**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Uso de sensor ativo de dossel na detecção da resposta da cana-de-
açúcar ao suprimento de nitrogênio**

Hugo José Andrade Rosa

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2012**

Hugo José Andrade Rosa
Bacharel em Agronomia

**Uso de sensor ativo de dossel na detecção da resposta da cana-de-açúcar ao
suprimento de nitrogênio**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

Piracicaba
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Rosa, Hugo José Andrade

Uso de sensor ativo de dossel na detecção da resposta da cana-de-açúcar ao
suprimento de nitrogênio / Hugo José Andrade Rosa.- - Piracicaba, 2012.
73 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Adubação 2. Agricultura de precisão 3. Cana-de-açúcar 4. Fertilizantes nitrogenados
5. Nitrogênio 6. Sensores ópticos 7. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 633.61
R788u

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais José Hugo Rosa e Sandra Andrade Leite Rosa e ao meu irmão Yuri José Andrade Rosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, à minha família pelo apoio, agradeço também à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade e ao Professor José Paulo Molin, pela confiança e ensinamentos. Agradeço os técnicos do departamento de Engenharia de Biossistemas pela amizade e apoio durante as tarefas. Agradeço ao gMAP e seus integrantes e aos colegas de república pela excelente recepção, amizade e conhecimento compartilhado. Agradeço em especial todos os colegas de pós-graduação, os quais, sem exceção, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho e a todo grupo do IAC responsável pela condução dos experimentos e que em muito colaboraram. Agradeço também à Trimble pela disponibilização do conjunto de sensores utilizado nesse trabalho e ao CNPq pela bolsa concedida ao autor.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Panorama do setor sucroenergético	19
2.2 Nitrogênio como nutriente: importância e dinâmica.....	20
2.3 Manejo e recomendação de nitrogênio	23
2.4 Sensores de dossel, funcionamento e embasamento fisiológico	27
2.5 Estratégias de recomendação de N baseadas em sensores de dossel	29
2.6 Sensores e a cultura da cana-de-açúcar no mundo e no Brasil	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Experimentos de identificação de resposta	35
3.1.1 Descrição	35
3.1.2 Delineamento	35
3.1.3 Avaliação com sensor de dossel	36
3.1.4 Avaliação com medidores de clorofila	36
3.1.5 Avaliação de parâmetros biométricos.....	37
3.1.6 Análises.....	37
3.2 Experimento de recomendação com base na resposta da cultura	38
3.2.1 Descrição	38
3.2.2 Delineamento	38
3.2.3 Avaliação com sensor de dossel	39
3.2.4 Recomendação de N com base na resposta da cultura	39
3.2.5 Avaliação nitrogênio foliar	40
3.2.6 Análises.....	40
3.3 Comparação de métodos de estimativa de produtividade.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Experimentos de identificação de resposta	43
4.1.1 Apresentação dos dados.....	43
4.1.2 Análise do NDVI e SPAD	44
4.1.3 Análise da produtividade final.....	48

4.1.4 Relação dos dados de sensores com parâmetros biométricos.....	54
4.2 Experimento de recomendação com base na resposta	55
4.3 Comparação de métodos de estimativa de produtividade	60
3 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS	65

RESUMO

Uso de sensor ativo de dossel na detecção da resposta da cana-de-açúcar ao suprimento de nitrogênio

A complexidade na dinâmica do nitrogênio é resultado de suas interações com o ambiente. Embora muito já tenha sido estudado, a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar ainda pode ser considerada um desafio. Entre os esforços para melhorar o manejo do nitrogênio em cana-de-açúcar está o uso de sensores ativos de dossel. Para que um sensor de dossel se preste à adubação nitrogenada ele deve atingir requisitos fundamentais. Com base nisto, o objetivo deste trabalho foi avaliar se o sensor de dossel GreenSeekerTM é uma ferramenta de auxílio na recomendação da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar, através da avaliação dos requisitos: capacidade de identificar a resposta radiométrica às diferentes condições de nutrição por nitrogênio e de se correlacionar com a produtividade final da cultura. A produtividade e os dados de índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) foram coletados em cinco experimentos de resposta ao nitrogênio, ao longo do ano safra 2011-12. Os tratamentos se constituíram de doses de nitrogênio variando entre 0 e 240 kg ha⁻¹. Para determinação do NDVI foi utilizado o sensor ativo de dossel GreenSeekerTM, modelo RT200 (Trimble Navigation Ltda., Sunyvale, CA, EUA). As avaliações com o sensor foram guiadas pela altura média dos colmos. Apenas 50% dos experimentos avaliados foram responsivos ao nitrogênio. O sensor se mostrou capaz de identificar significativamente a resposta da cultura ao suprimento diferenciado de N, tanto em experimentos responsivos quanto na ausência de resposta, com R² de até 0,997. Além disso, o sensor foi capaz de se correlacionar com a produtividade final da cultura, através do índice NDVI medido no início do ciclo com R² significativos variando entre 0,466 e 0,666. Quando o método do índice de resposta (RI) modificado foi utilizado para estimar produtividade, foram obtidos melhores ajustes, proporcionando aumento nos valores de R², até três vezes maiores do que os obtidos com dados brutos de NDVI e produtividade, o que resultou na possibilidade de englobar no mesmo modelo dados referentes a experimentos heterogêneos quanto a ambientes variedades e tratamentos, porém com relações inferiores ao esperado. O sensor foi altamente eficiente na determinação da resposta da cultura ao suprimento diferencial de nitrogênio e foi capaz de se correlacionar com a produtividade final, caracterizando-se, portanto, como uma ferramenta útil no manejo da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; NDVI; Sensoriamento proximal; Curva resposta; *Saccharum spp*

ABSTRACT

Use of active crop canopy sensor to detect sugarcane responsiveness to nitrogen supply

The complexity in the nitrogen dynamics is due the range of iterations it has in the environment. Even though much has been studied already, sugarcane nitrogen fertilization is still considered a challenge. Among the efforts to better manage nitrogen in sugarcane is the use of active crop canopy sensors. In order to be valuable for nitrogen management, a sensor must fulfill fundamental requirements. Based on that, the objective of this study was to evaluate if the canopy sensor GreenSeekerTM is a valuable tool in the process of nitrogen recommendation in sugarcane, through the following requirements: capacity of identifying the crop radiometric response to differentiated conditions of nitrogen supply and to correlate with crop final yield. The yield and the normalized difference vegetative index (NDVI) data were collected from 5 different nitrogen response trials during the harvest season of 2011-12. The treatments consisted of nitrogen rates ranging from 0 to 240 kg ha⁻¹. A GreenSeekerTM, active crop canopy sensor, model RT200 (Trimble Navigation Ltda., Sunyvale, CA, EUA) was used to obtain the NDVI data. The sensor readings were guided by the average crop stalk height. Just 50% of the evaluated trials were responsive to nitrogen. The sensor has shown to be able to significantly identify the crop response to nitrogen supply in either responsive or non-responsive conditions with a maximum R^2 of 0,997. In addition, the sensor was also able to correlate with final yield, using early NDVI readings with significant R^2 values ranging from 0,466 to 0,666. When the modified response index (RI) yield prediction method was used, better fits were found, which translated into an increase in the R^2 values of up three times fold when compared to the estimation made with raw NDVI and yield data, resulting in the possibility to address in the same model data from trials heterogeneous in conditions, varieties and treatments even though the relations found were weaker than expected. The sensor was highly effective in identifying crop response to nitrogen supply and to correlate to final yield, hence it was characterized as a valuable tool for nitrogen management in sugarcane.

Keywords: Precision agriculture; NDVI; Proximal sensing; Response curve; *Saccharum spp*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição dos sensores em veículo de alto vão livre, no momento de uma das avaliações.....	39
Figura 2 - Box-plot dos dados de NDVI e SPAD em cada experimento (1, 2 e 3) e avaliação (Av1 e Av2) realizada. Os Box-plotes representam os percentis de 25 e 75 em torno da média, a linha horizontal é a mediana e os pontos representam possíveis outliers (± 3 desvios padrão de cada média).....	44
Figura 3 - Correlações entre NDVI e SPAD para as duas avaliações (primeira avaliação - a, segunda avaliação - b), conjuntamente para os três experimentos.....	48
Figura 4 - Produtividade de cada variedade de cana-de-açúcar, em função das doses de N aplicadas para o experimento 1.....	49
Figura 5 - Acréscimo diferencial em produtividade de cada variedade de cana-de-açúcar em resposta ao acréscimo na dose de fertilizante nitrogenado no experimento 1.....	50
Figura 6 - Produtividade em função das doses de N e equação de regressão linear no experimento 2.....	51
Figura 7 - Correlação entre produtividade final da cultura e as leituras de NDVI e SPAD para todos os tratamentos no experimento 1; gráficos a e c referentes à primeira avaliação e gráficos b e d referentes à segunda avaliação.....	52
Figura 8 - Correlação entre produtividade final da cultura e as leituras de NDVI e SPAD para todos os tratamentos no experimento 2; gráficos a e c referentes à primeira avaliação e gráficos b e d referentes à segunda avaliação.....	53
Figura 9 - Correlação linear entre NDVI e tamanho de colmo.....	55
Figura 10 - Produtividade final da cultura em função dos tratamentos aplicados em cada experimento. Médias seguidas de diferentes letras representam produtividades estatisticamente diferentes ao nível de 5% no teste de Scott-Knott. As barras verticais representam o desvio padrão da média do tratamento; barras escuras representam experimento 5 e barras claras o 4.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização dos experimentos, tipo de solo de cada área, variedades de cana-de-açúcar utilizadas e área total das parcelas.....	35
Tabela 2 - Dados médios por tratamento para as variáveis NDVI e SPAD, para cada experimento; quadrado médio e significância dos fatores doses, variedades e interação doses x variedades; coeficientes de determinação (R^2) e significância das equações de regressão.....	46
Tabela 3 - Dados médios referentes ao experimento 3, por tratamento para os parâmetros Tamanho de Colmo e Altura de Planta; quadrado médio e significância dos fatores doses, variedades e interação doses x variedades; coeficientes de determinação (R^2) e significância das equações de regressão	54
Tabela 4 - Dados médios de teor de N foliar em cada uma das três avaliações e de macronutrientes no solo por ocasião da terceira avaliação, respectivamente nos experimentos 4 e 5.	56
Tabela 5 - Produtividade obtida em função de cada dose de N, em cada experimento, e significância (P) das diferenças entre as produtividades.	60
Tabela 6 - Equações de regressão, coeficiente de determinação R^2 , e significância das regressões para cada metodologia aplicada individualmente para cada experimento e conjuntamente para todos.....	61

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar tem peso relevante no PIB e é importante pela sua múltipla utilização, na forma de forragem, como matéria prima para produção de açúcar, etanol, melado, rapadura, aguardente e energia (BRASIL, 2007). Estimativas projetam um cenário de aumento médio anual na produção de 3,25% até 2018/2019, sem prejuízos na produção de alimentos ou na estrutura de distribuição dos mesmos (BRASIL, 2012). No mundo, a cana-de-açúcar é cultivada com diferente relevância em 110 países (FAO, 2012). Os principais produtores são Índia, China Tailândia e Paquistão, liderados pelo Brasil com produção estimada para safra 2012-2013 de 596,63 mil t (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012).

Segundo o Agrianual 2012, a cana-de-açúcar, representada pelo setor sucroenergético, é fonte importante na matriz energética nacional, chegando a contribuir com 5,8% (somente energia elétrica), apesar de apenas 30% das unidades produtoras comercializarem os excedentes de energia provenientes da queima do bagaço, o que ressalta seu potencial, atual e futuro, como fonte energética renovável. Considerando toda a matriz energética nacional, os produtos da cana-de-açúcar contribuíram no ano de 2011 com 17,8% (BRASIL, 2011).

Um dos argumentos frequentes e contrários à produção de fontes de energia renováveis e biocombustíveis é, sem dúvida, o custo de produção. Neste âmbito, a produção de cana-de-açúcar no Brasil é exceção. Segundo Wall Bake et al. (2009), devido uma série de razões, o custo de produção do etanol no Brasil reduziu sistematicamente ao longo das últimas três décadas, contribuindo em parte para o sucesso da atividade. Para que o setor mantenha competitividade e as taxas de crescimento, um processo contínuo de melhorias é imprescindível, de cunho técnico e administrativo. Frequentemente, as técnicas adotadas pela Agricultura de Precisão (AP) são citadas como opções para que o setor se modernize, seja ainda mais eficiente e mantenha a sustentabilidade (VEIGA FILHO; FRONZAGLIA; TORQUATO, 2010).

Quando se trata de eficiência no setor produtivo, o uso adequado de insumos não pode ser desprezado. Na safra 2011/2012, somente a participação dos fertilizantes no custo de produção da cana-de-açúcar ultrapassou 10%

(AGRIANUAL, 2012). Dentre os componentes dos fertilizantes, o nitrogênio é o que demanda maior atenção, uma vez que possui dinâmica altamente complexa, custo elevado e potencial de impacto no ambiente, seja pelo mau uso diretamente, onde as perdas podem chegar a 50% em cana-de-açúcar (TRIVELIN et al., 2002), ou pela emissão de gases ligados ao efeito estufa durante o processo de produção, transporte e aplicação (JAMES; BALDANI, 2012).

No âmbito da AP, uma das técnicas mais estudadas mundialmente é o uso de sensores de planta para aumentar a eficiência no uso do N. Se no início estes estudos eram motivados pelo apelo sustentável, hoje também possuem um reconhecido potencial de racionalizar custos por possibilitarem que a adubação nitrogenada seja feita adequando a marcha de absorção e a possibilidade de resposta às doses adequadas. No Brasil, especificamente para cultura da cana-de-açúcar, os sensores ópticos ativos de dossel, têm sido estudados como ferramentas capazes de atingirem metas definidas pelo setor, aliando eficiência e sustentabilidade com possibilidade de redução de custos.

Embora esforços para utilização de sensores de dossel no manejo da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar estejam surgindo e já demonstraram o potencial da técnica, ainda não existem relatos na literatura sobre o uso destes equipamentos para recomendação de nitrogênio em taxa variável, demonstrando a demanda de estudos para que essa tecnologia seja adotada por produtores, em nível de campo, para recomendação de adubação nitrogenada.

Segundo Varvel et al. (2007) os requisitos para que uma ferramenta seja capaz de auxiliar na recomendação de N são que ela se relacione com a resposta ao N e com a produtividade.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar se o sensor de dossel GreenSeekerTM é uma ferramenta de auxílio na recomendação da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar, através dos seguintes requisitos: capacidade de identificar a resposta radiométrica às diferentes condições de nutrição por nitrogênio e de se correlacionar com a produtividade final da cultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama do setor sucroenergético

Devido a razões geopolíticas, ambientais e econômicas, se intensifica a busca pelo aumento e pelo desenvolvimento de novas fontes energéticas renováveis. Nesse cenário, a produção do etanol brasileiro possui destaque como uma alternativa promissora e que se consolida mais a cada dia. No mundo, cerca de 110 países cultivam a cana-de-açúcar com maior ou menor relevância, sendo os principais produtores Brasil, Índia, China Tailândia e Paquistão (FAO, 2012), liderados historicamente pelo Brasil com produção estimada para safra 2012-2013 de 596,63 mil t (CONAB, 2012).

Segundo levantamento da companhia nacional de abastecimento, a área que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira no Brasil deve chegar a 8,5 mi ha, distribuídos entre os estados produtores, dentre os quais São Paulo continua sendo o mais representativo com aproximadamente 52% da área (CONAB, 2012). Essa estimativa corresponde a um incremento de 2,1% em relação à safra anterior. A produtividade média nacional foi estimada em $69,9 \text{ t ha}^{-1}$, gerando assim uma produção equivalente a 596,6 milhões de toneladas, das quais 50,42% estão previstas para produção de açúcar e o restante para etanol, o que deve gerar 14,28 bilhões de litros de etanol hidratado e 9,21 bilhões de litros de etanol anidro.

O setor passa atualmente por mudanças em vários níveis, no sistema de produção e organizacional. Como exemplo, a queima da biomassa foliar ainda é prática comum em várias regiões produtoras, com o intuito de facilitar a colheita manual, embora, por iniciativa do setor e por medidas legislativas esta prática tem sido substituída gradativamente pelo sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar “crua”. Este sistema de colheita propicia ao solo uma cobertura composta de ponteiros, folhas secas e pedaços de colmos, podendo chegar a $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (GALDOS et al., 2009), contendo cerca de 40 kg N ha^{-1} , quantidade que certamente influenciará o manejo da cultura e diretamente a adubação (SARTORI, 2010).

Outra mudança no panorama do setor é a crescente exploração de subprodutos para cogeração de energia (SEABRA; MACEDO, 2011). Além da cogeração de energia, destaca-se a potencialidade da exploração do etanol de segunda geração, através da hidrólise do material celulósico, que ainda não é

produzido em escala comercial devido aos custos relacionados às enzimas e microrganismos envolvidos no processo, muito embora a tecnologia já esteja disponível (CARDONA; QUINTERO; PAZ, 2010). Todas estas opções contribuem para a relevância do setor na matriz energética nacional, sendo a segunda maior fonte, a qual contribuiu no ano de 2007 com 17,8% da matriz energética nacional, evidenciando o potencial da cultura e a sustentabilidade do setor (BRASIL, 2011).

Sobre sustentabilidade, segundo Goldemberg et al. (2008), a cana-de-açúcar sem dúvida é uma fonte de energia renovável que trás várias contribuições positivas e que por vezes são relevadas como, por exemplo, a melhoria na qualidade do ar em áreas metropolitanas devido à substituição de combustíveis fósseis pelo etanol, a eliminação da necessidade da adição de chumbo à gasolina e pela diminuição gradativa da queimada em zonas rurais.

2.2 Nitrogênio como nutriente: importância e dinâmica

Devido à sua presença em vários compostos essenciais ao metabolismo das plantas, o N como nutriente é fundamental. Entre estes compostos estão os aminoácidos, ácidos nucleicos e clorofila. Sendo assim, a participação do elemento N nas reações bioquímicas do metabolismo de plantas é muito grande, razão pela qual é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pelos vegetais em geral. Epstein e Bloom (2005) exemplificam a importância do N ao citar que cerca de um quarto do gasto energético dos vegetais provém de reações envolvidas na redução do nitrato a amônio para subsequente incorporação do N às formas orgânicas nas plantas.

O ciclo do N e suas relações com o sistema solo-planta é de uma complexidade notável. A maior fração do N no solo está na forma orgânica, na matéria orgânica do solo, em inúmeras formas e com períodos de meia vida extremamente variados, desde poucos dias até centenas de anos, características estas que adicionam complexidade à tarefa de manejo da adubação nitrogenada (CANTARELLA, 2007).

Do ponto de vista agrícola, o ciclo do N no solo é o mais importante, embora em um âmbito geral seja apenas parte do ciclo do mesmo na natureza. No solo, as reservas sob formas orgânicas estão susceptíveis a várias alterações com potencial de aumentar ou diminuir sua disponibilidade às plantas. Entre os vários processos

que aumentam a disponibilidade podem ser citados mineralização e a fixação biológica e entre os que diminuem estão a imobilização e lixiviação.

Segundo Manzoni e Porporato (2009), a maior parte do conteúdo de nitrogênio orgânico está presente em resíduos vegetais e na matéria orgânica do solo. Este conteúdo é transformado em formas inorgânicas simples (N-NH_3^- e N-NH_4^+) facilmente absorvíveis pelos vegetais, através do processo de mineralização, onde atua uma comunidade altamente dinâmica de microrganismos e decompositores. Mesmo sendo este um processo de ocorrência em nível celular dos organismos envolvidos, ainda assim sofre grande interferência do ambiente, seja o próprio clima, vegetação ou as interações físicas e biológicas com o solo. Os autores ressaltam ainda, a dificuldade na modelagem destes processos como forma de quantificar a disponibilidade de N, citando a imensa quantidade e a falta de consenso em trabalhos dessa natureza.

Antagonicamente à mineralização, existe o processo de imobilização. A imobilização pode ser definida como o processo onde o nitrogênio inorgânico (NH_3^- , NH_4^+ , NH_3 e NO_2^-) é convertido em formas orgânicas microbianas, influenciado de maneira geral pelos mesmos fatores que a mineralização. Outro determinante, de ambos os processos é a relação C/N da matéria orgânica. Segundo Camargo, Gianello e Tedesco (1999), quando esta relação situa-se acima de 30 ocorre imobilização de N e quando é menor do que 30, predomina a mineralização.

A fixação biológica de N (FBN) é muito importante e já considerada no manejo de culturas como a soja no Brasil, onde praticamente não se aplica fertilizantes nitrogenados. No Brasil e no mundo existe um grande interesse em pesquisas relacionadas à FBN em culturas não leguminosas como, por exemplo, a cana-de-açúcar. Existem para essa cultura, evidências diretas e indiretas da FBN e certos trabalhos quantificam a quantidade de N contribuída por meio desse processo. Um exemplo é o trabalho de Urquiaga et al. (2011) onde as variedades nacionais foram capazes de se beneficiarem com pelo menos $40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Evidências indiretas, assim como relatadas por Boddey et al. (2003) vêm do fato de esta cultura produzir quantidades expressivas de colmos, em sistemas de cultivo contínuo com adubações nitrogenadas relativamente baixas, representando um balanço negativo entre N adicionado por meio de adubações e a extração de N nos colmos colhidos, mesmo desconsiderando as perdas de N durante o ciclo da

cultura. Nesse estudo, os autores calcularam que para a produção de 70 Mg ha^{-1} (média nacional no momento), aproximadamente 100 kg N é exportado de cada hectare cultivado ou perdido no processo de queima dos resíduos. Sendo assim, o balanço negativo previamente citado seria de aproximadamente $30 \text{ a } 40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, considerando a média nacional de aplicação de $60 \text{ a } 70 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Parte da eficiência das variedades nacionais de cana-de-açúcar em aproveitar N proveniente da FBN pode ser explicada, assim como relatado por Baldani et al. (2002), pelo fato de que durante o processo de melhoramento e seleção de variedades, desde a inserção da cultura no país, as quantidades de N utilizadas nunca foram altas comparadas às utilizadas em países com produtividades semelhantes.

Embora evidências sejam claras, as estimativas de incorporação de N nos sistemas, provindos da fixação biológica do nitrogênio são difíceis de serem mensuradas com exatidão, principalmente em ambientes tropicais como o Brasil (JAMES; BALDANI, 2012). Segundo Filoso et al. (2006), em um trabalho limitado ao Brasil, o aporte de nitrogênio sob formas reativas, por meio da adição antropogênica é de cerca de 10 Tg ano^{-1} e a fixação biológica natural é de mesma ordem de grandeza. Porém este último não inclui o N proveniente da fixação biológica nos sistemas de produção de soja, estimada em $3,2 \text{ Tg ano}^{-1}$, ou cerca de um terço da quantidade adicionada pelas ações do homem e superior a quantidade de N adicionada como fertilizante.

A complexidade geral no ciclo e interações do nitrogênio tem implicações práticas importantes como, por exemplo, as perdas do sistema solo-planta que embora possíveis de serem manejadas, dificilmente serão eliminadas ou reduzidas a quantidades inexpressivas.

As perdas de N e a eficiência no uso deste nutriente possuem relatos variados na literatura. Avanços têm sido feitos. Por exemplo, Tilman et al. (2002) citam que as práticas disponíveis atualmente foram capazes de elevar a eficiência no uso de nitrogênio em milho nos EUA em mais de 36% nos últimos 21 anos. Na cultura da cana-de-açúcar em especial, relatos sobre o aproveitamento do nutriente também são bastante variáveis, embora exista um consenso que de forma geral, o aproveitamento é baixo, entre 10 e 35% do teor total de N nas plantas (FRANCO et al., 2011).

Se a falta de nitrogênio gera consequências conhecidas no desenvolvimento e produtividade das culturas, o excesso também pode ser prejudicial. Thorburn, Meier e Probert (2005) comentam que, diferentemente de cereais, que armazenam N em forma de proteína até estádios avançados, a cana-de-açúcar pode ter os seus teores de açúcares reduzidos e a maturação postergada se N em excesso continua a ser acumulado.

Mesmo sendo a matéria orgânica do solo a principal fonte de N, isto não se traduz exatamente em disponibilidade e este é segundo Tilman et al. (2002), um dos maiores desafios da agricultura moderna: sincronizar as necessidades reais das lavouras e os processos que tornam o N disponível. Assim, o nitrogênio é sem dúvida, por ser o que possui maior número de interações com o ambiente, o nutriente com maior potencial de melhoria na eficiência do uso, pela adoção das “boas práticas no uso de fertilizantes” (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

2.3 Manejo e recomendação de nitrogênio

O N possui um ciclo de reações complexas e volúveis. Estas características dificultam o diagnóstico da disponibilidade do mesmo no solo, diferentemente do que ocorre com outros nutrientes e com parâmetros físicos, que podem ser medidos de maneira confiável a partir de amostras de solo (CANTARELLA, 2007; RAIJ, 2011). Sendo assim, vários métodos já foram e continuam sendo desenvolvidos, tentando determinar quanto N o solo poderá disponibilizar para a cultura. Tais métodos embora promissores em determinadas situações, tendem a não serem adotados por laboratórios, pois comumente se mostram pouco correlacionados com a real disponibilidade de N no solo em condições de campo, principalmente em regiões tropicais.

No Brasil, nenhuma recomendação de adubação nitrogenada se baseia exclusivamente no teor de matéria orgânica do solo. Apenas os estados do RS e SC, e mais recentemente a região dos Cerrados, utilizam a análise de matéria orgânica do solo para ajustar as recomendações de N para as diversas culturas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Nos EUA e em algumas regiões da Europa, análises de nitrato (NO_3^-) são recomendadas para situações específicas de clima, cultura e geralmente possuem aplicabilidade regional, porém atualmente as legislações referentes à contaminação

ambiental por N-NO_3^- passaram a dar mais impulso a esta técnica que tem se tornado cada vez mais comum (OLFS et al., 2005; CANTARELLA, 2007).

Por décadas, produtores têm utilizado a produtividade a ser obtida como ponto inicial do cálculo da recomendação de fertilizantes nitrogenados, e ainda hoje o uso desta técnica é predominante para a maioria das culturas como, por exemplo, o milho (SCHARF et al., 2006). Para isso, devem ser estabelecidos valores de produtividades a serem alcançados que multiplicados pela concentração dos nutrientes em cada unidade de material colhido, acrescidos de um fator de aproveitamento geram o valor a ser repostado no solo (KITCHEN, GOULDING, e SHANAHAN, 2008). Esta abordagem, embora importante e usual, pode se tornar inexata em certos momentos, por não considerar fatores de perda de N que ocorrem dentro de uma mesma safra, nem a quantidade de N que será disponibilizado pelo ambiente para o ciclo seguinte, fatores que contribuem para que nem sempre maiores produtividades demandam a aplicação de doses de N mais altas.

Segundo Mullen, Labarge, e Diedrick (2010), as lavouras respondem diferentemente à aplicação de fertilizantes em anos diferentes. Essa variabilidade temporal na resposta das culturas ao uso dos fertilizantes é causada principalmente pelo clima, o qual controla os processos de perda, disponibilização e de demanda por nutrientes. Os mesmos autores citam ainda que nenhum sistema de manejo que vise o aumento da eficiência no uso de fertilizantes pode obter sucesso sem que a variabilidade temporal de resposta gerada pelo clima seja levada em consideração.

De acordo com Scharf et al. (2006), para o nitrogênio em especial, a credibilidade do uso da técnica de balanço de massa para gerar recomendações de fertilizantes nitrogenados se apoia em quão bem a variabilidade das produtividades dentro de uma lavoura se relaciona com a variabilidade das doses economicamente ideais de N, e segundo o mesmo autor, este relacionamento ainda não foi completamente entendido. Trabalhos que detalham em nível de campo a variabilidade espacial das doses economicamente ideais existem (SCHARF et al., 2005; KITCHEN et al., 2010), porém ainda são escassos, mas com a tendência cada vez maior da adoção de mapas de produtividades gerados pelos monitores de produtividade das colhedoras, certamente mais trabalhos a respeito deste assunto serão desenvolvidos.

Para aplicações de nitrogênio em pré-plantio, a estratégia baseada na produtividade a ser alcançada, tem se mostrado historicamente a melhor opção para

produção de grãos (RAUN et al., 2001). Por outro lado, para aplicações em cobertura baseadas nesta estratégia, as incertezas ambientais são depositadas sobre o produtor. Os mesmos autores completam que esta estratégia tem sido utilizada por falta de alternativa melhor e porque é uma forma simples do setor produtivo contabilizar investimento e retorno (RAUN et al., 2005a).

Médias históricas de produtividades também podem ser utilizadas, e são ótimas referências. No entanto, mesmo um bom registro de vários anos subsequentes, pode sub ou superestimar doses a serem aplicadas em anos onde as condições ambientais proporcionem maior ou menor disponibilidade (KITCHEN, GOULDING E SHANAHAN, 2008; SINGH, PANDEY, SINGH, D, 2011) e segundo Scharf et al. (2006) dados de produtividade são importantes, porém apenas parte da informação necessária para o sucesso na recomendação de fertilizantes nitrogenados. Para adoção desta abordagem, créditos são atribuídos ou subtraídos das recomendações com base em várias características como, por exemplo, cultivo anterior com leguminosas ou gramíneas. Estes créditos são valores numéricos definidos por meio de experimentação, mas que por serem sujeitos a variáveis diversas que em sua maioria não são previsíveis, adquirem caráter empírico e sendo assim qualquer modelo matemático que utilize os mesmos, por si só, trará grandes incertezas (CANTARELLA, 2007). Segundo esse mesmo autor, estas incertezas são diminuídas à medida que dados mais confiáveis possam ser obtidos e usados em modelos matemáticos mais complexos e validados pela experimentação em campo.

Sem dúvida, o fator que impulsionou o uso de dados de produtividades de vários anos como ferramenta de auxílio à recomendação de fertilizantes foi a presença de monitores de produtividade, hoje disponíveis para maioria das culturas. Tais monitores além de registrarem a variabilidade presente na produtividade dentro de um mesmo campo, ainda registram estes dados de forma que análises espaciais são possibilitadas (PIERCE; NOWAK, 1999), alimentando o que hoje é um dos ramos de maior destaque na AP, as aplicações a taxas variáveis.

Aplicações com base em produtividades, também foram estudadas para outros nutrientes como fósforo e potássio, os quais são relativamente estáveis quando comparados ao N, e de certa forma podem ser estimados com maior confiança por meio de análises de solo, e por tudo isso, para esses nutrientes, a abordagem do balanço de massas tende a se aplicar melhor (SCHARF et al., 2006).

Diante das vantagens e das limitações dos métodos citados anteriormente, alternativas têm sido propostas. Um exemplo são as análises do teor foliar de N (SHARMA et al., 2011), adequadas principalmente no ajuste das doses a serem aplicadas em culturas perenes como Manga, Café e Citros (CANTARELLA; RAIJ; QUAGGIO, 1998; MATTOS JUNIOR et al., 2004). Mais recentemente, o uso de medidores de clorofila como, por exemplo, o SPAD-502 (Minolta Co., Japão) surgiu como alternativa ou complemento das análises foliares. Estes equipamentos são portáteis, de fácil manuseio e por produzirem leituras rápidas e não destrutivas, baseadas na quantidade de luz com comprimento de onda vermelho transmitida pelas folhas, geraram informação de interesse para pesquisa e certos setores produtivos. Embora não realizem medições diretas de N foliar, os valores mensurados por esses sensores são indicadores do teor de clorofila, que por sua vez se relaciona com o teor de N foliar (CANTARELLA, 2007; SAMBORSKI; TREMBLAY; FALLON, 2009; AMARAL; MOLIN, 2011).

As correlações obtidas por meio dos medidores de clorofila com o teor de N foliar são geralmente altas (RAUN et al., 2005a; SCHARF et al., 2006; SAMBORSKI; TREMBLAY; FALLON, 2009; KITCHEN et al., 2010), mas podem ser afetadas por diferenças entre variedades (WASKOM et al., 1996; ZHANG et al., 2007), estresse hídrico (SCHEPERS et al., 1996), idade da planta e posição de amostragem na lâmina foliar (CHAPMAN; BARRETO, 1997; ZHANG et al., 2007), além de apresentarem uma limitação física do número de amostras possíveis de serem adquiridas, limitação tal que é capaz de inviabilizar o uso deste equipamento por produtores em grandes áreas.

Em um trabalho de avaliação de três medidores de clorofila, Amaral et al. (2010) verificaram que os sensores testados foram capazes de identificar o crescimento do teor de clorofila devido ao aumento do fornecimento de N em parcelas de cana-de-açúcar e ressaltaram vantagens operacionais dos sensores ClorofiLOG (Falker) e SPAD (Minolta) sobre o N-Tester (Yara). Contrastando com os relatos da literatura, também em um trabalho com cana-de-açúcar, Portz (2011) não encontrou relação significativa entre os valores estimados pelos medidores de clorofila e as características agrônômicas avaliadas.

Equipamentos para medir o estado nutricional por meio de medição de clorofila, detecção de cor e características espectrométricas têm sido desenvolvidos para utilização em tempo real em AP (ZILLMANN et al., 2006). Exemplos destes

equipamentos são os sensores de dossel (GreenSeeker, CropCircle, N-Sensor e outros), que a partir da refletância da luz que os mesmos irradiam sobre as plantas (ativos), geram informações úteis ao manejo de N em culturas, possibilitando inclusive aplicações em taxas variáveis e em tempo real. Esta promissora tecnologia tem sido muito estudada em todo o mundo e para a maioria das grandes culturas.

Apesar de não ter sido desenvolvida com fins puramente agrícolas, mas sim para sensoriamento remoto distante (aéreo ou orbital) e somente depois adaptada para o sensoriamento próximo (sensores de campo ou de laboratório), o estudo radiométrico da refletância se adequa bem ao ambiente agrícola.

Embora exista o potencial de uso desses equipamentos, estudos de calibração e adequação para culturas e ambientes locais são de importância fundamental para o sucesso da técnica (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

2.4 Sensores de dossel, funcionamento e embasamento fisiológico

A transformação de energia luminosa em energia química é realizada nos cloroplastos das plantas com absorção dos comprimentos de onda do vermelho (630-680 nm) e azul (450-520 nm). Os comprimentos de onda da região do verde (520-600 nm) são muito menos utilizados no processo de foto fosforilação e por isso geram maiores refletâncias nesta faixa do espectro eletromagnético. Sendo assim, conclusões sobre o conteúdo de clorofila das plantas podem ser traçadas a partir da informação radiométrica na região dos comprimentos de onda do espectro eletromagnético do vermelho, verde e azul (KITCHEN; GOULDING; SHANAHAN, 2008).

A refletância nos comprimentos de onda do verde e do vermelho já se mostrou efetiva na determinação do conteúdo de nitrogênio em plantas e a intensidade da refletância na região do vermelho por si só, medida a partir de sensores de dossel também foi provada como um melhor indicador de deficiência de nitrogênio do que os gerados por medidores de clorofila (BLACKMER; SCHEPERS, 1996), embora muitos relatos sugiram altas correlações entre o sensoriamento feito pelos sensores de dossel e pelos medidores de clorofila (SOLARI et al., 2008; SHANAHAN et al., 2008).

As plantas absorvem muito menos luz no comprimento do Infravermelho Próximo (700-1400 nm) do que, por exemplo, o solo (SOLARI, 2006). Segundo

Campbell (2002), isto se deve ao fato de que cerca de 60% de toda radiação nesta faixa do espectro que chega às plantas é refletida pela estrutura do mesófilo foliar. Este comportamento tem sido base para criação de vários índices de vegetação ou biomassa, também capazes de distinguir plantas de solo (SHARMA et al., 2011).

Para que a informação radiométrica, medida pelos sensores seja transformada em informação com sentido agrônomo, normalmente utiliza-se dos chamados índices de vegetação. Os índices de vegetação nada mais são do que cálculos combinando refletâncias ou bandas relacionadas aos fatores estudados, para vegetação em especial, mais comumente na região do visível (uma medida da saúde fotossintética das plantas) e na região do infravermelho próximo (uma medida da estrutura física das plantas e de suas capacidades de assimilarem carbono).

Um dos índices mais estudados é o NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada). O NDVI tem sido utilizado em larga escala, para diversos fins e por muito tempo. Atualmente, seu uso tem obtido sucesso para avaliar o conteúdo de nitrogênio e a necessidade de adição de fertilizantes nitrogenados (RAUN et al., 2002; POVH et al., 2008; KITCHEN et al., 2010; AMARAL; MOLIN, 2011; LOFTON et al., 2012). A utilização deste índice no manejo da adubação nitrogenada tem frequentemente possibilitado reduções consideráveis no uso de fertilizantes e aumento na eficiência no uso do nitrogênio, sem prejuízos à produtividade, por meio da aplicação desses fertilizantes em taxa variável (RAUN et al., 2002; KITCHEN et al., 2010).

As medidas de refletância podem ser influenciadas por condições várias, além do conteúdo de N como, por exemplo, diferentes cultivares e a arquitetura das mesmas (KITCHEN et al., 2008). Alternativas têm sido propostas para limitar a influência destas condições. Uma das mais difundidas é o sensoriamento de áreas, dentro de um mesmo campo ou unidade de manejo, onde o N não é um fator limitante (BLACKMER; SCHEPERS, 1996). Além disto, variáveis ambientais como luminosidade (afetada por nebulosidade, ângulo de incidência da luz solar etc.), podem afetar a determinação de refletância, dependendo do tipo de técnica e do equipamento utilizado nas medições.

Para sanar as dificuldades relativas a determinações de refletância quando a luminosidade é um fator relevante, foram desenvolvidos sensores que emitem, nas plantas a serem avaliadas, sua própria luz modulada em comprimentos de onda específicos por meio de diodos emissores de luz e que captam a luz refletida por

meio de fotodiodos e filtros de seleção de comprimento (KITCHEN et al., 2008). Estes sensores podem ser denominados sensores ativos por possuírem fontes de luz própria e, devido a isto, podem ser utilizados independentemente da condição de luminosidade, inclusive durante o período noturno (POVH et al., 2008).

Estes sensores também possuem como vantagem, a possibilidade da geração de dados espacializados, com resolução espacial muito além da atualmente atingível por quaisquer outros métodos tradicionais, manuais ou laboratoriais, a um baixo custo relativo (KIM; SUDDUTH; HUMMEL, 2009).

Tecnologias que produzem imagens aéreas também têm sido utilizadas para identificar estresses de várias naturezas. Imagens dão acesso a informações ao nível de campos inteiros ou até propriedades, com boa exatidão espacial, o que possibilita ao usuário quantificar a extensão do estresse e correlaciona-lo às características de solo e relevo. Apesar disto, limitações como a disponibilidade e periodicidade das imagens, resolução espacial insuficiente e potencial predominante para determinações qualitativas ainda têm limitado a adoção dessa tecnologia como ferramenta auxiliar ao manejo de nitrogênio em culturas e por consequência suas aplicações nas técnicas de Agricultura de Precisão (KITCHEN et al., 2008).

Por tudo que a pesquisa tem demonstrado, os sensores de dossel são ferramentas importantes para o manejo da adubação nitrogenada, embora muito tenha de ser estudado a respeito de estratégias de recomendação, momento ideal de avaliação e escolha de comprimentos de onda mais adequados, para que esta tecnologia possa ter seu potencial explorado por completo.

2.5 Estratégias de recomendação de N baseadas em sensores de dossel

No mundo, principalmente Europa e EUA, a utilização de sensores para recomendação de fertilizantes nitrogenados encontra-se em estágios mais avançados do que no Brasil, inclusive com utilização prática, desenvolvimento de algoritmos regionais pelas redes de pesquisa e adoção por produtores. Esse nível foi alcançado não por acaso, mas sim através de um processo longo de experimentação e melhoramento dos métodos. De maneira geral, todas as estratégias desenvolvidas ao longo do tempo podem ser enquadradas em dois diferentes grupos: as que determinam a dose baseada na demanda e as que redistribuem uma dose predefinida (BERNTSEN et al., 2006). Os mesmos autores

citam que as estratégias do último grupo, ou seja, de redistribuição, exigem conhecimento prévio sobre a variabilidade existente na lavoura e que são mais fáceis de serem construídas do que as do segundo grupo, as quais embora não exijam o mesmo nível de conhecimento prévio sobre a área (safras anteriores), se baseiam na variabilidade atual para explorar o potencial de resposta e definir doses a serem aplicadas independentemente do total final de insumo a ser utilizado.

A respeito das estratégias que determinam a dose baseada na demanda, inicialmente, para a cultura do trigo, Raun et al. (2001) demonstraram que o potencial produtivo poderia ser estimado através de leituras de NDVI. Além do NDVI, foi utilizada a soma cumulativa de graus-dia no período entre duas leituras sequenciais de NDVI, e assim, foi proposto o índice EY (*in season estimated yield*) que mais tarde seria aprimorado e chamado de INSEY (*in-season estimate of yield*). Sequencialmente (RAUN et al., 2002) demonstraram que a eficiência no uso do nitrogênio foi aumentada em mais de 15%, utilizando o índice previamente criado para atribuir doses variadas de N para cada 1m² de parcelas experimentais de trigo.

Embora seja um método, estimar a produtividade não se traduz necessariamente em uma forma de gerar recomendações de adubação nitrogenada. Talvez mais importante seja a estimativa da resposta das culturas às adições futuras de fertilizante (RAUN et al., 2005). Este conceito gerou o chamado índice de resposta ou RI (sigla em inglês), proposto inicialmente por Johnson e Raun (2003). Para propor este índice, os autores utilizaram dados de experimentos de longa duração e avaliaram que as máximas produtividades obtidas em parcelas fertilizadas nem sempre variaram na mesma proporção que nas parcelas não fertilizadas e assim propuseram o RI, ou seja, uma simples divisão entre as produtividades descritas acima. Nesse trabalho, os autores concluíram que o RI variou inesperadamente, contrariando a ideia de que experimentos de longa duração teriam efeito sobre as parcelas que continuamente não receberam nitrogênio, exaurindo assim qualquer possível reserva do mesmo, porém, contrariamente ao esperado, um dos menores RI foi obtido após 30 anos consecutivos de experimentação.

Outra característica desta metodologia, assim como foi proposta, é que além de não considerar a variabilidade atual, baseia-se no passado, ou seja, produtividades já obtidas, para manejar a adubação da safra seguinte.

Em uma tentativa de avaliar a condição presente da lavoura, (RAUN et al., 2005b) demonstraram que o RI, agora medido por NDVI durante estádios

vegetativos específicos da cultura, em parcelas que receberam diferentes doses de fertilizante nitrogenado, teve um bom relacionamento com a produtividade final.

Porém, em certas situações, principalmente em parcelas com valores de RI medianos, subestimou-se o benefício da adição de mais fertilizante. Os mesmos autores sugeriram que para fertilização em nível de campo, uma faixa rica em nitrogênio deve ser avaliada como medida de comparação com a área a ser fertilizada. A metodologia da faixa rica foi inicialmente proposta por Blackmer e Schepers (1996), com o intuito, naquele período, de trabalhar com medidores de clorofila e imagens aéreas.

Muito embora a metodologia da faixa rica possa ser considerada uma das mais completas, por considerar a situação atual da lavoura, e as condições ambientais como interferentes na disponibilidade de N, sem dúvida possui entraves práticos no planejamento operacional do programa de fertilização, uma vez que se faz necessário a instalação das mesmas, anteriormente ao sensoriamento, para somente depois proceder a fertilização. Outra dificuldade é a incerteza de onde instalar a faixa rica nos anos subsequentes e a determinação do tamanho da mesma para que se mostre representativa do restante da lavoura.

Outro conceito apresentado por Raun et al. (2005a), foi o dos “selos de calibração” (Calibration Stamps). Nesta metodologia, os autores propuseram a aplicação de uma faixa de doses fixas de fertilizante nitrogenado em nove células contínuas de 1m^2 , tendo como objetivo propiciar a oportunidade de avaliar visualmente, com ou sem o auxílio de sensores, a resposta de cereais aos incrementos na dose aplicada de fertilizante nitrogenado e com base nessa avaliação determinar a necessidade mínima de fertilizante nitrogenado para a produção de máxima biomassa no restante da lavoura. Nesta linha, os autores consideravam necessário, a partir de trabalhos anteriores com análises geoestatísticas, o gerenciamento da variabilidade espacial em cada 1m^2 .

Segundo Raun et al. (2008) embora tenha sido prontamente adotada por uma porção considerável de agricultores Norte Americanos, a necessidade de mudanças na metodologia dos “selos de calibração” que propiciassem a instalação dos mesmos em áreas maiores, foi exacerbada. Segundo estes mesmos autores, a evolução da metodologia previamente desenvolvida foi a estratégia das rampas de calibração. As rampas de calibração possuem o mesmo objetivo, porém nestas, os incrementos na dose aplicada de fertilizante nitrogenado são contínuos e as rampas

são instaladas ao longo de uma porção de tamanho variável (com o número de doses a serem testadas) em uma porção representativa da lavoura a ser fertilizada, não mais tratando necessariamente a variabilidade espacial na mesma escala que a metodologia dos “selos de calibração”.

Recentemente, Shaver et al. (2011) desenvolveram e aplicaram na cultura do milho, uma metodologia de confecção de algoritmos de aplicação de fertilizantes nitrogenados. Baseando-se na metodologia das rampas de calibração e no índice de resposta RI os autores criaram os algoritmos, calculando vários RI (modificados), dividindo o NDVI das parcelas fertilizadas pelo das parcelas não fertilizadas e posteriormente determinaram a equação de regressão entre os RI e as respectivas diferenças nas doses envolvidas no cálculo dos mesmos. Os algoritmos criados se mostraram eficientes na determinação da dose a ser aplicada em outras parcelas, sem a necessidade da estimação de produtividades. Apesar disso, uma análise prática da metodologia também expõe as dificuldades operacionais na implantação do método, assim como nas previamente citadas.

Na busca de uma metodologia paralela, capaz de eliminar a necessidade de instalar as faixas ricas e a necessidade de estimar o potencial produtivo, o qual é sabido ser variável no tempo, Holland e Schepers (2010) propuseram o conceito da faixa virtual. Esta metodologia baseia-se, e tem como principal crítica, a hipótese de que qualquer lavoura possui naturalmente plantas que não estão limitadas pela disponibilidade de N. Avaliando uma parte do campo, que estatisticamente representa a faixa de vigor presente na lavoura, dados podem ser obtidos identificando áreas com plantas não limitadas pelo N, sem que nenhuma atenção extra tenha sido despendida pelos produtores a uma porção específica da lavoura. Com as informações sobre as plantas não limitadas, um índice pode ser gerado e usado no processo de fertilização do restante do campo.

A respeito das estratégias de redistribuição de doses pré-estabelecidas, mais comumente utilizadas na Europa, Berntsen et al. (2006) objetivaram aumento de produtividade através da aplicação de N em taxa variável dirigida por algoritmos de redistribuição de doses. Os autores esclareceram que a função desse tipo de algoritmo é remover N a ser aplicado de áreas com valores de índice de vegetação, neste caso medido pelo equipamento Yara N-Sensor, muito altos (alta biomassa) e muito baixos (potencial já perdido ou ausência de plantas) e realocar este insumo nas áreas com valores intermediários, as quais segundo os autores ainda seriam

capazes de responderem com aumento de produtividade ao acréscimo de fertilizante, sem contudo alterar a dose final pré-estabelecida, apenas redistribuindo-as melhor. Neste trabalho assim como em alguns outros (VRINDTS et al., 2003; JØRGENSEN; JØRGENSEN, 2007) o incremento na produtividade e ou qualidade foi tão baixo ou nulo a ponto de tornar impraticável a implementação em campo.

É notável a falta de consenso sobre a melhor estratégia de recomendação, assim como é a evolução que as técnicas sofreram nas últimas décadas. Especialmente para culturas como a cana-de-açúcar, muitas questões precisam ser respondidas até que se atinja o nível praticado no manejo da adubação nitrogenada em cereais.

2.6 Sensores e a cultura da cana-de-açúcar no mundo e no Brasil

Devido às dificuldades de se trabalhar com análises de solo e produtividades a serem alcançadas como bases dos métodos de determinação de doses de nitrogênio, pesquisas principalmente na área de grãos (trigo e milho) têm sugerido abordagens que avaliem o status da cultura durante a safra. Entretanto, para culturas como cana-de-açúcar pouco foi estudado a respeito (LOFTON et al., 2012).

Trabalhando com experimentos de resposta da cana-de-açúcar ao nitrogênio nos EUA, Lofton et al. (2012) compararam o índice de resposta ao nitrogênio (NDVI parcela fertilizada/NDVI parcela não fertilizada), medido pelo sensor GreenSeeker, ao índice de resposta de produtividade de colmos. Neste trabalho os autores obtiveram um forte relacionamento entre resposta ao nitrogênio e produtividade ($R^2=0,92$), comprovando a possibilidade do uso de sensores de dossel também em cana-de-açúcar. Além disso, os autores também concluíram que o NDVI medido quatro semanas após a fertilização seria o mais informativo para fins de manejo da adubação nitrogenada para cana-de-açúcar nas condições locais da cultura no estado da Louisiana.

No Brasil, esforços no mesmo sentido têm sido feitos e resultados relevantes começam a ser encontrados. Trabalhando com o sensor GreenSeeker (MOLIN et al., 2010) verificaram que 90 dias após a colheita (safra anterior), o sensor foi capaz de identificar as doses de nitrogênio aplicadas em cobertura (safra atual) e que o NDVI medido neste momento se relacionou linearmente com a produtividade. Também estudando o mesmo sensor, Frasson (2007) avaliou que tal equipamento foi capaz

de estimar a quantidade de falhas de plantio existentes em um talhão comercial de cana-de-açúcar, e que as leituras de NDVI foram interferidas por diferentes variedades.

Trabalhando com o sensor Crop Circle ACS-210, Amaral (2010) e Amaral e Molin (2011) concluíram que o equipamento é útil para a recomendação de nitrogênio para a cultura em questão e que o mesmo foi eficiente em detectar a variabilidade espacial da lavoura embora tenham sugerido a necessidade de mais estudos para que seja definida qual a melhor estratégia de recomendação e quais os possíveis fatores interferentes. Avaliando o sensor Yara N-Sensor, Portz (2011) e Portz et al. (2011) verificaram alta correlação entre os valores de sensor e de biomassa real medida a campo, concluindo que os mesmos poderiam ser utilizados em algoritmos agronômicos para fins de fertilização de cana-de-açúcar em taxa variável.

Sem dúvida, o momento ideal do sensoriamento é um fator determinante no sucesso da técnica. Contrastando Lofton et al. (2012), Amaral e Molin (2011) e Portz (2011) propuseram ser a melhor opção para as condições brasileiras, definir o momento do sensoriamento com base na altura dos colmos até a primeira folha com aurícula visível e que 0,5 m parece ser o mais adequado.

Embora esforços para utilização de sensores de dossel no manejo da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar estejam surgindo e demonstrando o potencial da técnica, ainda não existem relatos na literatura sobre o uso desses equipamentos para recomendação de nitrogênio em taxa variável, acentuando a demanda de estudos para que esta tecnologia seja adotada por produtores, em nível de campo, para recomendação de adubação nitrogenada em tempo real.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Experimentos de identificação de resposta

3.1.1 Descrição

Foram avaliados três experimentos de resposta a doses de nitrogênio em cana-de-açúcar da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), em áreas não irrigadas. Detalhes sobre os experimentos podem ser observados na tabela 1. Os outros macronutrientes assim como todo o restante do manejo cultural praticado foram feitos conforme recomendado para a cultura na região.

Tabela 1 - Localização dos experimentos, tipo de solo de cada área, variedades de cana-de-açúcar utilizadas e área total das parcelas

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Local	APTA Polo Centro Sul Piracicaba - SP	APTA Polo Centro Oeste Jaú - SP	Faz. Itaúna Barra Bonita - SP
Classificação de solos ¹	Argissolo Vermelho	Latossolo Vermelho	Neossolo Quartzarênico
Variedades	SP 81-3250, IAC 87-3396 e CTC 14	SP 81-3250, IACSP 95-5000 e RB 85-5536	SP 81-3250, IACSP 94-2094 e RB 86-7515
Área da parcela (m ²)	75	60	75

¹ classificação de solos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS, 2006)

A colheita foi realizada manualmente, seguida de pesagem com célula de carga instalada em carregadora, nos meses de Agosto no experimento 1 e Outubro no experimento 2. O experimento 3 ainda será colhido mecanicamente e pesado através de vagão instrumentado com células de carga.

3.1.2 Delineamento

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, onde as parcelas foram constituídas por três variedades de cana-de-açúcar e nas sub-parcelas foram aplicados os tratamentos. Os tratamentos se constituíam por quatro doses de fertilizante nitrogenado (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹) aplicados na forma de ureia sobre a palhada remanescente do ciclo anterior.

3.1.3 Avaliação com sensor de dossel

Após a fertilização das parcelas, aguardou-se até que a cultura atingisse no mínimo 0,3 m de altura média de “palmito”, ou seja, até a primeira folha com aurícula visível, para que fosse realizada a primeira avaliação ou no mínimo 30 dias após a fertilização, de maneira que nos experimentos 1 e 2 foi possível a realização de duas avaliações, aos 0,3 e 0,5 m de altura de “palmito” ou 50 e 70 dias após a fertilização e no experimento 3 apenas uma, aos 0,5 m.

O conjunto sensor foi conduzido manualmente, de forma que se mantivesse à distância de 1,0 m entre o sensor e o dossel, independente da altura média da parcela, com frequência de coleta de um dado por segundo. O equipamento utilizado foi o sensor de dossel GreenSeeker™.

O sensor GreenSeeker™, modelo RT200 (Trimble Navigation Ltda., Sunyvale, CA, EUA), trabalha com dois comprimentos de onda, um na região visível do espectro eletromagnético, correspondente ao vermelho (V, 660 ±15 nm) e o outro na região do infravermelho próximo (IVP, 770 ±15 nm), com frequência de emissão aproximada de 40.000 Hz. Neste sensor, a refletância do alvo é captada por um único fotodetector com filtros de interferência nos comprimentos citados, independentemente das condições de luz solar. O campo de visão do sensor é, segundo o fabricante, aproximadamente constante (colmatado) medindo 0,6 m de largura, desde que preservadas as especificações de altura sobre o dossel.

A partir dos valores das duas bandas separadamente, foi possível calcular o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) através da equação 1.

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

em que,

ρ_{IVP} = refletância no infravermelho próximo;

ρ_V = refletância no vermelho.

As parcelas foram representadas pelos valores médios de NDVI, medidos separadamente em cada uma das linhas úteis.

3.1.4 Avaliação com medidores de clorofila

Simultaneamente à avaliação com o sensor de dossel, foram realizadas avaliações com o medidor portátil de clorofila SPAD.

O medidor portátil de clorofila SPAD-502 (Konica Minolta Sensing Inc., Osaka, Japão) quantifica a atividade da clorofila na região do espectro eletromagnético de aproximadamente 650 nm, através da transmitância da lâmina foliar. O valor medido é então comparado ao da transmitância na região do infravermelho próximo (940 nm) para que as leituras sejam corrigidas com relação a fatores físicos e mecânicos (SCHEPERS; FRANCIS, 1998).

As avaliações foram feitas em 15 plantas por parcela, cinco vezes por planta, e a média das leituras gerou o valor representativo da parcela. O medidor foi posicionado no centro da folha, em um dos lados do limbo foliar e para tanto foi utilizada a folha diagnóstico +1 (primeira com aurícula visível).

3.1.5 Avaliação de parâmetros biométricos

Especificamente no experimento 3, foram determinados os comprimentos médios de colmos, através da medição em cinco plantas por linha de cada parcela. O comprimento foi definido entre a base dos colmos e a bainha da primeira folha com aurícula visível. O mesmo procedimento de amostragem foi repetido para determinação da altura das plantas, ou seja, as mesmas plantas amostradas tiveram suas alturas determinadas entre a base dos colmos e a inflexão da última folha completamente expandida.

3.1.6 Análises

Foi realizada análise descritiva, com caráter exploratório, dos dados de NDVI e SPAD e os resultados foram apresentados através de gráficos de Box-plot, confeccionados pelo software SigmaPlot (Systat Software, San Jose, CA).

Para identificação da resposta da cultura aos tratamentos aplicados, medida através do NDVI e SPAD, realizou-se análise de variância, pelo software SISVAR (FERREIRA, 2011) e quando diferenças significativas foram encontradas procedeu-se análise de regressão no software SigmaPlot 11.0. O mesmo procedimento foi realizado no conjunto de dados de produtividade e quando diferenças significativas foram encontradas, procedeu-se análise de regressão para esclarecimento do comportamento do NDVI e do índice SPAD com relação à resposta em produtividade.

Finalmente, foram calculadas as correlações entre os parâmetros NDVI, SPAD, e a produtividade final da cultura.

3.2 Experimento de recomendação com base na resposta da cultura

3.2.1 Descrição

Os experimentos foram conduzidos em área da Usina São Martinho, localizada na região de Ribeirão Preto, SP (21°21'34"S e 48°03'56"W). Foram selecionados dois talhões de cana-de-açúcar, classificados pela Usina com ambientes D e A de acordo com a classificação solo-clima proposta por Prado et al. (1998), respectivamente para os experimentos 4 e 5. No experimento 5, a variedade cultivada foi a RB 86-7515, e no experimento 4, a variedade foi a CTC2, ambas em quarto corte. A colheita dos experimentos ocorreu no mês de julho de 2012. No experimento 5, a colheita foi realizada de forma mecanizada com pesagem por meio de vagão instrumentado com células de carga, enquanto no experimento 4, a colheita foi realizada manualmente com pesagem por meio de carregadora equipada com célula de carga.

Realizou-se também amostragem de solo na profundidade de 0,0–0,2 m, com dez subamostras, para determinação da fertilidade atual do solo, comparando os resultados com os sugeridos como ideais por Raij e Cantarella (1997).

3.2.2 Delineamento

O experimento foi instalado em cada uma das áreas, tendo como tratamentos quatro doses de N (60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) e duas testemunhas sem aplicação de N. Uma das duas testemunhas (tratamento referido como GS), receberia mais tarde, logo após a segunda avaliação com o sensor de dossel, doses de N baseadas na resposta da cultura medida pelo sensor, de acordo com metodologia proposta por Shaver et al. (2011), descrita resumidamente na seção 3.2.4. As doses de N foram aplicadas manualmente logo após o corte, na forma de nitrato de amônio, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada parcela era constituída de seis fileiras de cana-de-açúcar, espaçadas em 1,5 m, com 15 m de comprimento, tendo-se utilizado como área útil as quatro fileiras internas. Os demais

tratos culturais foram realizados, de maneira uniforme, assim como recomendado para a cultura na região e adotado pela Usina.

3.2.3 Avaliação com sensor de dossel

As avaliações da refletância da cultura foram realizadas quando a altura média de colmos na brotação atingiu 0,2, 0,4 e 0,6 m.

O sensor utilizado foi o mesmo descrito no experimento de identificação de resposta, o GreenSeeker modelo RT200 (Trimble Navigation Ltda., Sunyvale, CA, EUA). Para realização das leituras dinâmicas o conjunto de dois sensores foi instalado em um Uniport 3000 NPK (Jacto Máquinas Agrícolas S.A., Pompéia, SP), (figura 1). A média dos valores de refletância mensurados na área útil representou o valor de cada parcela.

Figura 1: Disposição dos sensores em veículo de alto vão livre, no momento de uma das avaliações

3.2.4 Recomendação de N com base na resposta da cultura

A recomendação seguiu a metodologia proposta Shaver et al. (2011). Para construção do algoritmo foram utilizados os dados médios de NDVI de cada parcela

os quais divididos pelo valor médio de NDVI do tratamento 0 geraram o índice de resposta do algoritmo ($RI_{\text{algoritmo}}$). Os valores de $RI_{\text{algoritmo}}$ foram plotados contra as doses de N referentes a cada tratamento e ajustou-se então uma regressão com auxílio da planilha eletrônica Excel. Posteriormente definiu-se visualmente, através dos dados plotados para gerar a regressão, até que dose de N a cultura respondeu por meio do NDVI (tratamento de referência). O NDVI médio do tratamento de referência dividido pelo NDVI da parcela a ser fertilizada constituiu a variável independente da equação de regressão criada anteriormente, a qual quando solucionada para cada uma das quatro repetições do tratamento GS, gerou quatro doses de N, as quais foram aplicadas manualmente, na forma de nitrato de amônio, logo após a segunda avaliação com o sensor de dossel, ou seja, quando a cultura apresentava em média 0,4 m de altura de “palmito”.

3.2.5 Avaliação nitrogênio foliar

As mesmas folhas utilizadas para o uso do medidor de clorofila tiveram suas nervuras centrais excluídas e foram enviadas ao Laboratório de Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo, para determinação do teor total de N foliar.

3.2.6 Análises

Procedeu-se análises de variância individuais para os parâmetros mensurados, através do software SISVAR. As análises de regressão e o processo de ajuste de curvas foram realizados no software SigmaPlot; o mesmo software foi utilizado na confecção dos gráficos apresentados e nos testes de normalidade.

Os dados de teor de N foliar foram submetidos à análise de variância e quando diferença significativa entre os tratamentos foi encontrada, procedeu-se o teste de média Scott-Knott. Finalmente foram descritas as correlações entre os teores de nitrogênio foliar e as produtividades obtidas.

3.3 Comparação de métodos de estimativa de produtividade

Comparou-se as metodologias de estimativa de produtividade com base em valores brutos de NDVI e produtividade e a do RI modificado ($RI_{\rho_{\text{NDVI}}}$ e $RI_{\rho_{\text{Colheita}}}$),

assim como proposto por Lofton et al. (2012) individualmente em todos os experimentos e posteriormente de forma conjunta. Uma terceira metodologia, a do RI ou faixa rica (RI_{NDVI} e $RI_{colheita}$), proposta inicialmente por Johnson e Raun (2003), foi comparada conjuntamente para todos os experimentos.

A metodologia do RI modificado segue as equações 2 a 8, similarmente para o cálculo dos $RI_{\rho_{NDVI}}$ e $RI_{\rho_{Colheita}}$, enquanto a metodologia do RI usa a equação 9, similarmente para o cálculo do RI_{NDVI} e $RI_{colheita}$, com o objetivo de estimar a produtividade com base em NDVI.

$$RI_{\rho_{50}} = (\text{tratamento } 50 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (2)$$

$$RI_{\rho_{60}} = (\text{tratamento } 60 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (3)$$

$$RI_{\rho_{100}} = (\text{tratamento } 100 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (4)$$

$$RI_{\rho_{120}} = (\text{tratamento } 120 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (5)$$

$$RI_{\rho_{150}} = (\text{tratamento } 150 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (6)$$

$$RI_{\rho_{180}} = (\text{tratamento } 180 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (7)$$

$$RI_{\rho_{240}} = (\text{tratamento } 240 \text{ kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (8)$$

$$RI = (\text{tratamento mais alto kg N ha}^{-1}) / (\text{testemunha}) \quad (9)$$

Para comparação propriamente dita, utilizou-se a significância das equações de estimativa de produção geradas e o coeficiente de determinação R^2 de cada uma delas como parâmetros indicadores da qualidade da estimativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimentos de identificação de resposta

4.1.1 Apresentação dos dados

Analisando os dados de NDVI e SPAD, nos três experimentos, nota-se que em todos os casos os equipamentos foram capazes de detectar, em maior ou menor escala a variabilidade presente nos experimentos. A análise de Box-plot, apresentada na figura 2 demonstrou que os valores de NDVI apresentaram padrão de comportamento semelhante nos dois primeiros experimentos, ou seja, os valores médios aumentaram entre as avaliações. Este comportamento era esperado, uma vez que a biomassa das parcelas aumenta com o desenvolvimento da cultura, tal observação corrobora o identificado por Frasson (2007), a qual utilizando o mesmo sensor também verificou o aumento no NDVI ao longo de sucessivas avaliações.

A medida de dispersão das leituras pode servir como indicador de saturação do sinal do sensor, de valia principalmente em situações privadas de dados biométricos. A saturação, principalmente em sensores que trabalham com NDVI, ocorre segundo Tremblay et al. (2008) quando se atinge um nível denso de vegetação e, por conseguinte deixa de existir o relacionamento linear das medidas de sensor com parâmetros biométricos, como índice de área foliar e biomassa. Em uma análise de box-plot, a saturação seria indicada pela aproximação da mediana com a média e pela diminuição do número de *outliers*, e por conseguinte, da amplitude. Segundo Eitel et al. (2008), a ocorrência de saturação é comum, e dificilmente um mesmo índice de vegetação pode ser sensível a um parâmetro importante e insensível aos demais. De forma geral, esse comportamento não foi importante; talvez o início desse fenômeno tenha sido captado na segunda avaliação do experimento 2, onde pode ser observada considerável redução na amplitude dos dados.

Figura 2 - Box-plot dos dados de NDVI e SPAD em cada experimento (1, 2 e 3) e avaliação (Av1 e Av2) realizada. Os Box-plotes representam os percentis de 25 e 75 em torno da média, a linha horizontal é a mediana e os pontos representam possíveis outliers (± 3 desvios padrão de cada média)

Por outro lado, a figura 2 demonstrou que as leituras de SPAD foram menos eficientes em detectar a variabilidade do que o NDVI, comportamento demonstrado pela proximidade das medianas em diferentes avaliações de um mesmo experimento, indicando falta de sensibilidade, e pela falta de padrão de incremento nos valores médios.

4.1.2 Análise do NDVI e SPAD

O NDVI foi capaz de identificar a resposta da cultura aos tratamentos aplicados, com exceção das primeiras avaliações nos experimentos 1 e 2, assim como pode ser observado na tabela 2. Frequentemente são encontrados na literatura, relatos de que o NDVI é insensível à resposta da cultura em estádios iniciais. Portz, Molin e Jasper (2011) determinaram que no estágio correspondente a 0,2 m de tamanho de colmo, a biomassa foi insuficiente para que o sensor fosse capaz de detectar a variabilidade da lavoura e a altura de 0,5 m foi considerada por Amaral e Molin (2011) e Portz (2011) como a ideal para levantamentos em cana-de-açúcar. Com relação ao NDVI na segunda avaliação, relações altamente significativas foram encontradas entre as doses aplicadas de N e os valores médios de sensor em cada tratamento. Esse comportamento é intrínseco de qualquer ferramenta capaz de auxiliar no manejo da adubação nitrogenada.

Outro ponto importante associado às medições de NDVI foi o fato do índice não ter sido influenciado, em nenhum dos experimentos, pelas diferentes variedades utilizadas. Este fato contrasta com o obtido por Frasson et al. (2007) os quais encontraram interferência de variedades no comportamento do NDVI medido pelo mesmo equipamento e por isso sugeriram a necessidade de calibrações específicas para cada variedade. Segundo Fortes (2003), o comportamento diferenciado entre variedades é consequência das características morfológicas de cada genótipo. Este mesmo autor, utilizando-se de imagens aéreas orbitais, mesmo utilizando resolução espacial e radiométrica muito inferior à abordada neste trabalho, obteve sucesso na estimativa de produtividade e na identificação de diferentes variedades.

Os medidores de clorofila não apresentaram, neste trabalho, comportamento diferencial com relação aos genótipos, assim como era esperado baseando-se na bibliografia. Este fato é favorável à utilização do equipamento na construção de algoritmos agrônômicos destinados ao manejo da adubação nitrogenada, uma vez que exclui a necessidade de calibrações específicas por variedade. Por outro lado, pode-se acrescentar, assim como feito por Amaral et al. (2010) que os medidores de clorofila apresentam limitações operacionais referentes à amostragem e à representatividade das mesmas, limitado seu potencial de uso quando comparado aos sensores de dossel, além da característica de serem insensíveis à biomassa.

De maneira geral, comparando as duas avaliações (0,3 e 0,5 m), percebe-se que relações melhores e mais significativas sempre foram encontradas na segunda avaliação, independentemente dos parâmetros utilizados (NDVI e SPAD). Isso se deve ao fato de que na segunda avaliação a biomassa era maior porém ainda adequada às medições de NDVI (antes do ponto de saturação do sinal do sensor) e com relação ao SPAD, o qual não é influenciado pela biomassa, a melhor relação obtida nas avaliações mais tardias pode ter sido resultado do tempo de resposta entre a fertilização e a avaliação. O melhor comportamento obtido nas segundas avaliações corrobora Amaral e Molin (2011) e Portz (2011) indicando, mais uma vez, ser 0,5 m de tamanho de colmo como o mais indicado para as avaliações.

Tabela 2 - Dados médios por tratamento para as variáveis NDVI e SPAD, para cada experimento; quadrado médio e significância dos fatores doses, variedades e interação doses x variedades; coeficientes de determinação (R^2) e significância das equações de regressão

Dose N (kg/ha)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	NDVI	SPAD	NDVI	SPAD	NDVI	SPAD
	1ª/2ª avaliação	1ª/2ª avaliação	1ª/2ª avaliação	1ª/2ª avaliação		
0	0,656 / 0,738	45,10 / 45,72	0,719 / 0,743	42,22 / 42,65	0,638	36,97
50	0,710 / 0,762	45,68 / 44,89	0,719 / 0,766	42,63 / 44,68	0,692	38,90
100	0,702 / 0,778	44,94 / 46,09	0,717 / 0,768	43,75 / 45,53	0,724	40,10
150	0,739 / 0,792	45,82 / 45,42	0,717 / 0,753	44,09 / 45,97	0,719	41,34
Doses ¹	0,0143** / 0,0063**	2,2124 ^{ns} / 3,0825 ^{ns}	0,0000 ^{ns} / 0,0016**	9,5307** / 25,9525**	0,01890**	41,6396**
Variedades ¹	0,0092 ^{ns} / 0,0012 ^{ns}	17,3997 ^{ns} / 9,3915 ^{ns}	0,0003 ^{ns} / 0,0007 ^{ns}	13,2152 ^{ns} / 0,22146 ^{ns}	0,00006 ^{ns}	8,54080 ^{ns}
Doses x Variedades ¹	0,0017 ^{ns} / 0,0007 ^{ns}	4,1082 ^{ns} / 2,3406 ^{ns}	0,0014 ^{ns} / 0,0006 ^{ns}	2,2207 ^{ns} / 1,16229 ^{ns}	0,00058 ^{ns}	1,44861 ^{ns}
Regressão Linear	82,2** / 98,55**	- / -	- / 99,92 ^{ns}	95,38** / 89,89**	81,26**	98,56**
Regressão Quadrática	84,34 ^{ns} / 99,89 ^{ns}	- / -	- / 99,92**	95,43 ^{ns} / 99,55**	99,74**	99,71 ^{ns}
CV (%)	6,33 / 4,38	11,97 / 3,31	6,53 / 3,01	3,2 / 2,53	4,51	4,59

^{ns} diferença não significativa. * e **, respectivamente diferenças significativas aos níveis de 5 e 1 % pelo teste F de Snedecor

¹ Quadrado médios obtidos a partir de análise de variância individual

A comparação entre as leituras de NDVI e SPAD está apresentada na 3. Uma vez que não foi observada interferência das variedades no comportamento do NDVI e do índice SPAD, as correlações apresentadas na figura 3 estão discutidas independentemente das variedades e conjuntamente para todos os três experimentos.

A baixa correlação entre NDVI e SPAD apresentada na figura 3a, provavelmente foi resultado do baixo desempenho do índice SPAD em detectar a variabilidade presente nos experimentos na primeira avaliação, principalmente no experimento 1 e também do baixo desempenho do NDVI na primeira avaliação do experimento 2. Solari (2006) comenta que os medidores de clorofila, por não serem influenciados pela biomassa, podem, em estágios menos avançados, desempenharem de maneira superior aos sensores de dossel, se a variabilidade criada pelas doses de N já tiverem se manifestado. Contrastando o citado, na primeira avaliação do experimento 1, os sensores de dossel se comportaram melhor do que os medidores de clorofila. Talvez, este fato possa ser explicado justamente pela capacidade do sensor de dossel se relacionar com a biomassa e, provavelmente, a diferença captada pelo sensor de dossel, mesmo no início do ciclo, era referente à biomassa e não ao teor de N, e já seria uma manifestação inicial da cultura aos tratamentos aplicados.

Uma vez que a relação da biomassa com a produtividade da cultura é mais direta em cana-de-açúcar do que em milho, alvo da pesquisa de Solari (2006), a característica demonstrada pelo sensor, bom desempenho em estádios iniciais, contribui para indicação do uso dos mesmos nesta cultura.

Considerando o mecanismo de amostragem de cada sensor, a diferença encontrada no comportamento dos mesmos não é surpreendente, uma vez que os medidores de clorofila podem ter seu desempenho afetado pela amostragem de folhas individuais e pela diferença existente no conteúdo de N em uma mesma folha e ao longo da planta (CHAPMAN; BARRETO, 1997; ZHANG, 2007), enquanto os sensores de dossel integram informações sobre a vegetação como um todo.

Figura 3 - Correlações entre NDVI e SPAD para as duas avaliações (primeira avaliação - a, segunda avaliação - b), conjuntamente para os três experimentos

A alta e significativa correlação encontrada na segunda avaliação (figura 3b) foi resultado da capacidade de ambos os sistemas em determinar a resposta da cultura em questão à aplicação de doses de N. Este comportamento está de acordo com o encontrado por Amaral e Molin (2011), os quais trabalhando com a mesma cultura obtiveram bons relacionamentos entre as leituras do sensor de dossel e dos medidores de clorofila, em estádios mais avançados, enquanto o desempenho dos mesmos foi inferior mais cedo no ciclo.

4.1.3 Análise da produtividade final

A produtividade final, medida no experimento 1, demonstrou que houve resposta linear significativa ($P=0,0065$) aos tratamentos aplicados. Adicionalmente, as variedades responderam com intensidades diferentes significativamente ($P=0,0002$), sem, no entanto, apresentarem interação entre os fatores ($P= 0,576$). O comportamento da produtividade de cada variedade em cada tratamento, assim como a equação de regressão entre dose de nitrogênio e produtividade, traçada a partir dos dados médios pode ser visualizado na figura 4.

Figura 4 - Produtividade de cada variedade de cana-de-açúcar, em função das doses de N aplicadas para o experimento 1

A produtividade média de cada variedade foi 81,2, 69,7 e 64,0 t ha⁻¹ (estatisticamente diferentes pelo teste de Sckott Knott ao nível de 5%), respectivamente para as variedades CTC14, IAC 3396 e SP 3250. Essa resposta diferencial era esperada devido aos diferentes potenciais produtivos intrínsecos de cada variedade.

Uma vez que a resposta ao nitrogênio aplicado não foi homogênea, tornou-se interessante a análise da resposta de cada variedade, em produtividade, para cada kg de N acrescido entre os tratamentos, apresentada na figura 5.

Figura 5 - Acréscimo diferencial em produtividade de cada variedade de cana-de-açúcar em resposta ao acréscimo na dose de fertilizante nitrogenado no experimento 1

Apesar da variedade CTC14 ter sido superior às demais com relação à produtividade de colmos, tanto na média quanto na dose mais alta de fertilizante nitrogenado, nota-se que, diferentemente das demais variedades, a resposta foi baixa quando suprida com doses baixas de N, indicando potencial de resposta e exigência ao mesmo tempo. Este comportamento contrasta o esperado, ou seja, incrementos decrescentes, assim como demonstrado pelos outros genótipos. Por outro lado, as variedades IAC 3396 e SP 3250, embora menos responsivas que a primeira, se comparado pela média final, se beneficiaram mais intensamente com o acréscimo de doses de N consideradas baixas, o que pode indicar grande ganhos produtivos com pouco acréscimo na condição de cultivo, neste caso referente à nutrição por nitrogênio.

No experimento 2, a produtividade final também respondeu de forma linear e significativa ($P = 0,0005$) aos tratamentos aplicados, porém, diferentemente do experimento 1, não houve interferência do fator variedades. A equação de regressão e a produtividade em cada tratamento podem ser visualizadas na figura 6.

Figura 6 - Produtividade em função das doses de N e equação de regressão linear no experimento 2

O resultado das avaliações com sensores pode ser observado nas figuras 7 (experimento 1) e 9 (experimento 2). Nota-se que o NDVI medido na primeira avaliação relacionou-se ($R=0,683$) com a produtividade final da cultura (figura 7a). A correlação do NDVI na segunda avaliação com a produtividade (figura 7b) foi inferior à comentada anteriormente. Uma razão pela qual esse comportamento poderia ser observado seria a saturação do sinal do sensor, situação tal que, neste experimento, pelo padrão de dispersão dos pontos, não parece ter influenciado na qualidade da correlação entre NDVI e produtividade.

Figura 7 - Correlação entre produtividade final da cultura e as leituras de NDVI e SPAD para todos os tratamentos no experimento 1; gráficos a e c referentes à primeira avaliação e gráficos b e d referentes à segunda avaliação

Com relação ao comportamento do índice SPAD, ressalta-se, mais uma vez, o baixo desempenho do índice no início do ciclo (figura 7 c). Assim como comentado anteriormente, várias podem ter sido as razões para que este comportamento fosse observado, como por exemplo, característica do sistema de amostragem e a necessidade de tempo hábil para que a cultura responda aos tratamentos aplicados. Na figura 7 d, percebe-se que o índice SPAD, neste experimento, relacionou-se significativamente com a produtividade ($R=0,675$), relacionamento apenas ligeiramente inferior ao obtido com o uso dos sensores de dossel, demonstrando assim, desde que excluídas as dificuldades operacionais, a

possibilidade de se trabalhar com medidores portáteis de clorofila para manejo da adubação nitrogenada.

No experimento 2, representado na figura 8, o relacionamento dos parâmetros medidos pelos sensores com a produtividade final foram inferiores aos apresentados no experimento 1. Nota-se inclusive, que na segunda avaliação (figuras 8 b e 8 d), parece ter havido saturação do sinal dos sensores, uma vez que a dispersão dos pontos representa grandes variações em produtividade para mesmos valores de sensor embora para uma melhor avaliação sobre saturação seria necessário avaliação de biomassa no momento da avaliação com os sensores.

Figura 8 - Correlação entre produtividade final da cultura e as leituras de NDVI e SPAD para todos os tratamentos no experimento 2; gráficos a e c referentes à primeira avaliação e gráficos b e d referentes à segunda avaliação

4.1.4 Relação dos dados de sensores com parâmetros biométricos

Segundo Varvel et al. (2007), para que um sensor se preste ao manejo da adubação nitrogenada ele deve ao menos ser capaz de identificar a variabilidade criada pelo suprimento diferenciado de nitrogênio e se relacionar com a produtividade. Em cana-de-açúcar a biomassa se relaciona fortemente com a produtividade final, e o tamanho de colmos é um dos componentes da produtividade da cultura (SILVA et al., 2008). Portanto, esse parâmetro seria um bom indicador das duas exigências citadas acima. Neste trabalho, o parâmetro biométrico tamanho de colmo, medido apenas no experimento 3, foi capaz de identificar diferenças significativas na resposta das doses aplicadas de nitrogênio (tabela 3). Esse fato era esperado, pois a avaliação neste experimento ocorreu 50 dias após a fertilização, tempo suficiente para que o efeito dos tratamentos tivessem se manifestado no alongamento e ou aumento no número de nós. Portz, Amaral e Molin (2012), já demonstraram o relacionamento entre dados de tamanho de colmo e de sensores de dossel, representando assim uma alternativa eficiente para se estimar a biomassa, altamente correlacionável com a produtividade e indicado como parâmetro complementar aos dados de sensores de dossel.

Por outro lado, o parâmetro altura da planta não identificou diferenças significativas na resposta à adubação nitrogenada. Provavelmente, neste trabalho, o baixo desempenho desse parâmetro ocorreu devido à dificuldade operacional e as incertezas inerentes à determinação, em campo, da altura de plantas.

Tabela 3 - Dados médios referentes ao experimento 3, por tratamento para os parâmetros Tamanho de Colmo e Altura de Planta; quadrado médio e significância dos fatores doses, variedades e interação doses x variedades; coeficientes de determinação (R^2) e significância das equações de regressão

Dose N (kg/ha)	Tamanho Colmo (cm)	Altura Planta (cm)
0	46,75	143,75
50	52,17	150,25
100	56,92	151,00
150	48,25	147,50
Doses ¹	247,965**	266,514 ^{ns}
Variedades ¹	40,771 ^{ns}	280,514 ^{ns}
Doses x Variedades ¹	38,048611 ^{ns}	219,280 ^{ns}
Regressão Linear	6,9 ^{ns}	-
Regressão Quadrática	86,9**	-
CV (%)	14,87	37,5

^{ns} diferença não significativa. * e **, respectivamente diferenças significativas aos níveis de 5 e 1 % pelo teste F de Snedecor

¹ Quadrado médios obtidos a partir de análise de variância individual

O relacionamento do parâmetro biométrico tamanho de colmo com o NDVI no experimento 3 está representado na figura 9.

Figura 9 - Correlação linear entre NDVI e tamanho de colmo

Embora o parâmetro tenha sido eficiente em determinar a resposta aos tratamentos aplicados, este se mostrou com uma capacidade inferior ao sensor de dossel, comparando os valores de R^2 , respectivamente 0,869 e 0,997 para tamanho de colmo e NDVI. Adicionalmente, pode-se ressaltar a impraticabilidade operacional da medição manual de parâmetros biométricos para fim de manejo da adubação nitrogenada em escala produtiva embora existam esforços para desenvolvimento de métodos automatizados no intuito de tornar esta operação mais simples.

4.2 Experimento de recomendação com base na resposta

Os dados médios referentes às análises do teor de nitrogênio foliar e macronutrientes no solo, estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Dados médios de teor de N foliar em cada uma das três avaliações e de macronutrientes no solo por ocasião da terceira avaliação, respectivamente nos experimentos 4 e 5

Tratamento	1ª Av.		2ª Av.		3ª Avaliação											
	N		N		N	P	K	Ca	Mg	S						
-----Teor g kg ⁻¹ -----																
0	18,7	a	18,6	a	22,6	a	2,00	a	9,05	a	4,33	a	1,75	a	0,99	a
60	21,1	b	19,2	a	22,5	a	1,99	a	10,07	a	5,33	a	1,70	a	1,11	a
120	21,6	b	21,7	a	21,1	a	2,00	a	10,26	a	3,99	a	1,68	a	0,98	a
180	21,7	b	21,9	a	22,9	a	2,00	a	11,28	a	4,51	a	1,55	a	0,94	a
240	23,2	b	22,0	a	20,8	a	2,00	a	10,52	a	4,29	a	1,63	a	0,89	a
GS	20,2	a	18,4	a	22,8	a	2,06	a	9,69	a	4,11	a	1,68	a	1,01	a
Experimento 5																
0	18,2	a	11,7	a	17,3	a	1,67	a	9,05	a	4,69	a	2,15	a	2,05	a
60	19,8	b	14,2	a	17,2	a	1,74	a	9,56	a	5,41	a	2,28	a	2,26	a
120	20,4	b	10,3	a	18,4	a	1,73	a	10,14	a	4,99	a	2,15	a	2,40	a
180	19,9	b	10,6	a	18,1	a	1,70	a	9,82	a	5,41	a	2,25	a	2,40	a
240	19,8	b	17,0	a	18,1	a	1,75	a	9,88	a	5,70	a	2,20	a	2,33	a
GS	17,5	a	11,3	a	17,4	a	1,58	a	9,24	a	4,83	a	2,13	a	2,17	a
Adequados ¹	18-25		18-25		18-25		1,5-3		10-16		2-8		1-3		1,5-3	

Médias seguidas por uma mesma letra em cada coluna não apresentam diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($P < 0,05$) em uma mesma avaliação. Valores em negrito se apresentam abaixo da faixa de teores adequados ¹ propostas por (RAIJ e CANTARELLA, 1997)

Com base nas faixas de valores adequados de macronutrientes proposta por Raij e Cantarella (1997), os dados médios dos teores de P, K, Ca, Mg e S podem ser considerados adequados ou pouco abaixo do recomendado, especialmente o K no experimento 5. Considerando que em nenhum dos experimentos eles apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos, exclui-se a possibilidade de que os mesmos possam ter causado qualquer possível diferenciação no rendimento final cultura. Com relação ao teor de N foliar, estes se apresentaram adequados na primeira avaliação em ambos os experimentos. O que se pode ressaltar é que por ocasião da primeira avaliação, a análise do conteúdo total de N foliar foi capaz de identificar diferenças significativas aos tratamentos aplicados, agrupando-os, segundo o teste de Scott-Knott, em dois grupos distintos e com mesmos padrões em ambos experimentos, ou seja, um grupo contendo os dois tratamentos que não haviam recebido nitrogênio em cobertura e outro com os demais tratamentos. As diferenças encontradas na primeira avaliação não foram perceptíveis nas demais e principalmente no experimento 5, houve marcante redução no teor de N foliar.

A redução no teor de N total pode ter ocorrido devido ao fenômeno de diluição do nutriente com o aumento da biomassa da cultura, principalmente em tratamentos

onde foram aplicadas altas doses de N, assim como observado por Faroni et al. (2009) e pela contribuição diferencial de fontes naturais de N, de forma complementar aos tratamentos aplicados, dificultando que diferenças significativas entre os mesmos fossem encontradas, assim como foi demonstrado por Thorburn et al. (2003).

Não foi encontrada correlação significativa ($P=0,1$) entre o teor de nitrogênio foliar na primeira avaliação e a produtividade final do experimento 4. No experimento 5, os teores de nitrogênio foliar se correlacionaram significativamente ($P < 0,001$) com alto coeficiente de correlação ($R = -0.94$), embora negativo.

Uma visão geral dos resultados expõe as dificuldades de se trabalhar com análises de tecido foliar para determinação da nutrição por nitrogênio em cana-de-açúcar, corroborando a ideia apresentada por Raij e Cantarella (1997), de que esta técnica era e ainda parece ser um desafio em cana-de-açúcar.

A análise dos dados de produtividade, considerando inclusive o tratamento GS, demonstrou que, de maneira geral, não houve (experimento 4, $P=0,1771$), ou foi baixa à resposta aos tratamentos. O experimento 5 apresentou diferença significativa de produtividade ($P=0,0748$) entre os tratamentos, muito embora, nota-se que a resposta foi negativa, baixa e irregular, com amplitude máxima de cerca de 8 t ha^{-1} , para tratamentos tão contrastantes, assim como demonstrado na figura 10.

Figura 10 - Produtividade final da cultura em função dos tratamentos aplicados em cada experimento. Médias seguidas de diferentes letras representam produtividades estatisticamente diferentes ao nível de 5% no teste de Scott-Knott. As barras verticais representam o desvio padrão da média do tratamento; barras escuras representam experimento 5 e barras claras o 4

A falta de resposta da cana-de-açúcar ao incremento de doses de fertilizante nitrogenado não é incomum, na verdade, alguns trabalhos obtiveram resultados semelhantes (THORBURN et al., 2003; ISHIKAWA et al., 2009; AMARAL; MOLIN, 2011; LOFTON et al., 2012). Na bibliografia, este comportamento tem sido relatado como consequência de vários fatores como, por exemplo, a alta participação de fontes outras que o fertilizante na disponibilidade de N (THORBURN et al., 2003), idade da lavoura e estresse hídrico em estádios específicos (LOFTON et al., 2012), baixo aproveitamento de certas fontes de N (FRANCO et al., 2011) e pela presença de outros fatores mais limitantes, inclusive outros macro nutrientes. Thorburn et al. (2003) observaram que em alguns casos, mesmo quando a produtividade final da cultura não se diferencia estatisticamente em função de doses de N aplicadas, ainda assim o total de N presente nas plantas, no final do ciclo, pode ser afetado, caracterizando nestes casos, segundo os autores, “consumo de luxo”.

Especificamente nestes dois experimentos é importante ressaltar que as parcelas foram instaladas em área comercial e que a lavoura receberia o quarto corte. Nestas situações, as características intrínsecas de áreas produtivas e de lavouras mais antigas podem ter contribuído para que não tenham sido encontradas diferenças significativas em produtividade, muito embora o coeficiente de variação

da produtividade nos dois experimentos possa ser considerado baixo para experimentos desta natureza, ambos inferiores a 8%.

Assim como foi baixa a resposta em produtividade, também foi quando utilizado o NDVI como avaliador. Esse fato comprometeu a possibilidade de se avaliar plenamente a capacidade da metodologia de recomendação utilizada. Sendo assim, como não foi observada resposta (NDVI) no experimento 5, o consequente resultado da metodologia em questão foi a não aplicação de N. Surpreendentemente, neste experimento, o tratamento testemunha (0 kg N ha^{-1}) e o tratamento GS, que receberia as doses indicadas pela metodologia, produziram estatisticamente cerca de 8 t ha^{-1} a mais do que os tratamentos que receberam as doses de N tão altas quanto 240 kg ha^{-1} . Por outro lado, no experimento 4, a metodologia pode ser aplicada e recomendou com base na equação (7), doses de 100, 132, 82 e 110 kg N ha^{-1} em cada uma das quatro repetições do tratamento GS.

$$N (\text{kg ha}^{-1}) = -3232 * IR2 + 8799,2 * IR - 5550,3 \quad (10)$$

em que: $IR = \text{NDVI tratamento } 180 / \text{NDVI alvo}$

Uma vez que a resposta em produtividade não existiu estatisticamente ao nível de 10% de probabilidade, o efeito do tratamento GS foi o mesmo que o apresentado por todos os outros, ou seja, sem influência na produtividade final do ciclo em questão, mesmo com o fato das parcelas deste tratamento terem recebido nitrogênio mais tarde do que as demais. Adicionalmente deve-se ressaltar a questão de se trabalhar com metodologias de recomendação com base na resposta em culturas perenes e semiperenes. Mesmo não havendo resposta aparente no ciclo atual, a decisão de não se aplicar nitrogênio em situação de ausência de resposta, assim como a decisão de se recomendar doses baixas em situações onde a resposta é aparentemente baixa, pode recorrer na produtividade de ciclos subsequentes. Sobre esta questão, muito tem sido estudado. Por exemplo, Vitti et al. (2007) observaram efeito linear significativo entre as doses de N aplicadas e o conteúdo de N e S no sistema radicular em uma condição de segunda soca na produtividade do ciclo seguinte.

4.3 Comparação de métodos de estimativa de produtividade

As produtividades foram bastante variáveis entre os experimentos assim como descrito na tabela 5. Esta variabilidade pode ser explicada pela diferença entre variedades, ambientes de produção e variáveis climáticas presentes em cada uma das áreas. Assim como a produtividade, a resposta à adubação nitrogenada também foi variável. Enquanto os experimentos 1 e 2 responderam de maneira significativa aos tratamentos aplicados, os experimentos 4 e 5 não foram responsivos ($P < 0,05$) (desta vez desconsiderando o tratamento GS).

Tabela 5 - Produtividade obtida em função de cada dose de N, em cada experimento, e significância (P) das diferenças entre as produtividades

Experimento	0	50	60	100	120	150	180	240	Resposta P
-----Produtividade (Mg/ha) -----									
1	62,356	73,844	-	72,200	-	76,410	-	-	0,0065
2	112,121	113,561	-	119,882	-	129,640	-	-	0,0005
3			-		-		-	-	-
4	83,861	-	77,583	-	84,389	-	86,972	88,944	0,1486
5	66,667	-	63,722	-	62,222	-	59,444	60,417	0,1276

“-” referentes a dados ainda não disponíveis ou à tratamentos não existentes no experimento

Em situações de falta de resposta ao nitrogênio, tentar estimar a produtividade da cana-de-açúcar através de dados de NDVI constitui-se em uma tarefa difícil. Lofton et al. (2012a) ressaltaram que o uso do Ri modificado ($RI_{\rho_{NDVI}}$ e $RI_{\rho_{colheita}}$), traz vantagens evidentes quando a aplicação de doses altas de nitrogênio não se traduz nas mais altas produtividades ou quando doses baixas de N apresentam produtividades semelhantes às demais doses, assim como ocorrido nos experimentos 4 e 5. Considerando estes fatos e analisando a tabela 5, um método mais dinâmico foi utilizado para tentar descrever o comportamento da produtividade da cultura em resposta às doses de nitrogênio. O uso do RI modificado parece ser indicado, assim como demonstrado na tabela 6.

A análise conjunta dos dados brutos de NDVI e produtividade, assim como esperado devido às discrepâncias naturais presentes entre experimentos, não resultou em informação útil, embora, na maioria dos casos, foi capaz de gerar estimativas de produtividade baseadas no NDVI, isoladamente por experimentos.

Tabela 6 - Equações de regressão, coeficiente de determinação R^2 , e significância das regressões para cada metodologia aplicada individualmente para cada experimento e conjuntamente para todos

Experimento	Equação	R^2	P
-----NDVI e t ha ⁻¹ -----			
1	Produtividade (t/ha) = -46,506 + (168,579 * NDVI)	0,466	<0,001
2	Produtividade (t/ha) = 31,628 + (120,227 * NDVI)	0,234	0,005¶
3	-	-	-
4	Produtividade (t/ha) = 60,437 + (123,299 * NDVI)	0,666	0,092
5	Produtividade (t/ha) = 45,263 + (24,045 * NDVI)	0,662	0,094
Conjunto	Produtividade (t/ha) = -58,030+ (533,504 * NDVI)	0,006	0,755*
RI ρ_{NDVI} e RI $\rho_{Colheita}$			
1	RI $\rho_{Colheita}$ = -1,386 + (2,457 * RI ρ_{NDVI})	0,707	0,005
2	RI $\rho_{Colheita}$ = -2,105 + (3,188 * RI ρ_{NDVI})	0,744	0,027
3	-	-	-
4	RI $\rho_{Colheita}$ = -0,387 + (1,312 * RI ρ_{NDVI})	0,941	0,030
5	RI $\rho_{Colheita}$ = 0,739 + (0,204 * RI ρ_{NDVI})	0,894	0,049
Conjunto	RI $\rho_{Colheita}$ = 0,661 + (0,345 * RI ρ_{NDVI})	0,256	0,014
----- RI _{NDVI} e RI _{colheita} -----			
Conjunto	RI _{colheita} = 0,346 + (0,593 * RI _{NDVI})	0,736	0,142

¶Não passou nos testes de normalidade de variância (Shapiro-Wilk)

Por transformar valores de NDVI e produtividade em índices relativos e por considerar a resposta de cada experimento ao nitrogênio, a metodologia do RI modificado, em teoria, permite a comparação entre experimentos não homogêneos e o aperfeiçoamento da capacidade de se estimar a produtividade em situações de ausência ou baixa resposta a adubação nitrogenada.

A vantagem da utilização dessa metodologia fica evidente, comparando os experimentos 4 e 5, os quais, utilizando valores de NDVI e produtividade não produziram equações de regressão significativas, ao nível de 5%. Porém, quando utilizada a metodologia do RI modificado, ganharam significância ($P < 0,05$) e incrementaram consideravelmente o R^2 . Este fato é explicado pelas relações contribuintes para construção das regressões. Nessa metodologia, o par NDVI do tratamento 0 e a produtividade do tratamento 0 são considerados no cálculo de todos os outros valores de RI porém não participam diretamente da equação como valores de RI modificado igual a 1. Nos dois experimentos não responsivos, a análise ganhou qualidade, pois os tratamentos de referência (0 kg N ha⁻¹) obtiveram produtividades altas ou equivalentes se comparados aos outros tratamentos, porém

nem sempre o NDVI medido no início do ciclo, muitas vezes 200 dias antes da colheita, teve o mesmo comportamento.

No experimento 2, apesar de ter havido resposta em produtividade ($P=0,0005$), aparentemente, o relacionamento dos valores brutos de NDVI com a produtividade de cada parcela foi baixo ($R^2=0,234$). Porém, quando a metodologia do RI modificado foi utilizada, o relacionamento dos dados médios por tratamento de $RI_{\rho_{NDVI}}$ e $RI_{\rho_{Colheita}}$ foi significativo e apresentou alto coeficiente de determinação ($R^2=0,744$). As razões para o bom desempenho dessa metodologia são as mesmas comentadas anteriormente: uso de dados médios, não participação direta do tratamento testemunha, e índice baseado na resposta local.

Assim como ressaltado por Lofton et al. (2012a), em experimentos responsivos ao nitrogênio, pouco ganho é obtido pela utilização da metodologia do RI modificado, assim como ocorrido no experimento 1. Embora o ganho em poder de determinação, medido pelo R^2 , das regressões geradas nem sempre são expressivos, o uso desta metodologia, além de permitir a avaliação conjunta de experimentos heterogêneos para que modelos mais robustos sejam produzidos, acrescenta significado agrônomo quando comparada à metodologia RI por considerar a resposta aos vários tratamentos utilizados e não somente a referência e a parcela sem restrição de nitrogênio, metodologia a qual, em casos de falta de resposta ou quando as doses mais altas não representam maiores produtividades, tem sua capacidade de estimar a produtividade comprometida.

Embora tenha sido a única metodologia capaz de analisar o comportamento da produtividade em função do NDVI dos diferentes experimentos conjuntamente, a qualidade da estimativa gerada pelo método do RI modificado foi bem inferior à encontrada por Lofton et al. (2012a), os quais foram capazes de estimar a produtividade com coeficiente de determinação ($R^2=0,85$)

A metodologia do RI, faixa rica (RI_{NDVI} e $RI_{colheita}$) mostrou-se, neste trabalho, incapaz de gerar relações significativas entre NDVI e produtividade. Provavelmente, esse comportamento foi resultado da análise de maneira conjunta de experimentos responsivos e não responsivos, situação onde tal metodologia tem o desempenho comprometido.

3 CONCLUSÕES

Os dados de sensores (NDVI e SPAD) foram correlacionáveis e tiveram melhor desempenho em estimar a resposta nas segundas avaliações (0,5 m).

A análise do teor de nitrogênio foliar não produziu informação útil para fins de manejo na cultura e apresentou comportamento inconclusivo quando comparado com os resultados de produtividade e dados de NDVI.

O sensor é uma ferramenta útil ao manejo da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar, pois o NDVI medido se relaciona com parâmetros biométricos, identifica diferenças na nutrição por nitrogênio e estima a produtividade final da cultura. Embora tenha sido possível estimar a produtividade final com dados de NDVI medidos no início do ciclo, não foi possível construir um modelo generalista de estimativa de produtividade, nem com dados brutos nem com índice de resposta. A metodologia do RI modificado produziu as melhores estimativas de produtividade, altamente significativas e com altos coeficientes de determinação, válidas principalmente para experimentos individuais. A metodologia de recomendação estudada foi adequada em considerar a resposta da cultura, porém ainda carece de avaliação em condição de maior resposta ao nitrogênio.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L.R.D. **Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar**. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

AMARAL, L.R.D.; 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.

AMARAL, L.R.D.; PORTZ, G.; FARIA, T.F.; MOLIN, J.P. Comparação de clorofilômetros como indicadores de suficiência de nitrogênio em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

BALDANI, J.I.; REIS, V.M.; BALDANI, V.L.D.; DÖBEREINER, J. Review: a brief story of nitrogen fixation in sugarcane — reasons for success in Brazil. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 29, n. 4, p. 417-423, 2002.

BERNTSEN, J.; THOMSEN, A.; SCHELDE, K.; HANSEN, O.M.; KNUDSEN, L.; BROGE, N.; HOUGAARD, H.; HØRFARTER, R. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 7, n. 2, p. 65–83, 2006.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Aerial photography to detect nitrogen stress in corn. **Journal of Plant Physiology**, Loebdergraben, v. 148, n. 3/4, p. 440–444, 1996.

BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; REIS, V. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 252, n. 1, p. 139–149, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanço nacional da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA; SPAE, 2007. 139 p.

_____. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional 2011: ano base 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266 p.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. cap. 7, p. 117–138.

CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing**. 3rd ed. New York: The Guilford Press, 2002. 621 p.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. cap. 7, p. 375-470.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STTIP, S.R. (Ed.); **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 5-67.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Soil and plant analyses for lime and fertilizer recommendations in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 29, n. 11/14, p. 1691–1706, 1998.

CARDONA, C.A.; QUINTERO, J.A.; PAZ, I.C. Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 101, n. 13, p. 4754–66, 2010.

CHAPMAN, S.C.; BARRETO, H.J. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 4, p. 557–562, 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar; safra 2012/2013, segundo levantamento, Agosto 2012**. Brasília, 2012. 16 p.

EITEL, J.U.H.; LONG, D.S.; GESSLER, P.E.; HUNT, E.R. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 6, p. 1694-1702, 2008.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 370 p.

FAO. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/index.html#VISUALIZE>>. Acesso em: 05 set. 2012.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Estado nutricional da cultura de cana-de-açúcar (cana-planta) em experimentação com N¹⁵. **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, Viçosa, v. 33, n. 7, p. 1919-1927, 2009.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciencia e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FILOSO, S.; MARTINELLI, L.A.; HOWARTH, R.W.; BOYER, E.W.; DENTENER, F. Human activities changing the nitrogen cycle in Brazil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 79, n. 1/2, p. 61–89, 2006.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. Cana-de-açúcar. In: _____. **Agrianual 2012**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2012. p. 221-246.

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, E.C.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 29–41, 2011.

FRASSON, F.R. **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FRASSON, F.R.; MOLIN, J.P.; POVH, F.P.; SALVI, J.V. Temporal behavior of ndvi measured with an active optical sensor for different varieties of sugarcane. **BioEng**, Campinas, v. 1, n. 3, p. 237–244, 2007.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; ANTWERPEN, R. Simulation of sugarcane residue decomposition and aboveground growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 326, n. 1/2, p. 243–259, 2009.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Oxford, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 5, p. 1415-1524, 2010.

ISHIKAWA, S.; ANDO, S.; SAKAIGAICHI, T.; TERAJIMA, Y.; MATSUOKA, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 55, n. 4, p. 485–495, 2009.

JAMES, E.K.; BALDANI, J.I. The role of biological nitrogen fixation by non-legumes in the sustainable production of food and biofuels. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 356, n. 1/2, p. 1–3, 2012.

JOHNSON, G.; RAUN, W.R. Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 26, n. 2, p. 249–262, 2003.

JØRGENSEN, J.R.; JØRGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 8, n. 1/2, p. 63–73, 2007.

KIM, H.-J.; SUDDUTH, K.A.; HUMMEL, J.W. Soil macronutrient sensing for precision agriculture. **Journal of environmental monitoring**, Cambridge v. 11, n. 10, p. 1810–1824, 2009.

KITCHEN, N.R.; GOULDING, K.W.T.; SHANAHAN, J.F. Proven practices and innovative technologies for on-farm crop nitrogen management. In: HATFIELD, J.L.; FOLLETT, R.F. (Ed.). **Nitrogen in the environment: sources, problems and management**. Amsterdam: Elsevier, 2008. chap. 15, p. 487-517.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; SCHARF, P.C.; PALM, H.L.; ROBERTS, D.F.; VORIES, E.D. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 1, p. 71-84, 2010.

LOFTON, J.; TUBANA, B.S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H. Predicting sugarcane response to nitrogen using a canopy reflectance-based response index value. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 1, p. 106-113, 2012a.

LOFTON, J.; TUBANA, B. S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H.; DALEN, M.. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, Basel, v. 12, n. 6, p. 7529–7547, 2012b.

MANZONI, S.; PORPORATO, A. Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 7, p. 1355–1379, 2009.

MATTOS JUNIOR, D.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; CARVALHO, S.A.D. Superfícies de resposta do tangor “Murcott” à fertilização com N, P e K. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 164–167, 2004.

MOLIN, J.P.; FRASSON, F.R.; AMARAL, L.R.; POVH, F.P.; SALVI, J.V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1345–1349, 2010.

MULLEN, R.; LABARGE, G.; DIEDRICK, K. Temporal variability of crop response to fertilizer. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 94, p. 16–17, 2010.

OLFS, H.-W.; BLANKENAU, K.; BRENTROP, F.; JASPER, J.; LINK, A.; LAMMEL, J. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 168, n. 4, p. 414–431, 2005.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 67, p. 1–85, 1999.

PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

PORTZ, G.; AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Measuring sugarcane height in complement to biomass. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., 2012, Indianapolis. **Proceedings...**Indianapolis: ISPA, 2012. 1 CD-ROM.

PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 13, n. 1, p. 33–44, 2011.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1075–1083, 2008.

PRADO, H.; ROSSETTO, R.; LANDELL, M.G.A. IAC propõe classificação de solos adaptada para a cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, p. 13, 1998.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. cap. 2, p. 189–203.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; ZAVODNY, D.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W. Automated calibration stamp technology for improved in-season nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 1, p. 338–342, 2005a.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; TAYLOR, R.K.; ARNALL, D.B.; MACK, C.J.; EDMONDS, D.E. Ramp calibration strip technology for determining midseason nitrogen rates in corn and wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 4, p. 1088-1093, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. Season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 1, p. 131-138, 2001.

RAUN, W.R.; OLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 815–820, 2002.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L. FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 36, n. 19/20, p. 2759–2781, 2005b.

SAMBORSKI, S.M.; TREMBLAY, N.; FALLON, E. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 4, p. 800-816, 2009.

SARTORI, R.H. **Eficiência de uso de nitrogênio e enxofre pela cana-de-açúcar (primeira e segunda rebrota) em sistema conservacionista (sem queima)**. 2010. 112 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SCHARF, P.C.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DAVIS, J.G. Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 6, p. 2154-2160, 2006.

SCHARF, P.C.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DAVIS, J.G.; HUBBARD, V.C.; LORY, J.A. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 452–461, 2005.

SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D. Precision agriculture—what's in our future. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 29, n. 11/14, p. 1463–1469, 1998.

SCHEPERS, J.S.; BLACKMER, T.M.; WILHELM, W.W.; RESENDE, M. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. **Journal of Plant Physiology**, Loebdergraben, v. 148, n. 5, p. 523–529, 1996.

SEABRA, J.E.A.; MACEDO, I.C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. **Energy Policy**, Oxford v. 39, n. 1, p. 421–428, 2011.

SHANAHAN, J.; KITCHEN, N.R.; RAUN, W.R.; SCHEPERS, J.S. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 61, n. 1, p. 51–62, 2008.

SHARMA, R.K.; JAT, M.L.; MARTIN, K.L.; CHANDNA, P.; CHOUDHARY, O.P.; GUPTA, R.K.; THIND, H.S.; UPPAL, H.S.; KHURANA, H.S.; UPPAL, R.K.; VASHISTHA, M.; RAUN, W.R.; GUPTA, R. Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 31, n. 3, p. 589–603, 2011.

SHAVER, T.M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 12, n. 6, p. 892–904, 2011.

SILVA, M.D.A.; ALBERTO, J.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 6, p. 620–627, 2008.

SINGH, J.S.; PANDEY, V.C.; SINGH, D.P. Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 140, n. 3/4, p. 339–353, 2011.

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

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.S.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 571–579, 2008.

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modeling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 337–351, 2005.

THORBURN, P.J.; DART, I.K.; BIGGS, I.M.; BAILLIE, C.P.; SMITH, M.A.; KEATING, B.A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, n. 3/4, p. 201–209, 2003.

TILMAN, D.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, London, v. 418, p. 671–677, 2002.

TREMBLAY, N.; WANG, Z.; MA, B.-L.; BELEC, C.; VIGNEAULT, P. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 10, n. 2, p. 145–161, 2008.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W. de; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.D.C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da ureia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193–201, 2002.

URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, R.B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J.M.; MAIA E SÁ, J.; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen balance and ^{15}N natural abundance data for the contribution of biological N^2 fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 365, n. 1/2, p. 5–21, 2011.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. An Algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 3, p. 701–706, 2007.

VEIGA FILHO, A.A.; FRONZAGLIA, T.; TORQUATO, S.A. A necessidade de inovação tecnológica agrícola para sustentar o novo ciclo expansionista do setor sucroalcooleiro. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de açúcar**. Campinas: IAC, 2010. cap. 40, p. 855–868.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.D.C.; PENATTI, C.P. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249–256, 2007.

VRINDTS, E.; REYNIERS, M.; DARIUS, P.; DE BAERDEMAEKER, J.; GILOT, M.; SADAOU, Y.; FRANKINET, M.; HANQUET, B.; DESTAIN, M.-F. Analysis of soil and crop properties for precision agriculture for winter wheat. **Biosystems Engineering**, London, v. 85, n. 2, p. 141–152, 2003.

WALL BAKE, J.D. VAN DEN; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; POOT, T.; WALTER, A. Explaining the experience curve: cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 4, p. 644–658, 2009.

WASKOM, R.M.; WESTFALL, D.G.; SPELLMAN, D.E.; SOLTANPOUR, P.N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 27, n. 3/4, p. 545–560, 1996.

ZHANG, J.; BLACKMER, A.M.; BLACKMER, T.M.; KYVERYGA, P.M.; ELLSWORTH, J.W. Nitrogen deficiency and recovery in sustainable corn production as revealed by leaf chlorophyll measurements. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 27, n. 4, p. 313–319, 2007.

ZILLMANN, E.; GRAEFF, S.; LINK, J.; BATCHELOR, W.D.; CLAUPEIN, W. Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 3, p. 682–690, 2006.