

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS**

**0111000 – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA**  
**AGRONÔMICA**

**Natureza: III. Manuscrito de trabalho científico desenvolvido através de**  
**atividade de iniciação científica**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO A PARTIR DE SENSOR ATIVO DE DOSSEL E SEUS**  
**POTENCIAIS FATORES DE INTERFERÊNCIA EM CANA-DE-AÇÚCAR**

**ALUNO: LEANDRO TAUBINGER**  
**Nº USP: 6460940**  
**leotbr@yahoo.com.br**  
**PROFESSOR ORIENTADOR: JOSÉ PAULO MOLIN**  
**jpmolin@usp.br**

**PIRACICABA, SÃO PAULO**  
**JUNHO, 2012**

# ÍNDICES DE VEGETAÇÃO A PARTIR DE SENSOR ATIVO DE DOSSEL E SEUS POTENCIAIS FATORES DE INTERFERÊNCIA EM CANA-DE-AÇÚCAR

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.) é a cultura de maior importância na produção de açúcar e etanol em climas tropicais e subtropicais, respondendo por aproximadamente 80% da produção mundial de açúcar e cerca de 35% da produção global de etanol (FAO, 2011). O Brasil é o principal produtor, com aproximadamente 570 milhões de toneladas produzidas em 7,1 milhões de hectares (AGRIANUAL, 2010), correspondendo a mais de um terço da produção mundial (FAO, 2011), tendo grande importância econômica, social e ambiental. A aplicação de processos mais eficientes, que incrementem a produtividade e a redução dos custos de produção, principalmente a partir do menor uso de insumos, é fundamental para o desenvolvimento do setor.

Dentre os insumos utilizados, o nitrogênio é um dos que desperta maior atenção dos agricultores e pesquisadores, ao se considerar a resposta variável da cultura, em função da dificuldade em prever a quantidade de N mineralizado da matéria orgânica do solo durante o desenvolvimento da cultura e a alta perda por lixiviação no perfil do solo. Scharf & Lory (2002) afirmaram que as necessidades de nitrogênio (N) são frequentemente diferentes das taxas realmente aplicadas pelos agricultores e também muito variáveis de uma área para outra. Em uma mesma área, a carência de N apresenta grande variabilidade espacial. A aplicação da real necessidade de N tem o potencial de aumentar a produtividade em áreas previamente fertilizadas abaixo da recomendação e de reduzir a aplicação desnecessária de N em áreas previamente fertilizadas acima da recomendação e o fluxo de N para os lençóis freáticos.

Nas condições brasileiras geralmente não é utilizada análise de solo para recomendação de nitrogênio (N). As recomendações são feitas com base no tipo de solo, variedade e idade do canavial, sem levar em consideração a disponibilidade de N no solo e a sua variabilidade espacial. Dessa forma, o uso de sensores ópticos ativos é uma das alternativas à recomendação tradicional de N (Amaral & Molin, 2011).

A utilização de métodos que estimem a resposta da cultura ao N em determinada situação edafoclimática durante a safra, possibilita a aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxa variável (Solari, 2006). Um desses métodos é a utilização de sensores ativos de dossel, que é uma tecnologia bastante estudada em culturas altamente domesticadas como trigo (Raun et al., 2002) e

milho (Kitchen et al., 2010) e vem apresentando comprovada eficiência na fertilização nitrogenada nestas e em outras culturas (Vellidis et al., 2011).

Entretanto, na cultura da cana-de-açúcar essa técnica de recomendação da adubação nitrogenada ainda é um desafio (Molin et al., 2010; Amaral & Molin, 2011; Lofton et al., 2012).

Bausch and Brodahl (2011) apontam que diversos índices de vegetação estão sendo avaliados e desenvolvidos para possibilitar a gestão do N durante a safra em diferentes culturas. Entretanto, em culturas rústicas, como é o caso da cana-de-açúcar, apresentando relativamente poucos estudos científicos sobre sua fisiologia e nutrição, o uso dessa técnica de recomendação da adubação nitrogenada ainda é um desafio. Existem diversos fatores que interferem na obtenção dos índices de vegetação e que, para as mesmas condições de superfície, podem conduzir a valores diferentes. Entre os muitos fatores que interferem na refletância das culturas e conseqüentemente no cálculo dos índices de vegetação, estão os fatores de estresse, clima, solo e planta.

Eitel et al. (2008), trabalhando com a cultura do trigo, concluíram que índices simples como o NDVI e CI são influenciados por outros fatores, como a quantidade de biomassa e a influência do substrato, enquanto que o índice composto MCARI/MTVI2, que leva em conta a refletância de comprimentos de ondas específicos nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, melhor se correlaciona com o status nutricional por N.

Na cultura do milho, Wu et al. (2007) verificaram o mesmo resultado, utilizando o índice composto MCARI/OSAVI, o qual se mostrou mais apropriado para a estimativa da clorofila, sendo que o mesmo não foi influenciado pela interferência da refletância do solo. As contribuições do solo na resposta espectral da vegetação variam com a quantidade exposta, com as condições da superfície e com as suas propriedades intrínsecas, como características mineralógicas, orgânicas e de absorção de água (Huete, 1989).

Quando a planta é submetida a um déficit de água, ocorre no seu interior uma série de reações bioquímicas para contornar esta situação. Em plantas estressadas há um decréscimo na absorção pela clorofila, diminuindo também refletância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células da planta, e esse decréscimo leva a um aumento na refletância no vermelho (Ayala-Silva et al., 2005).

Um dos mecanismos morfofisiológicos que a cultura da cana-de-açúcar apresenta para amenizar o estresse por déficit hídrico é o enrolamento foliar, reduzindo a transpiração, a

projeção de área foliar e conseqüentemente a radiação incidente (Lisson et al., 2005). Desta forma poderá também afetar a radiação refletida durante os diferentes horários do dia e interferir nos índices de vegetação calculados. Esse mecanismo pode variar consideravelmente entre variedades, podendo ser correlacionado com a tolerância à seca (Inman-Bamber, 2004), daí a importância do estudo em diferentes variedades.

Sendo assim surge a necessidade de se realizar estudos do comportamento de índices de vegetação que melhor expressem a condição nutricional da cana-de-açúcar e que sejam menos suscetíveis à influência de outras variáveis. Assim, o presente trabalho teve como objetivo verificar a interferência de diferentes substratos, da presença de água sobre as folhas e do momento do dia em diferentes índices de vegetação calculados a partir de mensuração feita por sensor ativo de dossel, assim como avaliar a eficácia desses IVs em identificar doses de N aplicadas na cultura da cana-de-açúcar.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi composto por experimentos em casa de vegetação e em campo com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). Em casa de vegetação analisou-se o efeito de mensurações realizadas com sensor em diferentes horários do dia. Em campo analisaram-se os efeitos das doses de nitrogênio (N) aplicadas, tipos de substrato e presença de água sobre as folhas nos valores dos índices de vegetação obtidos com o sensor.

As mensurações foram realizadas com o sensor ativo de dossel (CropCircle, Model ACS-470 Multi-spectral, Holland Scientific, NE, USA), o qual mediante troca de filtros óticos e calibração do sensor (Fig. 1), fornece as refletâncias nos comprimentos de onda de 450, 550, 650, 670, 730 e 760 nm, com as quais foram calculados diferentes índices de vegetação (Tabela 1).



**Fig. 1.** Componentes do sensor (A), sensor acoplado a computador para calibração (B) e troca de filtros óticos (C)

**Tabela 1. Índices de vegetação utilizados com indicação de seus respectivos autores; devido aos filtros óticos disponíveis, algumas adaptações foram feitas no presente trabalho: entre 760 e 800 nm, utilizou-se 760 nm; entre 550 e 590 nm, utilizou-se 550 nm; entre 700 e 730 nm, utilizou-se 735 nm.**

Índice de Vegetação	Equação	Referência
NDVI	$(R_{760} - R_{670}) / (R_{760} + R_{670})$	Rouse et al. (1974)
CI	$(R_{760} / R_{590}) - 1$	Gitelson et al. (2005)
GNDVI	$(R_{780} - R_{550}) / (R_{780} + R_{550})$	Gitelson and Merzlyak (1996)
Yara ALS	$100(\ln(R_{760}) - \ln(R_{730}))$	Jasper et al. (2009)
NDRE	$(R_{760} - R_{730}) / (R_{760} + R_{730})$	Barnes et al. (2000)
MCARI/MTVI2	$\text{MCARI} \quad [(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})] (R_{700} / R_{670})$ $\text{MTVI2} \quad \{ 1.5[1.2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550})] \} / \sqrt{[(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{R_{670}} - 0.5)]}$	Eitel et al. (2008)
MCARI/OSAVI	$\text{MCARI} \quad [(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})] (R_{700} / R_{670})$ $\text{OSAVI} \quad (1 + 0.16)(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Wu et al. (2008)

## 2.1 Experimento em ambiente protegido

### 2.1.1 Horário do dia

O experimento de leituras ao longo do dia foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, Piracicaba-SP, Brasil (22°42' S – 47°37' W) em experimento com diferentes variedades e níveis de irrigação, conduzido pela equipe do Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho. As mudas de cana-de-açúcar foram plantadas em janeiro de 2009 em vasos de 0,5 m<sup>3</sup> com solo de textura média. Foram plantadas três variedades, CTC 9, SP 90-3414 e RB 855156, em vasos distintos com recebimento de água via gotejamento, sempre buscando manter a umidade do solo na capacidade de campo.

Para verificar a influência da hora do dia nos diferentes IVs, devido às alterações morfológicas e fisiológicas das plantas, como variação da arquitetura foliar, enrolamento das folhas (hidronastismo), e modificação da taxa fotossintética entre momentos de alta e baixa intensidade de radiação solar ao longo do dia, foram realizadas mensurações a cada duas horas, entre 6:00 h e 20:00 h. Foram realizadas três leituras (cerca de 100 valores por leitura) em pontos diferentes de cada vaso em cada um dos horários.

Adicionalmente realizou-se nos mesmos momentos a avaliação com medidor portátil de clorofila (SPAD-502, Konica Minolta Sensing Inc., Sakai, Osaka, Japan). Adotou-se duas folhas diagnóstico para fins de comparação. Uma folha analisada foi a TVD (top visual diulep – folha

+1) e na outra se utilizou duas folhas expandidas abaixo (folha +3 – folha mais velha). Procedeu-se uma mensuração no meio de um dos limbos foliares em cinco folhas distintas.



**Fig. 2. Coleta de dados realizada às 6 horas (A), 10 horas (B), 16 horas (C), 18 horas (D) e 20 horas (E)**

Em todas as avaliações, as mensurações de refletância foram realizadas adaptando-se o sensor a uma base fixa, de forma que todas as mensurações captassem a refletância do mesmo local das plantas. De forma similar, marcaram-se as folhas mensuradas com o clorofilômetro, realizando sempre as leituras nas mesmas folhas.

Devido a não existência de repetições verdadeiras (apenas um vaso para cada variedade), mesmo tendo sido feitas avaliações em pontos diferentes dos vasos, julga-se incoerente trabalhar com análise de variância e testes de comparação de médias. Desta forma, procedeu-se o cálculo dos valores médios para cada período do dia e estimativa do intervalo de confiança para a média (95%) com plotagem dos gráficos para análise visual.

## **2.2 Experimentos em campo**

Os experimentos de campo foram divididos em: efeitos das doses de N aplicadas, influência do substrato e influência devido à presença de água sobre as folhas.

### **2.2.1 Efeito das doses de N**

Pelo fato de os sensores que trabalham com o índice de vegetação NDVI terem sido projetados para identificar as diferenças nutricionais por N em culturas (trigo e milho) com arquitetura foliar e comportamento de desenvolvimento diferentes da cana-de-açúcar, é

necessário analisar se algum IV pode ser mais eficiente em identificar a resposta da cana-de-açúcar ao N.

Para tanto, avaliou-se dois experimentos com diferentes doses de N aplicadas. O primeiro experimento foi instalado em parte de um talhão comercial da Usina São Martinho, na região de Ribeirão Preto-SP, Brasil (21°21'34" S e 48°03'56" O), durante a safra 2011/2012, cultivada com a variedade CTC2 em quarto corte. As avaliações ocorreram em três estágios de crescimento distintos da cultura, sendo a primeira quando as plantas apresentavam altura média de palmito de 0,25 m (Fig. 3), a segunda quando as plantas apresentavam altura média de palmito de 0,5 m, e a terceira quando as plantas apresentavam altura média de palmito de 0,7 m.



**Fig. 3. Coleta de dados com o sensor na primeira avaliação na Usina São Martinho, quando as plantas apresentavam altura média de palmito de 0,25 m.**

O sensor foi mantido a uma distância média de 0,8 m do dossel das plantas, conduzido manualmente, com uma frequência de coleta de 10 Hz, totalizando cerca de 600 leituras por parcela. Adicionalmente realizou-se a mensuração com medidor portátil de clorofila (SPAD-502), com 20 leituras por parcela, sendo que na primeira avaliação foi realizada apenas na folha +1, pois a folha +3 estava muito debilitada. Essas mesmas folhas foram enviadas ao laboratório da ESALQ/USP para determinação do teor foliar de N, pelos métodos descritos por Malavolta et al. (1997).

As parcelas eram constituídas por seis fileiras de cana-de-açúcar de 15 m de comprimento, com quatro repetições em blocos ao acaso, tendo como tratamentos a aplicação de doses de N (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de N).

Pelo fato de na segunda avaliação os dados terem sido perdidos, por falha do equipamento, foram analisadas apenas a primeira e a terceira avaliação.

Os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativos procedeu-se teste de comparação de médias (Scott-Knott a 5%) e análises de regressão.

O segundo experimento foi realizado em um experimento fatorial conduzido pela Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) via Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Piracicaba-SP, Brasil (22°41' S – 47°38' O), com três variedades de cana-de-açúcar (SP81-3250, IAC87-3396 e CTC14) e quatro doses de N (0, 50, 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup>). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com quatro repetições no esquema de parcelas subdivididas, onde as parcelas são constituídas pelas variedades de cana e as subparcelas pelas doses de N, sendo essa última formada por cinco fileiras de cana-de-açúcar, espaçadas 1,5 m, com 10 m de comprimento. O mesmo delineamento e tratamentos foram instalados no ano anterior (cana-planta) e se repetiram na presente safra avaliada.

Uma única avaliação ocorreu quando as plantas apresentavam altura média de palmito de 0,5 m (Amaral & Molin, 2011; Portz et al., 2012). O sensor foi mantido a uma distância média de 0,8 m do dossel das plantas, conduzido manualmente, com uma frequência de coleta de 10 Hz. Adicionalmente realizou-se a mensuração com medidor portátil de clorofila (SPAD-502), na folha +1 e +3, separadamente, seguindo o procedimento descrito anteriormente, mas com 20 leituras por parcela.

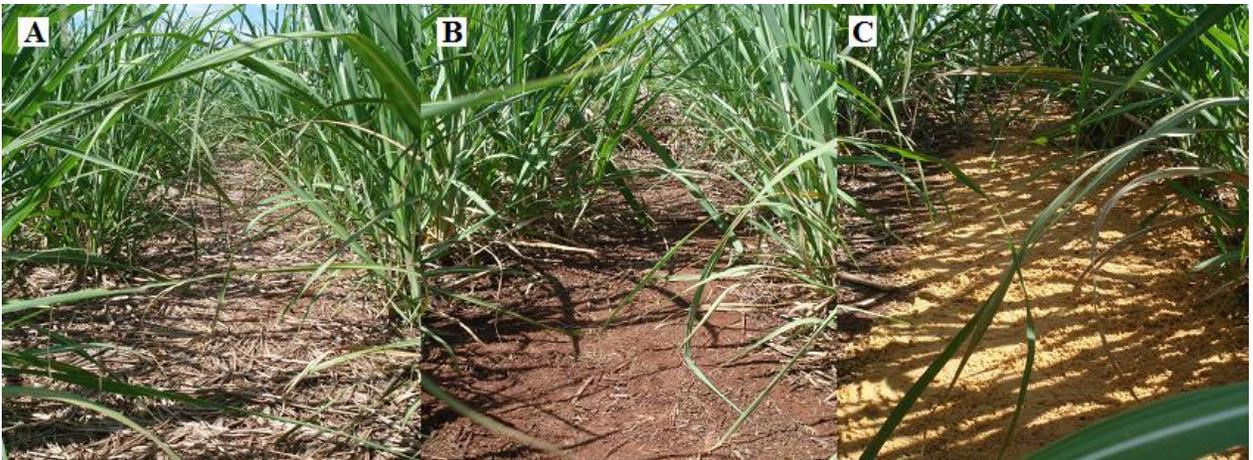
Os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativos procedeu-se teste de comparação de médias (Scott-Knott a 5%) e análises de regressão.

### **2.2.2 Influência do substrato**

Devido à área mensurada pelos sensores ser variável em função da altura e da biomassa da cultura, nem sempre o feixe de luz emitida atinge apenas o dossel das plantas, captando também refletância do substrato (solo ou palha), o que pode ocasionar alteração nos valores mensurados. Buscando verificar essa influência, foram realizadas leituras sobre diferentes substratos (Fig. 4) em uma fileira de cana-de-açúcar de 10 m de comprimento da variedade CTC2 em quarto corte, com altura média de plantas de 0,5 m.



**Fig. 4.** Coleta dos dados com o sensor com manutenção de palha sobre o solo (A) com exposição do solo de textura argilosa (B) e com deposição de areia para simular solo com textura arenosa (C).



**Fig. 5.** Manutenção de palha sobre o solo (A) exposição do solo de textura argilosa (B) e deposição de areia para simular solo com textura arenosa (C).

As condições de substrato foram: palha de cana-de-açúcar oriunda da colheita mecanizada depositada sobre o solo ( $14 \text{ ton ha}^{-1}$ ); retirada da palha manualmente, com exposição do solo de textura argilosa (vermelho escuro); deposição de areia sobre a superfície do solo, de forma a simular a refletância da superfície de um solo de textura arenosa (Fig. 5). Foram realizadas seis leituras dinâmicas (seis repetições) em cada condição de substrato, com o sensor mantido a uma distância média de 0,8 m do dossel das plantas, conduzido manualmente com uma frequência de coleta de 10 Hz.

Os dados foram submetidos à análise de variância e procedeu-se teste de comparação de médias (Scott-Knott a 5%).

### 2.2.3 Influência da água sobre as folhas

Os produtores de cana-de-açúcar necessitam fertilizar grandes áreas, trabalhando 24 horas por dia. Dessa forma, mesmo em condições de chuva rala, logo após a ocorrência das mesmas ou em presença de orvalho, a operação normalmente não é interrompida. Com isso, é preciso analisar se existe influência da presença de água sobre as folhas nas mensurações com sensores óticos e se há algum IV que diminua esse efeito.

Para tanto, utilizou-se um pulverizador costal equipado com bico gerador de gotas de grande diâmetro para a simulação de chuva ( $32,4 \text{ mm h}^{-1}$ ). Procedeu-se leituras estáticas com o sensor antes (seca), durante (chuva) e após (orvalho) a simulação de chuva (Fig. 6). Para cada condição foram realizadas quatro mensurações (cerca de 600 valores) em quatro pontos distintos de um talhão cultivado com a variedade CTC2 em quarto corte.



**Fig. 6. Coleta dos dados com o sensor antes (A) e durante (B) a simulação de chuva. Destaque do molhamento das folhas após a simulação de chuva (C).**

Os dados foram submetidos à análise de variância e tiveram suas médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5%. Todas as análises foram realizadas mediante o uso do software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Experimento em Ambiente protegido

#### 3.1.1 Horário do dia

Observando os valores dos índices de vegetação e dos valores SPAD nas mensurações ao longo do dia (Fig. 7) não foi possível encontrar um padrão de comportamento que pudesse ser explicado pela fisiologia vegetal e/ou sensoriamento remoto. Salienta-se que caso fosse analisado

o comportamento das variedades separadamente, seria possível inferir certo padrão de comportamento em função da hora do dia. Entretanto, analisando o comportamento de mais de uma variedade de cana, tal erro foi evitado.

Sobre os IVs, a grande variação observada entre os diferentes momentos do dia deve ter ocorrido principalmente pela pequena, porém, existente alteração de posicionamento e angulação do sensor em relação às folhas das plantas nas diferentes avaliações. Para os valores SPAD, a grande variação ocorreu em razão da grande variabilidade nas leituras realizadas em uma mesma folha.

Observa-se que quando os comprimentos de onda utilizados foram os mesmos (CI e GNDVI ou NDRE e Yara ALS) a resposta observada foi muito similar. Por outro lado, utilizando a mesma equação com comprimentos de onda diferentes, o comportamento foi diferente (NDVI, GNDVI e NDRE). Essa constatação preocupa quando se considera a possibilidade de adaptação dos IVs originais em função dos filtros óticos disponíveis em determinado estudo. A análise dos resultados de estudos desse tipo devem levar em consideração os comprimentos de onda realmente utilizados e não apenas o nome do IV estudado. Essa identificação foi realizada eficientemente, por exemplo, nos trabalhos de Wu et al. (2008) e Shiratsuchi et al. (2010), ao diferenciarem os IVs em suas configurações iniciais dos IVs que sofreram adaptação das bandas espectrais. Nas condições do presente estudo não foi possível identificar um comportamento padrão dos IVs mensurados ao longo do dia. Entretanto não é possível afirmar que essa interferência não exista. Isso porque, principalmente em condições de disponibilidade reduzida de água, as plantas tendem a reduzir seu metabolismo nas horas mais quentes do dia, assim como

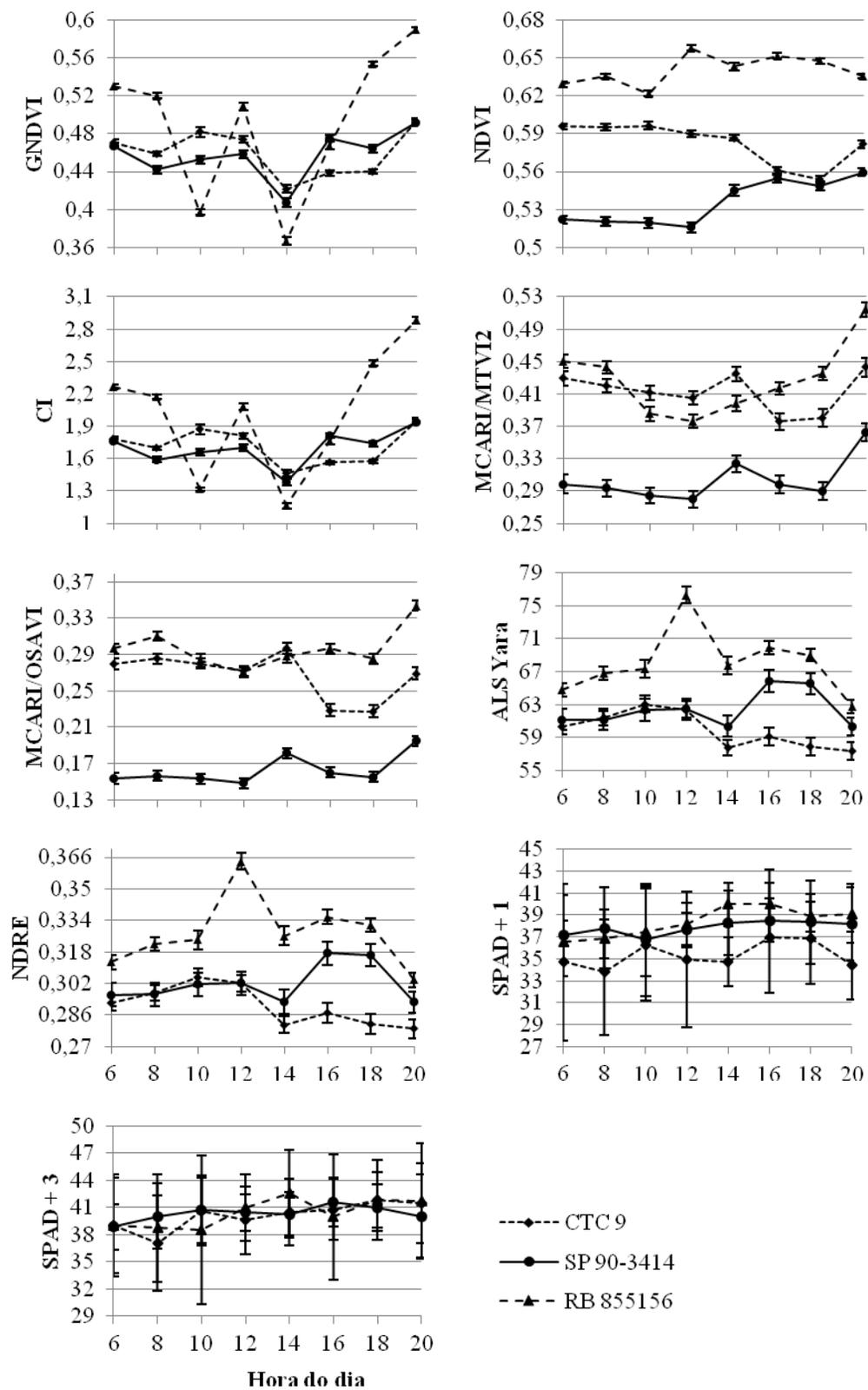


Fig. 7. Valores dos índices de vegetação e valores de SPAD obtidos ao longo dia (das 6:00 às 20:00h) e seus respectivos intervalos de confiança nas três variedades de cana estudadas.

enrolar as folhas para diminuir a perda de água por transpiração (Lisson et al., 2005). Por haver essa alteração na arquitetura foliar, a refletância teoricamente deveria ser alterada. Esse mecanismo pode variar consideravelmente entre variedades, podendo ser correlacionado com a tolerância à seca (Inman-Bamber, 2004), daí a importância do estudo em diferentes variedades.

Dessa forma, mais estudos devem ser conduzidos para avaliar essa possível interferência e dar segurança ao usuário que esse tipo de erro não aconteça.

## **3.2 Experimentos a campo**

### **3.2.1 Efeito das doses de N**

Para os experimentos com doses de N realizados na Usina São Martinho (Tabela 2), é possível identificar que em nenhuma das datas avaliadas os sensores conseguiram diferenciar as doses de N aplicadas. Na primeira data, isso pode ser explicado pela pouca biomassa acumulada pela cultura e pela alta influência do substrato nas mensurações realizadas com o sensor, conforme verificado por Amaral & Molin (2011). No entanto, nessa data a análise foliar foi capaz de detectar os diferentes teores de N foliar entre os tratamentos, o que já não ocorre na terceira avaliação. Baseado nisso, e pelos indícios de resto de adubo granulado encontrado na área em uma data que não estava planejada a adubação, acredita-se que as parcelas foram comprometidas pela adubação nitrogenada não intencional realizada pela equipe técnica da Usina, afetando os resultados desse trabalho.

Para os experimentos com doses de N realizados no APTA (Tabela 3), fora o IV MCARI/MTVI2, os valores obtidos com o restante dos IVs não identificaram diferença entre as variedades, enquanto os clorofilômetros sofreram grande influência. Quanto às doses de N aplicadas, foram obtidas altas respostas pelos IVs NDVI, MCARI/OSAVI, Yara ALS e NDRE, enquanto os IVs CI E MCARI/MTVI2 não foram influenciados por esse fator. Eitel et al. (2008) afirmaram que o IV MCARI/MTVI2 foi um bom estimador de clorofila e N foliar para a cultura do trigo. Entretanto, nas condições do presente estudo esse IV não foi capaz de diferenciar as doses de N. Por outro lado, Wu et al. (2008), também trabalhando com trigo, afirmaram que MCARI/OSAVI foi o melhor entre os IVs utilizados para determinação da clorofila nas folhas por meio de imagens orbitais. Nas condições desse estudo, esse IV foi eficiente em identificar as doses de N, de forma similar ao NDVI, Yara ALS e NDRE. O IV GNDVI também obteve

resposta às doses de N, porém com menor intensidade. Os clorofilômetros obtiveram alta resposta ao N.

**Tabela 2. Valores médios observados pelos diferentes equipamentos, análise de variância dos tratamentos e coeficiente de variação na primeira e na terceira avaliação.**

Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )	NDVI	CI	GNDVI	MCARI/ MTVI2	MCARI/ OSAVI	Yara ALS	NDRE	SPAD	N foliar (g kg <sup>-1</sup> )
Primeira avaliação - 0,25 m									
0	0,337	1,49	0,425	0,297	0,127	40,96	0,202	42,7	18,70
60	0,345	1,54	0,434	0,298	0,130	41,79	0,206	44,2	21,10
120	0,318	1,33	0,396	0,269	0,112	39,65	0,195	44,6	21,60
180	0,352	1,51	0,428	0,273	0,121	43,67	0,215	45,6	21,70
240	0,366	1,56	0,437	0,289	0,134	44,62	0,219	45,0	23,20
Anova <sup>3</sup>	0,79	0,49	0,45	0,35	0,81	0,67	0,67	0,28	0,01
CV (%)	15,76	12,60	7,70	8,56	22,71	12,41	12,07	4,10	6,71
Terceira avaliação - 0,70 m									
0	0,644	1,22	0,358	0,366	0,294	73,37	0,350	44,90	22,60
60	0,678	1,48	0,368	0,503	0,465	73,53	0,350	44,30	22,50
120	0,643	0,62	0,225	0,387	0,347	67,55	0,325	45,20	21,10
180	0,688	0,91	0,310	0,404	0,378	77,50	0,368	45,40	22,90
240	0,699	1,09	0,344	0,432	0,424	79,57	0,376	45,40	20,80
Anova	0,79	0,60	0,44	0,58	0,67	0,83	0,83	0,51	0,15
CV (%)	11,75	72,61	36,09	29,35	44,83	20,64	18,29	2,21	6,11

Apenas para o IV MCARI/MTVI2 foi verificada interação entre as variedades e as doses de N aplicadas. Realizando o desdobramento das doses dentro de cada variedade verificou-se que apenas uma variedade apresentou diferença entre os tratamentos. Entretanto, nesse único caso a análise de regressão não foi significativa, mostrando que não foi o N a principal causa que afetou os resultados obtidos por esse IV, não devendo esse IV ser usado para recomendação de adubação N na cultura. Os IVs NDVI, MCARI/OSAVI, Yara ALS e NDRE apresentaram alto ajuste à regressão linear. O IV GNDVI também apresentou ajuste à regressão linear, porém com menor intensidade. Quanto à regressão quadrática, apenas o IV NDVI e o clorofilômetro na folha + 3 obtiveram ajuste a ela, indicando que essa folha possa ser mais apropriada para a determinação do teor de clorofila foliar em cana-de-açúcar e que o NDVI pode começar a saturar em pontos com alta biomassa (SOLARI et al., 2008).

Destaque deve ser dado ao CI, onde trabalhos anteriores verificaram grande similaridade com o NDVI, ambos calculados a partir dos comprimentos de onda de 590 (ambar) e 880 nm

(Solari et al., 2008; Shiratsuchi et al., 2010; Amaral & Molin, 2011). Entretanto, quando se trabalha com os comprimentos de onda na região do visível mais próximo aos originalmente propostos, respectivamente 560 e 670 nm para CI (Gitelson et al., 2003) e NDVI (Rouse et al., 1974), esta grande similaridade deixa de existir, corroborando o que foi verificado também no experimento de leituras ao longo do dia. Desta forma, a configuração para o CI utilizada no presente estudo (verde) o tornou insensível em identificar a nutrição das plantas por N.

**Tabela 3. Análise de variância (p valor) dos dados obtidos pelos diferentes índices de vegetação e o clorofilômetro SPAD nas folhas +1 e +3, separadamente (acima). Teste de comparação de média (Scott-Knott a 5%) e análise de regressão (abaixo).**

Fonte de variação	G.L. <sup>2</sup>	NDVI	CI	GNDVI	MCARI/MTVI2	MCARI/OSAVI	Yara ALS	NDRE	SPAD +1	SPAD +3
bloco	3	0,0713	0,1954	0,1006	0,0181	0,025	0,2012	0,193	0,47	0,153
variedade	2	0,7875	0,5723	0,6252	0,0298	0,0663	0,3842	0,395	0,003	0,002
dose de N	3	<0,001	0,1591	0,038	0,0842	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
interação <sup>1</sup>	6	0,7892	0,8929	0,9198	0,0308	0,1377	0,7696	0,792	0,75	0,884
Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )										
0		0,488 b	1,90	0,475 b	0,353	0,212 b	54,59 b	0,266 b	44,6 b	45,4 c
50		0,567 a	2,14	0,512 a	0,383	0,254 a	62,93 a	0,305 a	46,6 a	48,4 b
100		0,587 a	2,41	0,528 a	0,368	0,255 a	68,56 a	0,329 a	47,4 a	50,0 a
150		0,606 a	2,33	0,531 a	0,382	0,272 a	69,60 a	0,334 a	48,0 a	51,0 a
Reg. linear		<0,001	-	0,008	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Reg. quadrática		0,027	-	0,248	-	0,134	0,123	0,107	0,083	0,022

<sup>1</sup> interação entre tratamento (dose de N) e variedade; <sup>2</sup> GL: grau de liberdade; <sup>3</sup> Letras diferentes indicam diferença entre as médias dos tratamentos pelo teste de Scott-Knott a 5%

Comparando a média dos tratamentos (Tabela 3), é possível observar diferença apenas entre os tratamentos que receberam N e o tratamento sem N, explicável pela baixa resposta ao N que ocorre em diversas situações brasileiras (Cantarella et al., 2007).

### 3.2.2 Influência do substrato

Foi observada influência variável dos substratos nos diferentes IVs (Tabela 4). Os resultados obtidos corroboram Wu et al. (2008) e Eitel et al. (2008), pois os índices compostos MCARI/OSAVI e MCARI/MTVI2 não sofreram influência do substrato. Além destes, o NDRE foi o IV que apresentou melhores resultados, comprovado pela baixa alteração de valores observada entre os tratamentos. O índice Yara ALS também foi capaz de reduzir a influência do substrato. O NDVI e o GNDVI foram suscetíveis à interferência do substrato, provavelmente pela forte influência dos comprimentos de onda na região do visível desses índices. Dessa forma,

alterando a coloração do substrato, altera-se também os valores de refletância dossel/substrato e, conseqüentemente, os valores dos IVs.

O índice CI mais uma vez apresentou inconsistência dos dados, apresentando alto CV. Maior variação no CV para *ambar* CI foi observado também por Amaral & Molin (2011). Entretanto, mesmo apresentado maior CV do que o *ambar* NDVI, esse IV foi capaz de identificar doses de N aplicadas.

**Tabela 4. Valores dos índices de vegetação observados nas condições de presença de palha, solo exposto e areia como substrato**

	NDVI	CI	GNDVI	MCARI/MTVI2	MCARI/OSAVI	Yara ALS	NDRE
Palha	0.633 b	2.46 a	0.549 a	0.444 a	0.329 a	68.61 a	0.330 a
Areia	0.643 b	1.79 a	0.471 b	0.450 a	0.358 a	67.94 a	0.327 a
Solo argiloso	0.673 a	2.67 a	0.558 a	0.458 a	0.348 a	73.95 a	0.353 a
CV %	3.000	27.80	9.890	7.820	9.520	9.84	8.660
Erro padrão	0.008	0.26	0.021	0.014	0.013	2.82	0.012

<sup>(1)</sup> Letras diferentes indicam diferença entre as medias dos tratamentos pelo teste Scott-Knott a 5%

Huete (1989) cita que as contribuições do solo na resposta espectral da vegetação variam com a quantidade exposta, com as condições da superfície e com as suas propriedades intrínsecas, como características mineralógicas, orgânicas e de absorção de água.

Grohs et al. (2009), trabalhando com o *red* NDVI, identificaram que houve interferência nos valores obtidos quando as condições do substrato eram palha de milho ou palha de soja. Isso mostra que as alterações de substrato devem ser atentamente observadas pelos utilizadores da tecnologia de sensores óticos como base para a adubação nitrogenada, especialmente em culturas ou em fases de desenvolvimento das culturas que apresentem área significativa de substrato aparente.

### 3.2.3 Influência da água sobre as folhas

Foi observada influência variável das condições de água sobre as folhas nos diferentes IVs (Tabela 5). Isto pode ser preocupante nas condições de campo, pois a operação de aplicação de fertilizantes possui um período curto para sua realização e não deve ser interrompida. Dessa forma, a aplicação de N com base em sensores óticos pode ficar suscetível a erros de dosagem quando da ocorrência de chuvas, tanto durante a chuva, quanto enquanto as folhas não estiverem completamente secas.

**Tabela 5. Índices de vegetação para as condições de chuva, orvalho e sol.**

	NDVI	CI	GNDVI	MCARI/MTVI2	MCARI/OSAVI	Yara ALS	NDRE
Chuva	0.554 c	1.02 a	0.330 a	0.458 a	0.439 a	55.98 c	0,272 c
Orvalho	0.580 b	1.00 a	0.303 a	0.445 a	0.435 a	58.17 b	0.283 b
Sol	0.613 a	1.41 a	0.379 a	0.481 a	0.437 a	61.12 a	0.296 a
CV %	2.240	31.79	24.340	12.960	11.570	2.07	1.920
Erro padrão	0.007	0.18	0.041	0.030	0.025	0.61	0.003

<sup>(1)</sup> Letras diferentes indicam diferença entre as medias dos tratamentos pelo teste Scott-Knott a 5%

NDVI, Yara ALS e NDRE sofreram influência dos tratamentos, indicando que as condições de umidade no momento da avaliação com sensores óticos é fonte de erro e deve ser observada com cautela. Para os demais índices de vegetação não foi observada interferência significativa, provavelmente em função do alto CV apresentado, o que representa uma inconsistência dos dados obtidos.

Essa influência da água na refletância dos dosséis das plantas também foi verificada por Madeira et al. (2001), que trabalhando com gramados, verificaram que o orvalho e a presença de água sobre o dossel das plantas aumentou a reflectância no visível (VIS) e diminuiu no infravermelho médio (MIR) e no infravermelho próximo (NIR). Já a precipitação leve diminuiu a reflectância no infravermelho próximo (NIR), o que tende a influenciar nos valores obtidos pelos IVs.

#### 4. CONCLUSÕES

Nas condições do presente estudo não foi possível identificar padrões de comportamento dos IVs ao longo do dia.

Nas parcelas de doses de N na Usina São Martinho, os resultados foram inconsistentes, provavelmente pela aplicação indesejável de N nas parcelas.

Nas parcelas do APTA, dentre os IVs estudados, o MCARI/OSAVI foi o que apresentou melhores resultados. Não apresentou interferência do substrato e da água sobre as folhas, mas foi eficiente em identificar as doses de N.

NDRE e Yara ALS apresentaram comportamento semelhante em todas as análises realizadas, sendo eficientes em identificar as doses de N, mas sendo sensíveis a variações quando da presença de água. O NDVI apresentou essas mesmas características, mas ao contrário dos outros dois IVs, foi sensível também às variações de substrato.

O CI e o MCARI/MTVI2, embora tenham apresentado sensibilidade variável às condições de substrato e água, não foram eficientes em identificar as doses de N. Dessa forma, as configurações desses IVs conforme a utilização no presente estudo devem ser descartadas quando se tem o objetivo de controlar a fertilização nitrogenada.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa de iniciação científica, ao corpo técnico da Usina São Martinho, ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e ao Professor Rubens Duarte Coelho (ESALQ/USP) por permitir o uso de suas instalações e experimentos.

## 6. REFERÊNCIAS

AGRIANUAL 2010. Anuário estatístico da agricultura. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2010. p. 239-242.

Amaral, L.R.; Molin, J.P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 12, p.1633-1642, 2011.

Ayala-Silva, T.; BEYL, C.A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. *Advantages in Space Research*, Elmsford, v. 35, p. 305-317, 2005.

Barnes, E.M.; Clarke, T.R.; Richards, S.E.; Colaizzi, P.D.; Haberland, J.; Kostrzewski, M.; et al. In *Coincident detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data [CD Rom]*, Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA, 16-19 July 2000.

Bausch, W.C.; Brodahl, M.K. Strategies to evaluate goodness of reference strips for in-season, field scale, irrigated corn nitrogen sufficiency. **Precision Agriculture**, New York, v. 13, p. 104-122, 2011.

Cantarella, H., P.C.O. Trivelin and A.C. Vitti. 2007. Nitrogen and sulfur in sugarcane crop (p. 355-412). In: T. Yamada, S.R.S. Abdalla and G.C. Vitti (eds.), Nitrogen and sulfur in Brazilian agriculture. (In Portuguese.) IPNI Brasil, Piracicaba, SP.

Eitel, J.U.H., D.S. Long, P.E. Gessler and E.R. Hunt. 2008. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. *Agron. J.* 100: 1694-1702.

FAO. 2011. Food and Agriculture Organization. Faostat. <http://faostat.fao.org/> (accessed 15 Dec. 2011).

Ferreira, D.F. 2011. SISVAR: a computer statistical analysis system. *Cienc. Agrotec.* 35(6): 1039-1042.

Gitelson, A.A., A. Viña, D.C. Rundquist, V. Ciganda, and T.J. Arkebauer. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32:L08403. doi:10.1029/2005GL022688

Gitelson, A.A. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.* 160:271-283

Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *J. Plant Physiol.* 148: 494-500.

Grohs, D.S., C. Bredemeier, C.M. Mundstock and N. Poletto. 2009. Model for yield potential estimation in wheat and barley using the GreenSeeker sensor. *Agric. Eng.* 29:101-112.

Huete, A.R., 1989. Soil Influences in Remotely Sensed Vegetation Canopy Spectra. In: *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, Asrar, G. (Ed.). John Wiley and Sons, New York, USA., ISBN-13: 9780471628958, pp: 107-141.

Inman-Bamber, N.G. 2004. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Res.* 89: 107-122.

Jasper, J., S. Reusch and A. Link. 2009. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. In: *Prec. Agriculture '09*, Wageningen. Published as CD-ROM.

Kitchen, N.R., K. A. Sudduth, S.T. Drummond, P.C. Scharf, H.L. Palm, D.F. Roberts, and E.D. Vories. 2010. Ground-Based Canopy Reflectance Sensing for Variable-Rate Nitrogen Corn Fertilization. *Agron. J.* 102(1): 71-84.

Lisson, S.N. 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. *Field Crops Res.* 92: 321-336.

Lofton, J., B.S. Tubana, Y. Kanke, J. Teboh, and H. Viator. 2012. Predicting Sugarcane Response to Nitrogen Using a Canopy Reflectance-Based Response Index Value. *Agron. J.* 104(1): 106-113.

Madeira, A.C., T.J. Gillespie and C.L. Duke. 2001. Effect of wetness on turfgrass canopy reflectance. *Agric. For. Meteorol.* 107: 117-130.

Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

Molin, J.P., F.R. Frasson, L.R. Amaral, F.P. Povh, and J.V. Salvi. 2010. Capability of an optical sensor in verifying the sugarcane response to nitrogen rates. (In Portuguese, with English abstract.) *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 14(12): 1345-1349.

Portz, G., J.P. Molin, and J. Jasper. 2012. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precis. Agric.* 13: 33-44.

Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, et al. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 94: 815-820.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, pp. 1-137.

Scharf, P. C.; Lory, J. A. Calibration of remotely sensed corn color to predict nitrogen need. *Agronomy Journal*, v.94, p.397-404, 2002.

Shiratsuchi, L.S., R.B. Ferguson, J.F. Shanahan, V.I. Adamchuk, and G.P. Slater. 2010. Comparison of spectral indices derived from active crop canopy sensors for assessing nitrogen and water status. Presented at: 10th International Conference on Precision Agriculture. Denver, CO.

Solari, F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, and A. Gitelson. 2008. Active Sensor Reflectance Measurements of Corn Nitrogen Status and Yield Potential. *Agron. J.* 100(3): 571-579.

Solari, F. **Developing a crop based strategy for on-the-go nitrogen management in irrigated cornfields**. 2006. 157 p. Thesis (PhD) - University of Nebraska, Lincoln, 2006.

Vellidis, G., H. Savelle, R.G. Ritchie, G. Harris, R. Hill, and H. Henry. 2011. NDVI response of cotton to nitrogen application rates in Georgia, USA. In: J.V. Stafford, editor, Precision agriculture. Proceedings of the 8th Conference European on Precision Agriculture. Czech Republic, Prague: ECPA. p. 358-368.

Wu, C., Z. Niu, Q. Tang and W. Huang. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. *Agric. For. Meteorol.* 148: 1230-1241.