

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

v.4, n.3, p.329-337, jul.-set., 2009

Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br

Protocolo 517 - 02/03/2009 • Aprovado em 01/06/2009

Cristina R. Nascimento²Jurandir Zullo Júnior²Geber B. A. Moura³

Estimativa de produtividade da cana-de-açúcar utilizando séries temporais de imagens AVHRR/NOAA-17 e modelo fenológico-espectral¹

RESUMO

Apesar da evolução e importância econômica e social do agronegócio para o Brasil, existe, ainda, uma grande dificuldade em estimar com a precisão e a antecipação necessárias à safra das principais culturas agrícolas do país, o que justifica o estudo e a elaboração de metodologias empregando o sensoriamento remoto para essa finalidade. Assim, este trabalho tem o objetivo de avaliar uma metodologia baseada na utilização de um modelo fenológico-espectral proposto por Pellegrino (2001) e a série temporal dos valores de NDVI na estimativa da produtividade final da cultura. Os testes foram realizados em quatro safras (2003/2004, 2004/2005, 2005/2006 e 2006/2007) e seis municípios localizados no estado de São Paulo (Araraquara, Cravinhos, Jaboticabal, Pitangueiras, Ribeirão Preto e Sertãozinho). Os valores de Referência para a produtividade foram fornecidos pelo IBGE (Instituto Nacional de Geografia e Estatística). A metodologia utilizada indica ser útil para o apoio operacional e oficial dos sistemas de previsão/acompanhamento da cana-de-açúcar, fornecendo erros inferiores a 6% com antecipação de 81 a 142 dias antes da colheita.

Palavras-chave: NDVI, ano-safra, dias após o corte, massa seca dos colmos

Estimation of sugar cane productivity using time series of AVHRR/NOAA-17 images and a spectral-phenological model

ABSTRACT

Despite the progress and economic and social importance of agribusiness in Brazil, there is still a great difficulty in estimating the accuracy and anticipation necessary to harvest the main crop of the country, which justifies the study and development of methods employing the sensing remote for this purpose. This study aims to evaluate a methodology based on the use of a spectral-phenological model proposed by Pellegrino (2001) and time series of NDVI values of the final estimate of the productivity culture. The tests were performed in four seasons (2003/2004, 2004/2005, 2005/2006 and 2006/2007) and six municipalities located in the São Paulo state (Araraquara, Cravinhos, Jaboticabal, Pitangueiras, Ribeirão Preto and Sertãozinho). The reference values for the yield were provided by IBGE (National Institute of Geography and Statistics). The methodology is useful for indicating the operational support and official systems of forecasting/monitoring of sugar cane, providing errors less than 6% in advance from 81 to 142 days before harvest.

Key words: NDVI, crop seasons, days after harvest, dry weight of stalks

² Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Agrícola, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Distrito de Barão Geraldo. 13083-970. Campinas-SP. Fone/fax: (19) 3521-1127. E-mail: cristina@cpa.unicamp.br; jurandir@cpa.unicamp.br

³ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife-PE, 52171-900. Fone: (81) 3320-6246. Fax: (81) 3320-6244. E-mail: geber@depa.ufrpe.br

INTRODUÇÃO

Maior produtor nacional de cana-de-açúcar, o estado de São Paulo possui 4,45 milhões de hectares disponíveis para colheita, o que representa 66% de toda a área cultivada na região centro-sul do país (Inpe, 2009). Em relação à safra anterior (2007/2008), São Paulo registrou crescimento de 12,2% (483,3 mil hectares). Apesar da evolução e importância econômica e social dessa cadeia para agronegócio do Brasil, existe ainda uma grande dificuldade em estimar com a precisão, objetividade e antecipação necessárias à safra das suas principais culturas, o que justifica o estudo e a elaboração de metodologias empregando o sensoriamento remoto para essa finalidade.

Dentre os vários sistemas orbitais existentes atualmente, os satélites da série AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration*) têm grande potencial de aplicação em métodos operacionais e objetivos de previsão de safras, pois possibilitam a obtenção de coberturas globais diárias a partir de pelo menos dois satélites devidamente sincronizados e com resolução temporal de doze horas (Ippoliti-Ramilo et al., 1999). O Cepagri (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicada à Agricultura) opera um sistema de recepção destas imagens desde 1995, totalizando, aproximadamente, 40,000 imagens em janeiro de 2009. O tamanho desta série tem, sem dúvida, um valor inestimável para as pesquisas na agricultura, devido à diversidade de condições climáticas registradas desde abril de 1995 e à grande evolução da agricultura.

Outra característica de grande relevância está diretamente relacionada à utilização de um grande volume de dados, sendo usualmente útil para reduzir as limitações do AVHRR/NOAA quanto à sua resolução espacial (Jakubauskas et al., 2002). Novas técnicas de sensoriamento remoto aplicadas a sensores de moderada e baixa resolução espacial e alta frequência temporal é fundamental para a obtenção de informações atualizadas de regiões extensas, o que tem dado origem à procura de novas metodologias de processamento e análise para este tipo de informação (Pardi Lacruz, 2006). O presente trabalho teve dois objetivos principais, para a determinação da produtividade e estimativa de safras da cana-de-açúcar em seis municípios do estado de São Paulo, são eles: i) Avaliar e ajustar um modelo fenológico-espectral proposto por Pellegrino (2001) na determinação da produtividade da cultura por ano-safra analisado e ii) Avaliar o comportamento produtivo da cana-de-açúcar através da exploração de informações da série temporal de imagens AVHRR/NOAA-17, em função da resposta do índice de vegetação NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada), no modelo analisado.

MATERIAL E MÉTODOS

Na Figura 1 é apresentada a metodologia adotada para obtenção da produtividade da cana-de-açúcar por ano-safra, para os seis municípios analisados.

Área de estudo e seleção da série temporal de imagens AVHRR/NOAA-17

Foram utilizadas séries temporais de imagens do sensor AVHRR/NOAA, de quatro anos-safra (período que corresponde ao mês de abril de um ano a março do ano seguinte), para as safras 2003/2004, 2004/2005, 2005/2006 e 2006/2007 para seis municípios do estado de São Paulo, são eles: Araraquara, Cravinhos, Jaboticabal, Pitangueiras, Ribeirão Preto e Sertãozinho, situados na principal região produtora de cana-de-açúcar do Estado. As imagens foram obtidas diretamente do banco de imagens AVHRR/NOAA, disponíveis no Cepagri. Na Figura 2 é apresentada a localização espacial dos municípios selecionados para análise, em uma imagem NDVI (mês de abril de 2007).

Georreferenciamento e geração das imagens NDVI no programa NAVPro (*Navigation Products*)

Segundo Pergola & Tramutoli (2003) o georreferenciamento é um fator preponderante quando se pretende explorar a alta resolução temporal do sensor AVHRR/NOAA. Neste sentido Esquerdo et al., (2006), em parceria com a Universidade do Colorado (Colorado Center for Astrodynamics Research - CCAR), adaptou um sistema automático para o georreferenciamento preciso das imagens e posterior geração de produtos. O pacote é composto por uma série de programas executados via linha de comandos no IDL (*Interactive Data Language*), necessitando de um conjunto de imagens (série temporal) para geração dos produtos finais. O processamento no NAVPro inclui: Conversão das imagens do formato HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) "raw data" para o formato CCAR, bastante similar ao Level 1B; transformação dos níveis de cinza das imagens dos canais 1 e 2 para valores de refletância no topo da atmosfera; mascaramento de nuvens; geração de imagens NDVI e posterior geração das composições de máximo valor ou MVC (*Maximum Value Composition*) do índice de vegetação NDVI.

Geração das composições mensais (MVC) do índice de vegetação NDVI

Composições de máximo valor, ou MVC são largamente utilizadas, a fim de minimizar a influência de nuvens e os efeitos atmosféricos. Este método vem sendo largamente utilizado em dados de NDVI, onde o valor máximo de um dado pixel numa série temporal de imagens é utilizado para a construção de uma composição máxima de um dado período, registrando-se o mais alto valor (Moreira & Shimabukuro, 2004). Utilizou-se na pesquisa as composições de máximo valor no intervalo mensal, que foram geradas automaticamente por meio da rotina IDL acima descrita. O processamento exclui imagens com mais de 30% de cobertura de nuvens em razão do sombreamento dos pixels, que proporciona um "mascaramento" do valor do NDVI (Chen et al., 2003). Esse parâmetro tem sido utilizado com sucesso na estimativa da produtividade em diversas culturas. Foram descartadas, também, imagens com ruídos de aquisição e as obtidas em passagens com baixo grau de elevação (ângulo zenital solar maior que 70° e ângulos de varredura maiores que 42°, em relação à estação de recepção)

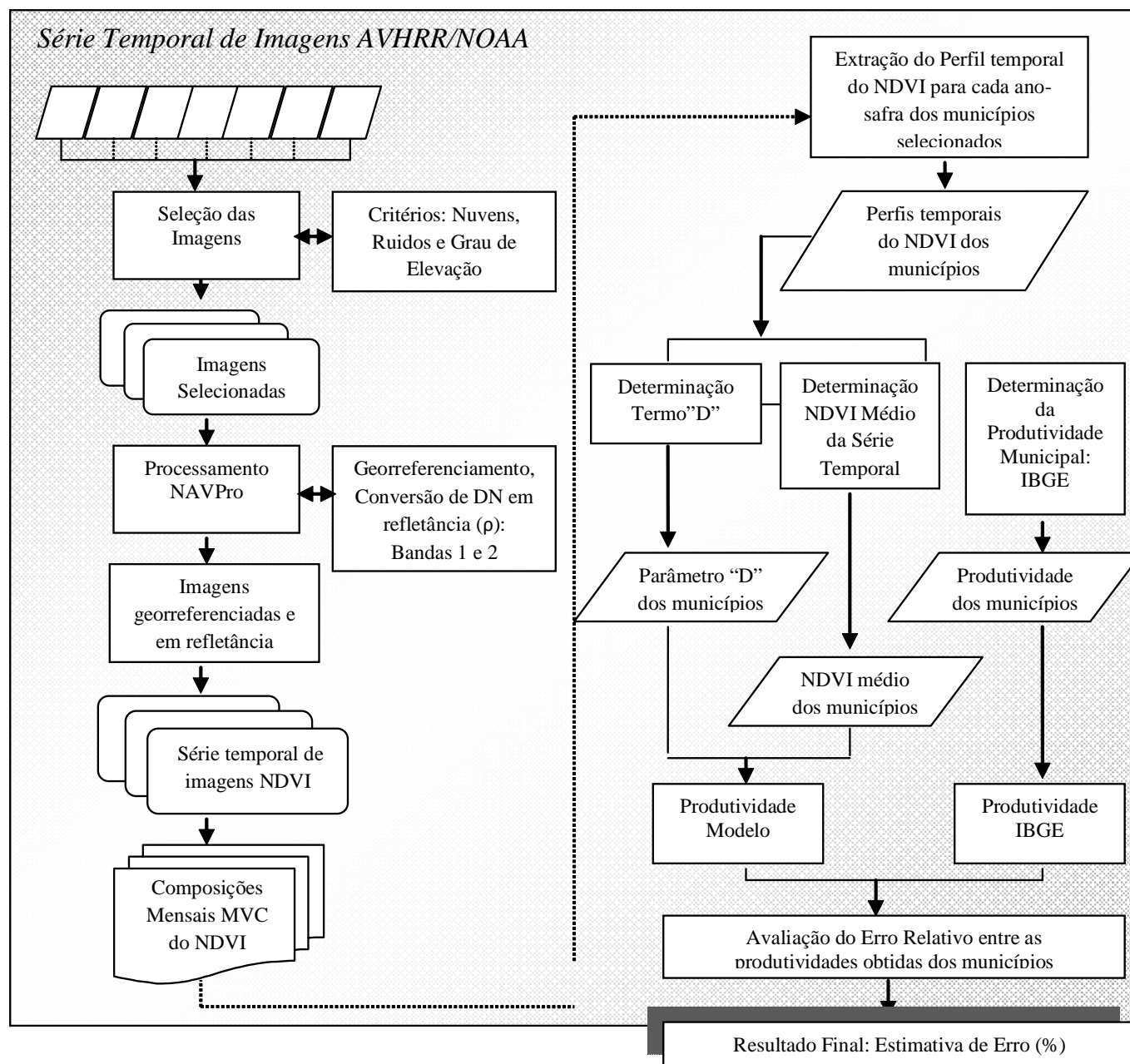


Figura 1. Metodologia adotada na obtenção da produtividade através do modelo espectral-fenológico e posterior comparação com estimativas oficiais – IBGE

Figure 1. Methodology in obtaining productivity through the spectral-phenological model, and later compared to official estimates – IBGE

do satélite devido à dificuldade na realização da correção geométrica.

A partir das composições de máximo valor do NDVI para cada mês da série de quatro anos-safra, foi criado um metarquivo, no ENVI 4.1 (*The Environment for Visualizing Image*) contendo as 48 imagens resultantes do processamento. Desta série temporal de imagens, foram extraídos os perfis médios do NDVI, representando o comportamento de todos os pixels, com cana-de-açúcar dentro de cada município. O item abaixo descreve a metodologia empregada na caracterização das áreas com cana-de-açúcar.

Identificação das áreas com cana-de-açúcar nas imagens do AVHRR/NOAA e geração automática dos perfis temporais do

índice de vegetação NDVI

Para geração do perfil temporal do NDVI dos municípios selecionados, foram considerados apenas os pixels com cana-de-açúcar. Assim, para evitar misturas entre duas ou mais coberturas vegetais, que são comuns nos pixels do AVHRR/NOAA, devido à resolução espacial de 1,1km, foram utilizados como referência terrestre na identificação das áreas com cana-de-açúcar, três mapeamentos. O primeiro corresponde à safra 2001/2002 realizado por Pontes (2003) e os dois restantes correspondem às safras 2005/2006 e 2006/2007, respectivamente, realizado pelo projeto Canasat/Inpe. Cada mapeamento foi desenvolvido utilizando-se imagens do satélite Landsat-7, sensor ETM+, para a cena 220/75, onde concentra-se a principal região produtora do estado. Na Figura 3 é

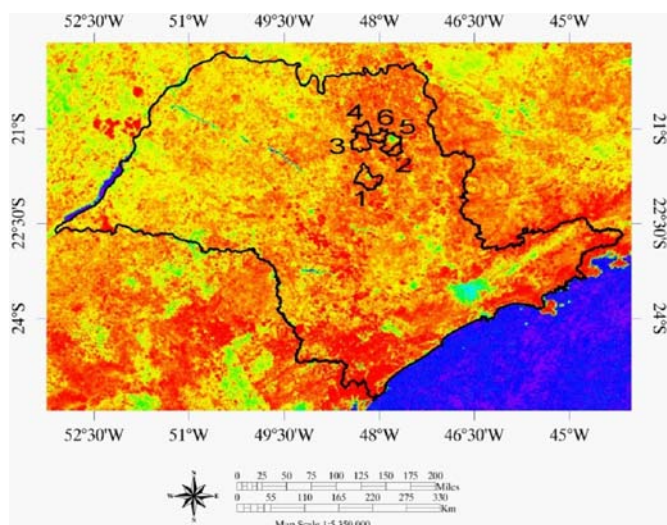


Figura 2. Localização espacial dos municípios utilizados na previsão de safras da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Em ordem numérica os municípios selecionados: Araraquara (1), Cravinhos (2), Jaboticabal (3), Pitangueiras (4), Ribeirão Preto (5) e Sertãozinho (6)

Figure 2. Spatial location of the municipalities used in the prediction of harvests sugar cane in São Paulo state. In numerical order the selected municipalities: Araraquara (1), Cravinhos (2), Jaboticabal (3), Pitangueiras (4), Ribeirão Preto (5) and Sertãozinho (6)

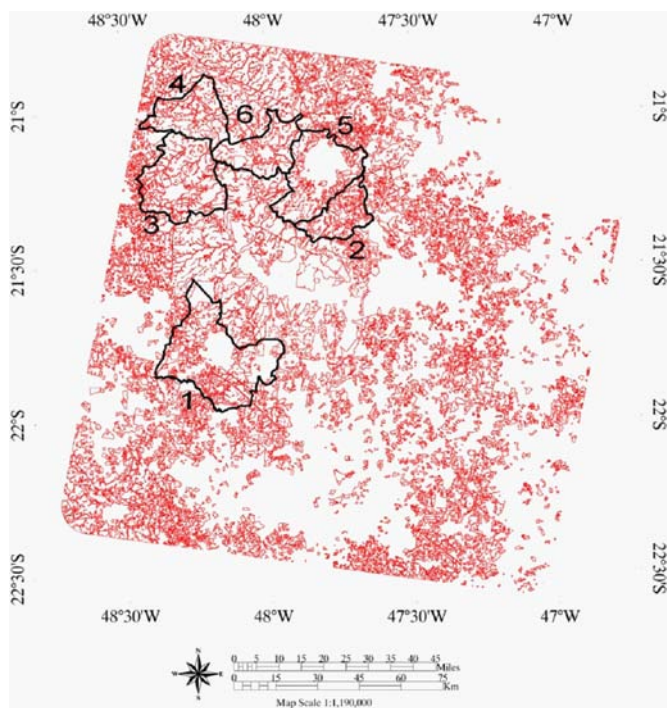


Figura 3. Mapeamento (vetor) das áreas de cana-de-açúcar safra 2005/2006, realizado tomando-se como base imagens LANDSAT-7/ETM+, órbita/ponto 220/75)

Figure 3. Mapping (vector) of the areas of sugar cane crop 2005/2006, carried out taking as a basis pictures of LANDSAT-7/ETM+, orbit / point 220/75.)

apresentado o vetor resultante, safra 2005/2006, destacando os municípios selecionados: Araraquara (1), Cravinhos (2),

Jaboticabal (3), Pitangueiras (4), Ribeirão Preto (5) e Sertãozinho (6).

Em seguida foi realizada uma máscara, a partir dos vetores com valores entre 0 e 1, onde 1 representa “pixels” com maior concentração de cana-de-açúcar e conseqüentemente uma menor mistura espectral (Antunes, 2005). Foram então extraídas as coordenadas dos pixels com valores (1/cana), correspondentes às áreas com a cultura, sendo estas coordenadas exportadas a um arquivo ASCII. O arquivo resultante faz parte do conjunto de dados, que juntos com os arquivos *shapfile* de contorno dos municípios irão delimitar a extensão de ocupação e crescimento das áreas de cana-de-açúcar nas safras analisada. Nas Figuras 4A, 4B e 4C foi representada a metodologia envolvida na seleção dos pixels com cana-de-açúcar nas imagens do sensor AVHRR/NOAA.

Modelo Fenológico-espectral

O modelo testado foi desenvolvido por Pellegrino (2001) e utiliza informações espectrais, representada pelo índice de vegetação NDVI, com o objetivo de estimar a produtividade final da cana-de-açúcar a partir dos dados do satélite AVHRR/NOAA. A obtenção da produtividade final está baseada em três equações que correlacionam dados de produção instantânea, ou massa seca dos colmos (MSC), medido num determinado número de “dias após o corte” (D). A base do modelo proposto por Pellegrino (2001) está representada na Equação 1.

$$MSC = NDVI * (-325,394) + D * 17,1384 + (-963,69) \quad (1)$$

$$R^2 = 0,9567$$

Segundo Pellegrino (2001), é possível estimar a produção de MSC dispondo-se de um valor para esse parâmetro em um ponto ao longo do ciclo e do número de dias “D” após o início do desenvolvimento da cultura (Figura 4).

A variável “Dias Após o Corte” (D) funciona como fator de ponderação do NDVI e representa os dados meteorológicos transformados em Graus-Dia ou na relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial, mais comumente utilizados em trabalhos de estimativa de Produção. As variáveis numéricas representam os coeficientes de ajuste do modelo.

A partir da Equação 1 foi calculada a estimativa da produtividade final com base no modelo de crescimento fenológico adaptado para a cultura (Equações 2 e 3).

$$MSC_{proporcional} = 1,309664 * 10^{(-16)} * D^{(11,33342 - 1,995582 * \log(D))} \quad (2)$$

$$R^2 = 0,9866$$

A $MSC_{proporcional}$ é a Massa Seca dos Colmos Proporcional, ou seja, normalizada em relação a MSC (Massa Seca dos Colmos). Esta equação ressalta o comportamento da cultura ao longo do seu ciclo de crescimento e procura como já mencionado, minimizar a expressão das diferentes condições meteorológicas, que seria a responsável principal pelas diferenças na produção final entre os ciclos (safras), em função do termo “D”. A última etapa foi o cálculo da Massa Seca Máxima do Ciclo (MSC_{Max}) para cada ano-safra e que resultará na estimativa final da produtividade.

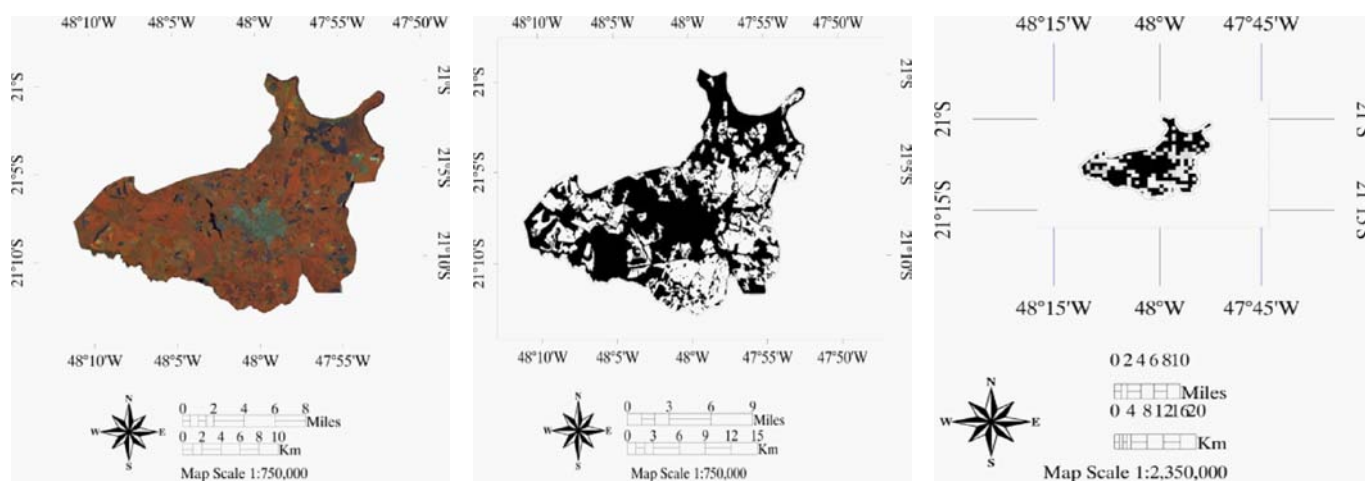


Figura 4. (A) Composição colorida falsa cor RGB-453 da cena LANDSAT-7/ETM+, órbita/ponto 220/75, município de Sertãozinho, (B) máscara de cana-de-açúcar aplicada sobre o município, safra 2004/2005 e (C) seleção dos pixels com menor mistura espectral nas imagens AVHRR/NOAA

Figure 4. (A) False color composite RGB-453 color of the scene LANDSAT-7/ETM+ orbit / point 220/75, Municipality of Sertãozinho, (B) mask of cane sugar applied to the council, season 2004/2005 and (C) selecting the pixels with lower spectral mixture images in AVHRR / NOAA

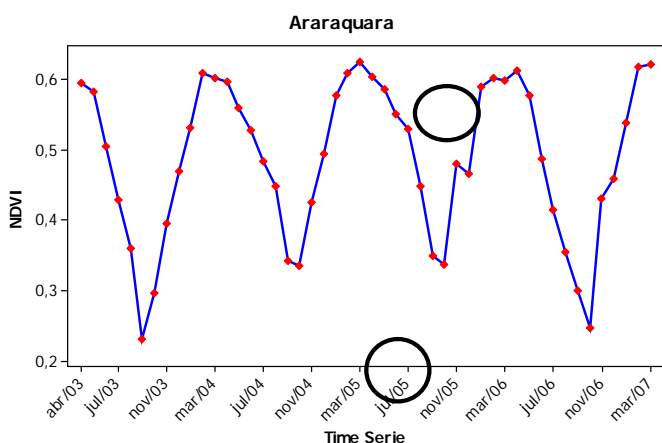


Figura 5. Representação do termo “D” para o município de Araraquara, ao longo das safras 2003/2004, 2004/2005, 2005/06 e 2006/2007. Os meses de janeiro/fevereiro e setembro/outubro representam, respectivamente, os pontos de máximo e mínimo crescimento vegetativo da cultura

Figure 5. Representation of “D” term) for the municipality of Araraquara, during the seasons 2003/2004, 2004/2005, 2005/06 and 2006/2007. The months of January /February and September /October are, respectively, the points of maximum and minimum vegetative growth of the culture

$$MSCMax = MSC / MSCProporcional \quad (3)$$

A partir da avaliação do perfil temporal do NDVI dos municípios selecionados (Figura 5), foi definida a variação decidual do parâmetro “D” entre 71 e 365 dias, ou seja, entre os meses de junho e março. Este período está diretamente relacionado com a diminuição e o aumento dos valores do NDVI, respectivamente representando o período de colheita e o crescimento vegetativo da cultura onde é encontrado o pico dos valores do NDVI ao longo da série temporal de imagens.

Estimativa da Produtividade Oficial: IBGE

O cálculo da produtividade foi realizado através dos dados de produção e área plantada, obtidos no IBGE – Institu-

to Brasileiro de Geografia e Estatística, para os anos em questão, a partir do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), para previsão de safras (IBGE, 2008). O principal enfoque da pesquisa é extrapolar o trabalho antes desenvolvido em nível de talhão, para um nível regional, podendo obter a produtividade da cana-de-açúcar com uma margem de dias de antecedência (parâmetro “D”) em relação à estimativa oficial. Este parâmetro é sem dúvida um grande diferencial, pois possibilita, quando associado ao crescimento da cultura (expresso na análise temporal dos perfis do NDVI) estimar com a precisão e a antecipação necessárias a safra, de acordo com a fenologia da cultura.

Cálculo do Erro Relativo (%): Comparação entre as estimativas de produtividade do modelo e a produtividade oficial – IBGE

O cálculo do erro relativo, em porcentagem, entre a estimativa de produtividade obtida com o modelo e a estimativa oficial fornecida pelo IBGE por município foi obtida a partir da Equação 4.

$$Erro(\%) = ((Prod_{IBGE} - Prod_{MODELO}) / (Prod_{IBGE})) * 100 \quad (4)$$

Como a análise foi realizada de forma pareada entre duas estimativas de área, então o erro relativo é equivalente ao coeficiente de variação. Baseado nisso, para avaliação dos resultados das comparações foi adotada a classificação de Pimentel-Gomes (2000), em que o erro relativo é considerado baixo quando for menor que 10%, médio de 10% a 20%, alto de 20% a 30% e muito alto quando for maior que 30%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de abril de 2003 a março de 2007 foram processadas 569 imagens: 134 na safra 2003/2004, 93 na safra 2004/2005, 172 na safra 2005/2006 e 170 na safra 2006/2007. Na

Tabela 1 é apresentada a distribuição mensal do total de imagens da série temporal por ano-safra. Pode-se observar que para o estado de São Paulo de uma maneira geral, a precipitação pluviométrica é maior nos meses de dezembro a março, o que ocasiona uma maior incidência de nuvens nas imagens e consequentemente uma diminuição do total das imagens resultantes do processamento, que são utilizadas na geração das composições MVC do índice de vegetação NDVI.

Tabela 1. Número de imagens utilizadas na geração das composições mensais de máximo valor

Table 1. Number of images used in generation of monthly compositions of maximum value

Meses	Anos-safra			
	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007
Abril	15	6	20	20
Mai	19	4	18	18
Junho	17	5	18	21
Julho	18	8	23	21
Agosto	17	12	19	20
Setembro	7	12	11	9
Outubro	15	3	9	5
Novembro	10	5	11	13
Dezembro	3	3	6	7
Janeiro	2	7	12	1
Fevereiro	5	12	9	16
Março	6	16	16	19
Total	134	93	172	170

Outra informação relevante está relacionada à mudança da antena de recepção, das imagens em 2005, por uma mais moderna, o que ocasionou um visível aumento no total das imagens, para as safras 2005/2006 e 2006/2007. Esse aumento pode estar associado à redução dos ruídos ocasionados por falha no sistema de recepção. A partir das coordenadas geográficas, obtidas dos vetores das áreas mapeadas com cana-de-açúcar nas diferentes safras foi extraído o perfil médio temporal do NDVI para cada município, parâmetro espectral de entrada para obtenção da produtividade, a partir do modelo proposto. Na Figura 5 é apresentada a série temporal do perfil médio do NDVI, resultante, nas diferentes safras.

Pode-se observar que excepcionalmente na safra 2003/2004 para o município de Araraquara e para todos os municípios da safra 2006/2007 foram constatados casos onde o perfil médio do NDVI foi influenciado pela presença de nuvens ou de ruídos, cujas composições de 30 dias não foram suficientes para eliminá-las, ou ocasionados por composições MVC resultantes de um número reduzido de imagens.

Uma consideração importante refere-se à exclusão de nuvens do processamento, apenas quando estas representam mais de 30% de cobertura nas imagens. Com a extração dos dados do perfil médio do NDVI, sobre as áreas identificadas tomando-se como referência as máscaras de cana-de-açúcar dos diferentes anos-safra, foram definidos o intervalo de dias para a aplicação da Equação 1. Como já mencionado, escolheu-se a variação decidual de 71 dias (início do mês de junho) a 365 dias (fim do mês de março) para caracterizar a dinâmica do crescimento vegetativo da cultura, que é mais intenso nos meses de outubro a março quando a cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, tem alta demanda de água,

radiação e temperatura. A partir do mês de abril, o crescimento vegetativo passa a ser reduzido, o que caracteriza a fase de acúmulo de sacarose nos colmos. Neste período dá-se início à colheita que se estende até os meses de outubro, onde pode ser observada a redução dos valores do NDVI (Figura 5).

Aplicando-se os dados de NDVI obtidos do perfil temporal mensal e a variação de 71 a 365 dias do termo “D” à Equação 1, obtiveram-se os valores de MSC que associado ao modelo de crescimento fenológico (Equações 2 e 3) estimou a produtividade final da cultura para cada ano-safra. Os dados estimados foram comparados aos dados de produtividade, proveniente do IBGE (Tabela 2) considerados como referência, sendo a produtividade determinada pela relação entre a área colhida e a área plantada. O gráfico da dispersão entre a variação do erro relativo (%) e o termo D para cada intervalo de 10 dias, dos diferentes municípios é apresentado na Figura 6.

Tabela 2. Resultados da MSC Máxima do Ciclo estimada pelo modelo e o erro (%) nas diferentes safras

Table 2. Results of Maximum Cycle of Dry Weight of Stalks estimated by the model and the error (%) in the different seasons

Municípios	D	Prod. IBGE	Prod. Modelo MSC Máxima	Erro Relativo (%)
Safra 2003/2004				
Araraquara	132	75,95	73,37	3,39
Cravinhos	132	75,00	72,30	3,58
Jaboticabal	81	87,80	87,17	0,71
Pitangueiras	101	89,71	88,86	0,94
Ribeirão Preto	142	70,00	67,71	3,26
Sertãozinho	122	80,00	77,55	3,05
Safra 2004/2005				
Araraquara	111	82,86	76,75	1,80
Cravinhos	111	82,15	79,83	2,82
Jaboticabal	91	92,00	91,33	0,72
Pitangueiras	111	86,89	81,68	5,99
Ribeirão Preto	132	72,43	71,70	1,02
Sertãozinho	81	82,14	81,85	0,34
Safra 2005/2006				
Araraquara	81	82,86	81,67	1,43
Cravinhos	111	80,00	79,56	0,54
Jaboticabal	101	90,00	86,53	3,84
Pitangueiras	81	86,89	85,58	1,50
Ribeirão Preto	142	70,00	66,97	4,39
Sertãozinho	122	80,00	75,85	2,89
Safra 2006/2007				
Araraquara	122	80,00	78,75	1,55
Cravinhos	122	80,00	78,61	1,73
Jaboticabal	81	90,00	88,46	1,71
Pitangueiras	111	86,89	83,31	3,50
Ribeirão Preto	142	70,00	68,58	2,02
Sertãozinho	132	80,00	73,45	4,25

É possível observar que quando o termo “D” é inferior a 70 dias, o modelo tende a produzir erros superiores a 50% para todos os municípios e safras analisadas. Esses valores são inaceitáveis para a estimativa da produtividade. Neste período os erros são sempre positivos, indicando que para esta fase do desenvolvimento da cultura, o modelo tende a subestimar os valores de produtividade em relação ao dado oficial considerado (IBGE). Isto significa que este modelo não é adequado para estimar a produtividade no início do ciclo.

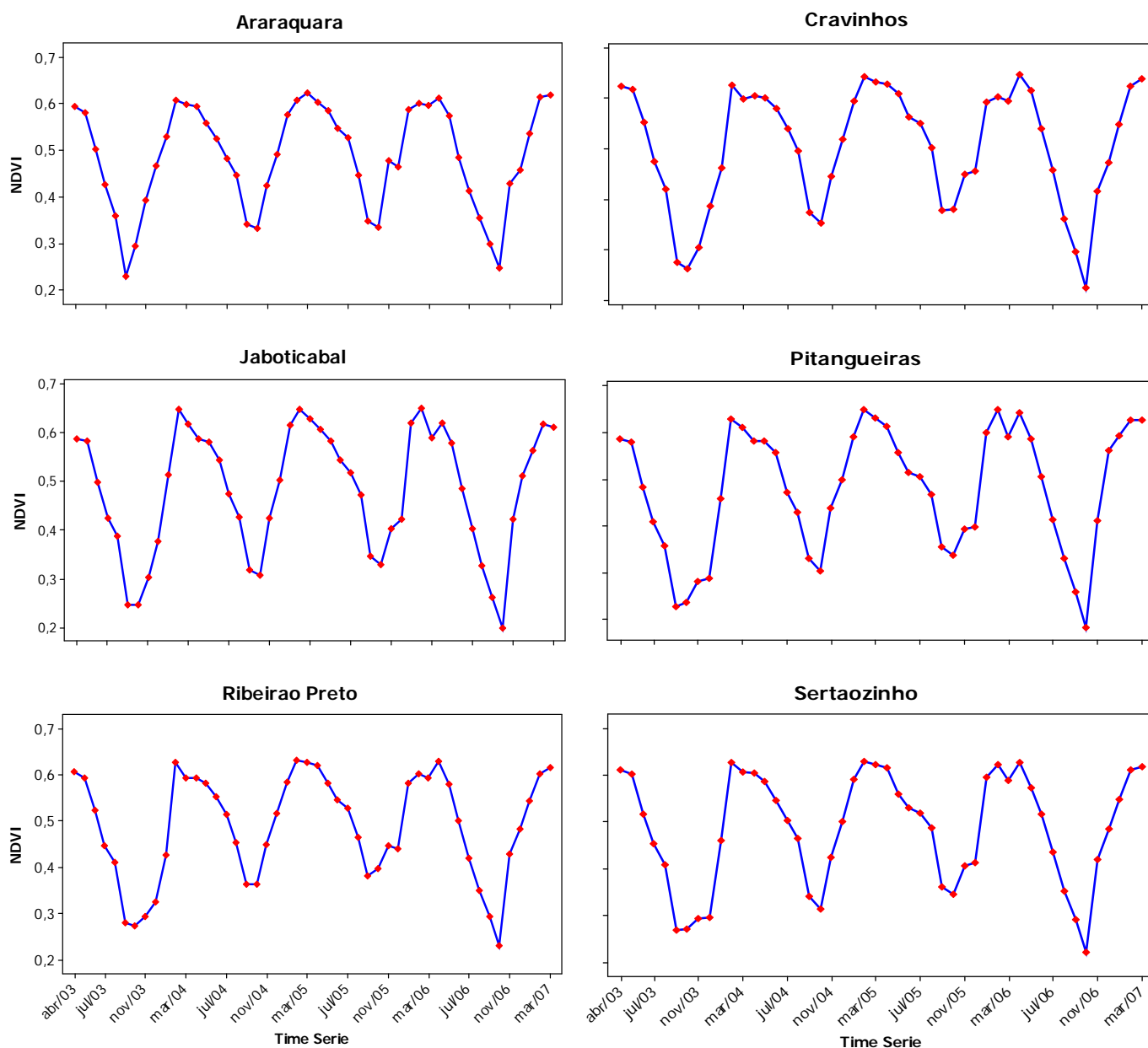


Figura 6. Série temporal do perfil do NDVI municipal, nas diferentes safras

Figure 6. Time series of NDVI municipal profile, in different seasons

Após o octogésimo dia todos os municípios analisados começam a apresentar características distintas em relação à produtividade. Entretanto destacam-se a presença de erros negativos variando num intervalo de -0,58 a -31,48, indicando que nesta fase, ao contrário da acima descrita, o modelo pode superestimar os valores obtidos nos municípios analisados.

É possível perceber também, que a utilização de valores de NDVI do meio do ciclo da cultura (entre os dias 81 a 142) gerou erros inferiores a 6%, quando aplicados nas fórmulas de Massa Seca de Colmos e nas fórmulas de MSC Máxima e Proporcional, especialmente comparados aos mesmos valores no início e no fim do crescimento fenológico da cultura.

Detalhadamente na Tabela 2 é mostrada a MSCMáxima do ciclo que é equivalente a produtividade final obtida pelo modelo, a produtividade oficial fornecida pelo IBGE, ambas

em ton/ha⁻¹, e o erro relativo (%) dos municípios. Ressalta-se que, quando são utilizados dados de NDVI do meio do ciclo da cultura, os erros encontrados variaram numa faixa entre 0,34 a 6%, exceto para os municípios de Pitangueiras, safra 2004/2005. Esses erros indicam que a adaptação do modelo, considerando-se apenas os pixels com a presença da cultura, mostrou-se bastante satisfatória, o que torna o modelo uma ferramenta viável a ser aplicada na previsão de safras da cana-de-açúcar quando utilizado da maneira proposta, permitindo um monitoramento mais freqüente das condições de campo e a obtenção de resultados de uma maneira mais rápida e menos subjetiva.

Os erros relativos (%) obtidos com a comparação entre os valores de produtividade do IBGE e do modelo fenológico-espectral, foram considerados baixo, de acordo com a termi-

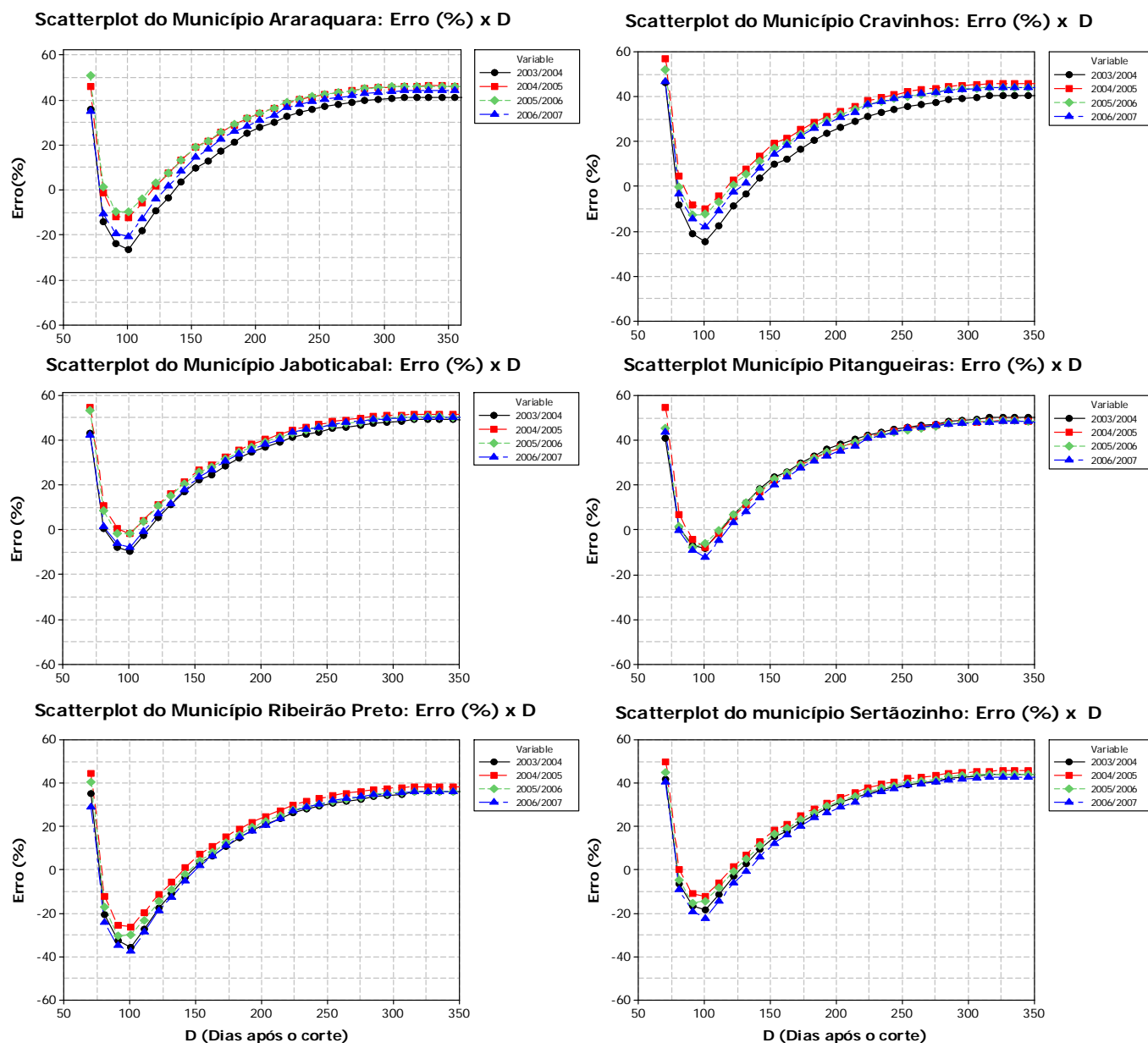


Figura 7. Erro (%) x D (Dias após o corte) dos municípios em questão nos diferentes safras

Figure 7. Error (%) x D (Days after harvest) of the municipalities concerned in different seasons

nologia proposta por Pimentel-Gomes (2000). Notou-se que, os menores erros relativos foram observados entre os meses de julho e agosto. Este período está diretamente relacionado com a diminuição da precipitação pluviométrica em todo o estado, conseqüentemente para a cultura em geral, este período coincide com a época de estresse hídrico e com a redução dos valores do índice de vegetação NDVI.

CONCLUSÃO

A utilização de um modelo fenológico-espectral, proposto por Pellegrino (2001), com uma série temporal de imagens AVHRR/NOAA-17 serve como estimador da

produtividade da cana-de-açúcar com erros inferiores a 6% antecipação em torno de 81 a 142 dias antes da colheita. Estes valores são adequados e aceitáveis para apoio operacional e oficial de sistemas de acompanhamento das culturas e previsão. As séries temporais de imagens AVHRR/NOAA-17 foram fundamentais para definir os valores do parâmetro “D” e para testar a metodologia em quatro safras.

LITERATURA CITADA

Antunes, J. F. G. Aplicação de lógica *fuzzy* para estimativa de área plantada da cultura de soja utilizando imagens AVHRR/NOAA. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005. 105 p. Dissertação Mestrado.

- Chen, P. Y.; Srinivasan, R.; Fedosejevs, G.; Kinity, J. R. Evaluating different NDVI composites techniques using NOAA-14 AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 17, p. 3403-3412, 2003.
- Esquerdo, J. C. D. M.; Antunes, J. F. G.; Emery, W.; Baldwin, D. G.; Zullo Junior, J. An Automatic System for AVHRR Land Surface Product Generation. *International Journal of Remote Sensing*, v.27, n.18, p. 3925 - 3942, 2006.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção Agrícola Municipal (PAM). <http://www.sidra.ibge.gov.br>. 21 out. 2008.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). CANA-SAT – Mapeamento de cana via imagens de satélite de observação da Terra. <http://www.dsr.inpe.br/mapdsr>. 10 jan. 2009.
- Ippoliti-Ramilo, G.; Epiphanyo, J. C. N.; Shimabukuro, Y. E.; Formaggio, A.R. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. *Agricultura em São Paulo*, v. 46, n. 1, p. 89-101, 1999.
- Jakubauskas, M. E.; Legates, D. R.; Kastens, J. H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 37, n. 1, p. 127-139, 2002.
- Moreira, M. A.; Shimabukuro, Y. E. Cálculo do índice de vegetação a partir do sensor AVHRR. In: Ferreira, N. J. (Ed.). *Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N*. São Paulo/SP: Oficina de Textos, 2004. p 271.
- Pardi Lacruz, M.S. Análise harmônica de séries temporais de dados MODIS como uma nova técnica para a caracterização da paisagem e análise de lacunas de conservação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. 130 p. Tese Doutorado.
- Pellegrino, G.Q. Utilização de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR como Fonte de Dados para Modelos Matemáticos de Estimativa da Fitomassa da Cana-de-Açúcar. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001. 116 p. Tese Doutorado.
- Pergola, N.; Tramutoli, V. Two years of operational use of Sub-pixel Automatic Navigation of AVHRR scheme: accuracy assessment and validation. *Remote Sensing of Environment*, v. 85, n. 2, p. 190-203, 2003.
- Pimentel-Gomes, F. Curso de estatística experimental. 14. ed. Piracicaba: ESALQ, 2000. 477p.
- Pontes, P. P. B.; Rocha, J. V.; Lourenço, L. S.; Lamparelli, R. A. C.; Machado, H. M. Análise da evolução temporal do índice de vegetação (NDVI) em talhões comerciais de cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 32, 2003, Goiânia. Anais. Goiânia, CONBEA, 2003. p. 42-51.