

**ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE CAFEZEIROS IRRIGADOS PELO MÉTODO ZONA AGROECOLÓGICA ESPECTRAL**Thomé Simpliciano Almeida<sup>1</sup>, Gilberto Chohaku Sedyama<sup>2</sup> & Leônidas Pena de Alencar<sup>3</sup><sup>1</sup> Físico, Prof. Doutor do IFSULDEMINAS/Passos-MG, [thome.almeida@ifsuldeminas.edu.br](mailto:thome.almeida@ifsuldeminas.edu.br)<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, Prof. Doutor UFV/Viçosa-MG, [g.sedyama@ufv.br](mailto:g.sedyama@ufv.br)<sup>3</sup> Engenheiro Agrícola, Prof. Doutor UFGD/Dourados-MS, [lpaufv@hotmail.com](mailto:lpaufv@hotmail.com)**Palavras-chave:**balanço hídrico  
modelo agrometeorológico  
sensoriamento remoto**RESUMO**

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 para políticas de planejamento e comercialização agrícola. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo realizar a estimativa da produtividade de uma fazenda cafeeira na região Noroeste do Estado de Minas Gerais a partir de modelagem agrometeorológica e dados espectrais do sensor MODIS. O modelo utilizado tem como base a penalização da produtividade potencial da cultura em função do déficit hídrico (ET/ETc) e da produtividade do ano anterior (Yaa/Yp), ajustados por diferentes coeficientes de sensibilidade da cultura (ky), em diferentes estádios fenológicos. Com a parametrização do modelo, obteve-se um valor de  $r^2$  variando entre 0,79 a 0,95, e um índice de concordância “d” de Willmott de 0,93 a 0,95, entre a produtividade real e a estimada. Os resultados satisfatórios comprovaram o potencial da aplicação do modelo agrometeorológico-espectral para obtenção da estimativa da produtividade a nível de fazendas.

**Keywords:**water balance  
agrometeorological model  
remote sensing**YIELD ESTIMATE OF IRRIGATED COFFEE BY SPECTRAL AGROECOLOGICAL ZONE METHOD****ABSTRACT**

The notorious role of coffee in the Brazilian economy justifies and motivates the performance of scientific researches for the improvement of crop monitoring and production estimation, which can offer support for political and commercialization planning. In this context, the present paper aimed to forecast coffee crops, located in the northwest of Minas Gerais, by means of an agrometeorological model and spectral data from MODIS sensor. The agrometeorological model is based on the penalization of crop potential productivity due to water deficit (ET/ETc) and low yield (Yaa/Yp) during the previous year. These variables were adjusted by different crop sensibility coefficients (ky) for different phenological stages. After parameterization of the model, a value of  $r^2$  was obtained between 0,79 and 0,95 and also a Willmott's agreement index (d) from 0,93 to 0,95 between actual and estimated productivity. The satisfactory results confirm the potential of the agrometeorological-spectral model application for productivity estimation at farm level.

## INTRODUÇÃO

Dada a sua relevância na economia brasileira, o monitoramento da cultura cafeeira se faz importante. Estimativas confiáveis sobre a safra de café são essenciais tanto para o planejamento dos produtores quanto para ações governamentais de financiamento.

Quando se trata de cafeeiros irrigados, diversos autores indicam o aumento da produtividade e a rentabilidade econômica do manejo de irrigação para a cafeicultura (MARTINS *et al.*, 2007, SILVA *et al.*, 2008 e SERRA *et al.*, 2013). Nesse ponto, a estimativa da produtividade de áreas irrigadas possui papel fundamental na determinação da eficiência do uso da água, relacionando a produção de biomassa seca ou a produção comercial com a quantidade de água aplicada ou evapotranspirada pela cultura (SOUZA *et al.*, 2011).

A produtividade cafeeira relaciona-se a fatores climáticos, fisiológicos e também de manejos da cultura. O clima, de forma primordial, 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, enquanto temperaturas muito baixas acarretam em danos e morte do tecido foliar (DAMATTA *et al.*, 2007). A disponibilidade hídrica, por sua vez, destaca-se ante os fatores climatológicos, ao passo que sua escassez pode limitar a produtividade do cafeeiro (SILVA *et al.*, 2008). Dentre os fatores fisiológicos, considera-se a bienalidade, dois anos para completar o ciclo fenológico, a influência nas altas e baixas produtividades cafeeiras, ocasionando a superprodução e um esgotamento das reservas da planta, causando uma queda brusca na produtividade do ano seguinte (PEREIRA *et al.*, 2011), podendo a colheita causar a intensificação da bienalidade devido à desfolha da planta (SILVA *et al.*, 2010).

A estimativa da safra pode ser realizada através de modelos agrometeorológicos. Esses modelos utilizam dados climáticos e são desenvolvidos com base em penalizações hídricas durante o ciclo da cultura, repercutindo na quebra da produtividade potencial. Vários modelos agrometeorológicos foram validados e são usados para a predição da produtividade agrícola em muitos países como Estados Unidos, Índia, China e Coréia (DEHGHANISANIJ *et al.*, 2009 e KABOOSI e KAVEH 2012).

Modelos agrometeorológicos voltados à produtividade cafeeira têm sido desenvolvidos e testados com sucesso 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.

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. O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra e Aqua, tem sido uma ênfase para estudos e monitoramento da vegetação, caracterizando a fenologia de diversos biomas (GANGULY *et al.*, 2010) e aplicado ao estudo da fenologia de culturas agrícolas (LUNETTA *et al.*, 2010). No trabalho desenvolvido por Volpato *et al.* (2013) o produto NDVI do sensor MODIS mostrou-se com grande potencial para monitoramento agrometeorológico de cafeeiros e apresentou correlação com o déficit hídrico.

Diante do exposto, com a possibilidade das análises espectrais obtidas através das imagens MODIS, dados meteorológicos e de solo adquiridos em campo aliados à modelagem agrometeorológica, o objetivo deste trabalho foi realizar a estimativa da produtividade cafeeira em nível de propriedade rural para cafeeiros irrigados no noroeste de Minas Gerais, analisando o comportamento dos NDVI com os estágios fenológicos da cultura, clima e práticas de manejo.

## MATERIAL E MÉTODOS

A aplicação do modelo agrometeorológico-espectral foi realizado, no presente trabalho, na região Noroeste de Minas Gerais, na fazenda Canduá (15°49'58"S 46°30'59"W) na cidade de Buritis-MG, para o período de 2005 a 2011.

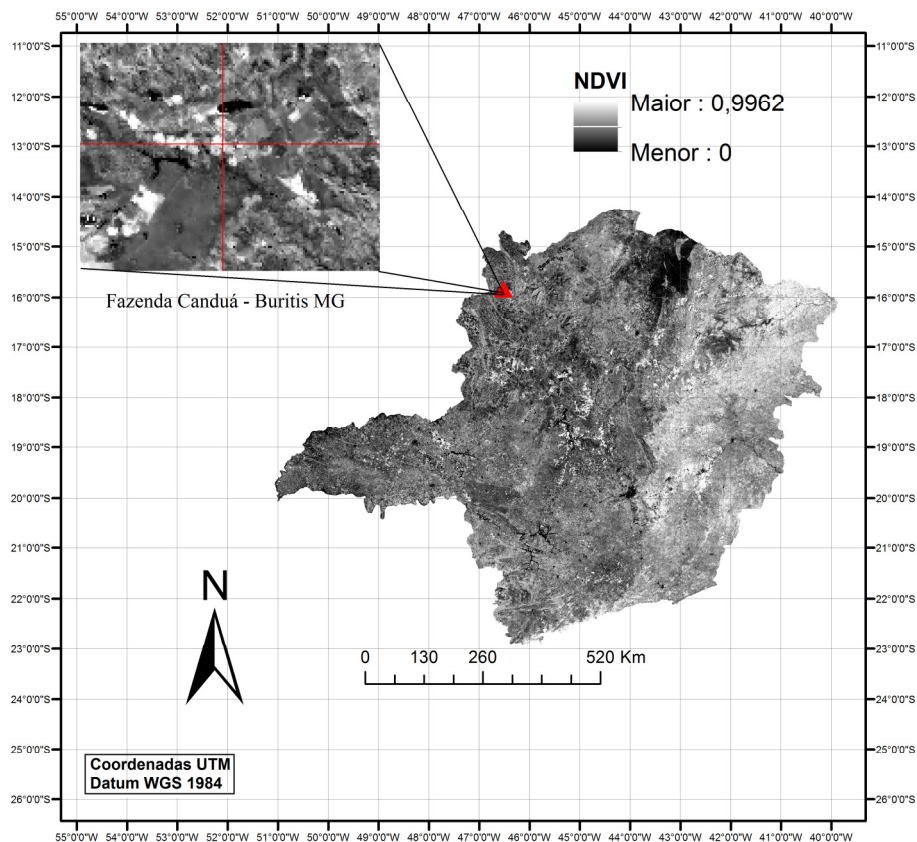
Na fazenda Canduá estão instalados 14 pivôs, todos os cafeeiros são irrigados por pivô central com aplicação localizada - LEPA (Low Energy Precision Application), onde a irrigação teve início em Maio de 2006. Para esse estudo foram utilizados os três maiores pivôs (P3, P4 e P5), com 132 ha cada um. A escolha dos maiores pivôs se deve à resolução espacial do sensor MODIS, onde os menores pivôs teriam mais pixels misturados com outros alvos (solo exposto, outra cobertura vegetal, água, etc.) ao seu redor. Os cafeeiros são da espécie *Coffea*

*arabica L.* (cultivar Catuaí), plantados em um espaçamento de 0,6 por 3,65 m. A data de plantio do pivô P3 foi 15/12/2001, enquanto a dos pivôs P4 e P5 foi 15/12/2002.

Nesse estudo, foram utilizados os produtos índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), identificado por MOD13Q1 e cedidos gratuitamente pela Earth Observing System (EOS/NASA) pelo 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 da fazenda (Figura 1) foi o

H13V10, sendo utilizado um total de 135 imagens, cobrindo o período de setembro de 2005 a junho de 2011. Os dados são fornecidos em formato HDF (Hierarchical Data Format) e foram extraídos via programação NCL (NCAR Command Language).

Na Tabela 1 são apresentados os dados meteorológicos utilizados para a determinação da evapotranspiração de referência e da cultura, assim como para fazer o balanço de água no solo. Os dados foram coletados na fazenda por estações meteorológicas, que são as mesmas para os três pivôs, exceto os dados de precipitação e irrigação.



**Figura 1.** Mapa de NDVI e localização da fazenda Canduá, Buritis-MG.

**Tabela 1.** Dados de entrada do modelo

Dados	Fonte
Temperatura máxima e mínima (°C)	Irriger®
Radiação (MJ.m <sup>-2</sup> )	Irriger®
Precipitação (mm)	Irriger®
Irrigação (mm)	Irriger®
Umidade Relativa (%)	Irriger®
Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )	Irriger®

**Tabela 2.** Características do solo e propriedades da cultura

Solo		
Capacidade de Campo	Ponto de Murcha	
%	%	
21	13	
21	13	
Cultura		
Fase	Kc	Área sombreada
		%
Adulta	1,05	60

A fazenda Canduá possui um solo caracterizado como Latossolo vermelho distrófico e as características de armazenamento do solo e as propriedades utilizadas para a cultura no balanço hídrico estão apresentadas na Tabela 2.

O modelo utilizado para a estimativa e monitoramento da produtividade na fazenda foi o proposto por Doorembos e Kassam (1979), com a adição da penalização da produtividade pela produtividade do ano anterior devido a bienalidade da cultura cafeeira, proposta por Santos e Camargo (2006) (Equação 1).

$$Y_e = \sum_{i=1}^{353} \left[ Y_{p_i} \times \left( 1 - \left[ 1 - k_{y0} \left( \frac{Y_{aa}}{Y_{p_i}} \right) \right] \times \left[ 1 - k_{y_i} \left( 1 - \frac{ET}{ETc} \right)_i \right] \right) \right] \quad (1)$$

em que,

$Y_e$  = produtividade final estimada, kg.ha<sup>-1</sup>;

$Y_{p_i}$  = produtividade potencial parcial da cultura, kg.ha<sup>-1</sup>;

$k_{y_i}$  = coeficiente de penalização hídrica para cada período fenológico, adimensional;

$ET$  = evapotranspiração da cultura, mm.dia<sup>-1</sup>;

$ETc$  = evapotranspiração potencial da cultura, mm.dia<sup>-1</sup>;

$Y_{aa}$  = produtividade do ano anterior, kg.ha<sup>-1</sup>;

$k_{y0}$  = coeficiente de penalização devido à produtividade do ano anterior, adimensional; e

$i$  = são os dias das imagens MODIS  $i = 1, 17, 33, 49, \dots, 353$ .

O coeficiente de penalização hídrica ( $k_y$ ) refere-se à redução da produtividade, devido a evapotranspiração da cultura atingir a potencial da

cultura quando essa está sobre um déficit hídrico. Os valores de  $k_y$  utilizados nesse estudo para as áreas cafeeiras da fazenda foram os mesmos determinados por Santos e Camargo (2006) em nível de propriedade rural. Para cada fase fenológica do cafeeiro foi atribuído um valor de  $k_y$ , pois está relacionado com a demanda hídrica da cultura em cada fase. Os períodos das imagens MODIS foram atribuídas a cada fase fenológica dos cafeeiros de acordo com Camargo e Camargo (2001).

O valores de  $k_{y0}$  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.

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), visto na Equação 2, desenvolvido por Kassam (DOORENBOS e KASSAM, 1979), sendo uma metodologia precisa para a estimativa da produtividade potencial das culturas em função de dados climáticos (TUBIELLO *et al.*, 2007).

$$Y_p = cL.cN.cH.G.Y_0 \quad (2)$$

em que,

$Y_p$  = produtividade potencial, kg.dia.ha<sup>-1</sup>;

$cL$  = fator de compensação de crescimento e área foliar, adimensional;

$cN$  = fator de produção líquida de matéria seca, adimensional;

$cH$  = fator de colheita, adimensional;

$G$  = número de dias acumulados; e

$Y_0$  = produção de matéria seca bruta, kg.dia.ha<sup>-1</sup>.

A Produção de matéria seca bruta 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 para dias nublados e para dias claros. Essa relação depende da cultura e da temperatura, onde a taxa de produção pode ser maior ou menor que 20 kg.hora.ha<sup>-1</sup>, que é a suposta para a cultura padrão. A fração do dia com nebulosidade ( $F$ ) foi calculada durante todo o ciclo da cultura pela Equação 3.

$$F = \frac{Rse - 0.5Rs}{0.8Rse} \quad (3)$$

em que,

$Rse$  = radiação ativa de ondas curtas nos dias claros, cal.dia.cm<sup>-2</sup>; e

$Rs$  = radiação de ondas curtas observada, cal.dia.cm<sup>-2</sup>.

O fator de produção líquida de matéria seca  $cN$  está relacionado com a necessidade de energia para os processos internos de desenvolvimento (respiração), estimado em cerca de 0,6 para condições frias, temperatura média < 20°C, e 0,5 para condições quentes, temperatura média maior que 20°C (ALLEN *et al.*, 1998).

O fator de colheita  $cH$  está relacionado com a parte colhida em relação à massa seca total dos cafeeiros e 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, sendo observado que a matéria seca produtiva é menor em anos de baixa produtividade.

O fator de compensação de crescimento e área foliar  $cL$  estão relacionados com a taxa máxima de crescimento e é representada pelo índice de área foliar da cultura. A determinação do IAF deu-se através de sensoriamento remoto pelo sensor MODIS.

Os pixels correspondentes aos pivôs nos anos de estudo da fazenda passaram por uma seleção de qualidade de pixel a partir das informações QA (Quality Assessment) contido em cada pixel dos produtos MODIS. Somente os pixels de melhor qualidade, sem presença de nuvens, com baixa

quantidade de aerossol e sem problemas com as correções de nuvens, aerossóis e correções geométricas, foram utilizadas no estudo.

Com os valores de NDVI foi calculada a fração de cobertura do solo, de acordo com Choudhury *et al.*, (1994):

$$F_{cor} = 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0,6} \quad (4)$$

em que,

$F_{cor}$  = fração do solo coberto pela cultura;  
 $NDVI_{max}$  = valor máximo de NDVI da imagem;  
 $NDVI_{min}$  = valor mínimo do NDVI da imagem; e  
 $NDVI$  = valor do NDVI de cada pixel referente à área do pivô.

Posteriormente, o IAF foi obtido através da seguinte relação de Norman *et al.*, 2003:

$$IAF = -2 \ln(1 - F_{cor}) \quad (5)$$

E, por fim, o cálculo do fator de compensação do crescimento  $cL$  com base nos dados de Doorenbos e Kassam (1979):

$$cL = 0,515 - e^{(-0,664 - (0,515 \times IAF))} \quad (6)$$

Para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) utilizou-se o método de Penman-Monteith padrão FAO 56 (Allen *et al.*, 1998). Por se tratar de um sistema de irrigação por pivô central com aplicação localizada, onde se aplica a água de forma pontual e não irrigando toda a área, tem-se uma redução da evapotranspiração devido à redução da área molhada e da área sombreada pela cultura. Dessa forma, para a determinação da evapotranspiração potencial da cultura utilizou-se um ajuste  $kl$  devido a porcentagem de área molhada, a relação utilizada pode ser vista na Equação 7.

$$ETc = ET_0.kc.kl \quad (7)$$

em que,

$ETc$  = evapotranspiração potencial da cultura, mm.dia<sup>-1</sup>;

$ET_0$  = evapotranspiração de referência, mm.dia<sup>-1</sup>;

$kc$  = coeficiente da cultura, adimensional; e

$kl$  = coeficiente de localização, em função da porcentagem de área molhada e sombreada.

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

$$kl = 0,1.P^{0,5} \quad (8)$$

em que,

$P$  - porcentagem de área sombreada ou molhada, utilizando-se o maior valor entre os dois (%).

A evapotranspiração potencial da cultura é calculada de forma que a planta esteja sob condições ideais de água no solo. Para a determinação da evapotranspiração da cultura, onde considera-se o déficit de água no solo, foi utilizada a Equação 9.

$$ET = k_s.ETc \quad (9)$$

em que,

$ET$  = evapotranspiração da cultura, mm.dia<sup>-1</sup>;  
 $ETc$  = evapotranspiração potencial da cultura, mm.dia<sup>-1</sup>; e  
 $k_s$  = coeficiente de estresse hídrico, adimensional obtido através do balanço de água no solo.

Para avaliação do modelo foram utilizados o índice “d” de concordância de Willmot (Equação 10), que indica o grau de exatidão entre os valores estimados e observados, e o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM), descrito na Equação 11.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Ye_i - Yo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Ye_i - \bar{Yo}| + |Yo_i - \bar{Yo}|)^2} \right] \quad (10)$$

$$EPAM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(Ye_i - Yo_i)}{Ye_i} \cdot 100 \right] \quad (11)$$

em que,

$d$  = índice de concordância;

$EPAM$  = medida do erro;

$Ye_i$  = i-ésimo valor previsto ou estimado;

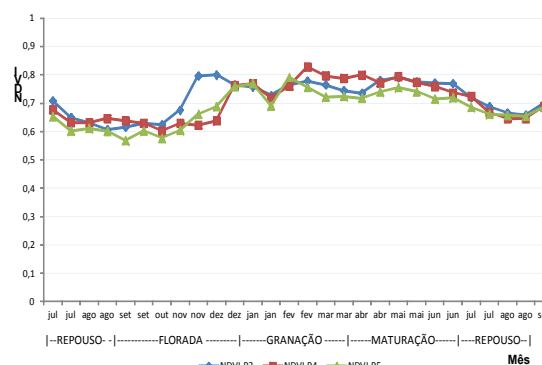
$Yo_i$  = i-ésimo valor observado; e

$\bar{Yo}$  = média dos valores observados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados na Figura 2 mostram que a variação temporal dos índices de vegetação NDVI tiveram comportamentos distintos para cada fase do ciclo fenológico dos cafeeiros para o ano de produção 2005/2006, comportamento similar foi apresentado em todo o período de estudo. Valores mais baixos dos índices ocorreram no período de agosto e setembro (repouso), esse decréscimo foi observado a partir do mês de julho até agosto, quando se deu início do período de colheita, devido à desfolhagem das plantas durante a colheita e consequente perda de biomassa.

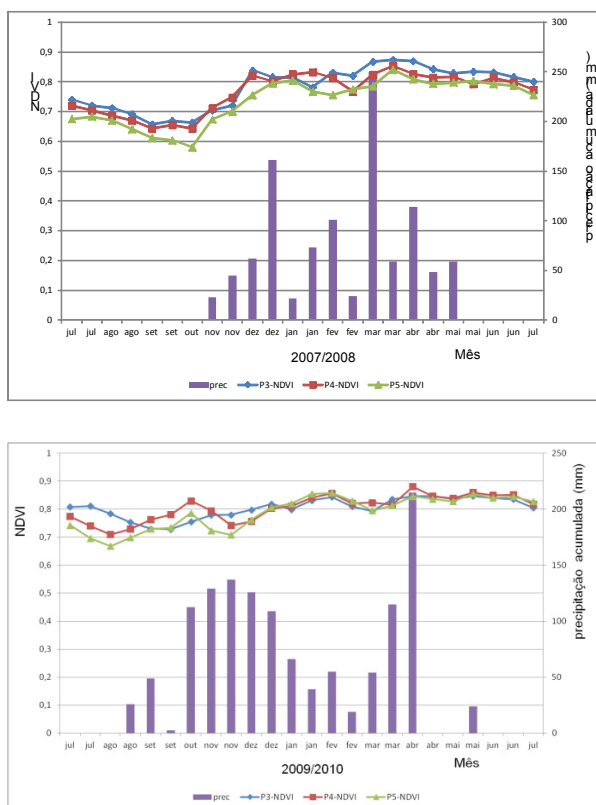
Com o início da florada seguida pela granação e maturação dos frutos, os cafeeiros apresentam um aumento de biomassa, refletindo no acréscimo do NDVI, indicando a sensibilidade dos índices a essa variação.



**Figura 2.** Índices de vegetação NDVI para os pivôs 3, 4 e 5 da fazenda Canduá durante o ano de produção 2005/2006.

A partir do início do período de chuvas, observa-se o acréscimo contínuo do NDVI, como mostrado na Figura 3, para os anos 2007/2008 e 2009/2010, relatando o início da florada. Santos e Camargo (2006) indicaram que a florada ocorre após uma chuva de no mínimo 5 mm, com um acúmulo prévio de 340 mm de evapotranspiração, somado a partir do início do primeiro decêndio de abril. Foi observado um aumento médio de 40% no valor do NDVI durante a transição entre as fases de repouso e florada. Todos os anos agrícolas mostraram comportamento semelhante

entre o NDVI e o regime de chuvas. 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, quando, possivelmente, não houve uma florada principal e a variação do NDVI não apresentou-se tão acentuada.

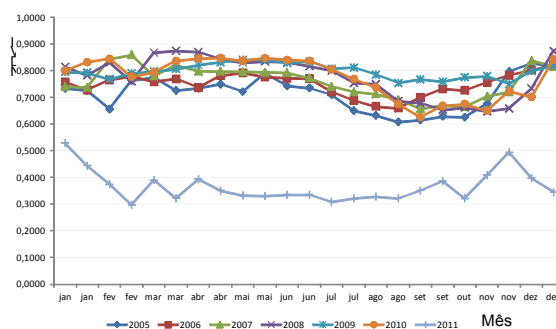


**Figura 3.** Relação entre o NDVI e o regime de chuvas durante os anos de produção 2007/2008 e 2009/2010.

O mesmo comportamento do NDVI, para áreas cafeeiras no Sul de Minas Gerais, foi relatado por Volpato *et al.* (2013), porém, com menores valores para o índice quando comparados com o do presente estudo. Por se tratar exclusivamente de áreas irrigadas, os maiores valores de NDVI encontrados podem estar relacionados com os maiores índices de área foliar, visto que o manejo de irrigação tende a proporcionar maior índice de área foliar para cafeeiros (REZENDE *et al.*, 2014).

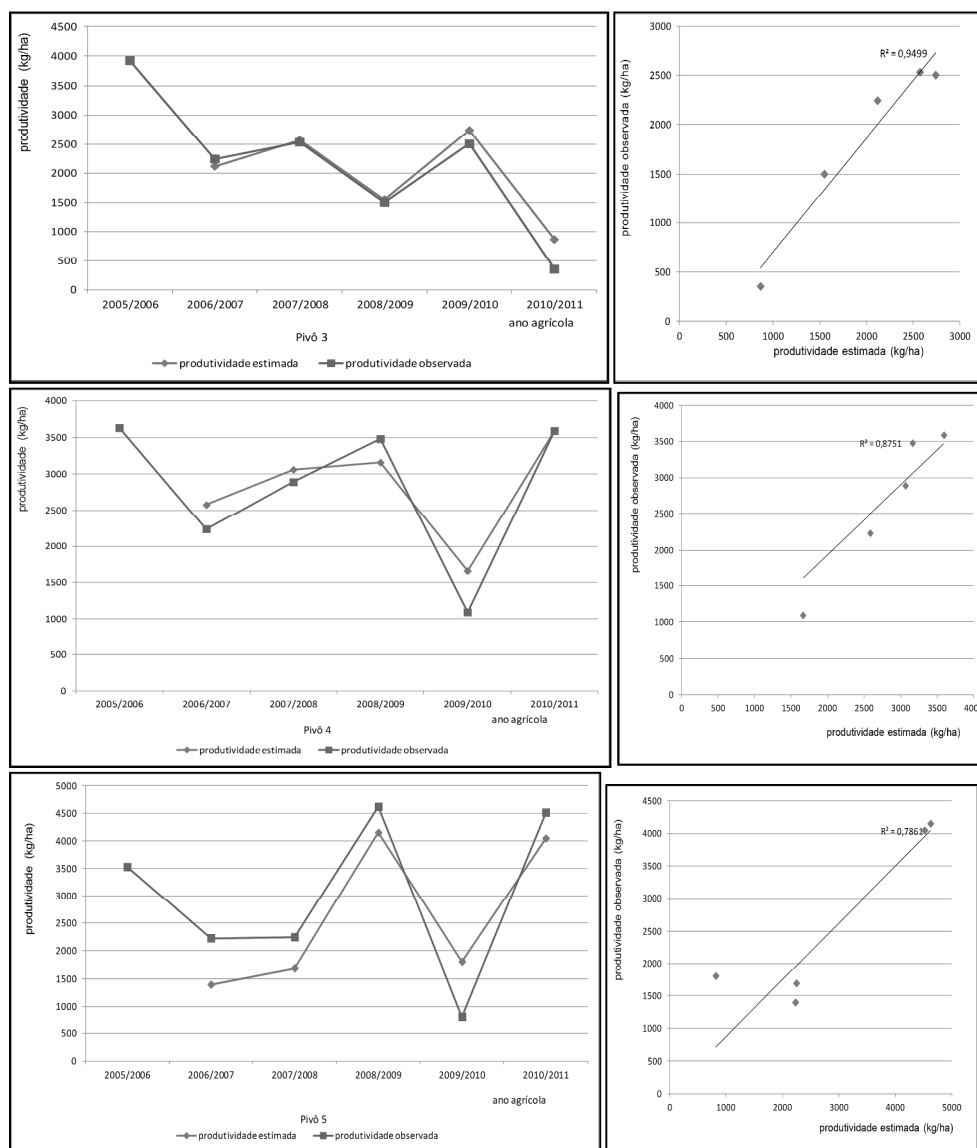
O índice de vegetação NDVI mostrou-se sensível também aos tratos culturais, como poda dos cafeeiros e perda de biomassa durante a

colheita (Figura 4). Observando o comportamento do NDVI para o pivô 3, temos os menores valores do índice registrados para o ano de 2011, tendo a poda dos cafeeiros do pivô sido iniciada 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. A menor safra colhida entre os anos de 2006 a 2010 foi referente ao ano produtivo de 2008/2009 para o pivô 3. Com essa baixa produtividade, a prática da colheita danificou menos os cafeeiros do pivô, com uma menor desfolhagem 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).



**Figura 4.** Comportamento do NDVI para os anos de 2005 a 2011 do pivô 3 da fazenda Canduá.

As estimativas das produtividades realizada pelo modelo calibrado, comparadas com as produtividades colhidas na Fazenda Canduá, estão apresentadas na Figura 5. As produtividades estimadas e observadas ficaram próximas e seguiram a bienalidade da cultura do café, incluindo a baixa produtividade da safra 2010/2011 do pivô três, onde houve a poda do cafeeiro, em que o fator espectral adicionado à modelagem foi de extrema importância, pois influenciou na estimativa de valores mais baixos da produtividade potencial. De acordo com as análises de regressão, os valores de  $r^2$  apresentaram valores entre 0,78 a 0,94, indicando um bom ajuste dos valores estimados pelo modelo, comparados com os dados de produtividade real dos pivôs.



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

A Tabela 3 informa os valores dos parâmetros para a melhor calibração do modelo, segundo a análise estatística do índice “d” de concordância de Willmot, o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) e o coeficiente de regressão  $r^2$ , para os pivôs. 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, que chegou a um erro percentual de 32,65 na estimativa da produtividade.

Dos valores calibrados, observou-se que o índice de colheita variou entre 0,23 para anos

de alta produtividade a 0,10 para anos de baixa produtividade, indicando que 23% da produção de matéria seca dos cafeeiros foi destinada para a produção de seus grãos para anos de alta produtividade e 10% para anos de baixa produtividade.

Os valores de  $k_{yo}$  ficaram entre 0,10 e 0,50, indicando baixa penalização pela produtividade do ano anterior em comparação com os valores encontrados em outros modelos, como o de Santos e Camargo (2006), em que os valores do coeficiente chegaram a 0,63 para o estado de São Paulo, e o de Victorino *et al.* (2016), que obteve valores entre 0,46 e 0,76 para localidades no Sul de Minas Gerais.



**Tabela 3.** Resumo dos valores de coeficiente de penalização pela produtividade do ano anterior kyo, fator de colheita *cH* e a análise estatística para cada pivô.

Fazenda Canduá						
Pivô	kyo	cH		d	EPAM	r <sup>2</sup>
		Alta produtividade	Baixa produtividade			
3	0,1	0,16	0,10	0,94	18,1	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

## CONCLUSÃO

- O comportamento do índice de vegetação NDVI obtido a partir do produto MOD13Q1 do sensor MODIS mostrou-se de acordo com as fases fenológicas da cultura do café foi sensível às condições de manejo da cultura, como poda dos cafeeiros e irrigação, e seguiu o regime de chuvas da região indicando possíveis épocas de florada do cafeeiros.
- A inclusão do fator espectral no modelo agrometeorológico foi de grande importância e teve ênfase em períodos em que o índice de área foliar 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 um coeficiente de regressão  $r^2$  que varia entre 0,79 e 0,95, representando bem a bienalidade da produtividade cafeeira nas fazendas.

## AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo apoio e financiamento do projeto de pesquisa 50139259707 da Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Meteorologia Aplicada. À empresa Irriger<sup>®</sup> por ter cedido apoio técnico e dados para realização desse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines**

**for computing crop water requirements.** Rome: FAO, Roma, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <<https://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2016.

CAMARGO, A.P., CAMARGO, M.B.P. Definição das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. Campinas, SP. **Agrometeorologia**, v.60, n.1, p.65-68, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v60n1/a08v60n1.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2017.

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.

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.

DEHGHANISANIJ, H.; NAKHJAVANI, M.M.; TAHIRI, A.Z.; ANYOJI, H. Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions. **Irrigation Drainage**, v.58, p.105–115, 2009.

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

- GANGULY, S.; FRIEDL, M.A.; TAN, B.; ZHANG, X.; VERMA, M. Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sensing of Environment*, v.114, n.8, p.1805-1816, 2010.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990, 649p.
- KABOOSI, K.; KAVEH, F. Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function. *Irrigation Science*, v.30, p.89-100, 2012.
- LUNETTA, R.S.; SHAO, Y.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J.G. Monitoring agricultural cropping patterns across the Laurentian Great Lakes Basin using MODIS-NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.12, n.2, p.81-88, 2010.
- MARTINS, C.C. et al. Manejo da irrigação por gotejamento no café (Coffea arabica L.). *Bioscience Journal*, v.23, n.2, p.61-69, 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 Geoscience & Remote Sensing Symposium, 7., 2003, Toulouse. **Proceedings**. Toulouse: IGARSS, 2003.
- PEREIRA, S.P.; BARTHOLO, G.F.; BALIZ, D.P.; SOBREIRA, F.M.; GUIMARÃES, R.J. Crescimento, produtividade e bialidade do café em função do espaçamento de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, n.2, p.152-160, 2011.
- 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 café. *Bragantia*, v.58, n.1, p.157-170, 1999.
- REZENDE, F.C.; CALDAS A.L.D.; SCALDO, M.S.; FARIA, M.A. de. Índice de área foliar, densidade de plantio e manejo de irrigação do café. *Coffee Science*, v.9, n.3, p.374-384, 2014.
- SANTOS, M.A.; CAMARGO, M.B.P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do café nas condições do estado de São Paulo. *Bragantia*, 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: VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 6., 2009, Belo Horizonte. **Anais**. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/29145/1/Variacao-temporal.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2017.
- SILVA, C.A.; TEODORO, R.E.F.; MELO, B. Produtividade e Rendimento do Café Submetido a Lâmina de Irrigação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.3, p.387-394, 2008.
- SILVA, F.M.; ALVES, M.C.; SOUZA, J.C.S.; OLIVEIRA, M.S. Efeitos da colheita manual na bialidade do café em Ijaci, Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.34, n.3, p.625-632, 2010.
- SILVA, C.A.; TEODORO, R.E.F.; MELO, B. Produtividade e rendimento do café submetido a lâminas de irrigação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.3, p.387-394, 2008.
- SERRA, E.L.; SCALCO, M.S.; GUIMARÃES R.J.; COLOMBO, A.; MORAIS, A.R.; CARVALHO, C.H.M. Funções de produção do café irrigado em diferentes densidades de plantio. *Coffee Science*, v.8, n.2, p.157-165, 2013.
- SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; SEDIYAMA, G.C.; SILVA, T.G.F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. *Bragantia*, v.70, n.3, p.715-721, 2011.
- 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.

VICTORINO, E.C.; CARVALHO L.G.; FERREIRA D.F. Modelagem agrometeorológica para previsão de produtividade de cafeeiros na região sul do estado de Minas Gerais. **Coffee Science**, v.11, n.2, p.211-220, 2016.

VOLPATO, M.M.L.; VIEIRA, T.G.C.; ALVES, H.M.R.; SANTOS W.J.R. Modis images for agrometeorological monitoring of coffee areas. **Coffee Science**, v.8, n.2, p.168-175, 2013.

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.