

ISSN 0104-1347

Estimativa do índice de área foliar e da massa seca de colmos da cana de açúcar a partir de dados espectrais de campo

Sugarcane leaf area index and dry matter estimation from field spectral data

Giampaolo Queiroz Pellegrino¹, Hilton Silveira Pinto², Jurandir Zullo Júnior²,
CarlosAlberto Soares de Almeida²

Resumo: Na hipótese de que é possível estimar o índice de área foliar (IAF) ou a Massa Seca de Colmos (MSC), a partir de dados espectrais, coletaram-se dados de campo para se estabelecerem modelos que correlacionem índices espectrais de vegetação (IVs) com o IAF e com a produção de MSC. Ajustes de curvas correlacionando IAF a dezesseis tipos de IVs apresentaram R^2 em torno de 0,65. Regressões lineares múltiplas correlacionando MSC aos mesmos IVs e ao número de dias após o início do ciclo (D) apresentaram R^2 em torno de 0,83. Os autores sugerem que a definição de equações combinando D e IVs pode propiciar a utilização de imagens de satélites no monitoramento e previsão da produção final da cultura em outras áreas e variedades.

Palavras-chave: índice de vegetação, IVDN, radiometria de campo, análise de crescimento, biomassa, índice de área foliar, cana-de-açúcar.

Abstract: Field spectral conditions were monitored under the hypothesis that it is possible to estimate Leaf Area Index (LAI), or even Sugarcane Dry Matter (SDM), from spectral vegetation indexes (VIs). Curve adjusts for LAI and sixteen VI types produced R^2 close to 0.65. Multiple linear regression presented R^2 close to 0.83 when correlating these VI types and the number of growing days (GD) to SDM. Authors suggest that equations combining GD and VIs can help yield monitoring and prediction using remote sensing for other areas and varieties.

Key-words: vegetation index, NDVI, field radiometry, growth analysis, biomass, leaf area index, sugarcane.

¹ Dr./ Embrapa Informática Agropecuária. E-mail: giam@cnptia.embrapa.br

² Dr./ Cepagri-Unicamp

Introdução

A importância da cultura da cana-de-açúcar, tanto como alimento quanto como biocombustível alternativo ao uso de combustíveis fósseis, tem crescido substancialmente com a retomada de programas federais de estímulo à produção do álcool combustível e reforça o interesse na previsão de sua fitomassa final, como ferramenta de planejamento político e econômico. Tradicionalmente, e para diversas culturas, a previsão da produção final tem sido realizada por meio de métodos agrometeorológicos que relacionam as deficiências hídricas ao longo do ciclo com a diminuição na produção final da cultura.

Porém, nas últimas décadas, técnicas de sensoriamento remoto também vêm sendo aplicadas com esse fim, permitindo um monitoramento mais freqüente das condições de campo, sendo aplicadas em estudos da superfície vegetada, no mapeamento e na identificação das diferentes coberturas do solo, bem como na estimativa da produtividade. O princípio utilizado para o estudo da vegetação por sensoriamento remoto é a existência de relações entre respostas radiométricas de um dossel de plantas e os parâmetros que caracterizam o estado de crescimento da cultura. As respostas radiométricas são captadas pelos sensores dos aparelhos de campo ou dos satélites e utilizadas para inferir dados a respeito do crescimento da vegetação.

Segundo WIEGAND & RICHARDSON (1990), os dosséis podem ser monitorados a partir de dados espectrais e suas características podem ser expressas por índices de vegetação (IVs). Essa transformação dos dados espectrais em IVs é necessária para minimizar a influência de fatores externos que provocam perturbações nas respostas radiométricas de um dossel de plantas, tais como irradiações e reflexões de outros corpos, propriedades óticas do solo e da liteira e ângulo de iluminação e de visada. Vários IVs têm sido propostos pela literatura especializada, buscando minimizar cada vez mais o efeito desses fatores externos à cultura.

De maneira geral, os IVs são combinações de duas bandas do espectro eletromagnético, o vermelho (V) e o infravermelho próximo (IVP), nas quais a vegetação apresenta características bem distintas. Eles têm sido estudados desde o final da década de sessenta e vêm recebendo melhorias ao

longo dos anos. Alguns autores (BARET & GUYOT, 1991; EASTMAN, 1999; MOREIRA, 2000) apresentam um breve histórico da evolução desses índices e de sua aplicação. Alguns exemplos são a estimativa da quantidade de energia fotossinteticamente ativa e atividade fotossintética (BARET & GUYOT, 1991; WIEGAND et al., 1991), do índice de área foliar (ASRAR et al., 1984; CLEVERS, 1989; GUTMAN, 1991; GOWARD et al., 1991; CASANOVA et al., 1998), da biomassa, ou fitomassa, e da produção de culturas (BERNET & THOMPSON, 1982; ASRAR et al., 1985; CASANOVA et al., 1998; UNGANAI & KOGAN, 1998). Outros trabalhos utilizando dados de satélites tiveram como objetivo determinar a relação entre o fator de refletância espectral e o IV (GALLO & EIDENSHINK, 1988; GUTMAN, 1987; GUTMAN, 1991) e, a partir deste, a produtividade de uma cultura (IDSO et al., 1980; CONESE et al., 1994; SIMÕES et al., 2005).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi obter modelos de estimativa de índices de área foliar (IAF) e da massa seca de colmos (MSC) a partir de dados espectrais de campo. Esse é um passo importante para o desenvolvimento futuro de metodologia de previsão de safra da cana-de-açúcar com o auxílio de dados espectrais obtidos por meio de imagens satélites.

Material e Métodos

Para atender ao objetivo deste trabalho, a seqüência metodológica foi a seguinte:

1. monitoramento, com o radiômetro de campo CIMEL-313/22, das alterações no fator de refletância da cultura provocadas, principalmente, pelas alterações do IAF da cultura da cana-de-açúcar;
2. transformação dos valores de refletância da cultura no IVP e no V em IV para minimizar a variabilidade devida a fatores externos (BARET & GUYOT, 1991), para permitir uma melhor correlação dos dados espectrais com o IAF e com a produção de MSC da cana de açúcar;
3. análises de correlação entre os IAF e os IVs;
4. ajuste de equações que permitissem estimar diretamente a MSC a partir de IVs.

A área de estudo foi selecionada com auxílio da Copersucar e totaliza 694,41 ha, com manchas de solo do tipo Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho Escuro, cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum sp*), variedade RB83-5486, ciclo de aproximadamente doze meses, espaçamento de um metro entre linhas, colheita mecanizada e localizada na fazenda São Bento Velho, de propriedade da Usina São Martinho no Município de Guariba, SP (21° 24' 7,0" S, 48° 08' 26,5" O). Possuía, ainda: dimensões de aproximadamente 3km x 3km; mesma variedade e mesmo plantio, evitando variações devidas a fatores genéticos; manejo, topografia plana e tipo de solo uniformes; e bordadura com a mesma cultura.

Embora a área fosse bastante homogênea, ela foi percorrida para se detectar sua variabilidade interna e diferentes padrões de crescimento, analisados visualmente. Com base nas diferenças observadas, foram definidas cinco subdivisões, ou parcelas, dentro da área de estudo, tendo sido, as medidas, sempre tomadas na área próxima ao ponto central de cada uma delas.

Durante o período de amostragem, de agosto de 1997 a outubro de 1999, foram realizadas dez campanhas para as quais, além do monitoramento das condições meteorológicas e de condução da cultura, em cada uma das parcelas, foram realizadas as seguintes medidas ou estimativas para a obtenção dos modelos que permitissem calcular valores de MSC a partir de dados de reflectância da cultura e/ou do IAF:

· **radiação refletida (RR):** obtida por meio do aparelho CIMEL-313/22;

· **radiação incidente (RI):** medida por meio do espectrorradiômetro LI COR/LI 1800 e/ou com o radiômetro CIMEL 313/22;

· **massa verde e massa seca (MS):** colhida em 1m², sem a presença de folhas secas, e levada

ao laboratório para separação e pesagem da massa foliar e de colmos e posterior secagem em estufa a 75°C até peso constante para obtenção da massa seca foliar (MSF) e da MSC; e

· **índice de área foliar (IAF):** após a separação das folhas verdes e sua pesagem, a medida da área foliar foi realizada por meio do medidor de área foliar de esteira LI-COR/LI-3000A.

As medidas de RR e RI foram tomadas pelo radiômetro CIMEL-313/22, que é composto de uma unidade de controle e armazenamento de dados e de uma cabeça ótica com campo ou geometria de visada de 10° (FOV=10°), responsável pela detecção e filtragem da Radiação Refletida por um alvo de acordo com as bandas ou filtros descritos na Tabela 1.

Os filtros analisados ao longo deste trabalho foram apenas o Filtro 1 e o Filtro 2, visto que os índices de vegetação analisados baseiam-se exclusivamente nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo do espectro luminoso.

O espectrorradiômetro LI COR/LI 1800, também utilizado para medidas da RI, opera na faixa de 400nm a 1100nm com bandas de 2 nm de largura. Para comparação com dados do aparelho CIMEL 313/22, suas medidas foram integradas para as respectivas faixas dos Filtros 1 e 2.

Como já citado, para minimizar a variabilidade devida a fatores externos e ao aparelho utilizado e para permitir a comparação de dados gerados por sensores diferentes, é recomendado que se utilizem dados de fator de reflectância ao invés de dados brutos de contagens de pulsos eletrônicos, como os do aparelho utilizado em campo (BARET & GUYOT, 1991; GUTMAN, 1991; GOWARD et al., 1991; MORAN et al., 1991). Portanto, a determinação do fator de reflectância da superfície foi o primeiro passo para a estimativa dos IVs para

Tabela 1. Definições dos filtros do radiômetro de luminescência CIMEL-313/22.

Filtro	Centro(nm)	Largura(nm)	Início(nm)	Fim(nm)	Faixa do Espectro
F1	837	91	791,5	882,5	Infravermelho Próximo
F2	648	53	621,5	674,5	Vermelho
F3	548	85	505,5	590,5	Verde
F4	450	40	430,0	470,0	Azul

que estes pudessem ser correlacionados ao IAF e também à MSC.

Conforme descrito por ZULLO Jr. (1994), para se estimar o fator de refletância de uma superfície é necessário medir a sua RI e RR, simultaneamente ou com intervalos pequenos o suficiente para impedir que haja diferença nas condições da atmosfera entre as duas medidas. ZULLO Jr. (1994) cita o trabalho de GU et al. (1990) que apresenta fatores que podem alterar a precisão das medidas experimentais da refletância da cultura (RC). Essas condições foram respeitadas neste trabalho.

A equação $RC = (RR/RI) * FI$ expressa matematicamente a relação entre essas duas medidas, onde FI é o fator de intercalibração entre os aparelhos. Esse fator de intercalibração entre os aparelhos só é utilizado caso as duas medidas sejam tomadas por aparelhos diferentes pois, outra forma de realizá-las é utilizando um só aparelho, que após a primeira medida é imediatamente mudado de posição para medir a RI. Como na maioria das medidas, a RR foi obtida por meio do radiômetro CIMEL-313/22 e a RI por meio do espectrorradiômetro LI COR/LI 1800, houve a necessidade de intercalibração dos aparelhos, que foi realizada obtendo-se equações de correlação para os filtros do primeiro em função do segundo.

Nessas estimativas da RC, as medidas de RR foram tomadas nas cinco parcelas, com um mínimo de cinco repetições em cada uma delas, totalizando no mínimo 25 repetições por campanha, e foram analisadas quanto à sua consistência para o cálculo posterior da RC e com o objetivo de amostrar a maior variação interna possível para compor uma média próxima da radiação que o satélite receberia, um misto entre radiação do solo, da palhada e da cultura. Assim, foram tomadas medidas tanto sobre a planta verde, quanto sobre o solo com palhas ou sobre as folhas secas ou palhada, dependendo se no início ou mais próximo ao final do ciclo, respectivamente.

A partir dos dados de RC obtidos, foram gerados os dezesseis IVs descritos por EASTMAN (1999) e que podem ser agrupados como apresentado a seguir:

· IVs Baseados na Razão de Bandas: a simples

divisão entre a RC no IVP e no V, chamada aqui de RATIO (ROUSE et al., 1974 e JORDAN, 1969); RVI - *Ratio Vegetation Index* - Índice de Vegetação em forma de Razão (PEARSON & MILLER, 1972 e RICHARDSON & WIEGAND, 1977); NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (ROUSE et al., 1973 e 1974); TVI - *Transformed Vegetation Index* - Índice de Vegetação Transformado (DEERING et al., 1975); CTVI - *Corrected Transformed Vegetation Index* - Índice de Vegetação Transformado Corrigido (PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER, 1984); TTVI - *Thiam's Transformed Vegetation Index* - Índice de Vegetação Transformado de Thiam (THIAM, 1997); e NRVI - *Normalized Ratio Vegetation Index* - Índice de Vegetação da Razão Normalizada (BARET & GUYOT, 1991).

· IVs Baseados na Distância da Reta do Solo: PVI - *Perpendicular Vegetation Index* - Índice de Vegetação Perpendicular (PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER, 1984); PVI_2 é uma transformação no PVI original proposta por BARET & GUYOT (1991) e WIEGAND et al. (1991); QI et al. (1994) propõem nova transformação gerando o PVI_3 ; HUETE (1988), procurando eliminar a influência do brilho do solo, desenvolveu um índice chamado SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo); BARET et al. (1989), citados por BARET & GUYOT (1991), sugerem uma alteração para vegetação de baixa densidade, criando o $TSAVI_1$ (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Transformado - primeira versão), que foi, posteriormente, melhorado por estes últimos autores, gerando uma segunda transformação, o $TSAVI_2$; QI et al. (1994) propõem uma alteração $MSAVI_1$ (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Modificado - primeira versão); Os mesmos autores propõem uma segunda modificação $MSAVI_2$; e CLEVERS (1989) descreve o WdVI (*Weighted Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação por Diferença Ponderada).

Resultados e Discussão

Neste item não houve o interesse de avaliar as diferenças entre as parcelas. Ao contrário, estas foram estabelecidas para garantir que a variabilidade

da área fosse representada pelas medidas e o que se buscou foi obter uma média que representasse a área como um todo, simulando dados que seriam obtidos por satélite, cujo sensor mede uma integração da radiação refletida pela superfície, apresentando um único valor para cada elemento de imagem, ou *pixel* (*picture element*). Assim, a Tabela 1 mostra uma síntese das campanhas, apresentando as médias de MSC, IAF e estatísticas descritivas das médias da RC, que foram utilizadas para o cálculo dos IVs, combinando o filtro 1 (IVP – 791 a 883 nm) e o filtro 2 (V – 621 a 675 nm) do radiômetro CIMEL 313/22. Após a análise de consistência, os dados da campanha 1 (04 e 05/11/98) foram eliminados por problemas no cabo do aparelho LICOR/LI-1800 e os das parcelas 1 e 3 da campanha 3 (17/08/1998) foram excluídos das análises porque a cana-de-açúcar havia florescido, provocando desvios nos valores de RC obtidos e, conseqüentemente, nos IVs. Foram excluídos ainda os dados da parcela 1 da campanha 9 pois, embora não se houvesse detectado a causa, apresentaram um valor de IAF acima do admissível e destoante dos valores das outras parcelas na mesma campanha.

Analisando-se os coeficientes de variação (CV) apresentados na Tabela 1, também se observam valores altos, provocados intencionalmente, visto que as medidas amostraram os diferentes alvos dentro da parcela, ou seja,

palhada, solo, folhas. As próprias parcelas foram escolhidas justamente para representar a variabilidade entre “sub-regiões” dentro da área de amostragem, representando a área que seria integrada pelo *pixel* da imagem de satélite. Pode-se perceber ainda que esses CVs são mais altos, principalmente quando a porcentagem de cobertura do terreno pelas folhas ainda não é suficiente para evitar a influência do brilho do solo com restos de palha do ciclo anterior, o que ocorre no início do ciclo e na fase de senescência das folhas, quando a quantidade de folhas verdes diminui e a palhada ou folhas secas tornam-se visíveis. Portanto, quando o objetivo é calcular IVs para estimar outros parâmetros a partir deles, deve-se evitar essas fases com maior variação, principalmente se esta não for uniforme na área de estudo. Essa conclusão está em acordo com PELLEGRINO (2001), quando o autor sugere a metade do ciclo como época mais aconselhada para a coleta das medidas que levarão à estimativa da produção final do ciclo. Ainda na Tabela 2, que mostra a evolução da RC média ao longo das campanhas, percebe-se o efeito dessas duas fases sobre as RCs nos filtros 1 e 2 (IVP e V, respectivamente).

Os IVs foram calculados para os dados individuais de RC e foram obtidas médias para cada parcela de cada campanha. Embora os dados da campanha 3 tenham sido descartados da análise de

Tabela 2. Relação das Campanhas realizadas, constando Ciclo, Data e Dias Após o Início do Ciclo (D), Massa seca de colmos (MSC em g), índice de área foliar (IAF em m² de folhas/m² de terreno) e estatísticas descritivas da Refletância (%) das campanhas, para os filtros 1 (IVP) e 2 (V).

Ciclo (início/fim)	Campanha	Data	D (dias)	MSC (g)	IAF (m ² f/m ² t)	Média (%) Refl IVP	C.V.(%) Refl IVP	Média (%) Refl V	C.V.(%) Refl V
1 (20/08/97 a 14/09/98)	1	04/10/97	45	14,2	0,3310	—	—	—	—
	2	23/06/98	308	4991,8	4,1438	29,31	29,70	4,15	56,81
	3	17/08/98	362	3515,3	3,7008	45,81	71,55	7,05	52,46
	4	05/11/98	52	25,9	0,6013	36,16	61,15	12,51	87,14
	5	24/11/98	71	64,5	1,0307	35,78	5,89	5,92	18,85
2 (14/09/98 a 06/10/99)	6	25/01/99	134	815,7	4,3723	41,21	9,57	5,63	14,22
	7	28/03/99	196	2110,9	4,4949	32,59	12,67	4,83	38,67
	8	26/05/99	255	3776,8	4,7028	31,26	24,43	4,60	26,34
	9	11/07/99	301	4045,5	3,8436	31,52	28,20	4,83	12,65
	10	25/08/99	346	4410,2	2,4436	34,18	14,36	10,20	28,61

regressão devido ao florescimento da cana-de-açúcar, o fato de ter havido desvio nos dados de RC e do IVs mostra a sensibilidade dos índices utilizados diante das alterações no dossel, confirmando sua eficiência no monitoramento da cultura.

Portanto, nas análises de regressão foram utilizados 41 pares de dados, para se obterem as correlações entre os IVs e o IAF. Utilizou-se, como limite para a aceitação das regressões, o valor mínimo de aproximadamente 0,80 para o coeficiente de correlação, o que corresponde a um coeficiente de determinação (R^2) de 0,65. Assim, na Tabela 3, são apresentadas apenas as equações para os IVs cujas correlações com o IAF estejam acima desse limite. Cabe ressaltar que as equações escolhidas representam as regressões com maiores valores de R^2 , porém que tenham um comportamento coerente com o esperado, baseando-se nos dados observados, e que sejam as mais simples possíveis.

A partir da Tabela 3, percebe-se que nenhum dos IVs apresenta boa correlação com o IAF, pois não foi possível obter valores de R^2 acima de 70%. Mesmo assim, os índices selecionados são os que apresentaram melhor resposta. Os quatro tipos de PVI foram eliminados, pois apresentaram dados muito dispersos, não se enquadrando em nenhum dos modelos de regressão disponíveis no programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986).

Por outro lado, pode-se perceber uma leve melhoria, em relação ao NDVI, para os índices que levam em consideração a reta do solo, como o SAVI,

o TSAVI₂ e o MSAVI₂, principalmente este último. Essa observação está de acordo com o destacado por BARET & GUYOT (1991) que detectaram uma maior sensibilidade desses índices, em relação ao NDVI, na eliminação da influência do brilho do solo. Um problema ressaltado por esses autores é a rápida saturação do TSAVI e do NDVI para altos IAFs, ou seja, a falta de sensibilidade na detecção de variações acima de determinado valor do IAF. MOREIRA (2000) cita saturações, detectadas por alguns autores, para IAFs em torno de 4 ou 5 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno). Uma análise do comportamento dos índices selecionados acima mostra extrema semelhança entre todos eles, que apresentam saturação para valores em torno de 4,5 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno), fazendo com que esse seja o limite para sua utilização nas estimativas para previsão do final do ciclo.

A composição da liteira é um aspecto importante na cana-de-açúcar, pois a palhada deve ter uma influência similar à do solo, como também citado por BARET & GUYOT (1991). Portanto, seria necessário determinar uma "reta da palhada", analogamente à reta do solo do SAVI e seus derivados, a partir da qual se poderia diferenciar a sua influência sobre a refletância geral do dossel. Acredita-se que essa seja a principal dificuldade para se obter melhores correlações para a cultura da cana-de-açúcar, como as obtidas para o trigo, por exemplo, por ASRAR et al. (1984).

A estimativa da MSC utilizando-se as equações da Tabela 3 ($R^2 < 0,70$) depende ainda da substituição de valores de IAF, obtidos por meio delas, em modelos

Tabela 3. Equações de regressão entre os Índices de Vegetação (IV) e o Índice de Área Foliar (IAF) com Coeficiente de Determinação (R^2) acima de 0,65.

IV	Regressão Escolhida	R^2
Ratio	IAF = 1,322657E-3 * (Ratio) ^{(7,00524 - 3,454406 * log(Ratio))}	0,6712
NDVI ¹	IAF = 14,31356 * NDVI ^{4,572136}	0,6773
RVI	IAF = 15,53271 * EXP(-9,645858 * RVI)	0,6856
TVP ²	IAF = 0,6060479 * TVI ^{16,62705}	0,6790
SAVI	IAF = 365,3941 * SAVI ^{4,569753}	0,6872
TSAVI ₁	IAF = 255,2679 * EXP(-3,056468 / TSAVI ₁)	0,6773
TSAVI ₂	IAF = 256,7262 * EXP(-3,043273 / TSAVI ₂)	0,6806
MSAVI ₂	IAF = 11,77192 * MSAVI ₂ ^{7,05225}	0,6922

¹ Como NDVI = - NRVI, optou-se por apresentar apenas o NDVI

² Como os resultados para CTVI e TTVI foram sempre idênticos aos do TVI, optou-se por apresentar apenas este último.

que correlacionem essas duas variáveis. Um teste, com modelo apresentado por PELLEGRINO (2001) para o mesmo conjunto de dados, apresentou resultados incoerentes e essa opção foi descartada.

Os modelos de regressão do programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986) foram então testados para se estimar a MSC exclusivamente a partir dos dados de IVs. Porém, os R^2 obtidos foram ainda menores que os para o IAF, ficando, os melhores modelos, em torno de 0,55 e a regressão linear simples, perto de 0,20. Este último valor está de acordo com os obtidos por RUDORFF & BATISTA (1990) para o RVI, também para regressões lineares simples para a produção final da cultura da cana-de-açúcar no Brasil. Assim como para os IVs, regressões foram obtidas para se estimar a MSC exclusivamente a partir dos dados de "dias após o início do ciclo" (D), produzindo valores de R^2 em torno de 0,70.

MAAS (1988) e RUDORFF & BATISTA (1990), ao testarem separadamente os modelos exclusivamente agrometeorológicos, ou os de crescimento, e os modelos exclusivamente orbitais, obtiveram resultados piores do que os para modelos que combinavam esses dois tipos de dados. Diante disso, optou-se por realizar regressões lineares múltiplas utilizando-se os dados de "dias após o início do ciclo" (D) e os IVs como variáveis independentes para se estimar a MSC. Na prática, a variável D funciona como fator de ponderação do NDVI e,

indiretamente, representa o acúmulo de energia ao longo do ciclo, comumente utilizados em trabalhos de estimativa de produção na forma de Graus-Dia ou na relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial. Porém, optou-se por utilizar o valor de D por sua simplicidade, facilidade de obtenção e, principalmente, por seus bons resultados.

Assim, a Tabela 4 mostra os parâmetros das equações obtidas e seus respectivos R^2 . Os modelos ajustados apresentaram valores de R^2 em torno de 0,83 para todos os índices selecionados no item anterior, permitindo uma maior confiabilidade nos resultados de MSC que possam ser obtidos a partir delas. A combinação dessas duas variáveis produz resultados melhores que o uso individual de cada uma delas, pois o valor D ameniza o problema de estabilização do IV com o fechamento do dossel e o IV faz a ponderação do resultado, elevando ou reduzindo a estimativa da massa seca produzida até o dia D, durante o ciclo em análise.

As equações da Tabela 4 podem ser usadas para se estimar a MSC da cultura da cana de açúcar até pouco antes da estabilização dos IVs, o que normalmente ocorre logo após a metade do ciclo. Após esse período, os valores de IV deixam de expressar o acúmulo de MSC que continua ocorrendo e o modelo apresenta apenas variações devidas à variável D.

Tabela 4. Parâmetros das regressões lineares múltiplas obtidas para a estimativa da Massa Seca dos Colmos (MSC) a partir dos dados de Índices de Vegetação (IVs) e Dias Após o Início do Ciclo (D). Equações na forma $MSC = IV * a + D * b + c$.

IV	a	b	c	R^2
Ratio	93,7126	16,8510	-1604,94	0,8390
NDVI ¹	523,0838	17,6005	-1488,11	0,8275
RVI	456,4683	17,6740	-1508,14	0,8272
TVP	968,2780	17,6277	-2186,60	0,8273
SAVI	999,2944	17,6216	-1470,42	0,8274
TSAVI ₁	1907,9440	17,0239	-2310,70	0,8334
TSAVI ₂	696,5726	17,5641	-1588,15	0,8278
MSAVI ₂	456,4683	17,6740	-1508,14	0,8272 [*]

¹ Como NDVI = - NRVI, optou-se por apresentar apenas o NDVI

² Como os resultados para CTVI e TTVI foram sempre idênticos aos do TVI, optou-se por apresentar apenas este último.

Um teste da consistência dos valores obtidos com o uso dessas equações, para o meio do ciclo, foi feito por meio de sua substituição no modelo proposto por PELLEGRINO (2001):

$$\text{MSC}/\text{MSC}_{\text{máx}} = 1,309664 * 10^{-16} * D^{(11,33342 - 1,99582 * \log(D))},$$

$$R^2 = 0,9866$$

onde $\text{MSC}_{\text{máx}}$ é a MSC máxima para o ciclo, ou seja, sua produção final de colmos.

Pelo teste proposto, pôde-se chegar a valores coerentes para a estimativa da $\text{MSC}_{\text{máx}}$ para os dois ciclos em estudo. Sendo assim, por princípio, esses modelos devem funcionar bem desde que não ocorram fenômenos meteorológicos extremos e raros após a estimativa da MSC, por volta da metade do ciclo. A fase de validação desses modelos ainda depende da obtenção de um novo conjunto de dados, diferentes dos usados para a sua calibração.

Como recomendação para trabalhos futuros, pode-se sugerir ainda a inclusão de outras variáveis como graus-dia, relações entre evapotranspiração real e potencial ou a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura das folhas do dossel.

Conclusões

Os dados de fator de refletância medidos em campo produziram Índices de Vegetação que apresentaram uma correlação aceitável com os dados de Índices de Área Foliar ($R^2 < 0,70$). Porém, é desaconselhável o uso destes nas equações para obtenção de estimativas da Massa Seca dos Colmos, principalmente se aplicados em modelos de estimativa da Produção Final de Colmos, como o apresentado por PELLEGRINO (2001), pois isso levaria a erros multiplicativos. Essa correlação abaixo da esperada pode estar relacionada à influência da palhada da cana-de-açúcar sobre o comportamento da Refletância do dossel no período inicial de crescimento e pela saturação dos IVs com o fechamento do dossel, embora o IAF continue aumentando.

Os Índices de Vegetação que apresentaram melhores resultados para as relações com o Índice de Área Foliar foram: Ratio, NDVI, RVI, NRVI, TVI, CTVI, TTVI, SAVI, TSAVI₁, TSAVI₂ e MSAVI₂.

A tentativa de se obter regressões para a estimativa da Massa Seca dos Colmos diretamente a partir dos Índices de Vegetação de Campo não produziu valores de R^2 elevados. Porém, quando combinados aqueles índices a dados de Dias Após o Início do Ciclo, as regressões apresentaram R^2 em torno de 0,83. Como esta última variável é de fácil obtenção e produziu bons resultados, sua utilização é muito conveniente e foi adotada neste trabalho. A determinação de equações combinando Dias Após o Início do Ciclo e Índices de Vegetação facilitará a utilização futura de imagens de satélites no monitoramento e previsão da produção final da área de estudo, por meio da utilização de Índices de Vegetação Orbitais e, provavelmente, poderá ser adaptada para outras áreas e variedades da cultura.

Agradecimentos

À Copersucar, ao Centro de Tecnologia Canavieira, à Usina São Martinho e ao Cepagri/Unicamp pelo apoio logístico incondicional, incluindo alojamento, laboratório, equipamentos e pessoal. À FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ASRAR, G. et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v.76, n. 2, p.300-306, march/april, 1984.
- ASRAR, G.; KANEMASU, E. T.; YOSHIDA, M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and Solar angle. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.17, n. 1p 1-11, 1985.
- ASRAR, G.; MYNENI, R. B.; CLOUDHURY, B. J. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: a modeling study. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.41, p.85-103, 1992.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING AND IGARSS'90, 12., **Proceedings** v.4 Vancouver, Canada, 1989. v. 4.

- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, p.161-173, 1991.
- BARNETT, T. L.; THOMPSON, D. R. The use of large-area spectral data in wheat yield estimation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.12, p.509-518, 1982.
- CASANOVA, D.; EPEMA, G. F.; GOUDRIAAN, J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. **Field Crops Research**, v.55, p.83-92, 1998.
- CLEVERS, J. G. P. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.29, p.25-37, 1989.
- CONESE, C. et al. **Bilan hydrique agricole et sécheresse en Africa tropicale**. Paris: Ed. John Libbey Eurotext, 1994. Cap. 7: Crop yield estimation and forecasting in Niger using NOAA AVHRR data. p. 67-75.
- DEERING, D. W. et al. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 10., 1975. **Proceedings**. 1975. v. 2, p.1169-1178.
- EASTMAN, J. R. **Guide to GIS and image processing - Idrisi 32**. Worcester, Idrisi Production, 1999. 170p.
- GALLO, K. P.; EIDENSHINK, J. C. Differences in visible and near-IR responses, and derived vegetation indices, for the NOAA-9 and NOAA-1AVHRRs: a case study. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v.54, n.4, p.485-490, 1988.
- GOWARD, S. N. et al. Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, p.257-277, 1991.
- GU, X. F.; GUYOT, G.; VERBRUGGHE, M. Evaluation of measurement errors on the reflectance of "la crau", the french SPOT calibration area. In: EARSSEL SYMPOSIUM, 10., Toulouse, 5-8 junho - 1990. **Proceedings**. Toulouse, 1990. p.121-133.
- GUTMAN, G. The derivation of vegetation indices from AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.8, p.1235-1243, 1987.
- GUTMAN, G. Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, p.121-136, 1991.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v.25, p.295-309, 1988.
- IDSO, S. B. et al. Estimation of grain yields by remote sensing of crop senescence rates. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.9, p.87-91, 1980.
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.5, n.4, p.663-666, 1969.
- MAAS, S. J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. **Agronomy Journal**, v.80, p.655-662, 1988.
- MORAN, M. S. et al. Comparison of atmospheric correction procedures for visible and near-ir satellite sensor output. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON PHYSICAL MEASUREMENTS AND SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 5, **Proceedings**. Couchevel, 14-18 janeiro-1991, Ed. ESA SP-319, 1991. p.7-12.
- MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. São José dos Campos, 2000. 179p. Dissertação (Mestrado - INPE). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1972. v. 2, p.1355-1379.

- PELLEGRINO, G. Q. **Utilização de dados espectrais do satellite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar.** Campinas, 2001. 116p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola - Feagri/UNICAMP). Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- PERRY Jr., C. R.; LAUTENSCHLAGER, L. F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.14, p.169-182, 1984.
- QI, J. et al. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.48, p.119-126, 1994.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.43, n.12, p.1541-1552, 1977.
- ROUSE, J. W. et al. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3. **Proceedings**. 1973. v. 1, p.309-317.
- ROUSE, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Maryland. 1974.
- 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.183-192, 1990.
- SIMÕES, M.S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, Brazil, v.62, n.3, p.199-207, May/June 2005.
- THIAM, A. K. **Geographic information systems and remote sensing methods for assessing and monitoring land degradation in the Sahel: the case of Southern Mauritania.** Worcester Massachusetts, 1997. Tese (Doutorado - Clark University). Clark University, 1997.
- UNGANAI, L. S.; KOGAN, F. N. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.63, p.219-232, 1998.
- WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale. **Agronomy Journal**, v.82, n.3, p.623-629, 1990.
- WIEGAND, C. L. et al. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, p.105-119, 1991.
- ZULLO Jr., J.; ARRUDA, F. B. **Programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais.** Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 23p. (Boletim Técnico nº 113).
- ZULLO Jr., J. **Correção atmosférica das imagens de satélite e aplicações.** Campinas, 1994. 191p. Tese (Doutorado em Eng. Elétrica - DCA/FEE/UNICAMP). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1994.