

## **Estimativa de Produtividade de Cana-de-açúcar utilizando os produtos DMP e EVI, para os municípios de Barretos-SP, Frutal-MG e Uberaba-MG**

Diego Raoni da Silva Rocha<sup>1</sup>  
André Luiz Farias de Souza<sup>2</sup>  
Thais Carraro Di Gregorio<sup>1</sup>  
Gisele Martins Amaral<sup>2</sup>  
Társis Rodrigo de Oliveira Piffer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/FEAGRI  
Av. Candido Rondon, 501 - Barão Geraldo - 13083-875 - Campinas -SP, Brasil  
{diego.rocha, thais.gregorio}@feagri.unicamp.br

<sup>2</sup> Companhia Nacional de Abastecimento - Conab/GEOTE  
Caixa Postal 08582 – 70390010 – Brasília – DF, Brasil  
{giseledifferent, andrelfsouza}@gmail.com  
tarsis.piffer@conab.gov.br

### **Abstract**

The following study aimed to develop methodologies for estimating crop productivity of sugar cane, the main tool, the vegetation index EVI / MODIS (Enhanced Vegetation Index) and DMP / VEGETATION (Dry Matter Production), along with agronomic indexes relative to sugarcane productivity and official data of IBGE, for three cities, Barretos - SP, MG and Frutal-Uberaba-MG, using two agrometeorological spectral models. For all the cities best behavior occurred through the agrometeorological model 2, to make estimates of crop productivity. Presenting to Barretos, the model (2) obtained results very close to the official data with values between 91 and 99% of total official disclosed. The model (1) estimated an average of 83.83% during the study period while the model (2) estimated 95.22% for the same period from 2000 to 2009. In Frutal, the model (1) underestimated on average 11% compared to the official figures, and model (2) was closer, overestimating by 4% on average for the years 2000 to 2009. And to Tuticorin, the model (2) was also the one closest to the official results, with an average difference of 5.5% less, even taking into account the results of 2000 underestimated that did not possess all the necessary data while the model (1) showed a mean difference of 11.7% lower over the same period, comprising 2000 to 2009.

**Palavras-chave:** crop productivity, vegetation index, agrometeorological spectral models, produtividade da cultura, índice de vegetação, modelos agrometeorológicos espectrais.

### **1. Introdução**

Segundo o Ministério da Agricultura a cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil no período colonial, e se transformou em uma das principais culturas da economia brasileira. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana, é também o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol e conquista, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética.

A produção brasileira de cana-de-açúcar atingiu 717.462.101 toneladas em 2010, um aumento de 3,7%. A área colhida cresceu 5,3%, alcançando 9.076.706 hectares. Contudo, o avanço dos canaviais tem sido bem inferior ao ocorrido no período de 2006 a 2008 (IBGE, 2010).

A maioria dos Modelos agrônômicos para estimativa de produtividade agrícola tenta representar de forma simplificada, os principais processos que atuam na produtividade, transformando-os em variáveis quantificáveis por meio de equações matemáticas. Para se executar os modelos de estimativa de produtividade de forma mais coerente, as informações

obtidas devem ser relacionadas aos aspectos fenológicos, climáticos e às características de manejo da cultura.

Com o aumento tecnológico nos cultivares de cana-de-açúcar, como melhoramento genético, melhorias nos insumos e ainda as questões econômicas, os modelos matemáticos acabam excluindo tais influências, que são difíceis de mensurar. Mesmo considerando as dificuldades naturais de um modelo agrônomico, é inegável que os dados meteorológicos e de sensoriamento remoto, são capazes de gerar resultados espacializados que podem ser relacionados com a variabilidade interanual e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar, conforme observado por Sugawara, 2010.

Com isso o presente estudo dispõe sobre a calibração de um modelo de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar, nas principais regiões produtoras do Centro-Sul do Brasil, através de rotinas de processamento de imagens, desenvolvido no âmbito do projeto GeoSafras na Gerência de Geotecnologias da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Foram analisadas duas séries históricas de produtos EVI (*Enhanced Vegetation Index*) do sensor MODIS (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*) e DMP (*Dry Production Matter*) do sensor Vegetation-2, para as áreas mapeadas de cultivo, juntamente com índices agrônomicos relativos à cultura da cana e dados oficiais de produtividade, obtidos no endereço eletrônico do IBGE por municípios. Foram realizadas simulações de estimativas de produtividade, com intuito de gerar um série temporal consistente para ser calibrada utilizando dados oficiais do IBGE.

## 2. Metodologia de Trabalho

O município de Barretos foi escolhido por estar centrado dentro da região da “mancha de cana”, sendo uma das áreas com as maiores produtividades do Estado de São Paulo, e aliado ao seu longo histórico de cultivo de cana de açúcar com aproximadamente 20 anos registrados pelo IBGE, fornecem menor margem para ocorrência de contaminação dos dados espectrais, devidos à mistura com outras culturas, com isso, os dados são os mais puros possíveis. O mesmo cuidado foi tomado para a escolha das outras regiões produtoras de cana em Minas Gerais em que o município de Frutal faz fronteira com Barretos, já Uberaba está distante aproximadamente 120 quilômetros de Barretos.

O clima na região é predominantemente quente e seco. No verão são registradas temperaturas médias que variam dos 30°C aos 34°C. No inverno a variação média vai dos 13°C aos 20°C, a precipitação média anual é por volta de 1250 mm, com eventos máximos de 220 mm, e mínimos de 15 mm.

Todos os dados foram extraídos e processados com base na máscara de cana-de-açúcar, gerada pela Conab, com base em imagens LandSat e produtos MODIS.

Os municípios estão localizados na área central de lavouras de cana de açúcar da região centro-sul, sendo possível observar um histórico aproximado de 20 anos nessas áreas segundo dados oficiais do IBGE.

Inicialmente, foi obtida uma série temporal de produtos EVI do sensor MODIS para cada Estado, com resolução espacial de 250 metros e temporal de 16 dias, que abrange desde o fim de fevereiro de 2000 até junho de 2011, totalizando 522 imagens. Através de uma rotina de processamento de imagens elaborada no software ILWIS, os dados de EVI foram importados, processados, mascarados para as áreas de cultivo de cana de açúcar, e em seguida, recortados para cada município para, finalmente, serem extraídos os dados estatísticos de cada uma das imagens.

Os valores de médio e máximos EVI de cada cena, foram extraídos e organizados em sequência temporal a fim de visualizar o comportamento espectro-temporal das áreas de cana.

Com a análise da oscilação do EVI no perfil gerado de cada área, foi definido uma escala média de tempo de 1 ano para representar o período da safra.

Foi obtido também o produto DMP, gerado a partir do sensor Vegetation-2, a série temporal começa no início de 2000 até julho de 2011, com dados decendiais que totalizam, 415 imagens que cobrem todo o Brasil. Esses dados estão diretamente relacionados com o comportamento vegetativo e produção de matéria seca. Para esta estimativa, foram adaptados dois modelos agrometeorológicos para que seu uso possa seguir um padrão que seja facilmente utilizado em diferentes áreas e safras. Com isso, foram obtidos dois resultados para cada ano safra, e a sua estimativa é apresentada na comparação com dados gerados pelo IBGE.

### 2.1 Modelo Agrometeorológico Espectral (1)

Este primeiro modelo têm por base os dados de produtividade obtidos através da relação entre a área colhida e produção total, fornecidos pelo IBGE.

Os dados de produtividade calculados, são assumidos como a produtividade máxima, e a penalização do modelo é feita através da relação entre os valores máximos e mínimos de Produção de Matéria Seca, obtidos através dos produtos DMP SPOT, juntamente com o índice  $K_y$ , que foi estipulado em 0,3 para todo o ciclo.

O modelo de penalização adaptado é descrito pela seguinte equação:

$$P_{est} = PM_{IBGE} * (1 - K_y (1 - (DMP_{med} / DMP_{max}))) \quad (1)$$

Para este modelo, a penalização pela relação entre os valores de DMP médios e máximos foi o que melhor se adaptou, pois os dados do IBGE já são a referência na base de entrada do modelo, e o mesmo já foi ponderado pelas condições locais de cada município.

### 2.2 Modelo Agrometeorológico Espectral (2)

Este modelo tem por base a penalização da produtividade máxima estimada da cultura, através de índices espectrais que são sensíveis à mudanças nos padrões vegetativos que estão relacionados a fatores climáticos e fenológicos.

Em busca de um padrão simples e aplicável para diferentes áreas, algumas variáveis do modelo são determinadas como constantes e outras obtidas através de uma série de equações, que têm como entrada os dados de EVI MODIS.

As etapas para a concepção do modelo são descritas nos passos seguintes:

#### 2.2.1. Passo 1: Obtenção do Fator de Compensação do Crescimento

Os dados médios de EVI, devem compor a equação para estimativa da Fração de Cobertura Vegetal (FCV), proposta por Muñoz et al (2005), e adaptada para o modelo proposto, descrito como:

$$FCV = 0,9101 * EVI - 0,0857 \quad (2)$$

#### 2.2.2. Passo 2: Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF)

A partir da estimativa da FCV, estimou-se o IAF, através da equação proposta por Norman et al (2003), onde:

$$LAI = -2 \ln(1 - FCV) \quad (3)$$

### 2.2.3. Passo 3: Fator de Compensação do Crescimento (FCC)

Através da equação proposta por (Doorenbos and Kassam, 1979) e adaptada por Berka et al (2003), estimou-se o FCC, onde:

$$FCC = 0,515 - e(-0,667-(0,515*IAF)) \quad (4)$$

### 2.2.4. Passo 4: Estimativa da Produtividade Máxima Potencial

Nesse ponto já tem-se as variáveis necessárias para estimar a produtividade máxima potencial que é dada pela equação:

$$PM = (FCC*FR*480*FPA*10) \quad (5)$$

Onde : FR= Fator de Respiração da Planta

480= é o valor fixo definido, com base em Dorembos e Kassam (FAO#33), a média de produção de matéria seca de cana-de-açúcar é de 20kg/ha/h, como a produção de matéria seca máxima gerada em 1 dia, que deve ser multiplicada por 10 para ter um dado decenal.

FPA= Fator de Produção Agrícola, estimado em 2,9 por Rudorff (1985).

O Resultado é um dado decenal estimado para condições de máxima produtividade.

### 2.2.5. Passo 5: Produtividade Estimada com Penalização

Nessa etapa, os resultados serão reunidos com as variáveis que compõem o modelo de penalização para Produtividade Estimada (Pest). Onde:

$$Pest = PM * (1 - Ky * (1 - (EVI_{med} / EVI_{max}))) \quad (6)$$

Foi adotado um valor de  $Ky = 0,5$  para todo o ciclo, com intuito de padronizar o modelo.

No modelo proposto, também é considerado como fator de penalização a relação entre os valores médios e máximos de EVI, na mesma imagem recortada para a máscara da área de estudo, o que deverá normalizar as diferenças existentes em grandes áreas com uma alta a média homogeneidade.

O resultado referente ao ano safra, é dado a partir da soma de todas as produtividades parciais obtidas onde, também é somada a parcela média de água na planta, e a adição inicial em colmos de cana de açúcar na razão de ton/ha para o início do ciclo, onde o valor adotado foi de 15 ton/ha.

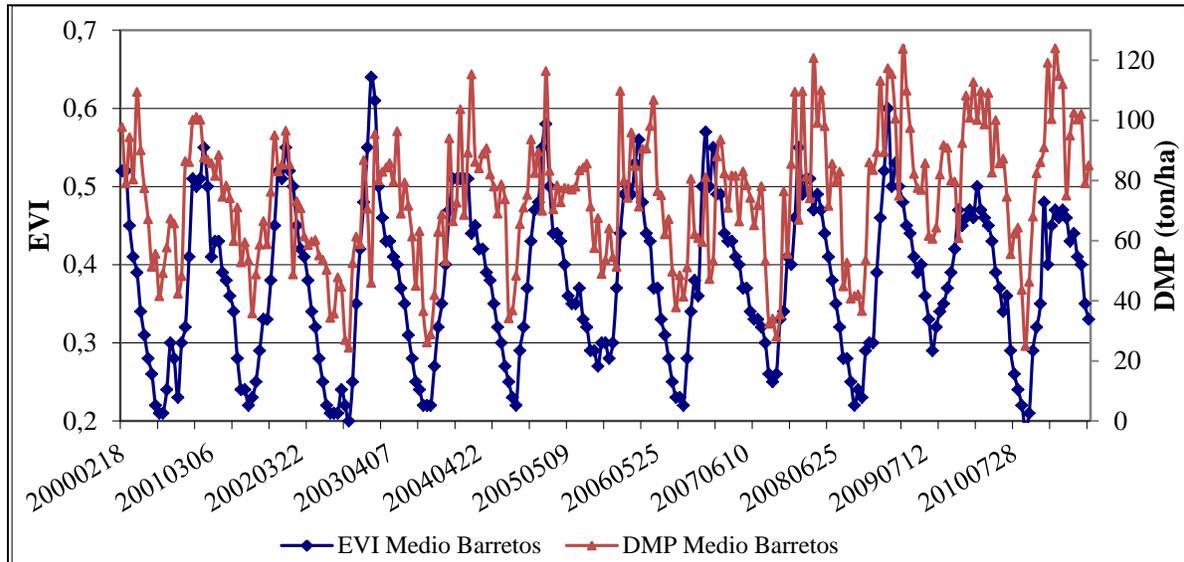
## 3. Resultados

### 3.1 Barretos

Cada período safra determinado é separado no gráfico por um pequeno intervalo para evidenciar as características nos padrões de EVI e DMP observadas.

É possível observar na figura 1, que o período selecionado para o ciclo anual de safra de 1 ano, conseguiu cobrir todas as variações fonológicas esperadas para a cana, com os picos máximos e mínimos em cada ano safra. Observa-se também a existência de uma relação direta no comportamento dos dois dados de satélites EVI MODIS e DMP SPOT que servem de base para os 2 modelos.

Com essas informações, obteve-se uma maior confiabilidade na coleta dos dados para o modelo.



**Figura 1:** Comportamento do EVI MODIS e DMP Spot ao longo dos onze anos e meio de análise.

Pôde-se observar na tabela 1, que os dados oficiais do IBGE seguem uma tendência de estabilidade ao longo de 10 anos. No ano 2000, para o Modelo (2) houve em todos os municípios uma pequena sub-estimativa, pois do conjunto de 23 imagens que compõem 1 ano de dados, neste existem apenas 20, em virtude da data de início da operação do sensor MODIS, que gera o produto EVI. No entanto, para os anos subsequentes, os valores estimados se aproximam muito dos dados oficiais do IBGE, que vão até 2009.

**Tabela 1:** Resultados absolutos e relativos dos modelos 1 e 2, para os anos estudados com referência aos dados oficiais do IBGE, no município de Barretos – SP.

Ano	Produtividade Oficial IBGE ton/ha	Produtividade Absoluta		Produtividade Relativa	
		Yest_IBGE_Ky 0,3 Modelo (1) ton/ha	Yest_Literatura_Ky 0,5 Modelo(2) ton/ha	Yest_IBGE_Ky 0,3 Modelo (1) ton/ha	Yest_Literatura_Ky 0,5 Modelo(2) ton/ha
2000	90,0	80,822	73,045	89,80%	81,16%
2001	90,0	74,308	87,569	82,56%	97,30%
2002	90,0	73,364	85,827	81,52%	95,36%
2003	90,0	74,184	88,250	82,43%	98,06%
2004	90,0	75,587	85,572	83,99%	95,08%
2005	92,0	76,973	86,141	83,66%	93,63%
2006	90,0	74,830	89,632	83,14%	99,59%
2007	90,0	75,979	84,169	84,42%	93,52%
2008	90,0	75,614	84,502	84,02%	93,89%
2009	90,0	77,393	88,005	85,99%	97,78%

Já observando os valores relativos da tabela 1, percebe-se que o modelo (2) obteve resultados muito próximos dos dados oficiais com valores entre 91 e 99% do total oficial divulgado. O

modelo (1) estimou em média 83,83% no período estudado enquanto que o modelo (2) estimou 95,22% para o mesmo período de 2000 a 2009.

### 3.2 Frutal

A análise dos produtos EVI MODIS e DMP SPOT ao longo de 11 anos mostrou na figura 2, boa correlação entre os dados, sendo que, as poucas diferenças apresentadas em relação a este comportamento devem-se aos períodos de maior contaminação dos dados por nuvens, o que atenua a intensidade do sinal no produto DMP. Observou-se também, que as áreas de cultivo de cana de açúcar, tem um longo histórico pelo perfil, o que aumenta a confiabilidade do uso das máscaras de cana, que apresentam os resultados espectrais esperados daquela área.

Em Frutal, a produtividade ao longo do tempo segundo os dados do IBGE, permaneceu estável em 80 Ton/ha, Figura 4. Os resultados obtidos com o modelo (1) subestimou em média 11% em relação aos dados oficiais, e o modelo (2) esteve mais próximo, superestimando em 4% na média dos anos de 2000 a 2009.

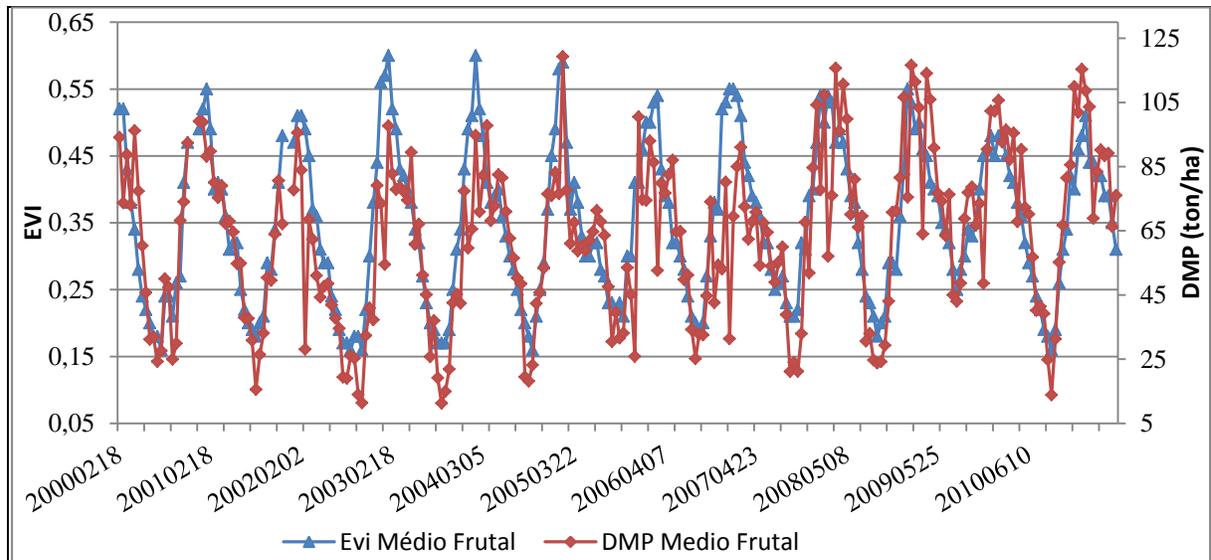


Figura 2: Comportamento do EVI MODIS e DMP Spot ao longo dos onze anos e meio de análise.

Tabela 2: Resultados absolutos e Relativos dos modelos 1 e 2, para os anos estudados com relação aos dados oficiais de referência (IBGE), no município de Frutal – MG.

Ano	Produtividade Oficial IBGE ton/ha	Produtividade Absoluta		Produtividade Relativa	
		Yest_IBGE Ky 0,3 Modelo (1) ton/ha	Yest_Literatura Ky 0,5 Modelo(2) ton/ha	Yest_IBGE Ky 0,3 Modelo (1) Percentual Estimado	Yest_Literatura Ky 0,5 Modelo(2) Percentual Estimado
2000	80	70,752	67,849	88,44%	84,81%
2001	80	67,266	83,827	84,08%	104,78%
2002	75	69,958	82,568	93,28%	110,09%
2003	80	70,980	86,310	88,72%	107,89%
2004	80	71,877	84,277	89,85%	105,35%
2005	80	71,877	84,277	89,85%	105,35%
2006	80	71,829	83,864	89,79%	104,83%
2007	80	71,368	81,335	89,79%	104,83%

2008	80	72,656	82,388	89,85%	105,59%
2009	80	73,749	85,769	89,21%	101,67%

### 3.3 Uberaba

Em Uberaba, outro importante município produtor de cana de açúcar, observamos na figura a boa relação entre o comportamento de diferentes dados no caso o EVI médio e o DMP médio ao longo de toda a série de dados utilizada no produto.

Na figura 3, notamos que ocorre o mesmo comportamento entre os resultados do modelo (1) e os dados oficiais, isso se deve às características do próprio modelo que utiliza dados do IBGE, e que nesse caso os fatores de penalização permitiram ele assumir o mesmo comportamento.

Os dados do modelo (2) demonstram um comportamento diferente na mesma figura, mas na tabela 3 em termos relativos podemos observar que em média foi o modelo (2) o que mais se aproximou dos resultados oficiais, com uma diferença média de 5,5% a menos, mesmo levando em consideração os resultados subestimados do ano 2000 que não possuiu todos os dados necessários, enquanto que o modelo (1) apresentou uma diferença média de 11,7% menor durante o mesmo período, que compreende 2000 a 2009.

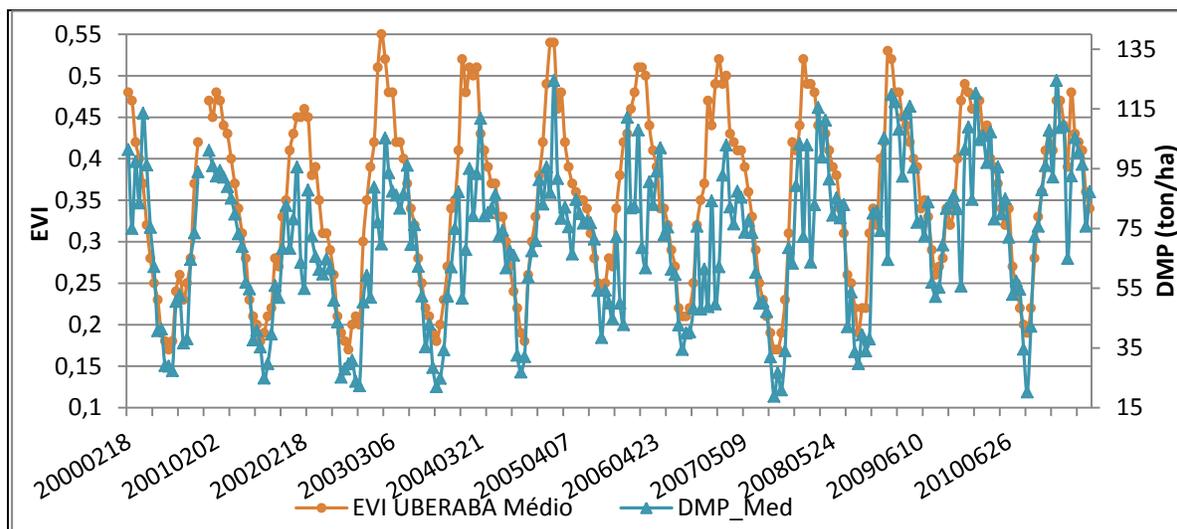


Figura 3: Comportamento do EVI MODIS e DMP Spot ao longo dos onze anos e meio de análise

Tabela 3: Resultados absolutos e relativos dos modelos 1 e 2 para os anos estudados com relação aos dados oficiais de referência (IBGE), no município de Uberaba – MG.

Ano	Produtividade Oficial IBGE ton/ha	Resultados Absolutos		Resultados Relativos	
		Yest_IBGE_Ky 0,3 Modelo (1) ton/ha	Yest_Literatura_Ky 0,5 Modelo(2) ton/ha	Yest_IBGE_Ky 0,3 Modelo (1) ton/ha	Yest_Literatura_Ky 0,5 Modelo(2) ton/ha
2000	100	87,988	69,482	87,99%	69,48%
2001	90	79,639	83,207	88,49%	92,45%
2002	90	78,432	83,319	87,15%	92,58%
2003	90	79,348	86,669	88,16%	96,30%
2004	95	85,258	86,569	89,75%	91,12%
2005	95	85,715	88,632	90,23%	93,30%
2006	90	75,622	89,161	88,97%	104,90%
2007	95	74,869	84,765	88,08%	99,72%

2008	95	79,270	87,164	88,08%	96,85%
2009	95	86,289	90,889	90,83%	95,67%

#### 4. Conclusão

Após a análise verificamos que o modelo (2), obteve melhores resultados que o modelo (1), na realização das estimativas de produtividade de safra. Utilizando os mesmos parâmetros nas três regiões obtivemos resultados satisfatórios.

#### 5. Agradecimentos

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a equipe da Gerência de Geotecnologia (GEOTE), e ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), por viabilizar o presente estudo.

#### 6. Referências Bibliográficas

Berka, L.M.S., Rudorff, B.F.T., Shimabukuro, Y.E. (2003): Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. *Scientia Agricola*, v.60, p.433-440.

Doorenbos, J., Kassam, A.H. Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, **FAO – Irrigation and Drainage Paper no. 33**, 193 p., 1979.

IBGE (Instituto de Geografia e Estatística). **Produção Agrícola Municipal** - Culturas Temporárias e Permanentes, ISSN 0101-3963. Rio de Janeiro, vol. 37, p.1-91, 2010.

Muñoz, J. C. J.; Sobrino, J.A. Guanter, L.; Moreno, J.; Plaza, A.; Matínez, P. (2005): **Fractional Vegetation Cover Estimation from Proba/CHRIS Data**: Methods, Analysis of Angular Effects and Application to the Land Surface Emissivity Retrieval. *Proc. 3rd ESA CHRIS/PROBA Workshop*, ESRIN, ESA SP-593, Frascati, Italy, June 2005.

Norman, J.M., Anderson, M.C., Kustas, W.P., French, A.N., Mecikalski, J., Torn, R., Diak, G.R., Achmugge, T.J. (2003): Remote Sensing of Evapotranspiration for Precision-Farming Applications. In: **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Toulouse. Proceedings IGARSS 2003 – Organizing Committee, 2003. p. 21-25.

Rudorff, B.F.T. (1985): Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**, São José dos Campos. 114 p.

SUGAWARA, L.M. **Varição Interanual da produtividade agrícola da cana de açúcar por meio de um modelo agrônomo**. Tese de Doutorado (Sensoriamento Remoto) orientada pelo Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 04 de novembro de 2010. Disponível no site: <http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.08.14.39/doc/publicacao.pdf> Acesso em 05 Nov 2011.