

## **Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar**

Pedro Piason Breglio Pontes<sup>1</sup>  
Jansle Vieira Rocha<sup>1</sup>  
Rubens Augusto Camargo Lamparelli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/FEAGRI  
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas - SP, Brasil  
{pedro.pontes,jansle}@agr.unicamp.br

<sup>2</sup> Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura -  
UNICAMP/CEPAGRI  
13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
rubens@cpa.unicamp.br

**Abstract.** Brazil is the world leader in the fabrication and exportation of sugar, in the production of alcohol and in the co-generation of energy from sugar cane bagasse. The forecasting of yield estimates through remote sensing aims to provide automatic interpretation and continuous realtime monitoring, as well as cheaper, faster estimates. This study aimed at analysing the temporal evolution of Vegetation Index of sugar cane from Landsat7/ETM+ imagery in 7 different dates, within the crop vegetative cycle, in 2023 commercial fields belonging to São João Sugar and Alcohol Mill, at São Paulo state, in Araras region. Seven images were acquired during the vegetative cycle and NDVI/GVI values were calculated for each field in the different dates and compared to their actual measured yield after harvest. Correlations were made between productivity and vegetation indices in order to construct statistical models that provide robust support for subsequent yield estimate forecasts.

**Palavras-chave:** sugar cane, vegetation index, yield estimate, cana-de-açúcar, índice de vegetação, estimativa de safra.

### **1. Introdução**

O setor sucro-alcooleiro representa no plano da produção 1,2% do PIB nacional, é responsável por um faturamento anual de US\$ 8,7 bilhões, gera 1 milhão de empregos diretos, 400 mil só em São Paulo. Com tal relevância na economia do país e sabendo que o mercado funciona segundo a lei da oferta e da procura, é de extrema importância o uso de um sistema eficiente de previsão de safras que têm como finalidade principal subsidiar os formuladores de políticas agrícolas e os tomadores de decisão do setor privado ligados às atividades agropecuárias.

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta que apresenta duas características que podem melhorar a estimativa de produção das Usinas são elas: a temporalidade e a outra é a visão sinótica (CLEVERS, 1989; DIKER et al. 1998, PELLEGRINO, 2001). A previsão de safras por meio de sensoriamento remoto tem como finalidade a interpretação automática, o monitoramento contínuo e atualizado de grandes áreas agrícolas, além do menor custo e o menor tempo para as estimativas. A agilidade e a disponibilidade de informações precisas podem facilitar a elaboração de estratégias referentes ao armazenamento, comercialização e suporte às decisões.

O índice NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é considerado um bom estimador de biomassa, é muito utilizado para avaliar produtividade de culturas (JACKSON et al., 1986) e tem uma boa correlação com o teor de umidade da planta (SIMS e GAMON,

2003), podendo ser aplicado até em Agricultura de Precisão no acompanhamento de culturas (BARNES et al., 1996).

Este trabalho consistiu em analisar e interpretar a evolução temporal de índices de vegetação, relativos a imagens captadas pelo satélite Landsat7/ETM+, em áreas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, região de Araras, durante a safra de 2002/2003. A evolução temporal não foi construída apenas baseando-se nos índices de vegetação, mas também em características como solo, variedade, corte e ambiente para cada uma das 2029 regiões de interesse. Uma posterior correlação foi feita entre a produtividade e os índices de vegetação, visando a construção de modelos estatísticos que forneçam um suporte robusto a previsões de safras subseqüentes. Este trabalho também pode servir como referência na localização de áreas de cana-de-açúcar em satélites de baixa resolução espacial (NOAA-AVHRR e MODIS), possibilitando a passagem de escala entre um sensor e outro.

## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1 . Seleção e correção das imagens**

As imagens usadas foram captadas pelo satélite Landsat-7, sensor Enhanced Thematic Mapper ETM+, órbita/ponto - 220/75, projeção cartográfica UTM (Universal Transversor de Mercator) referente á Zona 23 Sul - Datum SAD-69/Brazil. Estas cenas abrangem a região de Ribeirão Preto, Jaú, São Carlos, Bauru e Araras, e foram captadas nas seguintes datas: 11/06/2001, 02/11/2001, 05/01/2002, 10/03/2002, 11/04/2002, 30/06/2002 e 16/07/2002.

Foram usadas as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, necessárias para a composição de imagens NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) e GVI (*Green Vegetatin Index*). Para a melhor identificação das áreas de cana-de-açúcar, a visualização das imagens foi feita no formato RGB453 (Vermelho – banda 4, Verde – banda 5 e Azul – banda 3) , pois esta combinação de cores e bandas proporciona um maior destaque à vegetação ou uma maior facilidade na distinção dos vários tipos de vegetação.

Como as imagens não tinham a mesma correção geográfica, fez-se necessária à correção das mesmas. Essa foi feita com base em uma imagem georreferenciada feita por MACHADO (2003), por meio da identificação de pontos comuns como drenagens, estradas, limites, carregadores entre as mesmas. A exatidão é de fundamental importância para que não haja interferências externas nas regiões de interesse, como carregadores ou lagos, e conseqüentemente imprecisões nos resultados e em futuras correlações.

### **2.2. Definição das regiões de interesse**

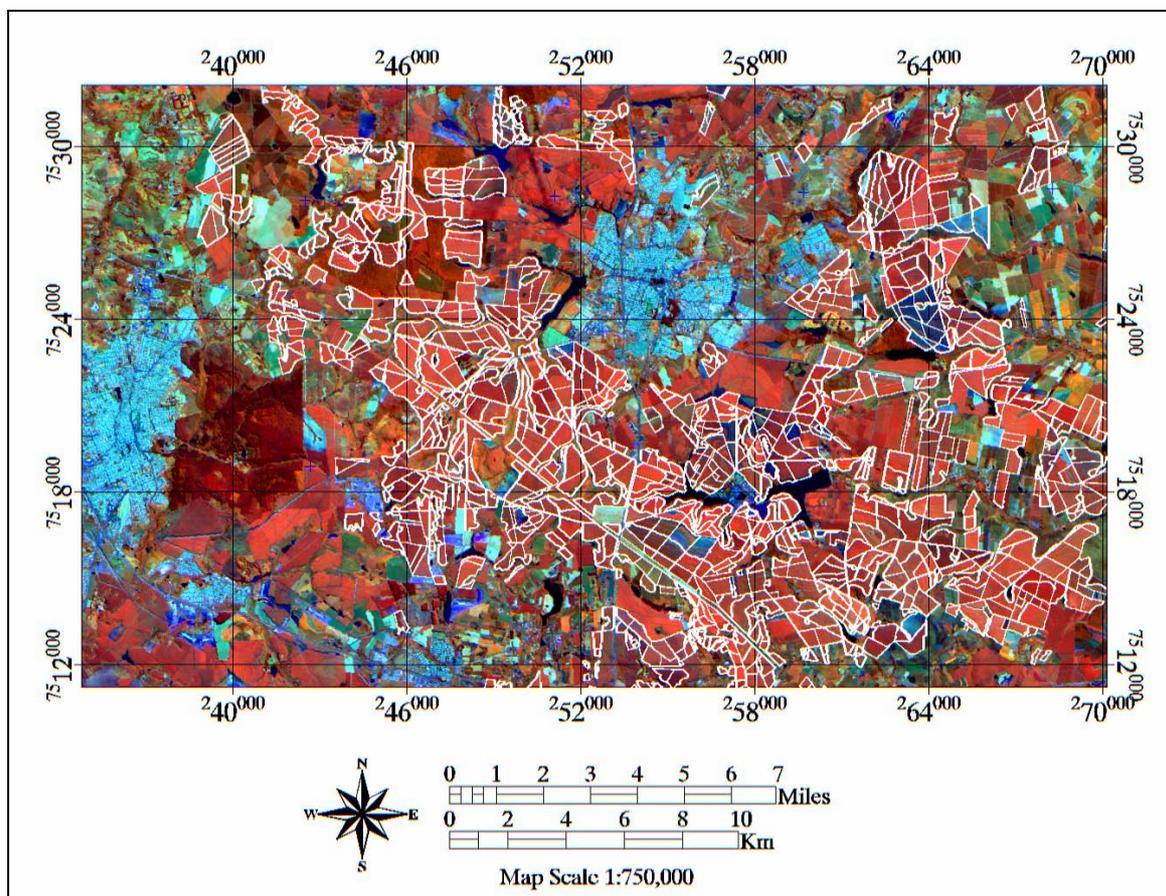
Para possibilitar uma posterior interpretação, usou-se um vetor que delimitava 2029 talhões de cana-de-açúcar com as suas respectivas produtividades, municípios, proprietários, fundo agrícola, variedades da cana, cortes da cana e ambientes.

### **2.3. Extração de dados estatísticos**

Como para cada banda e para cada índices de vegetação eram necessárias seis tabelas (totalizando 384 extrações), e para cada imagem e cada vetor que fosse passado para o IDRISI32, muitas rotinas de importação, foi programado um macro, que permitiu agilidade e otimização nos processos, diminuindo a margem de erro e padronizando as etapas.

Os valores que foram retirados das bandas 1,2,3,4,5 e 7, e das imagens NDVI e GVI, referentes ao nível de cinza, para cada um dos 2029 talhões nas 8 datas anteriormente citadas são os seguintes: valor médio (Méd), valor máximo (Máx), valor mínimo (Mín), valor máximo menos o valor mínimo (Ran), desvio padrão (DP) e somatório (Sum) dos pixels

dentro de cada talhão. Inicialmente os dados foram salvos em 8 tabelas referentes a cada uma das datas no Microsoft Excel, facilitando cálculos ou alterações que posteriormente possam ser feitas. E para facilitar a consulta dos dados e futuras correlações estas tabelas também foram feitas no Microsoft Access.



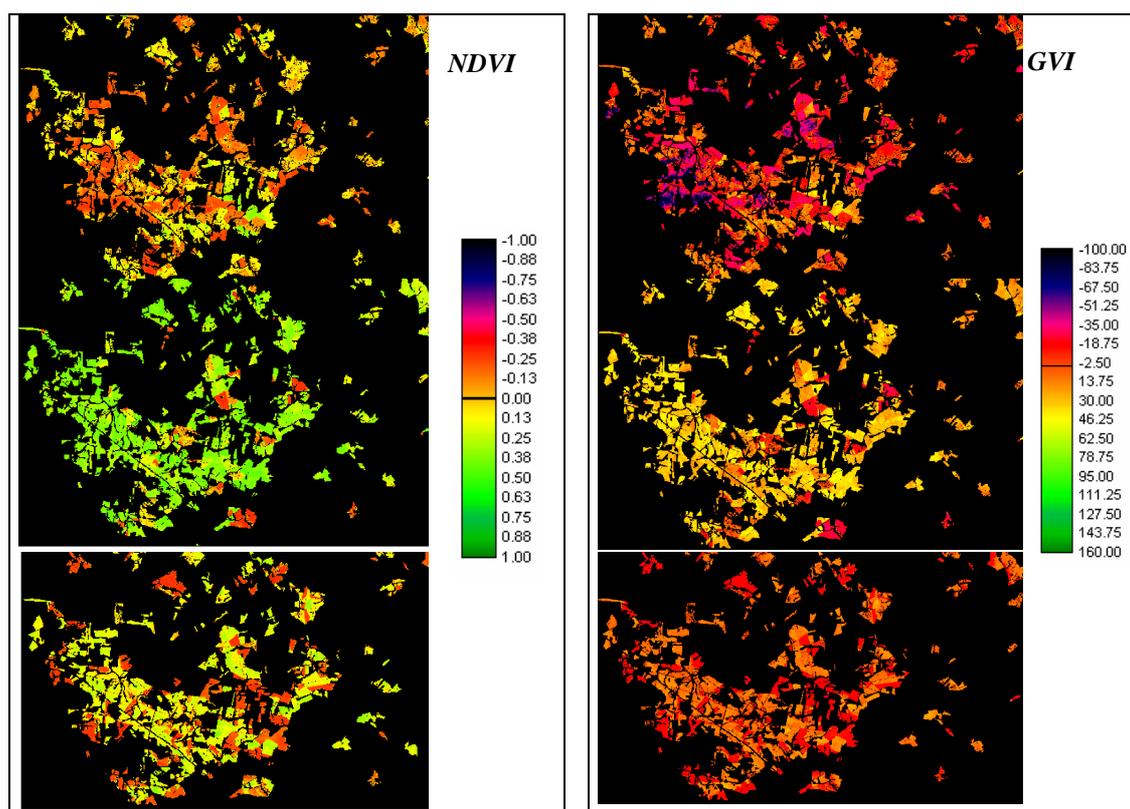
**Figura 1** – Composição RGB453 mostrando detalhes de alguns talhões representativos ao redor de Araras.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Análise temporal dos Índices de Vegetação

Para tornar esta evolução visível, foram multiplicadas as máscaras das regiões de interesse pelas imagens dos índices, criando, em três datas representativas (novembro, abril e junho), mapas da distribuição espacial dos índices delimitados pelos talhões (**Figura 2**).

Analisando as imagens e a evolução dos índices (**Figuras 2**), bem como as curvas características do NDVI nas sete datas estudadas, pode-se observar alguns comportamentos que caracterizam o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar, como o crescimento dos índices até o período do pico do ciclo vegetativo, antes do período de maturação da cana.



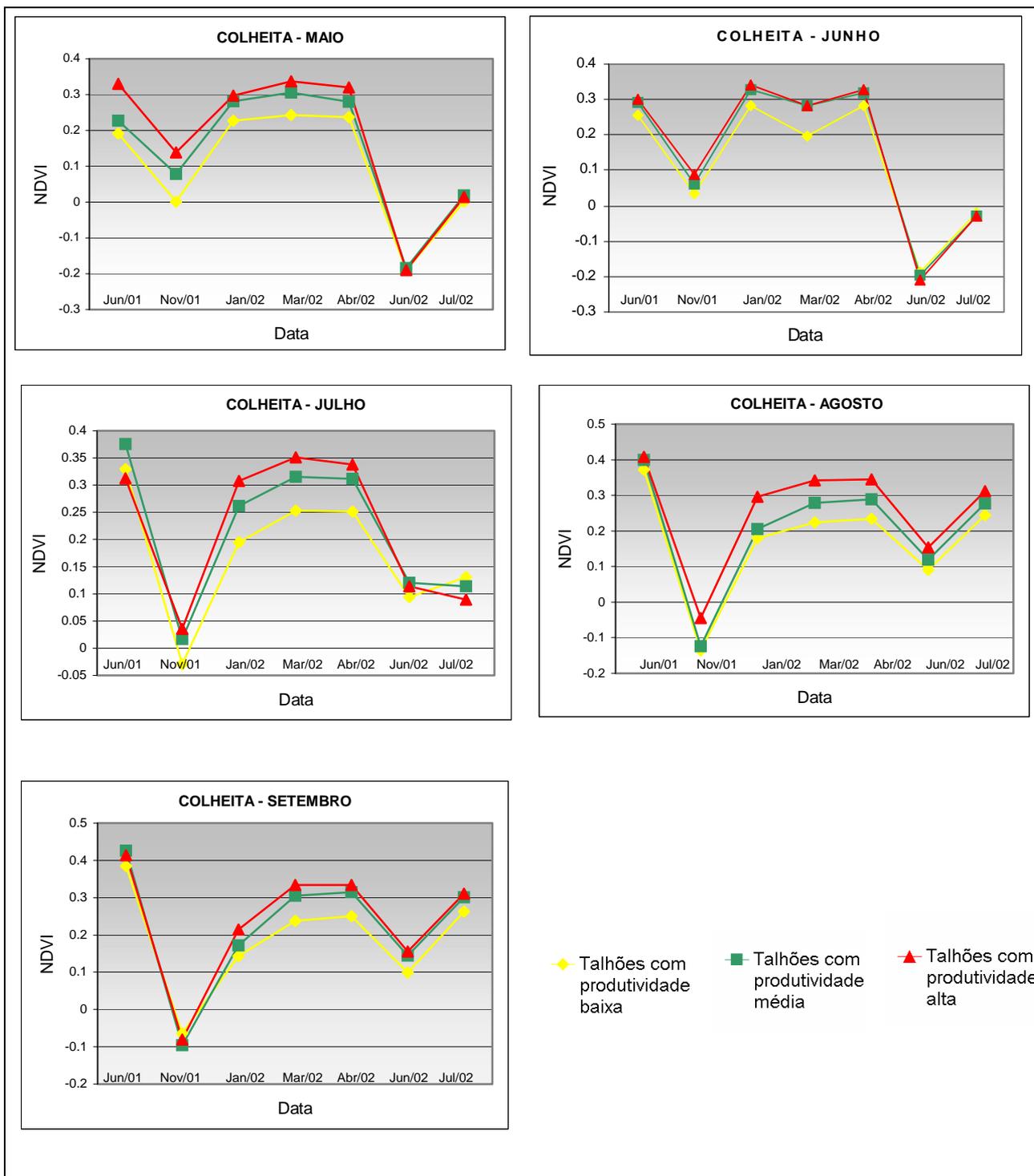
**Figura 2** – Evolução temporal (novembro / 2001 – abril / 2002 – junho / 2002) do NDVI/GVI, espacializados nas regiões de interesse.

Com o intuito de segmentar os talhões com características ou tendências semelhantes, os mesmos foram divididos em função da data de colheita. Foram feitas cinco tabelas com as seguintes datas de colheita: maio, junho, julho, agosto e setembro. Estas tabelas, extraídas do banco de dados montado no Access, contém para cada talhão: NDVI e GVI (extraídos nas cinco diferentes imagens) data da colheita, produtividade e o identificador.

Para cada data de colheita foram construídos dois gráficos de evolução temporal do NDVI. O primeiro compara três grupos de talhões separados em função de sua produtividade, em cada uma das datas de corte (**Figura 3**). Foram escolhidos três intervalos de divisão, 25 – 65 ton/ha (baixa), 65 – 110 ton/ha (média) e 110 – 155 ton/ha (alta). O segundo compara os talhões em função da variedade de cana-de-açúcar plantada (**Figura 4**). Foram escolhidas as três variedades predominantes (RB835486, SP80-1816 e SP813250).

Comparando os gráficos (**Figuras 3 e 4**) observa-se que a evolução temporal do NDVI em áreas com cana-de-açúcar, na região estudada, independentemente da produtividade ou variedade, segue uma mesma tendência.

Nos gráficos que comparam os talhões de diferentes produtividades com a evolução do índice NDVI (**Figura 3**), observa-se que no início do ciclo vegetativo (em novembro de 2001 e janeiro de 2002) a diferença entre os valores de NDVI não é expressiva. Ao longo do ciclo, no entanto, a diferença de produtividade, e conseqüentemente de produção de biomassa, passa a influenciar o valor do NDVI. A saturação do NDVI ocorre imediatamente após o período de chuvas (imagem de março/2002 e abril/2002), onde a diferença entre talhões que apresentam maior e menor biomassa é mais perceptível. Após esse período de saturação, correspondente à senescência das plantas e concentração de açúcar, não existe diferença significativa de valores de NDVI. O pico de valor máximo de NDVI corresponde ao pico do ciclo vegetativo da cultura.

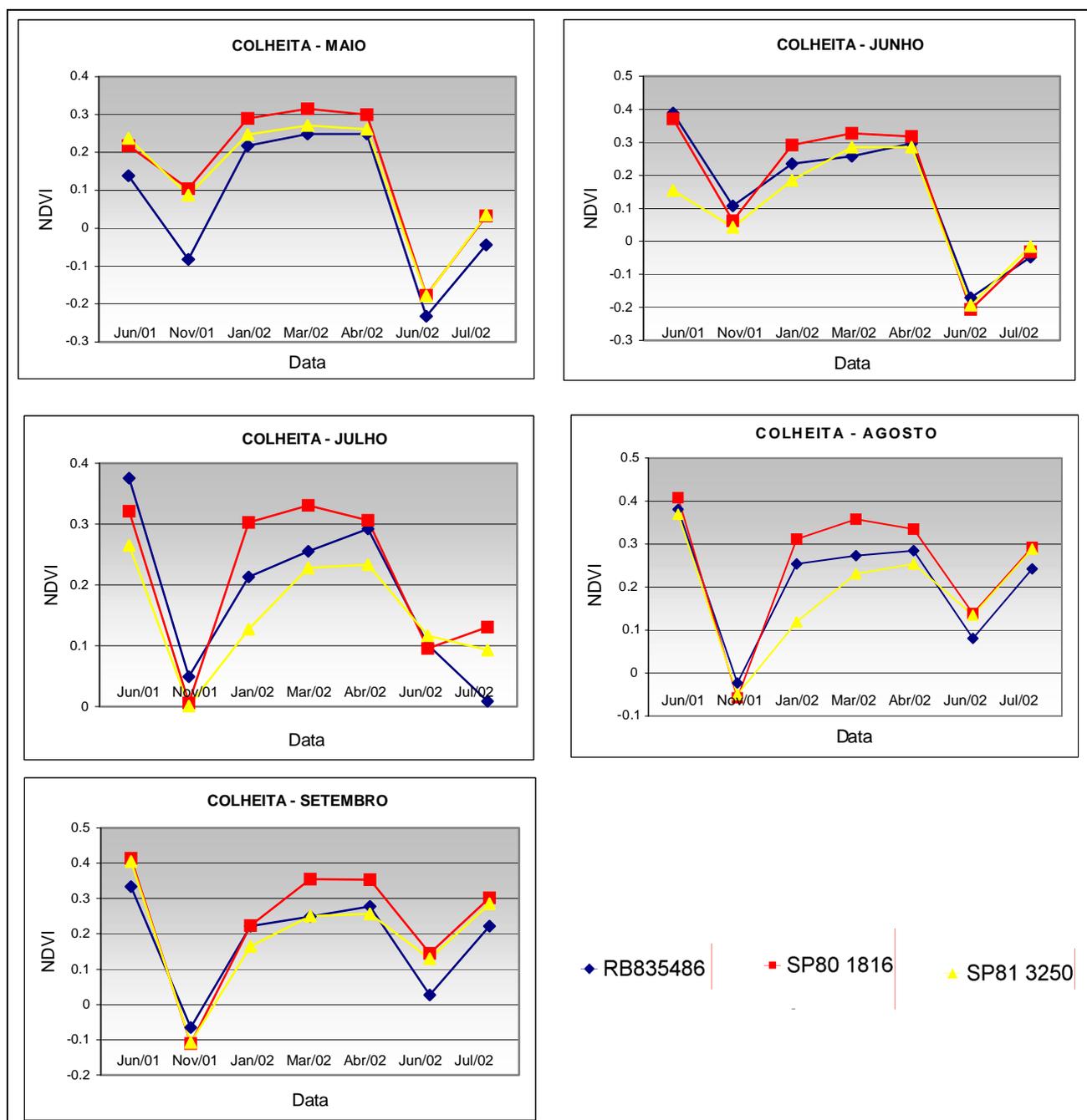


**Figura 3** – Gráficos da Evolução Temporal do NDVI, em grupos de talhões com produtividades alta, média e baixa.

Observando os gráficos de evolução temporal do NDVI comparativos entre as variedades de cana (**Figura 4**), pode-se notar que as variedades RB835486, SP80-1816 e SP813250, mesmo apresentando uma mesma tendência temporal, se diferenciam em escala numérica.

Se considerado o período de maior correlação NDVI – produtividade (imagens de janeiro, março e abril), a variedade SP801816 apresenta índices maiores em todos os talhões, independentemente da época de colheita do mesmo. Isto pode ser explicado pela estrutura física da planta, ou pelas suas características, como o excelente fechamento de entrelinhas e

porte ereto, condições que reduzem a influência do solo nos valores da imagem. A variedade RB835486 apresenta diminuição em seus índices nos meses que antecedem a colheita. Este comportamento pode ser justificado, dentre outros fatores, pelo alto grau de tombamento desta variedade, o que ocasiona uma maior interferência do solo nos valores espectrais.



**Figura 4** – Gráficos da Evolução Temporal do NDVI, em grupos de talhões com a mesma variedade de cana-de-açúcar.

### 3.2. Análise comparativa entre os Índices de Vegetação e a Produtividade

Com o intuito de avaliar a correlação entre a biomassa de cana-de-açúcar e os índices NDVI e GVI, foram feitas regressões entre os índices e a produtividade, para cada um dos períodos de colheita nas diferentes datas de imageamento. Foram usados apenas talhões com a variedade SP80-1816, sendo esta predominante nesta safra na região estudada.

Os resultados obtidos nas **Tabelas 1 e 2** mostram um maior coeficiente de determinação entre produtividade e os índices de vegetação na imagem de 11/04/2002. Exceção foi observada para os talhões colhidos em setembro, os mesmos apresentaram coeficientes de determinação mais altos na imagem capturada em 10/03/2002. Estes resultados mostram o quanto a produtividade está sendo explicada pelos índices de vegetação. E mostram que a correlação foi maior também na imagem de 11/04/2002, lembrando que os coeficientes de determinação e de correlação são dependentes. Exceção também foi observada nos talhões colhidos em setembro, os mesmos apresentaram coeficientes de correlação mais altos na imagem capturada em 10/03/2002. Estes resultados mostram o quanto a produtividade e os índices de vegetação apresentam de correlação.

**Tabela 1** – Coeficientes de **Determinação (R<sup>2</sup>)** e **Correlação (R)** obtidos pela correlação entre a produtividade e o NDVI, para diferentes períodos de colheita em diferentes datas de imageamento.

Colheita	Data da Imagem				
	05/01/2002	10/03/2002	<b>11/04/2002</b>	30/06/2002	16/07/2002
Maio	0.260 / 0.510	0.369 / 0.607	<b>0.558 / 0.747</b>	0.211 / 0.459	0.087 / 0.295
Junho	0.090 / 0.300	0.154 / 0.392	<b>0.163 / 0.404</b>	0.020 / 0.141	0.021 / 0.145
Julho	0.169 / 0.411	0.135 / 0.367	<b>0.418 / 0.647</b>	0.111 / 0.333	0.123 / 0.351
Agosto	0.154 / 0.392	0.254 / 0.735	<b>0.391 / 0.625</b>	0.329 / 0.574	0.372 / 0.610
Setembro	0.179 / 0.423	<b>0.336 / 0.580</b>	0.280 / 0.529	0.112 / 0.335	0.241 / 0.491

**Tabela 2** – Coeficientes de **Determinação (R<sup>2</sup>)** e **Correlação (R)** obtidos pela correlação entre a produtividade e o GVI, para diferentes períodos de colheita em diferentes datas de imageamento.

Colheita	Data da Imagem				
	05/01/2002	10/03/2002	<b>11/04/2002</b>	30/06/2002	16/07/2002
Maio	0.006 / 0.077	0.384 / 0.620	<b>0.483 / 0.695</b>	0.095 / 0.308	0.086 / 0.293
Junho	0.005 / 0.071	0.182 / 0.427	<b>0.191 / 0.437</b>	0.017 / 0.130	0.005 / 0.071
Julho	0.236 / 0.486	0.165 / 0.406	<b>0.425 / 0.652</b>	0.105 / 0.324	0.105 / 0.324
Agosto	0.158 / 0.397	0.292 / 0.504	<b>0.359 / 0.599</b>	0.212 / 0.460	0.320 / 0.566
Setembro	0.145 / 0.381	<b>0.234 / 0.484</b>	0.190 / 0.436	0.077 / 0.277	0.122 / 0.349

## 5. Conclusão

Pode-se afirmar que todos os talhões de cana têm um comportamento espectral ao longo do ciclo vegetativo semelhante e que, portanto, mantidas as condições climáticas constantes, é previsível o comportamento temporal dos valores espectrais de um pixel que contenha cana-de-açúcar.

As variedades de cana-de-açúcar estudadas, apesar de apresentarem uma mesma tendência temporal de evolução do índice NDVI, apresentam diferenças na resposta espectral e, portanto, podem ser estratificadas.

A análise estatística dos dados mostrou que existe correlação entre o índice NDVI e a produtividade da cultura de cana-de-açúcar. Esta correlação é mais evidente no pico do ciclo vegetativo da cultura (abril), após o período de chuvas.

As regressões entre o NDVI e o GVI, extraídos da imagem de abril, e a produtividade obtiveram bons índices de determinação. Portanto os índices de vegetação estudados explicaram satisfatoriamente a produtividade de cana-de-açúcar.

O estudo mostrou que existe potencial na utilização de índices de vegetação para diferenciação de produção de cana-de-açúcar, oferecendo um subsídio à previsão de safras.

Novos estudos podem ser desenvolvidos, incluindo-se, na análise do comportamento espectral, variáveis como balanço hídrico, associando os modelos espectrais a modelos agrometeorológicos.

## 5. Referências Bibliográficas

MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 – ETM+**. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BARNES, E. M., MORAN, M. S., PINTER, JR., P. J., CLARKE, T. R. Multispectral Remote Sensing and Site-Specific Agriculture: Examples of Current Technology and Future Possibilities. In: **Precision Agriculture '96: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Precision Agriculture**. 1996. Robert, P.C., R.H. Rust and L.E. Larson (ed.). Minnesota, June 23-26, 1996. ASA,CSSA, SSSA, Madison,WI.

CLEVERS, J. G. P. W. The application of a weighted infrared vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, 29(1):25-37, 1989.

DIKER, K.; BAUSCH, W. C.; PODMORE, T.H. GIS Mapping of Plant Parameters and Yield Potential Estimate by Remote Sensing. **ASAE Meeting**. Orlando/Flórida. July 12-16, 1998. Presentation Paper n.983143.

JACKSON, R. D., P.J. PINTER, R. J. REGINATO, S. B. IDSO. Detection and Evaluation of plant stresses for crop management decisions. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** GE-24:99-106. 1986.

PELLEGRINO, G. P. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 114p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP. Brasil.2001.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. **Remote Sensing of Environment**, 84 (4):526-537. 2003.

VICENT, J. R. et al. Comparações entre dados dos censos agropecuários e estimativas das safras agrícolas do estado de São Paulo. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.37, t.1, p.97-104, 1990.