

# Estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar por dados espectrais orbitais ETM<sup>+</sup>/LANDSAT 7

## Sugarcane agroindustrial yield forecast by orbital sensor ETM<sup>+</sup>/LANDSAT 7 data

Caio Fortes<sup>1</sup>

José Alexandre Melo Demattê<sup>2</sup>

Aline Marques Genú<sup>3</sup>

### Resumo

Os sistemas convencionais de estimativa de safras são geralmente onerosos e demorados, portanto, é importante o desenvolvimento de métodos mais rápidos para a obtenção de dados. Propõe-se, neste trabalho, obter uma metodologia para estimar a produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM<sup>+</sup>/LANDSAT 7 e utilizando-se dados reais áreas de produção de cana-de-açúcar na região de Paraguaçu Paulista, (SP), da variedade RB835486, de primeiro corte. Um banco de dados foi elaborado e escolheram-se talhões com épocas de plantio semelhantes, enquanto que para a coleta de dados espectrais foram testadas duas metodologias: na primeira, foram estabelecidas áreas de coleta de dados espectrais dentro dos talhões, e estes foram representados pelas respectivas médias aritméticas dos pixels amostrados e, na segunda, procedeu-se a uma classificação não supervisionada dos dados espectrais dos talhões que, por sua vez, foram representados pela média ponderada do valor dos pixels em sete classes espectrais distintas. As bandas B1, B2, B3, B4, B5 e B7 e seis índices de vegetação, foram utilizados para gerar modelos de regressão linear múltipla, visando à quantificação das características agroindustriais da cultura. Os resultados indicam que é possível estimar essas características através de dados espectrais orbitais, indicados por  $R^2 = 0,69$  para produtividade agrícola ( $Mg\ ha^{-1}$ ) e em média 0,58, para as características tecnológicas.

**Palavras-chave:** previsão de safras agrícolas; imagens de satélite; qualidade; matéria-prima.

1 M.Sc.; Engenheiro Agrônomo; BP Biofuels; E-mail: caio.fortes@bp.com

2 Dr.; Engenheiro Agrônomo; Professor do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP; E-mail: jamdemat@esalq.usp.br

3 Dra.; Engenheira Agrônoma; Professora do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; E-mail: agenu@unicentro.br

## **Abstract**

Conventional systems for crop yield projections are generally expensive and demand much time. Thus, it is important to develop quicker data obtaining methods. We have proposed a methodology for estimating the sugarcane agroindustrial yield by ETM + / LANDSAT 7 orbital sensor and also by collecting data from sugarcane production areas in Paraguaçu Paulista, São Paulo State, at fields of RB835486 variety in the first harvest. A database was established, and fields that were planted at the same dates were chosen. Two methods for spectral data collection were tested in order to identify best estimation results. In the first method, data collection areas were set within the spectral plots, and these were represented by the specific arithmetic average of the sampled pixels. In the second method, the spectral data went through a non-supervised classification of the plots, which were represented by the weighted average value of pixels in seven different spectral classes. The bands B1, B2, B3, B4, B5 and B7 and six vegetation indices were used to generate multiple linear regression models in order to qualify the crop agroindustrial characteristics. The results indicate that it is possible to estimate these characteristics drawing on orbital spectral data, indicated by  $R^2 = 0.69$  for crop yield (Mg ha<sup>-1</sup>) and a 0.58 average for the technological characteristics.

**Key words:** crop yield projection; satellite images; quality; raw matter.

## **Introdução**

A cultura da cana-de-açúcar tem importância mundial como commodity, por se tratar de uma fonte de energia renovável, sendo o álcool um combustível menos poluente e o açúcar um dos principais produtos de exportação interna. O Brasil é o maior produtor mundial, com área plantada de 6,8 milhões de hectares, que geram, em média, 505 milhões de toneladas de cana, 25 milhões de metros cúbicos de etanol e 27 milhões de toneladas de açúcar/safra (UNICA, 2009). O Estado de São Paulo é responsável por 60% desta produção e participa com 66% da área canavieira nacional (UNICA, 2009). Dessa forma,

estudos relacionados à cultura têm grande importância e um dos passos significativos no seu planejamento é a estimativa de safras, pois possibilitam o redirecionamento de produtos para os mercados interno e externo, intenções de plantio e políticas públicas em geral.

Atualmente, os sistemas de previsão e estimativa de safras são baseados em levantamentos que relacionam a área aproximada ocupada pelas culturas em diferentes escalas (municípios, estados e países) e seu rendimento médio; entretanto, a demora na publicação dos dados é a principal limitação deste método (SCHMIDT et al., 2001); outro método de estimativa utilizado por agricultores e unidades produtoras é

baseado na experiência de campo, porém esse método é oneroso e demorado.

Gitelson et al. (2002) definem a produtividade das culturas como o produto da energia solar captada pelo dossel e sua eficiência em conversão de biomassa e, embora a produtividade agrícola da cultura de cana-de-açúcar seja importante, a remuneração do produto é feita com base na qualidade da matéria-prima, quanto ao teor de sacarose (CONSECANA, 1999). Muchow et al. (1994) ressaltam a necessidade de estudos que relacionem a conversão da energia solar em biomassa e ao acúmulo de sacarose, uma vez que este é o ponto crítico no retorno econômico da atividade. A cana-de-açúcar possui duas fases no seu ciclo, primeiro com um intenso crescimento vegetativo e, segundo, a maturação ou acúmulo de sacarose, motivada pelo conjunto de fatores que afetam o desenvolvimento vegetativo, como queda na temperatura e escassez de água disponível (STUPIELLO, 1987). A maturação é um processo fisiológico afetado por vários fatores naturais, como a própria variedade, condições climáticas, tipo de solo e tratos culturais (FAUCONNIER e BASSEREAU, 1975). Sabe-se que as variedades comerciais de cana-de-açúcar têm comportamentos distintos, apresentando diferentes teores de sacarose, mesmo quando cultivadas nas mesmas condições, constituindo-se na base para o planejamento agrícola quanto à qualidade da matéria-prima, ao longo da safra (STUPIELLO, 1987).

A população de colmos e seu peso médio são os principais componentes da cultura possíveis de serem quantificados, pois apresentam maior correlação com a produtividade e podem ser utilizados

para estimar a produtividade dos ensaios de melhoramento e de talhões comerciais (GHELLER et al., 2002), porém este método exige equipes treinadas, tem alto custo e demanda muito tempo no caso de áreas extensas. Rudorff e Batista (1990) ressaltam a eminência de se estimar a produção de colmos a serem processados antes do início da colheita e concordam que a acurácia desta estimativa depende de pessoal tecnicamente experiente.

Com o exposto, observa-se a necessidade de métodos alternativos na sua avaliação com os quais se consiga obter informações mais abrangentes e com menor necessidade de análises laboratoriais. Nesse aspecto, o sensoriamento remoto orbital demonstra grande potencial na avaliação do comportamento espectral da cana-de-açúcar em levantamentos das áreas da cultura (SCHMIDT et al., 2001) e estimativas de produção (RUDORFF e BATISTA, 1990).

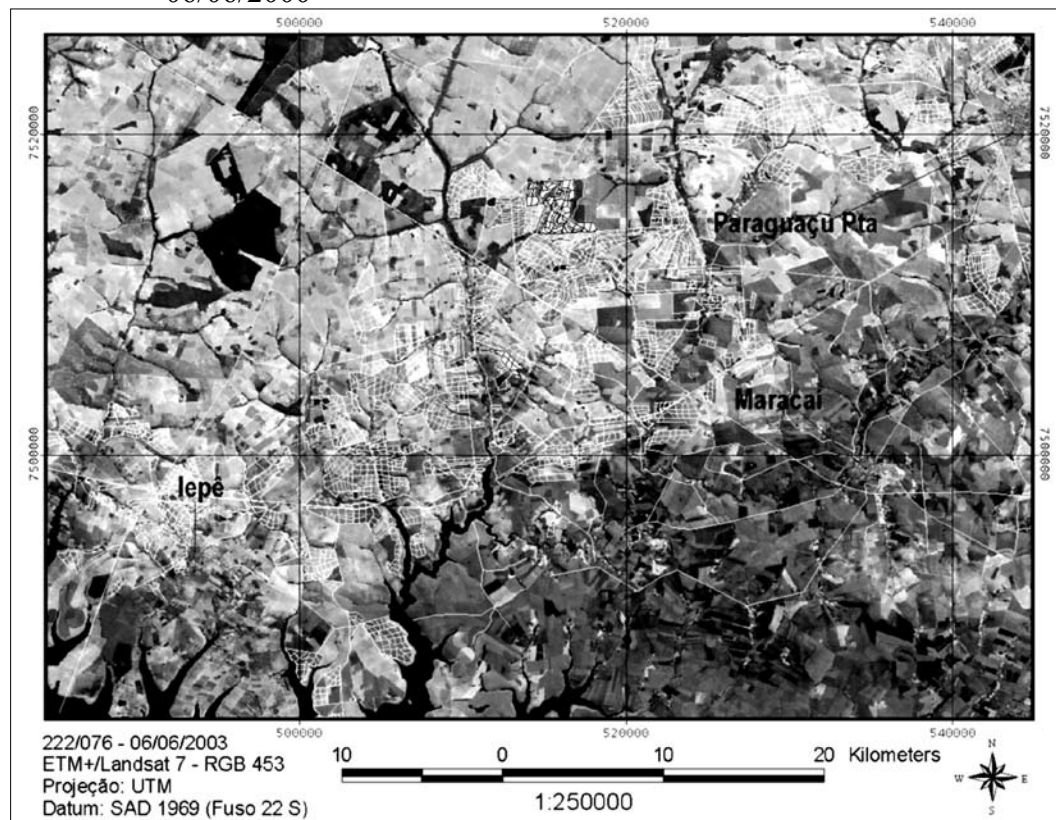
O objetivo deste trabalho foi a elaboração de uma metodologia para estimar a produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar, através de dados do sensor orbital ETM<sup>+</sup> do satélite LANDSAT 7.

## Material e Métodos

A área de estudo localiza-se a oeste do estado de São Paulo, no retângulo envolvente de coordenadas geográficas 22° 13' S/51° 08' O e 22° 45' S/50° 38' O, com altitude média de 410 m e abrange os municípios de Paraguaçu Paulista, Iepê e Maracá (Figura 1).

Na geologia, predomina a Formação Adamantina (Grupo Bauru) e em algumas

**Figura 1.** Composição falsa-cor (RGB-453) do ETM+ da área de estudo, 06/06/2000



Fonte: Os autores

áreas a Formação Serra Geral (Grupo São Bento), principalmente nos vales dos rios, como a Paranapanema (IPT, 1981). O solo dos talhões avaliados é classificado como Latossolo Vermelho de textura média (EMBRAPA, 2006). A área apresenta precipitação média anual de 1.400 a 1.600 mm e a temperatura média é de 22,5° C, com caracterização de déficit hídrico de junho a meados de setembro, com evapotranspiração da ordem de 1.050 mm (FRANÇA e DEMATTÊ, 1993).

A variedade de cana-de-açúcar estudada foi a RB835486, dada à sua importância na região e em virtude de ser uma variedade bem adaptada a tais

ambientes edáficos de produção, a qual apresenta alta produtividade em cana planta e soca alto teor de sacarose e precocidade (ARIZONO et al., 2000). Na maioria das áreas de produção contempladas neste trabalho, o plantio da variedade RB835486 ocorreu em meados de abril e maio, sendo colhida em junho e julho, com cerca de 14,5 meses em cana-planta, o que ressalta seu caráter precoce (Figura 2).

Utilizaram-se dados referentes a 70 talhões, em uma área de 764 ha de cana-de-açúcar da mesma variedade (RB835486) e nas mesmas condições edafoclimáticas, em um Latossolo Vermelho de textura média (EMBRAPA,

**Figura 2.** Canavial em plena maturação e detalhe da variedade RB835486



Foto: Os autores

2006) e mesmo estágio de corte (1º corte). Os talhões escolhidos foram plantados em meados de março até maio, como ciclo de 18 meses na cana-planta (Figura 1 e 2).

Utilizou-se a imagem do sensor ETM<sup>+</sup> do LANDSAT 7, órbita ponto WRS 222/76 de 6 de junho de 2000, no início da colheita dos talhões da variedade estudada. As bandas utilizadas foram: B1 (azul 450-520 nm), B2 (verde 520-600 nm), B3 (vermelho 630-690 nm), B4 (infravermelho próximo 770-900 nm), B5 (infravermelho médio 1550-1750 nm) e B7 (infravermelho médio 2090-2350 nm). Além dos valores espectrais das bandas foram criadas, mais seis imagens índice de vegetação (IV), a saber: NDVI, GVI, SAVI, RVI, RATIO e GNDVI (BANNARI et al., 1995; GITELSON et al., 1996; THENKABAIL et al., 2002). Foram observados os valores espectrais médios dos *pixels* dos talhões nas imagens das bandas e dos IV's.

A correção atmosférica foi realizada através do modelo "5S" – Simulation of

Satellite Signal in the Solar Spectrum (TANRÉ et al., 1990) e em seguida os dados da imagem foram convertidos e normalizados em fator de reflectância, como descrito por Epiphanyo e Formaggio (1988). Após este processo, o nível de cinza zero presente na imagem passou a corresponder à reflectância real 0% e o nível 255 à reflectância real 100%.

A correção geométrica foi realizada no programa Environment for Visualizing Images 3.6 (ENVI, 2003); para isto, foram coletados pontos de controle na região de abrangência da área de estudo, com um DGPS de erro submétrico e pós-processado, de acordo com procedimentos descritos por Lillesand e Kiefer (2000).

Elaborou-se um banco de dados em ambiente SIG - Sistema de Informações Geográficas, (ESRI© ArcView GIS 3.2) constituído de: mapas planimétricos digitais com a área dos talhões, classe de solos e variedade de cana-de-açúcar cultivada; planilhas contendo produtividade média (Mg ha<sup>-1</sup>), produção total de cana (Mg) estágio de corte e

características tecnológicas (Brix°, pol% caldo, pol % cana, fibra %, pureza%, umidade %) médias dos talhões referentes à safra 2000/01, idade dos canaviais em meses e datas de colheita.

Os contornos dos talhões de cana-de-açúcar foram vetorizados manualmente sobre a tela e posteriormente sobrepostos às imagens e ao mapa de solos da região no programa ArcView GIS 3.2 (ESRI, 1996). No SIG, relacionaram-se os atributos de rendimentos agroindustriais do banco de dados aos seus respectivos talhões, representados por entidades poligonais e estes foram considerados repetições. A escolha da data da imagem deu-se em função da menor cobertura por nuvens da região de estudo no meio da safra (ALMEIDA et al., 2002).

Dois métodos foram testados para aquisição dos dados espectrais de cada talhão: o de médias aritméticas e o de médias ponderadas, para o que as bordas dos talhões foram desprezadas, pois sofrem grande influência espectral dos carregadores.

O primeiro método foi obtido a partir da média aritmética entre os valores espectrais dos *pixels* dos talhões em cada uma das seis bandas, dividido pelo número de *pixels* contido nesses talhões; no segundo, as médias ponderadas foram obtidas através de uma classificação não supervisionada, visando mapear diferenças do dossel dentro dos talhões, utilizando-se o classificador “K-means” do programa ENVI 3.6. (*Environment for Visualizing Images*). Este procedimento distribui classes espectrais de maneira uniforme no espaço para, em seguida, aglomerar classe por classe, em um processo iterativo (repetitivo), usando-se

a técnica de distância mínima (ENVI, 2003). Para este trabalho foram definidas o número de sete classes e quatro iterações. Procedeu-se a uma aferição visual entre as classes espectrais geradas e os mapas de produtividade ( $Mg\ ha^{-1}$ ) no programa ArcView GIS 3.2, buscando correlacioná-las com a produtividade real dos talhões (TCH) observada no banco de dados.

Cada talhão foi avaliado quanto aos valores médios de reflectância nas seis bandas do sensor e aos seis índices de vegetação médios. Os valores de reflectância final dos talhões foram obtidos e ponderados através do valor médio de cada classe e da porcentagem que estas ocupavam da área dos talhões; portanto, cada talhão teve um valor espectral médio das observações para as seis bandas e para os seis índices de vegetação e para as duas metodologias de coleta de dados. Os dados relativos aos dois métodos de coleta de informações espectrais foram utilizados para elaboração de modelos de estimativa dos atributos agroindustriais dos talhões, individualmente, constituindo dois resultados, com o intuito de se comparar qual método de coleta proporcionou melhores resultados.

Para a análise estatística foram geradas equações de regressão múltipla para gerar os modelos de estimativa da produtividade ( $Mg\ ha^{-1}$ ) e características tecnológicas dos talhões (Brix°, pol % caldo, pol % cana, fibra %, umidade %, pureza %, e impureza %) utilizando-se como variáveis independentes, os valores médios de reflectância das bandas do sensor ETM<sup>+</sup>/LANDSAT 7 e dos índices de vegetação. Esta análise foi realizada a partir do procedimento REG do Statistical

Analysis System (SAS, 1999) e a seleção de variáveis através de *stepwise*.

**Resultados e Discussão**

Nas tabelas 1 e 2, encontram-se as equações de regressão múltipla obtidas através dos dados orbitais ETM+/LANDSAT 7 para estimar as características agroindustriais da cana-de-açúcar a saber: produtividade agrícola (Mg ha<sup>-1</sup>), Brix° (BRX), pol % caldo (POL), pol% cana (PCC), fibra% (FBR), pureza% (PZA), umidade% (UMD) e impurezas% (IMP), utilizando-se duas metodologias de amostragem de dados espectrais: as médias ponderadas e as aritméticas.

Nota-se que o método de coleta dos dados espectrais tem influência na estimativa de características agroindustriais de talhões de cana-de-açúcar. De maneira geral, os atributos dos setenta talhões analisados foram melhor estimados quando se realizou a coleta dos dados espectrais

pelo método da média aritmética dos pixels. Os trabalhos recentes indicam que os índices de vegetação (IV's) são dados relacionados à produtividade agrícola das culturas (THENKABAIL et al., 2002), mas também notou-se sua participação na confecção dos modelos de estimativa para os atributos tecnológicos (Tabela 2).

Os dados que compuseram as equações representam a média ponderada das observações das sete classes espectrais contidas nos talhões de estudo, obtidas através do classificador não supervisionado “K-means” do ENVI 3.6 (ENVI, 2003). O resultado de R<sup>2</sup> para TCH foi 0,52 e em média 0,38 para as características tecnológicas (Tabela 1). Wiegand et al. (1996) realizaram o mesmo procedimento de classificação não supervisionada, buscando correlacionar os resultados espectrais do satélite SPOT com padrões da cultura de cana-de-açúcar sob stress em solos salinos.

**Tabela 1.** Equações dos atributos agroindustriais de cana-de-açúcar, através dos dados espectrais e índices de vegetação coletados através de médias ponderadas das classes

Atributo <sup>(1)</sup>	Equações Múltiplas <sup>(2)</sup>	R <sup>2</sup>
TCH Real	- 245,35 + 370,66*GNDVI + 627,43*B5 - 142,31*RVI	0,52
BRX	19,53 - 54,54*B7 + 83,30*B2	0,57
POL	22,05 - 85,87*B5 + 160,50*B2 + 10,81*RVI	0,59
PZA	94,17 - 81,16*B5 - 44,63*B4 - 664,53*B1 + 422,97*B2	0,22
PCC	31,20 + 39,91*B4 - 68,90*B5 - 24,04*NDVI	0,51
UMD	96,33 - 33,81*B4 + 74,29*GNDVI + 195,03*B7 - 134,46*RVI - 60,09*SAVI + 0,04*GVI	0,62
FBR	2,41 - 392,25*B1 + 197,40*B2	0,30
IMP	- 0,37 + 6,90*RVI	0,10

Notas: (1) CH: Mg de cana/ha; BRX: Brix°; POL: pol% caldo; PZA: pureza%; PCC: pol% cana; UMD: umidade%; FBR: fibra%; IMP: impureza%. (2) Bandas do Sensor ETM+ (nm): B1 (450-520); B2(520-600); B3 (630-690); B4 (770-900); B5 (1550-1750); B7 (2090-2350) e Índices de Vegetação: NDVI = (NIR - R) / (NIR + R); RATIO = R/NIR; RVI = NIR/R; GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G); SAVI = (1 + L)(NIR - R) / (NIR + R + L), L = 0,5; GVI = - 0,24717\*B1 - 0,16263\*B2 - 0,40639\*B3 + 0,85468\*B4 + 0,005493\*B5 - 0,11749\*B7.

Fonte: Os autores

**Tabela 2.** Equações dos atributos agroindustriais de cana-de-açúcar, através dos dados espectrais e índices de vegetação coletados através de médias aritméticas dos *pixels* dos talhões

Atributo <sup>(1)</sup>	Equações Múltiplas <sup>(2)</sup>	R <sup>2</sup>
TCH Real	$79,97 + 175,68*B1 - 218,79*B7 + 99,59*B2 + 0,48*GVI$	0,69
BRX	$24,77 - 0,12*B3 - 25,26*GNDVI + 19,11*NDVI$	0,56
POL	$- 2,02 + 33,36*B4 + 41,56*B7 + 0,07*GVI - 4,43*B1 + 18,37*B5 - 0,06*B3$	0,74
PZA	$52,07 - 15,09*B1 + 98,98*B7 + 93,72*B4$	0,63
PCC	$0,28 + 24,84*B4 + 27,70*B7 + 0,04*GVI - 0,05*B3 + 15,34*B5$	0,62
UMD	$39,40 + 10,75*B1 - 44,06*B7 - 35,24*B4 + 47,20*GNDVI + 43,24*RVI + 0,12*B3 + 9,23*B2$	0,64
FBR	$22,09 - 11,32*B1 + 11,60*B7 - 8,40*B2 - 29,70*GNDVI + 17,48*NDVI$	0,42
IMP	$3,28 - 0,05*GVI$	0,09

Notas: (1) TCH: Mg de cana/ha; BRX: Brix°; POL: pol% caldo; PZA: pureza%; PCC: pol% cana; UMD: umidade%; FBR: fibra%; IMP: impureza%. (2) Bandas do Sensor ETM+ (nm): B1 (450-520); B2(520-600); B3 (630-690); B4 (770-900); B5 (1550-1750); B7 (2090-2350) e Índices de Vegetação: NDVI = (NIR - R) / (NIR + R); RATIO = R/NIR; RVI = NIR/R; GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G); SAVI = (1 + L)(NIR - R) / (NIR + R + L), L = 0,5; GVI = - 0,24717\*B1 - 0,16263\*B2 - 0,40639\*B3 + 0,85468\*B4 + 0,005493\*B5 - 0,11749\*B7.

Fonte: Os autores

Para TCH, o modelo contemplou o RVI, além da banda B5 e o GNDVI. O resultado desta estimativa obteve R<sup>2</sup> de 0,52 (Tabela 1). O GNDVI (GITELSON et al., 1996) incorpora no cálculo do NDVI a banda B2 (verde 520-600 nm), ao invés da B3 (vermelho 630-690 nm). O uso de bandas espectrais das regiões azul (500 nm) e verde (550 nm) é desejável no estudo de vegetação, como ressaltam Gitelson et al. (2002).

A variedade RB835486 apresenta colmos pesados que se acamam com facilidade em condições de cana-planta, ou seja, apresentam baixa densidade de carga (ARIZONO et al., 2000), recomendando-se, então, seu plantio em áreas próximas à indústria. A imagem utilizada no trabalho foi a da época de colheita desta variedade, que se encontrava em estágio adiantado de maturação; portanto, é de se esperar que algumas informações referentes à produtividade agrícola sejam mascaradas

em imagens tardias por palha, colmos e até mesmo solo, assim como ressaltou Pellegrino (2001), utilizando a mesma variedade, porém com o sensor AVHRR/NOAA-5 que é de menor resolução espacial (*pixels* de um quilômetro).

De forma geral, as equações de estimativa dos parâmetros tecnológicos apresentaram melhores resultados de R<sup>2</sup> que os de TCH (Tabela 1). A estimativa do Brix (BRX) obteve R<sup>2</sup> = 0,57, considerado regular, em se tratando de uma característica intrínseca ao caldo da cana e o sensor utilizado serem orbital.

A equação da pol% (POL) caldo pelo método de coleta das médias ponderadas contemplou, em seus cálculos, as bandas B2 e B5, relacionadas à reflexão verde da vegetação e à umidade das folhas, juntamente com o RVI (Tabela 1). O resultado obtido (R<sup>2</sup> = 0,59) foi considerado satisfatório, uma vez que é



esta uma medida do teor de sacarose do caldo dos colmos (STUPIELLO, 1987). Vários autores elucidam que podem ser detectadas diferenças sutis nas respostas espectrais de tecidos vegetais quando em maturação, devido ao acúmulo de substâncias (no caso da cana de açúcar, a sacarose) e diminuição dos teores de amido nas folhas (FOURTY e BARET, 1998; CURRAN et al., 2001).

A pureza% (PZA) é a razão entre brix e sacarose, ou seja, a porcentagem dos açúcares presentes no caldo, que é realmente a sacarose, e não glicose, frutose e dextrana (STUPIELLO, 1987). O  $R^2 = 0,22$  indica baixa performance na estimativa e as variáveis que participaram da composição da equação foram as bandas B1, B2, B4 e B5 e nenhum IV (Tabela 1).

A equação da pol% cana (PCC) foi obtida através das bandas B4, B5 e do NDVI. O resultado de estimativa para este parâmetro foi  $R^2 = 0,51$  (Tabela 1). Este atributo, por sua vez, é calculado em função da pol% caldo (POL) e da fibra% (FBR), segundo CESAR e SILVA (1993).

A umidade% (UMD) foi o parâmetro que obteve o melhor resultado  $R^2 = 0,62$  na estimativa e contemplou as bandas B4 e B7, além dos IV's GNDVI, RVI e SAVI. A banda B4 está relacionada ao vigor da vegetação (PONZONI, 2001), mas o comprimento de onda também é utilizado para determinar diretamente a qualidade da matéria-prima (FERNANDES e SOUZA, 1997). A banda B7 está relacionada à umidade dos tecidos vegetais e obteve grande peso na equação de estimativa para este parâmetro (Tabela 1). Na equação do parâmetro fibra%, as variáveis relevantes para o modelo foram às bandas B1 e B2, e resultado regular  $R^2 = 0,30$  (Tabela 1).

A impureza % (IMP) também não apresentou bons resultados de estimativa ( $R^2 = 0,10$ ) e somente a variável RVI entrou na composição da equação (Tabela 1). Ressalta-se que todas as características tecnológicas são medidas de qualidade da matéria-prima, ou seja, dos colmos entregues à indústria. Outro fato é que os dados utilizados são de pós-colheita e a medição dos dados radiométricos foi realizada pelo sensor enquanto a cultura ainda estava no campo.

Para o método de coleta de dados de médias aritméticas dos talhões avaliados, as características agroindustriais da cana-de-açúcar foram estimadas com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,69 para TCH ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e em média 0,53 para os atributos tecnológicos (Tabela 2). Os IV's que se destacaram nos modelos de estimativa agroindustrial foram o GVI (THENKABAIL et al., 2002) com cinco ocorrências, e o GNDVI (GITELSON et al., 1996) que ocorreu em três das onze equações deste método (Tabela 2).

Almeida et al. (2002) elucidam que a avaliação comparativa de vigor de canaviais através de dados espectrais deve ser aplicada somente a talhões de mesma variedade e idade, que foi o caso deste trabalho com a variedade RB835486 no estádio de primeiro corte; este fato concorda com Rudorff et al. (1995) que comentam que o emprego de variáveis qualitativas sobre os modelos, como a variedade e o estádio de corte, melhoram a relação entre a produtividade observada e os índices de vegetação obtidos das imagens de satélite. Usando somente o RVI, os autores obtiveram uma melhora no  $R^2$  de 0,13 para 0,41 com o emprego de variáveis qualitativas (variedade

tipo e estágio de corte) nos modelos de estimativa de produtividade.

As bandas que foram integrantes principais dos modelos em termos de ocorrência nas onze equações de estimativa agroindustrial foram: B1 e B7 com seis, B4 com quatro, B2 e B3 com três ocorrências, respectivamente (Tabelas 1 e 2). Embora se saiba que a quantidade de biomassa da vegetação é bem relacionada com a banda B4 (EIPHANIO e FORMAGGIO, 1991), esta não foi a principal componente das equações (Tabela 2), estando ausente, até mesmo, no modelo de estimativa de produtividade agrícola (TCH), o qual pode estar relacionado à senescência das folhas, menor atividade fotossintética e menor acúmulo de água no mesófilo das folhas, resultando em variações nas respostas espectrais não referentes à quantidade de biomassa (WIEGAND et al., 1996). A imagem utilizada para este trabalho foi de junho de 2000, mês em que se inicia a colheita da variedade RB835486. Gitelson et al. (2002) afirmam que existem respostas espectrais dos vegetais importantes nos comprimentos de onda 550 e 700 nm (verde e *red edge*) e ressaltam a necessidade de estudos em outros comprimentos de onda, além das bandas B4 e B3.

A produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar é função de muitos fatores de produção, sendo os principais a radiação interceptada, temperatura e precipitação no período de desenvolvimento, aptidão varietal e ambiente edáfico de produção (MUCHOW et al., 1994) e a maior parte das áreas utilizadas no trabalho se localizam perto da indústria, ou seja, são fertilizadas com resíduos

agroindustriais (torta de filtro e vinhaça), o que proporciona maior vigor vegetativo e, conseqüentemente, maior acamamento dos colmos; isto também interfere nas respostas captadas pelos sensores, como constataram Almeida et al. (2002).

Para o modelo de produtividade agrícola (TCH), as variáveis que compuseram o modelo foram às bandas B1, B7, B2 e o índice de vegetação GVI. Gitelson et al. (2002) definem a produtividade de uma cultura, como o produto da energia solar captada ao longo da estação de desenvolvimento e a eficiência com que essa energia é convertida em biomassa, concordando com Muchow et al. (1994). As bandas B1 e o índice de vegetação GVI contemplam a absorção pela clorofila/carotenóides e as principais variáveis espectrais referentes à vegetação, respectivamente.

Segundo Muchow et al. (1994), o principal fator intrínseco à planta responsável pela elevada produção vegetal é o IAF (Índice de Área Foliar), que varia entre as cultivares. A arquitetura foliar da cana-de-açúcar apresenta uma disposição vertical das folhas em relação ao colmo, refletindo em maior capacidade fotossintética, pois proporciona maior incidência da luz no dossel da cultura que, geralmente, possui alta densidade populacional (MACHADO et al., 1985).

O BRX foi estimado com um  $R^2$  de 0,56 e o modelo foi composto pela banda B3 e os índices GNDVI e NDVI. O BRX é o teor de sólidos solúveis totais presentes no caldo da cana e é o atributo primordial quando se pretende acompanhar o estágio de maturação da matéria-prima (STUPIELLO, 1987).

O estágio de maturação é verificado principalmente pelos teores de sacarose, de açúcares redutores e umidade que os colmos apresentam no decorrer do período da safra (STUPIELLO, 1987).

O modelo de estimativa da PCC obteve  $R^2$  de 0,74 e foi o melhor resultado de estimativa deste estudo (Tabela 2). Pellegrino (2001) enumera que o ponto ótimo de se estimar a safra de cana deve situar-se próximo à metade do ciclo e/ou em algum ponto no qual fatores edafoclimáticos adversos não teriam influência na produtividade final. Obteve-se um  $R^2$  para a PCC superior ao de estimativa de produtividade agrícola (TCH),  $R^2 = 0,69$ , indicando que dados espectrais de épocas tardias podem indicar a maturação de culturas, como a cana-de-açúcar, conforme ressaltam Fourty e Baret (1998) e Curran et al. (2001).

Os demais atributos, como PZA, PCC e UMD, embora sejam função do BRX e da POL também obtiveram coeficientes de determinação acima de 0,50, enquanto o  $R^2$  para fibra% foi 0,42. O resultado de  $R^2$  para o modelo de estimativa de impurezas% (IMP) não foi satisfatório para ambas as metodologias de coleta de dados em razão de se tratar de uma característica da matéria-prima e é função do tipo e condições que se procede a colheita (CESAR e SILVA, 1993), ou seja, não pode ser determinada com a matéria-prima ainda no campo; somente após o carregamento e o transporte.

Ressalta-se que todas as características tecnológicas são inerentes à qualidade da matéria-prima (colmos) que vai para a indústria e qualquer avaliação orbital é uma medição

indireta da qualidade da produção. A qualidade tecnológica da matéria-prima a ser industrializada depende de fatores bióticos (variedade, florescimento, moléstias, respiração e transpiração dos colmos após o corte, tempo médio de permanência no campo e decomposição microbiana) como abióticos (tipo de colheita, solo, condições agroclimáticas no momento da colheita, carregamento e transporte da matéria-prima) (CESAR e SILVA, 1993). Quanto maior o intervalo de tempo entre o corte e a moagem maiores também serão as perdas de sacarose. Para este trabalho, os valores de permanência da matéria-prima no campo estavam abaixo de cinquenta hectares, o que é preconizado pela maioria das indústrias; portanto, este não foi mais um fator externo que comprometesse a qualidade da matéria-prima.

Almeida et al. (2002) ressaltam que dados de sensoriamento remoto, de histórico e avaliações de campo, possibilitam a criação de classes (padrões) para interpretação das imagens e tomada de decisão, razão por que se pretendeu estabelecer, pela classificação não supervisionada e banco de dados, padrões espectrais dos talhões e os atributos de produtividade agroindustrial da matéria-prima neles contida, na ocasião da passagem do sensor.

Conforme Muchow et al. (1994), a biomassa de cana-de-açúcar é função da quantidade de radiação interceptada e da eficiência do uso desta radiação, ou seja, o desempenho fotossintético. Modelos estatísticos de crescimento de cana-de-açúcar que contemplam variáveis, como eficiência fotossintética e interceptação da radiação, são confiáveis apenas

para os dados locais, não podendo ser extrapolados para outras regiões diferentes daquelas em que as relações de regressão foram desenvolvidas. Embora não tenha sido contemplado no trabalho desses autores, outro fator de determinação de produtividade econômica de cana-de-açúcar é a quantificação da partição da biomassa em sacarose que constitui uma das pretensões deste trabalho. Assim como no presente trabalho, os autores também avaliaram a cana-de-açúcar cultivada em abril e irrigada com diferentes lâminas de irrigação e concluíram que o acúmulo de biomassa cessa bem antes do período de colheita, cerca de doze meses após o plantio, sendo que a variedade foi colhida aos 15,5 meses. A radiação solar interceptada pela cultura, porém, continua, mesmo após o final do período vegetativo, o que pode acarretar diferenças nas respostas espectrais captadas pelo sensor orbital (GITELSON et al., 2002) isso pode explicar a participação das bandas B1 e B3 na maioria das equações, para o método das médias aritméticas (Tabela 1).

No presente trabalho, obteve-se  $R^2 = 0,52$  e  $0,69$  para a estimativa de TCH, nos métodos de médias ponderadas e aritméticas, respectivamente. No caso deste estudo, as respostas espectrais dos talhões foram influenciadas provavelmente, pela presença de palha e folhas secas devido ao adiantado estágio de maturação na ocasião de passagem do sensor e ao intenso acamamento que a variedade possui, justificando, assim, os valores de estimativa de produtividade obtidos (Tabelas 1 e 2) serem menores ou iguais aos dos outros trabalhos, como Rudorff e Batista (1990) que obtiveram

baixos valores de  $R^2$  ( $0,14$  a  $0,59$ ) quando utilizaram somente o RVI para compor as estimativas de produtividade em três anos de safra; eles obtiveram, ainda, uma melhora no  $R^2$  para  $0,50$  a  $0,69$  quando utilizaram dados meteorológicos em conjunto com o modelo espectral. Wiegand et al. (1996) obtiveram  $R^2$  de  $0,77$  para a produtividade total em relação ao NDVI de imagens SPOT que apresentam melhor resolução espacial. Ressalta-se que os autores realizaram coletas de tecidos vegetais e solos no campo para obter padrões e calibrar os dados de sensor orbital, concordando com Schmidt et al. (2001).

Para este trabalho não houve avaliações no campo e foram utilizados os dados históricos da unidade produtora. Os dados, embora confiáveis podem estar sujeitos a falhas, concordando com Almeida et al. (2002), referidos autores ressaltam que imagens muito precoces não são adequadas para estimar a produtividade, uma vez que a cultura não atingiu o desenvolvimento mínimo que assegure seu status na ocasião da colheita; entretanto, em imagens tardias a cana pode tombar, o que dificulta a interpretação dos dados da imagem e pode ser uma explicação do porquê a banda B4 não participou na composição dos modelos de TCH; outro aspecto é que, apesar das avaliações deste trabalho terem sido baseadas apenas em dados espectrais, teve-se preocupação com a estimativa da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, ausente nos trabalhos anteriormente citados.

Comparando-se os métodos de coleta de dados da imagem, o BRX e a UMD foram os parâmetros que

apresentaram resultados de estimativa semelhantes em ambos os métodos. Para o BRX se obteve  $R^2$  de 0,56 e 0,57 e, para umidade 0,64 e 0,62 para os métodos de médias ponderadas e aritméticas, respectivamente. O BRX é o teor de sólidos solúveis (açúcares, sais e cinzas) presentes no caldo e a umidade é o teor de água da matéria-prima entregue à indústria. A estimativa da PCC apresentou melhor resultado no método das médias aritméticas com  $R^2$  0,74 contra 0,59 quando utilizados dados médios ponderados dos talhões (STUPIELLO, 1987).

APCC apresentou melhor estimativa no método das médias aritméticas com  $R^2 = 0,62$ , enquanto no outro método este resultado caiu para  $R^2 = 0,51$ . A FBR também indicou melhor resultado no método das médias aritméticas em relação ao das médias ponderadas, embora tenha sido considerado baixo ambos os casos, com  $R^2 = 0,42$  para o primeiro contra  $R^2 = 0,30$  para o segundo método. APZA é a relação entre o teor de POL e o BRX (STUPIELLO, 1987) e sua estimativa adequada somente no método das médias aritméticas, com  $R^2 = 0,63$  contra 0,22 para o outro método.

A IMP foi o parâmetro com menor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) nos dois casos, com tendência de baixa confiabilidade na estimativa com  $R^2$  de 0,09 nas duas situações de coleta de dados. Este resultado era previsto

uma vez que tal parâmetro tecnológico é função do tipo de colheita (crua ou queimada) e das condições climáticas em que se procede a colheita/carregamento da matéria-prima (CONSECANA, 1999).

## Conclusões

1. É possível estimar a produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar pelos dados orbitais do ETM+/LANDSAT 7 com uma acurácia de 70%. Porém, para características que são indiretamente ligadas à qualidade de matéria-prima e inerentes ao processo de colheita como impurezas minerais (IMP), a estimativa obteve acurácia inferior a 10%

2. Imagens tardias são adequadas para estudos de características tecnológicas da cultura da cana-de-açúcar embora tais parâmetros sejam inerentes à matéria-prima e, portanto, obtidas indiretamente por sensores orbitais.

3. O melhor método de coleta de informações espectrais, entre os testados, foi o das médias aritméticas, em relação aos dados coletados através de uma classificação não-supervisionada.

## Agradecimentos

À Cocal Açúcar e Alcool, pelo banco de dados e recursos para elaboração deste trabalho; à FAPESP, pelo auxílio à pesquisa (Processo nº 2002/09050-6) e a CAPES, pela bolsa de mestrado do primeiro autor.

## Referências

ALMEIDA, T. I. R.; ROSSETO, R.; SOUZA FILHO, C. R. Imagens ASTER e LANDSAT ETM aplicadas à previsão de safra de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: discussão metodológica e primeiros resultados. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8., 2002, Recife. *Anais...* Recife: STAB, 2002. p. 488-492.

ARIZONO, H.; GHELLER, A. C. A.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H. P.; BASSINELO, A. I.; GIGLIOTI, E. E.; MENEZES, L. L.; MATSUOKA, S. *Guia das principais variedades de cana-de-açúcar RB 2000*. Araras: UFSCar/CCA/DBV, 2000. 12p.

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, Lausanne, v.13, p.95-120, 1995.

CESAR, M. A.; SILVA, F. C. *A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira*. Piracicaba: ESALQ, 1993. 108p.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CONSECANA-SP. *Manual de Instruções*. Piracicaba: CONSECANA, 1999. 92p.

CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L.; PETERSON, D. L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.76, p.349-359, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Serviço de Produção, 2006. 306p.

ENVIRONMENT FOR VISUALIZING IMAGES – ENVI. ENVI 3.6 *Manual de instruções em português*. Disponível em: <<http://www.sulsoft.com.br>>. Acesso em: 20 jun. 2003.

ENVIRONMENT SYSTEM RESEARCH INSTITUTE - ESRI. *ArcView GIS 3.2 – The geographic information system for everyone*. ESRI: Thomas G. Lane, 1996. 254p.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 1988. p.400-405.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto de três parâmetros agrônômicos de trigo e de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.26, n.10. p.1616-1624, 1991.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. *La caña de azúcar: técnicas agrícolas y producciones tropicales*. Barcelona: Blume, 1975. 433p.

FERNANDES, A.; SOUZA, P. F. Análise direta da cana-de-açúcar em ensaios de competição de variedades através do NIR. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRÔNOMICA, 7., 1997, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. p.37-44.

FOURTY, T.; BARET, F. G. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.19, p.1283-1297, 1998.

FRANÇA, G. V.; DEMATTÊ, J. A. M. Levantamento de solos e interpretação fotográfica dos padrões de drenagem desenvolvidos em solos originados do Arenito Bauru. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 77-86, 1993.

GHELLER, A. C. A.; MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; NASCIMENTO, R. Metodologia para estimativa da produtividade industrial da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8., 2002. Recife. *Anais...* Recife: STAB, 2002. p.483-486.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.58, p.289-298, 1996.

GITELSON, A. A.; STARK, R.; GRITS, U.; RUNDQUIST, D.; KAUFMAN, Y.; DERRY, D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.23, n.13 p.2537-2562, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, DMGA, 1981. 1 mapa: color., [s., d.]. 1:500.000, v.1 (texto) e v.2 (mapa), 126 p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and Image interpretation*. New York: John Wiley, 2000. 724p.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; CAMARGO, M. B. P.; FAHL, J. I. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. *Bragantia*, Campinas, v.1, p.229-238, 1985.

MUCHOW, R. C.; SPILLMAN, M. F.; WOOD, A. W.; THOMAS, M. R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, Collingwood, v.45, p.37-49, 1994.

PELLEGRINO, G. Q. *Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa de fitomassa de cana-de-açúcar*. 2001. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola/ Universidade Estadual de Campinas, FEAGRI/UNICAMP, Campinas.

PONZONI, F. J. *Comportamento espectral da vegetação*. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. S. Sensoriamento remoto: Reflectância de alvos naturais. Brasília: UnB; Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2001. 262p.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.33, p.183-193, 1990.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G. T.; LEE, D. C. L. The contribution of qualitative variables to a sugarcane yield model based on spectral vegetation index. In: SIMPOSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, México. *Anais...* Guadalajara: Lemon, 1995. p.705-708.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE – SAS. *SAS Software: User's guide* version 8.2. Cary, 1999. 291p.

SCHMIDT, E. J.; GERS, C.; NARCISO, G.; FROST, P. Remote sensing in the south African Sugar Industry. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 24., 2001, Brisbane. *Proceedings...* Austrália: PK Editorial Services, 2001. p.241-246.

STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria prima. In: PARANHOS, S. B. (Ed.) *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. São Paulo: Fundação Cargill, 1987. v.2, p.761-804.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; DAHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P. Y. Technical Note: Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: The 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.11, p.659-668, 1990.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; PAUW, E. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Bethesda, v.68, p.607-621, 2002.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – ÚNICA. *Estimativa da Safra 2009/2010*. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/multimedia/>>. Acesso em: 01 fev. 2009.

WIEGAND, C.; ANDERSON, G.; LINGLE, S.; ESCOBAR, D. Soil Salinity Effects on crop growth and yield – Illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. *Journal of Plant Physiology*, Jena, v.148, p.418-424, 1996.