Lucas Rios do Amaral
Engenheiro Agrônomo

Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar

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

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

Piracicaba
2010

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

Amaral, Lucas Rios do

Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura de cana-de-açúcar /
Lucas Rios do Amaral. - - Piracicaba, 2010.
81 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

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

CDD 633.61
A485s

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

As importantes pessoas que passaram e passam em minha vida, que de uma maneira ou outra, influenciaram e continuam a influenciar em meus caminhos seguidos.

OFEREÇO

À minha mãe e a minha avó, pelo amor incondicional em todos os momentos de minha vida;

Ao meu pai e minha madrasta, pelo amor e palavras de sabedoria;

Aos meus tios Marco e Tony e à minha tia Marcia, pelo carinho e apoio em momentos difíceis e compartilhamento nos momentos de alegria;

À minha irmã Camila e aos meus primos Marco (Panda) e Matheus (Sabiá), pelo companheirismo, amizade e cumplicidade sempre;

Aos meus amigos, fundamentais nos momentos de descontração e de dificuldades.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, por meio do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao meu orientador, professor José Paulo Molin, pelo aprendizado, confiança, paciência e oportunidades.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de estudos, sem a qual se tornaria impossível o pleno desenvolvimento dessa pesquisa.

À FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), projeto PROSENSAP, pelo subsídio financeiro.

Aos parceiros fundamentais na instalação e condução deste e outros estudos, Usina São Martinho, Jacto Máquinas Agrícolas S.A. e Centro de Tecnologia Canavieira (CTC).

Ao colega Gustavo Portz, fazendo parte de praticamente todas as etapas de condução em campo dessa pesquisa, pelo constante auxílio.

Aos colegas Diego Soriano, Eloy Karam, André Colaço e Felipe de Araújo pelo apoio em diversas fases de realização do presente trabalho.

Ao Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão (gMAP), o qual tive o prazer de participar, aos seus estagiários e ex-estagiários, pela troca de conhecimentos, auxílio e convivência.

À equipe de auxílio a pesquisa do departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ/USP, Áureo, Juarez, Chicão, Afonso, Agnaldo e Zé Geraldo.

Às secretárias Fernanda e Luciane, pela paciência e ajuda em diversas situações.

Às demais pessoas, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar	15
2.2 Agricultura de precisão.....	19
2.3 Recomendação de aplicação de nitrogênio a partir de sensores óticos.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Descrição das áreas	25
3.2 Experimentos em parcelas	26
3.2.1 Delineamento experimental	26
3.2.2 Características dos equipamentos utilizados	27
3.2.3 Avaliações.....	29
3.3 Recomendação de nitrogênio em taxa variável com experimentos em forma de faixas	31
3.3.1 Delineamento experimental	31
3.3.2 Mapeamento a partir da mensuração com o sensor ótico.....	34
3.3.3 Obtenção dos mapas de recomendação de nitrogênio em taxa variável	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Experimentos em parcelas	39
4.1.1 Produtividade obtida.....	39
4.1.2 Estado nutricional da cana-de-açúcar mensurado por análise foliar.....	41
4.1.3 Resposta da cana ao nitrogênio mensurada por medidor portátil de clorofila.....	45
4.1.4 Resposta da cana ao nitrogênio mensurada por sensor ótico	49
4.1.5 Comparação entre os métodos de estimativa da resposta da cana ao nitrogênio.....	53

4.2 Recomendação de nitrogênio em taxa variável com experimentos em forma de faixas	60
4.2.1 Recomendação por curva de dose/resposta.....	62
4.2.2 Recomendação por faixa rica em N.....	63
4.2.3 Comparação entre os métodos de recomendação de N.....	65
5 CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS	75

RESUMO

Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar

Mundialmente surge uma grande demanda por fontes alternativas de energia, propiciando ao setor sucroalcooleiro brasileiro uma intensa expansão, exigindo cada vez mais tecnologias que maximizem a produção e aumentem o retorno econômico, sendo de suma importância o correto manejo do nitrogênio aplicado à cultura da cana-de-açúcar. Dessa forma, o uso de técnicas da agricultura de precisão, em especial o uso de sensores que possibilitam a aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxa variável e em tempo real, vem recebendo grande atenção por pesquisadores de todo o mundo. Sendo assim, a presente pesquisa teve como objetivo principal verificar a potencialidade de um sensor ótico ativo terrestre (*Crop Circle, Holland scientific*) em auxiliar na recomendação de nitrogênio em taxa variável para a cultura de cana-de-açúcar, de acordo com a necessidade de cada área. Para tanto, instalaram-se duas áreas experimentais, contando, em cada área, com um experimento em parcelas em um experimento em forma de faixas. O experimento em parcelas teve a finalidade de avaliar a resposta da cultura a doses de nitrogênio, mensurada por diferentes métodos. O experimento em forma de faixas de cana-de-açúcar teve a função de possibilitar o teste de diferentes estratégias de recomendação de nitrogênio, em taxa variável, a partir da utilização de sensores óticos terrestres. Verificou-se que a cultura não respondeu significativamente, em termos de produtividade, ao nitrogênio aplicado, enquanto que as análises foliares para fins de avaliação nutricional das plantas mostraram-se inconclusivas. Observou-se baixa correlação entre o teor foliar de nitrogênio e a quantidade de clorofila nas folhas mensuradas por clorofilômetro, sendo estes dois métodos insuficientes para avaliar a eficiência do sensor ótico em estimar a nutrição da cana-de-açúcar por nitrogênio, uma vez que os índices de vegetação mensurados por esse equipamento tiveram seus valores elevados pelo aumento na dose de nitrogênio aplicada. A metodologia de recomendação de fertilização nitrogenada, a partir de curvas de dose/resposta levantadas nos experimentos em parcelas, mostrou-se problemática por recomendar nitrogênio em excesso ao não levar em consideração a resposta da cultura a esse nutriente. A outra estratégia, com base na resposta da cultura estimada em uma faixa de cana-de-açúcar que tenha recebido a dose adequada de nitrogênio, recomendou nitrogênio em menores quantidades, mais condizentes com a baixa resposta da cultura verificada nos experimentos em parcelas. Concluiu-se que o sensor ótico é ferramenta útil para recomendar nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar levando em conta sua variabilidade espacial. Por isso torna-se necessária a realização de mais estudos para se aferir a melhor estratégia e o melhor índice de vegetação a ser utilizado para a recomendação, assim como possíveis fatores que venham a interferir nos resultados obtidos.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Sensoriamento remoto; Sensor ótico; Adubação nitrogenada; *Saccharum spp*; Clorofilômetro

ABSTRACT

Optical sensor to support the nitrogen recommendation on the sugarcane crop

Globally there is a great demand for alternative sources of energy, propitiating an intense expansion to the Brazilian sugarcane sector that becomes avid for more technologies to maximize the sugarcane production and increase the economical return. In this context, it is extremely important the proper management of nitrogen applied to sugarcane crop. The use of precision agriculture techniques, especially using sensors that make possible the nitrogen fertilization in variable rate and real time, is receiving great attention from researchers around the world. The present research had as main objective verify the potential of a terrestrial active optical sensor (Crop Circle, Holland Scientific) to support the nitrogen recommendation in variable rate application on the sugarcane crop, in agreement with the need for each area. To reach this goal, two experimental areas were conducted counting in each area with a plots experiment and a strips experiment. The plots aimed to evaluate the crop response to nitrogen, measured by different methods. The strips had the function to test different strategies of nitrogen fertilizer recommendation on variable rate based on the use of the terrestrial optical sensor. The crop did not respond significantly to the applied nitrogen in terms of productivity, while the leaf analyses to evaluate the plants nutritional status proved to be inconclusive. It was observed lower correlation between leaf nitrogen content and the amount of chlorophyll measured by a portable chlorophyll meter, being these two methods insufficient to evaluate the efficiency of the optical sensor on estimating the nitrogen nutrition of the sugarcane, as the vegetation indices measured by this equipment had values increasing according to the amount of nitrogen applied. The methodology of nitrogen fertilization recommendation, starting from curves of input/response obtained in the plots proved to be problematic, because it recommends nitrogen over application and does not take into account the crop response to this nutrient. The other strategy, based on estimated crop response in a strip that has received the appropriate nitrogen rate, resulted in smaller nitrogen amounts, being more consistent with the low response of sugarcane found in the experimental plots. The optical sensor is a useful tool to recommend nitrogen to the sugarcane crop, taking into account its spatial variability. Further studies are necessary to assess the best strategy and best vegetation index to be used for the recommendation, and possible factors that may interfere in the obtained results.

Keywords: Precision agriculture; Remote sensing; Optical sensor; Nitrogen fertilization; *Saccharum* spp; Chlorophyll meter

1 INTRODUÇÃO

Em função do atual panorama energético mundial, com o decréscimo das reservas de petróleo, aumento do consumo energético e crescente preocupação com as mudanças climáticas, o Brasil tem à sua frente um momento promissor, em termos de mercado para energias e combustíveis renováveis. É o país com melhores condições para gerar e produzir tais fontes energéticas, entre elas o álcool derivado da cana-de-açúcar (etanol), que figura como a alternativa que mais atende às preocupações das economias mundiais por ser renovável, poluir menos e, principalmente, poder reduzir a dependência do petróleo (SEGATO et al., 2006).

A expansão do mercado mundial de açúcar e álcool tem estimulado o aumento de investimentos no setor em todo o país, e segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2010), a lavoura de cana-de-açúcar continua em expansão no Brasil. Atualmente, o Brasil é o maior exportador mundial de açúcar e álcool, exportando, na safra 2009/2010, 67% do açúcar produzido e 17% do etanol, o que rendeu ao setor 23 milhões de dólares (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA, 2009).

A área de cana-de-açúcar a ser colhida destinada à atividade sucroalcooleira está estimada, para a safra 2010/2011, em 8.167,5 mil hectares, distribuídas em todos os estados produtores, atingindo um montante de 651,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada, representando um aumento de 7,8% em relação à safra anterior (CONAB, 2010).

Para atender a essa crescente demanda, vem sendo propostas e realizadas melhorias tecnológicas no processo de produção de cana-de-açúcar, tais como introdução de novas variedades adaptadas aos diferentes climas, tipos de solo e sistemas de corte (manual e mecânico), uso dos conceitos de agricultura de precisão, entre outros. Somente com a aplicação de processos mais eficientes que incrementem a produtividade, juntamente com a redução dos custos de produção, principalmente a partir do menor uso de insumos, é que será possível para o setor a atuação em mercados cada vez mais competitivos.

Dentre os diversos insumos agrícolas rotineiramente utilizados, o nitrogênio é um dos que desperta maiores atenções por parte de produtores e pesquisadores em todo o mundo. Nas condições dos países em desenvolvimento, esse interesse decorre do custo relativamente elevado dos fertilizantes nitrogenados e resposta variável das culturas, sendo que o nitrogênio é também

um dos fertilizantes que frequentemente sofrem má utilização, devido à variabilidade dos processos de mineralização, lixiviação, desnitrificação e absorção pela cultura.

Diante dessa situação, a utilização de métodos que estimem a resposta da cultura ao N em determinada situação edafoclimática durante a safra, possibilitando a aplicação de fertilizantes nitrogenados de maneira localizada, respeitando sua variabilidade espacial, possibilitaria um incremento na eficiência de uso do N, podendo aumentar a produtividade, diminuir gastos com fertilizantes e reduzir impactos ambientais. Assim, percebe-se um aumento no interesse em agricultura de precisão e no desenvolvimento de sistemas inteligentes para manejar os recursos agrícolas.

Sob essa ótica, o sensoriamento remoto surge com grande potencial de utilização, principalmente visando à adubação em taxa variável e em tempo real. Para tanto, vem se estudando o uso de sensores óticos ativos terrestres, que se caracterizam por utilizarem fonte de luz própria e serem aplicados na agricultura montados em veículos, como uma alternativa aos métodos tradicionais de recomendação da aplicação de nitrogênio. Essa tecnologia parte do princípio de que propriedades espectrais das folhas das plantas são alteradas pela deficiência deste nutriente, possibilitando a fertilização nitrogenada a partir de sensores que captam a refletância de determinados comprimentos de ondas de luz a partir de sensores localizados próximos ao dossel das plantas. No entanto, tais estudos se concentram em culturas como o trigo e o milho, não sendo ainda disponíveis estudos nesse sentido para a cana-de-açúcar.

Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo principal verificar a possibilidade de utilização de um sensor ótico ativo terrestre na recomendação da fertilização nitrogenada em taxa variável em lavouras de cana-de-açúcar, de acordo com a necessidade de cada área, evitando, dessa forma, a recomendação de aplicação de doses excessivas ou deficitárias. Os objetivos específicos são: 1) avaliar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio, mensurada a partir de sensoriamento remoto próximo (sensor ótico terrestre) e sensoriamento direto (medidor portátil de clorofila); 2) desenvolver uma estratégia de recomendação de nitrogênio em taxa variável para a cultura da cana-de-açúcar a partir da utilização de sensores óticos terrestres; 3) fornecer subsídios para posteriores trabalhos que visem à gestão da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar a partir de sensores óticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar

O nitrogênio (N) é constituinte de vários compostos em plantas, destacando-se os aminoácidos, ácidos nucleicos e clorofila (CANTARELLA, 2007). Dessa forma, o N é o elemento geralmente absorvido em maiores quantidades pelas culturas, perdendo, no caso específico da cana-de-açúcar, apenas para a grande absorção e acúmulo de potássio (CANTARELLA et al., 2007).

Se o N é utilizado adequadamente, juntamente com os demais nutrientes, pode acelerar o desenvolvimento das culturas em geral (TISDALE et al., 1993). Por outro lado, quando o suprimento de N excede a necessidade da cultura, o excesso é perdido por escoamento superficial e/ou lixiviação, podendo contaminar ecossistemas aquáticos e o lençol freático (WOOD et al., 1993), além de representar perda econômica para os agricultores.

Dessa forma, o manejo adequado do N é de extrema importância para o desenvolvimento adequado da cultura e o retorno econômico satisfatório do investimento. Entretanto, esse é um elemento que frequentemente sofre má utilização devido a sua dinâmica complexa no solo, apresentando diversos mecanismos de imobilização, mineralização e perdas.

Seu ciclo é controlado por fatores físicos, químicos e biológicos, sendo afetado por condições edafoclimáticas difíceis de prever e controlar (CANTARELLA, 2007). Devido a isso, não há, em âmbito nacional, um método que estime a quantidade de N disponível no solo para as culturas. Isto porque, de acordo com Cantarella (2007), a maior fração do N está na forma orgânica sob diferentes graus de recalcitrância. Segundo o mesmo autor, o N pode ingressar no sistema solo-planta por deposições atmosféricas, fixação biológica (simbiótica ou não), uso de fertilizantes minerais ou orgânicos. Por outro lado, pode ser removido por meio da extração pelas culturas e por diversos mecanismos de perdas, onde a lixiviação (NO_3^-) e a volatilização (NH_3) se apresentam como principais problemas em áreas que recebem fertilizantes nitrogenados.

Cantarella et al. (2007) compilando diversos dados, verificaram que, em cana-de-açúcar, a eficiência de uso do N fornecido por fertilizantes e mensurado pela sua recuperação no sistema, é menor que 40%, inferior à maioria das culturas, onde se situa entre 50% e 70%.

Solari (2006) aponta três principais causas para a baixa eficiência de uso do N: falta de sincronia entre a demanda de N pela cultura e seu fornecimento pelas diversas fontes; aplicações uniformes de N que não levam em conta a variabilidade espacial existente dentro de cada talhão, no que diz respeito à mineralização do N orgânico presente no solo e suas fontes de perda, assim como a capacidade de resposta das culturas em certa localidade; a forma como a recomendação do N é feita, tomando como base uma estimativa de produtividade que, na maioria das vezes, não é atingida devido à variabilidade climática dentro de cada safra.

O aproveitamento efetivo da adubação em cana-de-açúcar está estritamente relacionado à época de aplicação, e, portanto, deve-se levar em consideração o desenvolvimento da cultura e sua demanda por N, o comportamento do elemento no solo, a idade do canavial e a distribuição da precipitação (VITTI; MAZZA, 2002). Segundo os mesmos autores, a adubação nitrogenada de cana-planta deve ser feita com base no histórico da área, estando em torno de 40 kg ha^{-1} , em função da pequena resposta da cana-de-açúcar ao N aplicado. Segato et al. (2006) apontam alguns fatores para essa baixa resposta da cana-planta: ao preparar o solo, o N existente na matéria orgânica é mineralizado; a formação de um sistema radicular extenso e profundo que explora grande volume de solo; o tolete (muda) fornece parte do N necessário; por fim, sabe-se que a cana-planta forma associações com bactérias de vida livre, fixadoras de N do ar atmosférico, devido a exsudação de açúcar pelo tolete.

Para cana-soca, a estratégia mais acertada para recomendação de N seria a partir da extração pela cultura. No entanto, não há um consenso sobre a real exportação e necessidade de reposição desse elemento, por razão da alternância de resposta verificada em experimentos de campo. A baixa recuperação do N fertilizante confere uma sensibilidade limitada aos estudos que visam comparar fontes e modos de aplicação de N em cana-de-açúcar e, muitas vezes, explicam a falta de respostas significativas em lavouras e até mesmo em experimentos conduzidos em condições de campo (CANTARELLA et al., 2007).

Estudos realizados no Havai mostraram que a cana-soca necessitou de 1,3 kg de N por tonelada produzida (DILLEWIJN, 1952). Vitti e Mazza (2002) recomendam 1 kg de N para cada tonelada de colmos esperada. Cantarella et al. (2007), em ampla revisão bibliográfica, obtiveram valores de exportação de N pela colheita da ordem de 0,7 a 2,4 kg de N por tonelada de colmos

produzidos, concluindo que a cana extrai mais de 200 kg ha⁻¹ de N para uma produção de 100 t ha⁻¹ de colmos, dos quais 90 a 100 kg ha⁻¹ são exportados com os colmos removidos do campo.

Para o Estado de São Paulo, Raij e Cantarella (1997) recomendam que no plantio da cana-de-açúcar aplique-se 30 kg ha⁻¹ de N, e posteriormente aplique-se de 30 a 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura, em função da produtividade esperada e da cultura anterior, aos 30 - 60 dias após o plantio. Já, em cana-soca, esses mesmos autores recomendam a aplicação de 60 a 120 kg ha⁻¹ de N, de acordo com a produtividade esperada, aplicado ao lado das fileiras de cana, superficialmente e misturado ao solo, no máximo a 0,1 m de profundidade. Entretanto, tanto as recomendações de parcelamento, quanto as de incorporação do fertilizante, que têm como finalidade melhorar a eficiência de uso do nutriente, não são seguidas pelas usinas de açúcar e álcool e produtores rurais por representarem custos adicionais. Dessa forma, Cantarella et al. (2007) afirmam ser provável que as doses de N atualmente praticadas subestimem o potencial de resposta econômica ao N em lavouras com materiais genéticos mais produtivos, cultivados em ambientes de alto rendimento.

Argenta et al. (2003) apontam que, devido ao conjunto de práticas culturais adotadas em lavouras sem considerar suas particularidades de desuniformidade, rotineiramente ocorre uma sub ou superestimação da dose de N a ser utilizada, ocasionando áreas em que a adubação aplicada estará abaixo da necessidade das plantas e outras em que ela estará acima da necessidade.

Dessa maneira, a capacidade de resposta da cana-de-açúcar ao N apresenta-se como variável importantíssima a ser considerada na recomendação e aplicação de N durante a safra. Johnson e Raun (2003) apontam que em geral a resposta das culturas a aplicação de N é dependente do fornecimento de N pelo solo (por exemplo, devido à mineralização da matéria orgânica) em determinado ano, sendo necessário adotar estratégias de manejo que incluam previsões do índice de resposta das culturas ao N.

Uma alternativa, ou talvez uma informação complementar, seria o uso de indicadores das condições locais no fornecimento de N a partir de propriedades da cultura, uma vez que o estado nutricional das plantas durante a safra é um ótimo indicador das condições do ambiente, onde o clima e as práticas culturais interferem na resposta das plantas à aplicação de N, já que plantas bem supridas em N apresentam maior concentração de N nas folhas, maior teor de clorofila e maiores taxas de fotossíntese (SOLARI, 2006).

Uma estratégia seria a avaliação de tecidos vegetais, como a amostragem e análise foliar, mas particularmente no caso da cana-de-açúcar, a determinação da extração e suficiência de nutrientes por essa técnica ainda não se encontra consolidada (RAIJ; CANTARELLA, 1997; FONTES, 2001). Sendo assim, métodos alternativos devem ser almejados.

Argenta (2001) aponta que o desenvolvimento de medidores portáteis de clorofila, que permitem medições instantâneas do valor correspondente ao seu teor na folha sem destruí-la, apresenta-se como ferramenta útil para estimar o teor relativo desse pigmento na folha. Dessa forma, como o teor de clorofila da folha se correlaciona positivamente com o teor de N na planta (SCHADCHINA; DMITRIEVA, 1995), uma vez que 50 a 70% do N total das folhas são integrantes de enzimas que estão associadas aos cloroplastos (ARGENTA et al., 2001b), torna-se possível sua utilização em lavouras para prever a necessidade de N.

Argenta et al. (2001a) testaram características das plantas de milho como indicadores do nível de N (teor e acúmulo de N, leitura correspondente ao teor de clorofila na folha avaliada com clorofilômetro, produção de matéria seca e área foliar) e constataram que a mensuração com o clorofilômetro foi o melhor indicador do nível de N na planta dentre as características avaliadas.

Em estudos com a cultura do milho, Solari (2006) aponta que a utilização de clorofilômetros pode ocasionar aumento na eficiência de uso de N. No entanto, afirma não se tratar de uma estratégia exequível em campo quando se quer mensurar extensas áreas, por demandar muito tempo nas mensurações e no processamento das informações.

Outra alternativa é o uso do sensoriamento remoto, seja ele distante (imagens de satélite e fotografias aéreas) ou próximo (sensores óticos acoplados a máquinas agrícolas). Essa estratégia parte do princípio que propriedades espectrais, refletância e transmitância das folhas são afetadas pela deficiência de N (BLACKMER et al., 1996) onde, ao contrário dos medidores portáteis de clorofila, que avaliam folhas individualmente, os sensores óticos avaliam todo o dossel das plantas, tendo potencial para mensurar grandes áreas (SOLARI, 2006).

Dessa forma, a adoção de técnicas de agricultura de precisão e utilização de sensores óticos que possibilitam a estimativa da demanda da cultura por N e seu potencial de resposta passa a ser elemento chave no incremento da produtividade e eficiência de uso do N. Além disso, tais técnicas oferecem a capacidade de recomendar e aplicar fertilizantes nitrogenados em taxa

variável e em tempo real, evitando aplicações excessivas ou deficitárias dentro de um mesmo talhão, sempre tomando como base sua variabilidade espacial.

2.2 Agricultura de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) compreende um conjunto de técnicas que visam otimizar o manejo de cultivos e o uso de insumos agrícolas, aumentando sua eficiência agrônômica (MOLIN, 2009). Bramley (2009) classifica AP como sendo um conjunto de tecnologias que melhoram o manejo agrícola das culturas, considerando que o potencial produtivo das áreas pode variar significativamente a curtas distâncias. Molin (2001) aponta que AP é, acima de tudo, um sistema de gerenciamento da produção agrícola, contando com procedimentos e equipamentos focados na otimização das lavouras e sistemas produtivos, tendo como elemento principal o manejo da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados. Sendo assim, as práticas de AP envolvem mecanismos que aumentam a chance de se realizar as adequadas estratégias de manejo no local e no momento correto (BRAMLEY, 2009), aumentando o potencial de resposta da cultura e o retorno econômico (PIRES et al., 2004), além da redução dos impactos ambientais decorrentes das atividades agrícolas (MOLIN, 2009).

Segundo Pires et al. (2004), a questão mais importante evidenciada pela AP é mostrar a variabilidade das áreas agrícolas e fazer com que sejam criadas alternativas de manejo que levem em consideração tal diversidade, buscando tirar proveito delas (MOLIN, 2001). Molin (2009) aponta que, especialmente em nível nacional, a técnica de AP mais largamente utilizada é a aplicação de fertilizantes e corretivos em taxa variável, a partir de amostragem georreferenciada de solo em grade regular. No entanto, o mesmo autor lembra que AP é um sistema de gestão que considera a variabilidade espacial das lavouras em todos os aspectos e que acabam por se refletir na produtividade final das culturas, sejam elas condições de solo (características físicas, químicas e biológicas), infestação por plantas daninhas, doenças, pragas ou outro fator qualquer.

Mallarino et al. (1999), estudando a correlação existente entre parâmetros de fertilidade do solo (matéria orgânica, P, K, pH e $\text{NO}_3\text{-N}$) e a produção de milho, com amostras a cada 15 m, encontraram índices de correlação de 0 a 0,77, sendo altamente variáveis entre os elementos e as áreas analisadas, o que aponta para a baixa relação existente entre os elementos de fertilidade do solo e a produtividade das culturas em determinadas situações. Dessa maneira, estratégias que

levam em consideração também as plantas, e não somente características do solo, tanto na forma de monitoramento da produtividade, quanto na forma de monitoramento do desenvolvimento da cultura ou de algum parâmetro específico, mostram-se mais adequadas por representar a real resposta das plantas a certa situação edafoclimática.

Ao focar a fertilização com nitrogênio, a determinação da dose a ser aplicada com base na produtividade esperada tem sido a mais confiável (RAUN et al., 2001) e neste aspecto o mapeamento da produtividade tem fundamental importância. Entretanto, segundo Moges et al. (2004), medidas indiretas e não destrutivas da cultura são uma alternativa para as tomadas de decisão sobre o manejo. Nesta direção, existem atualmente no mercado, equipamentos com a capacidade de estimar indiretamente a nutrição das culturas por N e a sua capacidade de resposta em determinada condição de clima e solo, possibilitando a implementação de fertilizantes nitrogenados em cobertura, dentro da mesma safra.

2.3 Recomendação de aplicação de nitrogênio a partir de sensores óticos

Propriedades espectrais, refletância e transmitância das folhas das plantas são afetadas pela deficiência de N, em função do N ser integrante essencial da clorofila, pigmento que é o primeiro a absorver a energia luminosa necessária para a fotossíntese (BLACMER et al., 1996; TARPLEY et al., 2000). Sendo assim, equipamentos que quantifiquem estas alterações podem ser utilizados para estimar a deficiência das plantas por N, possibilitando a recomendação de N de acordo com sua demanda durante a safra (ARGENTA, 2001).

Sob essa ótica, assume-se que as plantas têm como expressar sua deficiência por N a partir de alguns indicadores, sendo que o indicador com maior potencial, apontado pela pesquisa e indústria, apresenta-se na forma da mensuração da refletância da luz incidente e/ou sua transmitância, especialmente na região do visível e do infravermelho próximo, onde sensores distantes poucos metros ou até centímetros das plantas, têm sido utilizados para leitura, interpretação e recomendação de N em taxa variável e em tempo real em grandes áreas (MOLIN, 2009).

Os sensores atualmente utilizados para esse fim são chamados de sensores óticos ativos terrestres (SOAT), acoplados a máquinas agrícolas. Estes sensores são denominados “ativos” pois possuem fonte própria de luz, podendo trabalhar dia e noite, captando a radiação refletida pelo

alvo (POVH, 2007). A refletância das culturas mensurada por estes equipamentos pode ser definida, segundo Schroder et al. (2000), como a intensidade da radiação refletida pela vegetação, partindo-se do princípio que a radiação emitida é conhecida.

Solari (2006) aponta que plantas, de maneira geral, apresentam baixa refletância e transmitância de radiação na faixa visível do espectro (400 a 700 nm), devido à forte absorção pelos pigmentos fotossintéticos (clorofila), principalmente na faixa do azul (~450 nm) e vermelho (~660 nm) (Figura 1). Por outro lado, há uma grande refletância e transmitância na região do infravermelho próximo (~700 a 1400 nm) (SOLARI, 2006), sendo influenciada pela estrutura interna das folhas (TUCKER, 1979 apud EITEL et al., 2008), principalmente em função da ausência de absorção pelos pigmentos e dispersão do mesófilo das folhas (WOOLLEY, 1971).

Figura 1 - Diagrama conceitual que ilustra a refletância de folhas saudáveis

Fonte: adaptado de Inman et al. (2005)

Um dos índices de vegetação mais estudados, tanto para a estimativa da nutrição por N (RAUN et al., 2002; SOLARI, 2006; EITEL et al., 2008), como para estimativas de cobertura do solo (PHILLIPS et al., 2004), produtividade (GIRMA et al., 2006; TEAL et al., 2006), teor de

clorofila nas folhas (WU et al., 2008), dentre outras aplicações e fatores de estresse (SOLIE et al., 2002), é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*).

Jordan (1969 apud SOLARI et al., 2008) propôs a razão simples entre as medidas espectrais de infravermelho próximo e do vermelho para a determinação do índice de área foliar (IAF), o qual foi um dos primeiros índices usados para quantificar a vegetação em imagens de sensoriamento remoto. Posteriormente, Rouse et al. (1973) propôs o NDVI, calculado a partir da normalização de bandas do vermelho e infravermelho próximo, conforme a eq. (1), onde os valores de NDVI estão contidos em uma mesma escala de valores adimensionais, entre -1 e 1.

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}) \quad (1)$$

em que:

ρ_{IVP} = refletância no infravermelho próximo;

ρ_{V} = refletância no vermelho.

Estes índices são largamente empregados em imagens de satélite e fotografias aéreas, sendo mais recentemente adotados em sensores óticos terrestres. Wright et al. (2004), trabalhando com diferentes formas de sensoriamento remoto na determinação da nutrição por N em trigo, encontraram maior correlação entre o índice de vegetação NDVI mensurado por um sensor ótico ativo terrestre (SOAT) do que os índices de vegetação de imagens de satélite e fotografias aéreas para a quantidade de nitrogênio aplicada na época da semeadura, quantidade de nitrogênio presente na folha bandeira, produtividade e teor de proteína nos grãos. Steven (2004) aponta que os dados espectrais que podem ser obtidos de imagens de satélites ainda possuem baixa resolução temporal para o uso na agricultura, afirmando que a aquisição de dados com sensores terrestres é menos dependente do clima, a coleta de dados pode ser feita aproveitando outras operações e os dados são disponibilizados em tempo real ou logo em seguida, não sendo necessário esperar seu processamento.

Com o uso do NDVI e/ou outros índices de vegetação, mensurados com SOAT, torna-se possível, a partir de diferentes metodologias, a recomendação de aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxa variável, seja com aplicações em tempo real, seja regida por mapa de recomendação. No entanto, Povh et al. (2007) ressaltam que para a aplicação de fertilizantes em taxa variável em tempo real, se faz necessário ter estudos de calibração do equipamento para diversos sistemas de produção, com diferentes culturas. Dessa forma, essa estratégia de fertilização vem sendo largamente estudada em diversas culturas ao redor do mundo, como por exemplo, nas culturas de milho (BLACKMER et al., 1996; TEAL et al., 2006; SOLARI et al., 2008), trigo (LUKINA et al., 2001; RAUN et al., 2002; WRIGHT, 2004; POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009), algodão (SUI et al., 2005; MOTOMIYA et al., 2009), cevada (POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009) e citros (MIN; LEE, 2005), entre outras.

Em espécies de plantas largamente cultivadas pelo mundo, as quais apresentam cultivares altamente domesticadas, como é o caso do trigo e do milho, a utilização destes SOATs para a recomendação e aplicação de N em taxa variável, pelo menos em nível experimental, pode ser realizada eficientemente a partir de algoritmos de fertilização, onde diversas variáveis são consideradas, como o índice de resposta da cultura ao N, número de dias compreendidos da semeadura até a mensuração com o sensor, graus dia acumulados¹ até a data da mensuração, dentre outros (RAUN et al., 2002; SOLARI, 2006; TEAL et al., 2006; POVH, 2007).

Stone et al. (1996), utilizaram um sensor ótico acoplado à frente de um trator e obtiveram boa correlação entre a refletância e a absorção de nitrogênio pela cultura de trigo para diferentes variedades. Osborne (2007), trabalhando com um SOAT comercial (GreenSeeker®) na cultura do trigo, concluiu que o equipamento pode ser eficiente em estimar, durante a safra, a nutrição por N da cultura e seu potencial produtivo, independentemente da variedade. Raun et al. (2002) e Solari et al. (2008), trabalhando, respectivamente, com trigo e milho, verificaram que a resposta destas culturas ao N pode ser eficientemente predita pelos SOATs, possibilitando a recomendação de N com base na produtividade almejada.

Em nível nacional, Povh et al. (2008), trabalhando com um SOAT (GreenSeeker®) nas culturas de trigo, cevada e triticale, observaram que o NDVI gerado pelo sensor apresentou

¹ Quantidade de graus centígrados superior à temperatura base da cultura registrados do momento da semeadura até a mensuração com o sensor ótico.

correlação e regressão positiva com as três variáveis analisadas (nitrogênio aplicado, nitrogênio foliar e produtividade), afirmando que o NDVI medido por esse sensor apresenta alto potencial para manejo do N nestas culturas. Motomiya et al. (2009) afirmam que esse mesmo equipamento se mostrou uma ferramenta potencial para a detecção da deficiência de nitrogênio na cultura do algodoeiro.

No entanto, em culturas rústicas, como é o caso da cana-de-açúcar, apresentando relativamente poucos estudos científicos sobre sua fisiologia e nutrição, o uso dessa técnica de recomendação da adubação nitrogenada ainda é um desafio. Inamasu et al. (2006) testaram um SOAT (ACS- 210 Crop Circle) na cultura da cana-de-açúcar com o objetivo de mensurar os teores de nitrogênio e potássio aplicados ao solo. O sensor não foi capaz de detectar as diferentes doses de potássio aplicadas. Entretanto, os índices da mensuração de refletância foram crescentes de acordo com as doses de nitrogênio aplicadas, sugerindo que há possibilidade do sensor ser utilizado na identificação de deficiência de nitrogênio nesta cultura, corroborando com Amaral e Molin (2010). Resultados semelhantes foram verificados por Frasson (2007) trabalhando em cana-de-açúcar, 90 dias após o corte, onde verificou regressões significativas entre doses de N e o NDVI obtido pelo sensor ótico, concluindo que esse tipo de sensor pode ser utilizado para detectar deficiência de N em cana-de-açúcar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição das áreas

Foram conduzidos experimentos em campo, na região de Ribeirão Preto, SP, em usina de açúcar e álcool com sede situada a 21°21'34"S e 48°03'56"W. Selecionou-se dois talhões experimentais em Ambiente de Produção A, em solos classificados, segundo levantamento prévio realizado pela usina, como Latossolo Vermelho eutrófico, cultivados com a variedade RB85-5453, sendo um de segundo corte (primeira soqueira) e o outro de quarto corte (terceira soqueira), nomeados, respectivamente, de Área 1 e Área 2, colhidos mecanicamente no final do mês de maio de 2009. Ambiente de Produção A caracteriza-se por apresentar produtividade média dos cinco cortes superior a 96 t ha⁻¹, capacidade de água disponível média-alta, CTC média-alta e ser eutrófico (PRADO, 2005). As áreas selecionadas, anualmente recebem aplicação de vinhaça, mas para evitar a interferência na resposta dos tratamentos, durante o ano de condução dos experimentos, não se aplicou esse sub-produto, realizando-se a aplicação de 78 kg ha⁻¹ de potássio na forma de cloreto de potássio. Ocorreu a aplicação de herbicidas antes do início da brotação da soqueira, seguindo manejo usual da usina.

Em cada área experimental foram instalados dois experimentos distintos e complementares, sendo um em parcelas alocadas em um canto do talhão (experimento em parcelas) e o outro na área restante do mesmo (experimento em forma de faixas). O experimento em parcelas teve o objetivo específico de verificar a possibilidade de uso de diferentes métodos indicadores da nutrição de plantas por nitrogênio na estimativa da resposta da cana-de-açúcar (sensor ótico, clorofilômetro e análise foliar) a doses crescentes deste elemento, visando uma recomendação mais precisa da adubação nitrogenada, assim como fornecer subsídios ao experimento em forma de faixas. O experimento em forma de faixas teve como objetivo específico mensurar a variabilidade da nutrição por N em área total e avaliar diferentes estratégias de recomendação de nitrogênio em taxa variável, a partir do sensor ótico ativo utilizado (SOAT).

3.2 Experimentos em parcelas

3.2.1 Delineamento experimental

Implantou-se o delineamento experimental logo após o corte da cana-de-açúcar, no esquema de blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos constaram de quatro doses de nitrogênio (50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N), aplicados manualmente na forma de nitrato de amônio (31% de N), e uma testemunha sem aplicação de N. Cada parcela possuía seis fileiras de cana-de-açúcar, espaçadas 1,5 m, com 15 m de comprimento, utilizando-se como área útil os 10 m centrais das quatro fileiras internas.

Realizou-se amostragem de solo composta por dez sub-amostras retiradas de 0 a 0,2 m de profundidade na área onde as parcelas foram instaladas. Os dados de precipitação e temperatura durante a condução dos experimentos, compreendidos do corte da cana-de-açúcar à colheita, estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Dados de temperatura e precipitação durante a condução dos experimentos, mensurados na estação climatológica da usina, localizada a cerca de 10 km das áreas experimentais

Segundo Conab (2010), as chuvas durante a safra 2009/2010 estiveram significativamente acima da média nos principais centros de produção, o que favoreceu o desenvolvimento dos canaviais.

3.2.2 Características dos equipamentos utilizados

3.2.2.1 Sensor ótico ativo terrestre

O SOAT usado foi o CropCircle, modelo ACS-210 (*Holland Scientific, Lincoln, NE, USA*) (Figura 3). Segundo informações do fabricante, o sensor possui sua própria fonte de luz modulada, com uma frequência de emissão aproximada de 40.000 Hz, emitida a partir de um único LED (*light emitting diode*) que simultaneamente emite ondas de luz na região do visível (âmbar, 590 nm, +/- 5,5 nm) e na região do infravermelho próximo (IVP -880 nm, +/- 10 nm), onde a refletância do alvo é captada por dois fotodetectores (400 nm a 680 nm e 800 nm a 1100 nm), o que elimina a interferência da luminosidade do ambiente (SOLARI, 2006); seu campo de visão é de 32 graus por 6 graus. Possui uma frequência de armazenamento de vinte dados por segundo, sendo que cada dado equivale a uma média aproximada de 2000 mensurações individuais, computando, entre outras informações, a refletância do IVP e do âmbar, assim como o cálculo do índice de vegetação NDVI (eq. 1.). A distância ótima do sensor ao alvo (dossel da cultura) para mensurações é de 0,8 a 1,2 m, coletando dados dinamicamente em apenas uma fileira de plantas por vez. Os dados básicos de saída do sensor incluem a refletância da luz visível (âmbar) e do infravermelho próximo (IVP), índice de razão simples (SRI - refletância no âmbar dividido pela refletância no IVP) e NDVI.

Figura 3 - Sensor ótico CropCircle e sua utilização em campo

3.2.2.2 Medidor portátil de clorofila

O medidor portátil de clorofila (clorofilômetro) utilizado foi o SPAD-502 (Konica Minolta Sensing, Inc., Sakai, Osaka, Japão) (Figura 4.). O equipamento possui diodos que emitem luz a 650 nm (vermelho) e a 940 (infravermelho). A luz em 650 nm situa-se próxima dos dois comprimentos primários de onda associados à atividade da clorofila (645 e 663 nm). O comprimento de onda de 940 nm serve como referência interna para compensar as diferenças na espessura ou no conteúdo de água da folha ou devido a outros fatores (WASKOM et al., 1996). A luz que passa através da amostra da folha atinge um receptor (fotodiodo de silicone) que converte a luz transmitida em sinais elétricos analógicos. Esses sinais são convertidos e usados por um microprocessador para calcular os valores adimensionais SPAD (*Soil Plant Analysis Development*), que são mostrados num visor. Os valores obtidos são proporcionais ao teor de clorofila presente na folha, conforme estudos realizados na cultura do milho (DWYER et al., 1995; ARGENTA, 2001) e em outras culturas (YADAVA, 1986; DWYER et al., 1995).

Figura 4 - Clorofilômetro Minolta SPAD-502 e sua utilização em cana-de-açúcar

3.2.3 Avaliações

Foram realizadas três avaliações em épocas distintas, em função da altura média da brotação (0,2, 0,4 e 0,6 m) (Tabela 1), sendo medida a altura, em relação ao solo, da primeira folha com aurícula visível (altura de colmo ou de palmito). Em cada avaliação realizou-se mensurações com o sensor ótico e clorofilômetro, assim como a coleta de amostras de folhas para determinação do teor foliar de N.

Tabela 1 - Datas do corte da cana-de-açúcar, aplicação dos tratamentos, avaliações e colheita, nas duas áreas experimentais

Área	Data de corte	Aplicação tratamentos	Primeira avaliação	Segunda avaliação	Terceira avaliação	Amostragem foliar macronutrientes	Colheita
1	27/5/2009	3/7/2009	10/8/2009	21/10/2009	3/11/2009	19/1/2010	13/5/2010
2	3/5/2009	23/6/2009	10/8/2009	28/9/2009	3/11/2009	19/1/2010	13/5/2010

O SOAT foi conduzido manualmente, mantido a uma altura de cerca de um metro de distância do dossel da cultura, onde a média dos valores de refletância mensurados na área útil (IVP, âmbar e NDVI) representou o valor de cada parcela.

O NDVI foi desenvolvido para a mensuração da vegetação a partir de imagens aéreas e orbitais, podendo apresentar alguns problemas de inexatidão e interferência quando utilizados

próximo às plantas, como é o caso da utilização a partir de sensores óticos ativos terrestres (SOLARI, 2006). Em função disso, diversos índices derivados do NDVI vêm sendo estudados (WU et al., 2008; EITEL et al., 2008), dentre eles o *Chlorophyll index* (CI) (GITELSON et al., 2003). Solari et al. (2008) verificaram que o CI (eq. 2.) é um índice mais sensível à variação de clorofila nas folhas, quando comparado ao NDVI (eq. 1.), principalmente em culturas que apresentam moderada a alta quantidade de biomassa.

$$CI_{\text{âmbar}} = (IVP_{880} / \text{verde}_{560}) - 1 \quad (2)$$

O SOAT testado emite comprimentos de ondas a 590 nm (âmbar), sendo que essa refletância está no limite entre o verde (560 nm) e o vermelho (660 nm), podendo ser utilizado em substituição à refletância do verde no cálculo do CI (SOLARI et al., 2008). Dessa forma, além da mensuração do NDVI automaticamente calculado pelo SOAT, calculou-se também o $CI_{\text{âmbar}}$ para cada parcela. Da mesma forma, salienta-se que o SOAT utilizado calcula um índice de vegetação que poderia ser denominado NDVI (banda do vermelho) ou GNDVI (banda do verde) (GITELSON; MERZLYAK, 1996; SOLARI et al., 2008), por utilizar um comprimento de onda intermediário, sendo que no presente trabalho esse índice de vegetação será chamado de NDVI. Este comprimento de onda intermediário (âmbar) pode tornar este índice mais sensível ao teor de clorofila nas folhas do que o NDVI utilizando a banda de refletância no vermelho, o qual é altamente influenciado pela biomassa (EITEL et al., 2008).

Quanto às avaliações com o medidor portátil de clorofila, seguiu-se as recomendações do Faroni² (informação pessoal), onde a folha a ser analisada deve ser a folha diagnóstico comumente adotada (“folha +1”), ou seja, a primeira folha com aurícula visível. Dessa forma, para as mensurações com o clorofilômetro, selecionou-se 30 folhas saudáveis dentro da área útil de cada parcela, realizando-se uma mensuração no meio da folha em um dos dois limbos foliares, calculando-se a média do índice SPAD representativo para cada parcela. Essas mesmas folhas, após separação de seu terço médio e exclusão da nervura central (RAIJ; CANTARELLA, 1997), foram enviadas ao laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da ESALQ/USP para determinação

² FARONI, C. E. Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, SP

do teor foliar de N. Adicionalmente, para se conhecer a nutrição da cultura por macronutrientes, se efetuou amostragem de folhas no momento de máximo desenvolvimento da cultura (mês de janeiro), conforme recomendações de Faroni² (informação pessoal) e Raij e Cantarella (1997), seguindo a mesma metodologia.

Um dia antes da colheita, procedeu-se a coleta de dez colmos na área útil das parcelas, para determinação no laboratório da própria usina, dos teores de brix (sólidos solúveis) % caldo, pol (sacarose) % cana, fibra % cana e açúcar teórico recuperável (ATR). Realizou-se a colheita total da área útil de cada parcela e pesagem individualizada, a partir de balança embarcada em caminhão, obtendo-se a produtividade final de colmos.

Os dados foram submetidos à análise de variância que, quando significativos, tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; análise de regressão e correlações.

3.3 Recomendação de nitrogênio em taxa variável com experimentos em forma de faixas

3.3.1 Delineamento experimental

Implantou-se o delineamento experimental logo após o corte da cana-de-açúcar, no esquema de blocos ao acaso com quatro repetições, no mesmo dia da instalação do experimento em parcelas (item 3.2). Os experimentos foram compostos por faixas de nove fileiras de cana, espaçadas 1,5 m, com o comprimento do talhão escolhido, da ordem de 300 a 500 m, composto por quatro tratamentos e quatro repetições, em blocos ao acaso (Figura 5). Os tratamentos consistiram de doses de 0, 25 e 50 kg ha⁻¹ de N, além de mais um tratamento com a dose adotada pela usina, de 100 kg ha⁻¹. A fonte de N utilizada foi o nitrato de amônio (31% de N), aplicado superficialmente sobre a palhada com um veículo adubador Uniport NPK-3000 (Jacto Máquinas Agrícolas S.A., Pompéia, SP).

Figura 5 - Croqui dos experimentos em forma de faixas mostrando a ordem de instalação dos tratamentos. A barra na lateral esquerda indica as doses de N em kg ha^{-1} , que formaram os tratamentos para cada faixa

Foi realizada amostragem georreferenciada de solo em grade regular, com uma amostra composta a cada meio hectare, retirando-se dez sub-amostras em um raio de 5 m do ponto central a uma profundidade de 0 a 0,2 m com um trado tipo holandês, conforme a distribuição indicada nos mapas na Figura 6, possibilitando a análise espacial dos parâmetros de fertilidade do solo e determinação de possíveis fatores limitantes à produção. Procedeu-se o contorno dos talhões, determinação da grade amostral e navegação aos pontos através de um PDA (*Pocket PC Ipaq 3600*, Palo Alto, CA, USA), equipado com o software *Farm Site Mate* (*FarmWorks Software*, Curitiba, PR), para navegação em campo, conectado a um receptor de GPS AG 132 (Trimble, Sunnyvale, CA, EUA).

Figura 6 - Pontos georreferenciados de amostragem de solo nos talhões experimentais: (a) Área 1; (b) Área 2

Os dados de precipitação e temperatura durante a condução dos experimentos, compreendendo o período do corte da cana-de-açúcar até o momento do mapeamento com o sensor ótico, estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Dados de precipitação e temperatura durante a condução dos experimentos em forma de faixas, mensurados na estação climatológica da usina, localizada a cerca de 10 km das áreas experimentais, equivalente ao período compreendido entre o corte anterior e a mensuração com o sensor ótico

3.3.2 Mapeamento a partir da mensuração com o sensor ótico

As mensurações com SOAT devem ser realizadas quando a cultura é capaz de expressar a variabilidade na sua nutrição por N. Dessa forma, o momento adequado para essa mensuração nas condições do presente estudo foi quando as plantas apresentavam altura média superior a 0,4 m, conforme os resultados observados nos experimentos em parcelas. Dessa forma, procedeu-se o mapeamento a partir da mensuração com sensor ótico³ quando a cultura apresentava 0,45-0,5 m, cerca de 140 dias após o corte (DAC).

As mensurações foram feitas em três das nove fileiras de cana-de-açúcar de cada faixa, intercaladamente, com o sensor acoplado a um receptor GPS AG 132 (Trimble, Sunnyvale, CA, EUA) que trabalha com sinal da frequência L1 e desenvolvido para permitir um bom paralelismo em aplicações agrícolas, oriundo de sua correção por algoritmo interno. Programou-se o sensor para coletar um dado a cada segundo, limitado pela frequência de coleta do GPS, sendo que com

³ Características descritas no item 3.2.2.1

o deslocamento do veículo a cerca de 5 m s^{-1} (18 km h^{-1}), obteve-se um valor de índice de vegetação a cada 5 m, sendo esse representativo da média de cerca de 40 mil leituras.

Para o mapeamento com o sensor ótico foi utilizado o veículo adubador Uniport NPK-3000, com o sensor acoplado conforme indicado na Figura 8.

Figura 8 - Sensor ótico e GPS acoplados ao veículo para o mapeamento do NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$

3.3.3 Obtenção dos mapas de recomendação de nitrogênio em taxa variável

Adotou-se dois métodos de recomendação de N para fins de comparação entre as metodologias e os índices de vegetação testados (IVs - NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$). O primeiro método leva em conta a curva de dose/resposta da cana-de-açúcar ao N aplicado, obtidas nos experimentos em parcelas e com mensurações feitas com o SOAT (recomendação de N por curva de dose/resposta), metodologia adaptada de Lukina et al. (2001), onde um valor qualquer do índice de vegetação (IV) indica uma quantidade teórica de N fornecido pelo solo (N absorvido), sendo

recomendada a diferença entre a dose máxima de N para cada área experimental e a quantidade de N já absorvida.

O segundo método segue o proposto por Raun et al. (2002) para a cultura do trigo e testado e adaptado no Brasil por Povh (2007), tendo como variáveis determinantes para a recomendação de N a estimativa da produtividade e da resposta da cultura ao N com base nas mensurações com o SOAT durante o desenvolvimento da cultura, sendo necessário a instalação de uma faixa rica em N (FRN), ou seja, uma faixa com fornecimento adequado de N (recomendação de N por faixa rica). Dessa forma, estima-se a produtividade com base nos valores de IV mensurados em campo (YP₀) e, em seguida, calcula-se o índice de resposta (RI) (eq. 3), dividindo-se o IV médio mensurado na FRN (NDVI_{rica} ou CI_{rica}) pelo NDVI ou CI das faixas que não receberam ou que receberam uma dose parcial de N. Apenas em casos onde o RI for superior a 1 a fertilização é recomendada.

$$RI = NDVI_{rica} / NDVI_{faixas} \text{ e } CI_{rica} / CI_{faixas} \quad (3)$$

Posteriormente, multiplicando-se o potencial produtivo das áreas que não receberam N (YP₀) pelo índice de resposta (RI), tem-se o potencial produtivo com a aplicação de N (YP_N) em cada ponto registrado (eq. 4).

$$YP_N = YP_0 \times RI \quad (4)$$

Determinado o potencial produtivo das plantas com e sem aplicação de N, torna-se possível calcular a dose de N a ser aplicada (eq. 5.) de acordo com cada índice de vegetação, sendo aplicado 1 kg ha⁻¹ de N (valor 1 na eq. 5) para cada tonelada de colmo esperada (VITTI; MAZZA, 2002), com um aproveitamento da adubação de 40% (CANTARELLA et al., 2007).

$$\text{Dose de N (kg ha}^{-1}\text{)} = [(YP_N - YP_0) \times 1] / 0,4 \quad (5)$$

O tratamento dos dados foi realizado em planilha eletrônica (Excel - Microsoft Office), calculando-se as quantidades de N necessárias. Os valores foram processados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) SSToolBox® (*SST Software*, Stillwater, OK, EUA). Procedeu-se a interpolação das doses de N recomendadas nos dois métodos, a partir do interpolador “Inverso da distância”, obtendo-se os mapas de recomendação de N em taxa variável. Para análise das faixas em separado, procedeu-se a interpolação de cada faixa separadamente, a fim de se evitar interferência dos valores de IV obtidos nas faixas vizinhas.

O método de interpolação pelo “Inverso da distância” faz uma média dos dados presentes em uma célula, levando em consideração também a distância entre as células vizinhas, sendo útil para tratamento de conjuntos denso de dados (AG LEADER TECHNOLOGY, 2010). Durante a interpolação, a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância (LANDIM, 2000). Desta forma, este método foi escolhido, segundo o mesmo autor, por ter seu uso indicado quando se trabalha com conjunto denso de dados, uma vez que não estima valores maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados, sendo bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas, além de requerer pouco tempo para seu processamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimentos em parcelas

Os resultados de fertilidade do solo nos locais onde foram instalados os experimentos em parcelas encontram-se na Tabela 2. Verifica-se, na Área 1, que os teores de fósforo e potássio estão baixos, segundo classificação de Raij et al. (1997).

Tabela 2 - Resultados de fertilidade do solo nos primeiros 0,2 m de profundidade nas duas áreas estudadas

Área	M.O.	P _{res}	K	Ca	Mg	CTC	m%	V%
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		-----mmol _c dm ⁻³ -----				
1 – 2º corte	35,6	6,0	1,4	41,9	15,8	89,9	0,17	65,71
2 – 4º corte	34,8	25,9	4,9	36,2	9,3	102,6	0,59	49,11

M.O.: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica; m%: saturação por alumínio; V%: saturação por bases.

4.1.1 Produtividade obtida

As produtividades médias obtidas (Figura 9) com as diferentes doses de N não apresentaram diferença estatisticamente significativa. Cantarella et al. (2007) alertam que estudos com N feitos em campo, quando analisados separadamente, muitas vezes não atingem significância estatística, devido ao seu grande erro experimental, mas que, quando se analisa os dados em conjuntos de experimentos, nota-se importante resposta a esse elemento.

Verifica-se que a Área 2, embora seja uma área com cana-de-açúcar mais velha (4º corte), apresentou maior produtividade final de colmos (Figura 9). Esse resultado é contraditório, uma vez que, segundo Prado e Pancelli (2008), ocorre uma diminuição da produtividade das soqueiras de cana-de-açúcar ao longo dos cortes, em razão de diversos fatores, como compactação do solo, enfraquecimento da soqueira e queda na fertilidade do solo. Os baixos teores de P e K na Área 1 (Tabela 2) pode ter comprometido a resposta da cultura ao N e ocasionado queda na produção.

Figura 9 - Produtividade média de colmos das duas áreas experimentais em função do tratamento aplicado; as barras verticais representam o desvio padrão

Verificando-se os resultados das análises tecnológicas efetuadas a partir das amostras de colmo coletadas antes da colheita (Tabela 3), nota-se que a quantidade de N aplicado não afetou os parâmetros de qualidade da cana (brix % caldo, pol % cana, fibra % cana e açúcar teórico recuperável), corroborando com Vitti et al. (2007). Prado e Pancelli (2008) verificaram que a cana-de-açúcar não respondeu, em seu primeiro ciclo, às diferentes doses de N aplicadas, respondendo apenas no segundo ciclo. Vitti et al. (2007) lembram que os técnicos que trabalham em usinas produtoras de cana sabem que se não for feita a adubação dos canaviais (soqueiras) com N em determinado ano, a produtividade naquela safra não será afetada de forma marcante, mas o efeito ocorrerá nos anos seguintes, com reflexo na longevidade da soqueira.

Tabela 3 - Análises tecnológicas da cana-de-açúcar em função do tratamento empregado [brix (sólidos solúveis) % caldo, pol (sacarose) % cana, fibra % cana e açúcar teórico recuperável (ATR)], nas duas áreas estudadas

Tratamento (kg ha ⁻¹ N)	Área 1				Área 2			
	brix %	pol %	% fibra	ATR (kg t ⁻¹)	brix %	pol %	% fibra	ATR (kg t ⁻¹)
0	19,30	16,94	11,26	143,32	19,74	17,68	11,70	147,73
50	19,71	17,44	11,05	147,73	19,35	17,29	11,53	145,08
100	19,72	17,46	11,01	147,94	19,54	17,49	11,18	147,53
150	19,45	17,14	11,08	145,29	19,55	17,46	11,44	146,67
200	19,42	17,15	10,62	146,49	19,58	17,57	11,24	147,95
Média	19,52	17,23	11,00	146,15	19,55	17,50	11,42	146,99
CV%	1,74	2,19	2,11	2,19	2,41	2,95	2,41	2,66
DMS*	0,76	0,85	0,65	7,21	1,06	1,16	0,62	8,82

* DMS: diferença mínima significativa pelo teste de Tukey a 5% de significância

4.1.2 Estado nutricional da cana-de-açúcar mensurado por análise foliar

Observa-se que a concentração de macronutrientes nas folhas, com exceção do cálcio, não foi alterada pelos tratamentos, inclusive o teor de N (Tabela 4). Não se encontrou na literatura resultados que pudessem explicar a variação no teor de cálcio oriundo de diferentes doses de N, como o constatado no presente trabalho, sendo que, no momento, a explicação mais plausível é o efeito aleatório que coincidentemente atingiu significância estatística a 5%. O fato de os teores de macronutrientes não serem afetados pelas doses de N corrobora os resultados obtidos por Prado e Pancelli (2008), que estudando a resposta da cultura da cana-de-açúcar a doses de N, verificaram que a concentração de macro e micronutrientes nas folhas não foi alterada pelo aumento no fornecimento deste elemento.

Estão listados na Tabela 4 dois padrões de referência para os teores foliares de nutrientes. Verifica-se certa discrepância entre a concentração de nutrientes considerados adequados. No padrão adotado por Cantarutti et al. (2007) nota-se limites mais estreitos de teores, o que pode representar intervalos adequados mais refinados por maior volume de experimentação, ao se levar em conta a data de publicação, quando comparado ao padrão de Raij e Cantarella (1997). No entanto, verifica-se que as recomendações de amostragem foliar nas duas literaturas são diferentes. Cantarutti et al. (2007) recomendam amostrar a folha +3 (terceira folha com bainha visível), 4 a 5 meses após o início da brotação, enquanto que Raij e Cantarella (1997) recomendam a folha +1 (folha mais alta com colar visível) amostrada no período de máximo desenvolvimento da cultura (mês de janeiro).

Tabela 4 - Teores de macronutrientes nas folhas de cana-de-açúcar, em função da dose de nitrogênio aplicada, nas duas áreas estudadas, com amostragem de folhas no período de máximo desenvolvimento da cultura; valores de referência de nutrientes presentes nas folhas de cana-de-açúcar considerados adequados

Tratamento (kg ha ⁻¹ de N)	Área 1					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- (g kg ⁻¹) -----					
0 kg	15,83	1,78	10,46	3,06 ab	1,10	0,71
50 kg	16,61	1,71	11,67	3,05 ab	0,93	0,69
100 kg	15,41	1,70	11,28	2,94 ab	1,10	0,70
150 kg	16,17	1,72	11,67	3,33 a	0,98	0,73
200 kg	15,82	1,86	11,16	2,40 b	1,05	0,76
DMS	2,76	0,19	2,91	0,79	0,41	0,27
CV%	7,68	4,84	11,47	11,92	17,79	16,56
Tratamento (kg ha ⁻¹ de N)	Área 2					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- (g kg ⁻¹) -----					
0 kg	18,20	1,66	12,75	1,95 b	1,00	1,00
50 kg	17,59	1,81	12,56	2,36 ab	0,95	0,97
100 kg	17,84	1,89	12,94	2,48 ab	0,88	1,12
150 kg	16,19	1,80	13,58	2,73 a	0,88	0,93
200 kg	16,99	1,76	12,62	2,29 ab	0,88	0,92
DMS	3,33	0,42	2,16	0,63	0,34	0,41
CV%	8,50	10,35	7,42	11,80	16,30	18,65
Valores de referência considerados adequados¹	20-23	2-2,5	9-15	9,5-11,5	2-4,5	1,5-3
Valores de referência considerados adequados²	18-25	1,5-3	10-16	2-8	1-3	1,5-3

¹ valores de referência considerados adequados segundo Cantarutti et al. (2007); ² valores de referência considerados adequados segundo Raij e Cantarella (1997) DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação; N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; S: enxofre. Letras diferentes nas colunas indicam que houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; nas colunas onde não há letras, significa que não houve diferença entre os tratamentos pelo teste F de Snedecor.

Como a estratégia de amostragem foliar seguiu as recomendações de Raij e Cantarella (1997), os teores foliares de macronutrientes obtidos devem ser analisados segundo o padrão de referência destes autores. Dessa forma, verifica-se que os teores de P, K e Ca estão adequados, embora os teores no solo destes dois primeiros elementos serem considerados baixos na Área 1 (Tabela 1); os teores de Mg foliar estão no limite para serem considerados deficientes; e o teor de S representa deficiência, podendo restringir a resposta da cultura ao N.

Cantarella et al. (2007) comentam que estudos focando a nutrição da cana-de-açúcar por S são escassos, mas que, no entanto, os poucos estudos existentes apontam para a resposta da cultura à aplicação de 30 a 60 kg ha⁻¹. Malavolta e Moraes (2007) e Cantarella (2007) apontam que a deficiência de S ocasiona menor produção de aminoácidos e proteínas, o que resulta em diminuição na eficiência de utilização de N pelas plantas. Por outro lado, Alvarez et al. (2007) afirmam que aplicação de doses elevadas de N ou S podem levar à menor disponibilidade do outro elemento, o que pode explicar os resultados verificados. Cantarella (2007) indica que a relação entre N e S deve estar entre 8 e 12 (N) para 1 (S), sendo que no presente estudo essa relação está mais elevada, podendo ocorrer desordens nutricionais.

Analisando-se o teor foliar de N, verifica-se que os teores podem ser considerados deficientes, mesmo nos tratamentos que receberam 200 kg ha⁻¹ desse elemento. Dessa forma, algum fator pode ter prejudicado a absorção de N, como as relações desbalanceadas do N com outros nutrientes (CANTARELLA, 2007) ou pode ter ocorrido alta perda de N no sistema. Esses dados inconclusivos corroboram com a afirmação de Raji e Cantarella (1997) e Fontes (2001), ao concluírem que a análise foliar para determinação de suficiência de nutrientes em cana-de-açúcar é uma técnica ainda não consolidada pela dificuldade em se estabelecer padrões confiáveis de referência.

Ao analisar os teores foliares de N obtidos a partir de amostragens durante as avaliações, verifica-se que não foi registrada variação nos teores deste elemento na primeira e terceira avaliações, enquanto que na segunda avaliação houve incremento no teor de N foliar conforme o aumento da dose de N aplicada (Tabela 5). Acredita-se que na primeira avaliação a cultura ainda havia se desenvolvido pouco devido às condições de temperatura e umidade, o que limitou a absorção de N. Entretanto, na segunda avaliação, quando começou a ocorrer um aumento na temperatura (a partir da vigésima semana – Figura 10), conseguiu-se verificar resposta, provavelmente em função do início do intenso processo de desenvolvimento da cultura nessa época do ano (mês de outubro). Já na terceira avaliação, supõe-se que os teores voltaram a não apresentar variação em razão do efeito diluição, onde a concentração dos nutrientes é diluída com o maior crescimento da planta nos tratamentos que receberam altas doses de fertilizantes nitrogenados (JARRELL; BEVERLY, 1981).

Tabela 5 - Teor foliar médio de N nas duas áreas nas três avaliações realizadas, com seus respectivos coeficientes de variação

Primeira avaliação – 0,2 m de altura				
Tratamento	Área 1		Área 2	
	N foliar	CV	N foliar	CV
(kg ha ⁻¹ de N)	(g kg ⁻¹)	(%)	(g kg ⁻¹)	(%)
0 kg	20,88	2,76	20,89	11,53
50 kg	21,46	7,52	19,73	3,19
100 kg	21,97	5,84	19,41	2,80
150 kg	20,48	3,98	25,13	21,60
200 kg	21,78	8,03	19,72	5,44
DMS	2,89		6,30	
Segunda avaliação – 0,4 m de altura				
Tratamento	Área 1		Área 2	
	N foliar	CV	N foliar	CV
(kg ha ⁻¹ de N)	(g kg ⁻¹)	(%)	(g kg ⁻¹)	(%)
0 kg	20,79 b	10,22	21,01 b	10,85
50 kg	23,58 ab	5,71	22,41 ab	9,59
100 kg	23,93 ab	5,24	25,54 ab	6,18
150 kg	25,35 ab	9,71	24,49 ab	7,95
200 kg	24,64 a	9,44	26,69 a	8,79
DMS	4,37		4,75	
Terceira avaliação – 0,6 m de altura				
Tratamento	Área 1		Área 2	
	N foliar	CV	N foliar	CV
(kg ha ⁻¹ de N)	(g kg ⁻¹)	(%)	(g kg ⁻¹)	(%)
0 kg	20,29	3,16	20,03	8,50
50 kg	20,43	5,31	20,53	6,43
100 kg	19,12	8,51	21,51	8,54
150 kg	20,33	7,03	20,44	5,82
200 kg	19,70	6,48	21,90	5,79
DMS	2,36		2,82	

DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação. Letras diferentes nas colunas indicam que houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.1.3 Resposta da cana ao nitrogênio mensurada por medidor portátil de clorofila

Na primeira avaliação não se verificou diferença nos teores de clorofila nas folhas (representada pelo índice SPAD) a partir de mensurações com o medidor portátil de clorofila (clorofilômetro) de acordo com o aumento da dose de N aplicada (Tabela 6). Isto pode ter sido ocasionado pelo pouco tempo hábil para a absorção, por parte da cultura, do N aplicado e sua resposta ao mesmo, combinado com a baixa demanda inicial por esse elemento em função do lento desenvolvimento inicial. Observou-se variação no índice SPAD entre as áreas experimentais, sendo que valor maior foi verificado no talhão em segundo corte (Área 1), provavelmente devido à brotação mais vigorosa por ser soqueira mais nova. Já na segunda e terceira avaliação, essa diferença entre as áreas deixou de ser relevante.

Tabela 6 - Média dos valores mensurados pelo medidor portátil de clorofila (clorofilômetro) nas três avaliações realizadas nas duas áreas, com seus respectivos coeficientes de variação

Primeira avaliação – 0,2 m de altura				
Tratamento (kg ha ⁻¹ de N)	Área 1		Área 2	
	Clorofilômetro (SPAD)	CV (%)	Clorofilômetro (SPAD)	CV (%)
0 kg	46,08	5,39	42,93	2,22
50 kg	45,98	3,47	42,95	5,65
100 kg	46,98	1,33	43,73	2,43
150 kg	45,90	0,94	42,98	3,70
200 kg	46,23	3,56	43,78	1,46
DMS	3,05		2,69	
Segunda avaliação – 0,4 m de altura				
Tratamento (kg ha ⁻¹ de N)	Área 1		Área 2	
	Clorofilômetro (SPAD)	CV (%)	Clorofilômetro (SPAD)	CV (%)
0 kg	44,25 b	3,52	43,30 b	3,51
50 kg	47,13 a	3,89	45,38 ab	1,97
100 kg	48,08 a	3,61	45,58 ab	1,55
150 kg	47,93 a	5,74	46,48 a	2,59
200 kg	47,93 a	4,95	47,15 a	2,80
DMS	2,71		2,45	
Terceira avaliação – 0,6 m de altura				
Tratamento (kg ha ⁻¹ de N)	Área 1		Área 2	
	Clorofilômetro (SPAD)	CV (%)	Clorofilômetro (SPAD)	CV (%)
0 kg	44,10 b	3,45	45,85	4,36
50 kg	45,45 ab	2,81	46,30	3,85
100 kg	45,78 ab	3,38	47,45	2,47
150 kg	46,18 ab	2,25	47,18	2,35
200 kg	47,48 a	3,10	47,25	1,11
DMS	2,24		2,65	

DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação. Letras diferentes nas colunas indicam que houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Nas duas últimas avaliações foi possível verificar aumento no teor de clorofila (SPAD) conforme o aumento das doses de N aplicadas. Dessa forma, vislumbra-se a possibilidade de uso desse tipo de equipamento no acesso à nutrição por N na cultura da cana-de-açúcar e a recomendação de N a partir de curvas de calibração para cada situação (Figura 10). Guimarães (1998) estabeleceu níveis críticos (NC) de valores SPAD na cultura do tomate a partir da dose que proporcionou a máxima produção econômica, mas, como no presente estudo a produtividade de cana-de-açúcar não foi influenciada significativamente pelas doses de N, essa determinação do NC ficou comprometida. Mesmo assim, estabeleceu-se o NC como sendo valor SPAD igual a 95% do valor SPAD obtido nas parcelas que receberam a dose máxima de N (200 kg ha⁻¹ - valor de referência), obtendo-se o índice de suficiência (SI - eq. 8.) (BLACKMER; SCHEPERS, 1995; VARVEL et al., 1997; SOLARI, 2006). A finalidade dessa estimativa de NC e SI foi se comparar apropriadamente os teores de clorofila entre as duas áreas, verificando a potencialidade em se utilizar essa metodologia para a geração de uma estratégia de recomendação.

$$SI = (SPAD_{\text{parcelas}} * 100) / SPAD_{200\text{kg}} \quad (8)$$

em que:

SI – índice de suficiência

SPAD_{parcelas} – valor SPAD médio das parcelas que receberam dose de N inferior a 200 kg ha⁻¹

SPAD_{200kg} – valor SPAD médio das parcelas que receberam dose de N igual a 200 kg ha⁻¹

Figura 10 - Gráficos de valores SPAD médios mensurados com o clorofilômetro, na segunda (2ªav) e terceira (3ªav) avaliações, de acordo com os tratamentos nas duas áreas; as duas linhas tracejadas em vermelho indicam o índice de suficiência igual a 95%

Dessa maneira, verifica-se que apenas as parcelas que receberam dose inferior a 50 kg ha^{-1} iriam requerer aplicação complementar de N. Salienta-se o ocorrido na Área 2, onde determinou-se na segunda avaliação a necessidade de aplicação complementar de N, mas na terceira avaliação essa necessidade não se encontrava mais explícita, provavelmente pelo fornecimento de N pelo solo e consequente diminuição da resposta ao N. Esses resultados demonstram a importância de aplicar N seguindo a capacidade de resposta ao longo da safra, visto que o emprego de altas doses desse nutriente, com aplicação logo após o corte do canavial, pode contaminar as águas sub-superficiais com nitrato quando não absorvidas pela cultura (ARGENTA et al., 2003).

A partir das curvas de dose/resposta geradas nas condições do presente estudo e suas respectivas equações (Tabela 7) e cálculo de NC e SI, seria possível recomendar N de acordo com o potencial de resposta da cana-de-açúcar no decorrer da safra agrícola. Solari (2006) aponta que essa é uma estratégia que proporciona a grande vantagem de aumentar a eficiência de uso do N, mas que, no entanto, não é uma solução prática quando os agricultores necessitam fertilizar

grandes áreas, devido ao procedimento lento e ao grande número de amostragens necessárias. Salienta-se que são necessários mais estudos para determinar a folha e a época adequada para a avaliação nutricional por meio de clorofilômetros, assim como a estimativa de um NC, onde não seja exigida a sua obtenção através de experimentação caso a caso.

Tabela 7 - Equações geradas a partir da resposta da cultura ao N, mensuradas com o clorofilômetro, na segunda e terceira avaliações, com seus respectivos coeficientes de determinação, nas duas áreas experimentais

Avaliação	Área	Equação	R ²
Segunda	1	$y = -0,0001957(\text{SPAD})^2 + 0,0554429(\text{SPAD}) + 44,4514286$	0,958
	2	$y = -0,0000600(\text{SPAD})^2 + 0,0296000(\text{SPAD}) + 43,5150000$	0,947
Terceira	1	$y = 0,0149500\text{SPAD} + 44,3000000$	0,938
	2	$y = -0,0000621(\text{SPAD})^2 + 0,0197786(\text{SPAD}) + 45,7592857$	0,880

4.1.4 Resposta da cana ao nitrogênio mensurada por sensor ótico

Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios de NDVI e $\text{CI}_{\text{âmbar}}$ obtidos pelo sensor ótico (SOAT). Como o esperado, os valores dos índices de vegetação (IV – NDVi e $\text{CI}_{\text{âmbar}}$) aumentaram conforme o desenvolvimento da cultura, corroborando com Frasson (2007) que testando outro sensor ótico (*GreenSeeker Red Hand Held*, NTech Industries, Ukiah, EUA), verificou aumento no valor de NDVI ao longo dos dias após o corte da cana-de-açúcar. Nota-se que quando as plantas mediam 0,2 m de altura, não se verificou resposta aos tratamentos nas duas áreas estudadas. Isto pode ter sido ocasionado pelo pouco tempo hábil para a absorção e resposta, por parte da cultura, ao N aplicado, assim como a baixa demanda em razão do lento desenvolvimento inicial. Contudo, no caso específico de se trabalhar com sensores óticos, devido à baixa biomassa das plantas nesta fase (Figura 11a), tende a ocorrer uma alta interferência do solo nas leituras, mascarando o possível efeito do N e, portanto, esse não se mostra o momento ideal para essa avaliação. Shanahan et al. (2001) apontam que o estágio de desenvolvimento da cultura e sua distribuição no solo afetam a proporção do solo visível aos sistemas de sensoriamento remoto, diminuindo sua efetividade em determinar a variabilidade presente dentro de uma área.

Tabela 8 - Média dos valores mensurados pelo sensor ótico, gerando os índices de vegetação NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$, nas três avaliações nas duas áreas experimentais, com seus respectivos coeficientes de variação

Primeira avaliação – 0,2 m de altura								
Tratamento	Área 1				Área 2			
	NDVI	CV (%)	CI _{âmbar}	CV (%)	NDVI	CV (%)	CI _{âmbar}	CV (%)
(kg ha ⁻¹ de N)								
0 kg	0,338	3,62	1,09	3,41	0,339	6,45	1,17	7,12
50 kg	0,338	4,62	1,07	5,94	0,358	2,45	1,23	3,74
100 kg	0,336	4,14	1,07	5,80	0,360	6,25	1,24	6,53
150 kg	0,340	4,13	1,09	6,13	0,360	4,02	1,24	6,65
200 kg	0,338	4,21	1,07	5,51	0,366	4,30	1,25	4,50
DMS	0,019		0,09		0,037		0,13	
Segunda avaliação – 0,4 m de altura								
Tratamento	Área 1				Área 2			
	NDVI	CV (%)	CI _{âmbar}	CV (%)	NDVI	CV (%)	CI _{âmbar}	CV (%)
(kg ha ⁻¹ de N)								
0 kg	0,489 b	6,09	1,98 b	11,75	0,451 b	5,77	1,73 b	10,70
50 kg	0,525 a	5,99	2,27 a	7,12	0,491 ab	3,45	2,03 ab	5,78
100 kg	0,523 a	3,69	2,25 a	3,25	0,507 ab	8,42	2,19 ab	17,32
150 kg	0,525 a	3,48	2,28 a	3,81	0,522 a	4,38	2,29 a	9,89
200 kg	0,538 a	5,05	2,39 a	3,29	0,523 a	5,84	2,30 a	11,13
DMS	0,030		0,24		0,060		0,50	
Terceira avaliação – 0,6 m de altura								
Tratamento	Área 1				Área 2			
	NDVI	CV (%)	CI _{âmbar}	CV (%)	NDVI	CV (%)	CI _{âmbar}	CV (%)
(kg ha ⁻¹ de N)								
0 kg	0,522 c	2,87	2,22 c	6,67	0,516 b	6,31	2,23 b	12,02
50 kg	0,548 b	1,60	2,47 b	3,07	0,555 ab	3,01	2,57 ab	6,59
100 kg	0,552 ab	1,62	2,52 ab	3,63	0,550 ab	7,04	2,56 ab	14,17
150 kg	0,552 ab	2,04	2,52 ab	4,51	0,578 a	2,37	2,80 a	5,40
200 kg	0,568 a	2,22	2,69 a	5,19	0,580 a	1,81	2,83 a	3,62
DMS	0,017		0,18		0,050		0,46	

DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação. Letras diferentes nas colunas indicam que houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ns indica que não houve diferença entre os tratamentos pelo teste F de Snedecor.

Entretanto, com as plantas atingindo altura média de 0,4 m (segunda avaliação), o SOAT foi capaz de distinguir as doses de N, principalmente com relação ao tratamento onde não se aplicou o fertilizante, possibilitando a confecção de curvas de dose/resposta (Figura 12). Essa capacidade dos SOATs diferenciarem doses de N aplicadas já foram constatadas por Povh (2007)

em cereais, Solari (2006) em milho, e Inamasu et al. (2006) e Frasson (2007) em trabalhos preliminares com cana-de-açúcar.

Observa-se que na segunda avaliação há uma significativa diferença na magnitude dos valores dos IVs mensurados nas diferentes áreas. No entanto, na terceira avaliação os valores se aproximam, indicando que essa diferença na segunda avaliação é devido à sutil disparidade de biomassa apresentada pela cultura no momento das mensurações, ainda ocasionando uma maior ou menor interferência do substrato (Figura 11b). Já na terceira avaliação, as plantas cobriam totalmente o solo anulando esse efeito, o que indica a possibilidade de confecção de algoritmos de fertilização nitrogenada em cana-de-açúcar com base em SOATs que não necessitem levar em conta o corte em que o canavial se encontra.

Figura 11 - Cobertura do solo pela cultura da cana-de-açúcar no momento da primeira (a) e segunda (b) avaliação

Verifica-se a partir da Figura 12, que os índices de vegetação NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$ geraram resultados semelhantes, embora os valores absolutos sejam diferentes. Esse fato é de certa forma esperado, uma vez que são calculados a partir da refletância do mesmo comprimento de onda. Entretanto, como o verificado por Solari et al. (2008) na cultura de milho, o CI torna-se mais sensível em determinar o teor de clorofila das culturas que apresentam alta densidade de biomassa (índice de área foliar superior a 2), o que pode ser preliminarmente constatado pela maior amplitude dos valores de $CI_{\text{âmbar}}$ e sua sensibilidade entre as diferentes doses de N, assim como o melhor ajuste (R^2 – Tabela 9) das curvas de dose/resposta obtidas na Figura 12.

Figura 12 - Curvas de dose/resposta de NDVI (a) e $CI_{\text{âmbar}}$ (b) médios mensurados com o sensor ótico, na segunda e terceira avaliação (2ªav e 3ªav), de acordo com os tratamentos nas duas áreas experimentais

Tabela 9 - Equações geradas a partir da resposta da cultura ao N, mensuradas com o sensor ótico, gerando os índices NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$, na segunda e terceira avaliação, com seus respectivos coeficientes de determinação, nas duas áreas experimentais

Avaliação	Área	Índice	Equação	R^2
Segunda	1	NDVI	$y = -0,0000012(NDVI)^2 + 0,0004397(NDVI) + 0,4941520$	0,806
	2	NDVI	$y = -0,0000012(NDVI)^2 + 0,0005911(NDVI) + 0,5087792$	0,990
	1	$CI_{\text{âmbar}}$	$y = -0,0000091(CI)^2 + 0,0034730(CI) + 2,0204863$	0,818
	2	$CI_{\text{âmbar}}$	$y = -0,0000187(CI)^2 + 0,0065394(CI) + 1,7340952$	0,998
Terceira	1	NDVI	$y = -0,0000007(NDVI)^2 + 0,0003333(NDVI) + 0,5254559$	0,870
	2	NDVI	$y = -0,0000012(NDVI)^2 + 0,0005357(NDVI) + 0,5199274$	0,889
	1	$CI_{\text{âmbar}}$	$y = -0,0000060(CI)^2 + 0,0031698(CI) + 2,2575194$	0,876
	2	$CI_{\text{âmbar}}$	$y = -0,0000104(CI)^2 + 0,004956.(CI) + 2,2573323$	0,922

4.1.5 Comparação entre os métodos de estimativa da resposta da cana ao nitrogênio

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão representados as correlações existentes entre a produtividade final de colmos, os valores médios dos índices obtidos com os equipamentos utilizados e os resultados das análises foliares, nas duas áreas experimentais, respectivamente, na primeira, segunda e terceira avaliação.

Verifica-se na primeira avaliação, uma grande dispersão dos valores obtidos que, em geral, não apresentaram correlação linear significativa quando analisadas as duas áreas em conjunto. Quanto à estimativa da produtividade, infere-se que com as plantas apresentando altura média de brotação de 0,2 m, ainda seja muito cedo para se estimar eficientemente a produção que será obtida cerca de um ano depois, uma vez que variações nas condições climáticas, competição com plantas daninhas e ataque de pragas e doenças, podem interferir no desenvolvimento da cultura de tal maneira que as variações inicialmente obtidas e mensuradas por essa avaliação precoce, principalmente ocasionadas pela desuniformidade na brotação, sejam sobrepujadas ao longo da safra.

Nota-se também, na primeira avaliação, que os métodos de estimativa da nutrição por N utilizados (sensor ótico, clorofilômetro e análise foliar) apresentaram grande dessemelhança entre os valores obtidos nas duas áreas. Acredita-se que tal fato seja ocasionado pela prematuridade das plantas de cana-de-açúcar nesta fase de desenvolvimento, onde o vigor da brotação é aspecto fundamental na obtenção desses resultados, não sendo influenciado pelas condições climáticas e de fertilidade do solo.

• Área 1 ○ Área 2 — Linha de tendência geral - - - Linha de tendência Área 1 Linha de tendência Área 2

Figura 13 - Gráficos de dispersão e correlação linear dos valores médios verificados na primeira avaliação e produtividade final de colmos, sendo: (a) produtividade x teor de N foliar, (b) produtividade x teor de clorofila, (c) produtividade x NDVI, (d) produtividade x CI_{âmbar}, (e) teor de clorofila x teor de N foliar, (f) NDVI x teor de N foliar, (g) CI_{âmbar} x teor de N foliar, (h) NDVI x teor de clorofila, (i) CI_{âmbar} x teor de clorofila e (j) CI_{âmbar} x NDVI

• Área 1 ○ Área 2 — Linha de tendência geral — Linha de tendência Área 1 - - - Linha de tendência Área 2

Figura 14 - Gráficos de dispersão e correlação linear dos valores médios verificados na segunda avaliação_e produtividade final de colmos, sendo: (a) produtividade x teor de N foliar, (b) produtividade x teor de clorofila, (c) produtividade x NDVI, (d) produtividade x $CI_{\text{âmbar}}$, (e) teor de clorofila x teor de N foliar, (f) NDVI x teor de N foliar, (g) $CI_{\text{âmbar}}$ x teor de N foliar, (h) NDVI x teor de clorofila, (i) $CI_{\text{âmbar}}$ x teor de clorofila e (j) $CI_{\text{âmbar}}$ x NDVI

Figura 15 - Gráficos de dispersão e correlação linear dos valores médios verificados na terceira avaliação e produtividade final de colmos, sendo: (a) produtividade x teor de N foliar, (b) produtividade x teor de clorofila, (c) produtividade x NDVI, (d) produtividade x $CI_{\text{âmbar}}$, (e) teor de clorofila x teor de N foliar, (f) NDVI x teor de N foliar, (g) $CI_{\text{âmbar}}$ x teor de N foliar, (h) NDVI x teor de clorofila, (i) $CI_{\text{âmbar}}$ x teor de clorofila e (j) $CI_{\text{âmbar}}$ x NDVI

Os teores foliares de N e de clorofila sofreram incremento na sua correlação com a produtividade na segunda e terceira avaliação, mas ainda apresentando alto grau de incertezas. Quando se correlaciona os dois métodos, onde o teor de clorofila estimaria indiretamente o teor de N (PIEKIELEK et al., 1995; SCHADCHINA; DMITRIEVA, 1995; ARGENTA, 2001), verifica-se baixa correlação na primeira e terceira avaliação, mas nota-se certa correlação quando as plantas mediam 0,4 m de altura (segunda avaliação), sendo os teores de N alterados pelas doses de N aplicadas (Tabela 5). Salienta-se que ainda existe certa dúvida sobre a folha, posição e número de mensurações necessárias para correta avaliação do teor de clorofila por meio de clorofilômetros, o que pode ser uma causa dessas baixas correlações encontradas. Blackmer e Schepers (1995) apontam que medidores de clorofila são considerados melhores indicadores do nível de nitrogênio nas plantas do que seu próprio teor foliar. Argenta et al. (2001a) testaram características das plantas de milho como indicadores do nível de N (teor e acúmulo de N, leitura correspondente ao teor de clorofila na folha avaliada com clorofilômetro, produção de matéria seca e área foliar) e constataram que a mensuração com o clorofilômetro foi o melhor indicador do nível de N na planta dentre as características avaliadas. Dessa maneira, ao analisar a eficiência no uso de medidores portáteis de clorofila, dever-se-ia mensurar o teor de N na planta toda e não apenas em suas folhas, até mesmo porque, segundo Raij e Cantarella (1997), a composição química das folhas das plantas de cana-de-açúcar sofre interferência da variedade, solo, clima e época de amostragem.

Como já abordado anteriormente (item 4.1.4), o uso de sensores óticos é adequado quando a cultura cobre eficientemente o solo (SHANAHAN et al., 2001). Logo, observa-se boa capacidade do SOAT em estimar a produção quando as plantas apresentam altura superior a 0,4 m. Salienta-se que existe a possibilidade de ocorrer o deslocamento do foco de luz um pouco para o meio da entrelinha da cultura no ato das mensurações, favorecendo variação nos valores obtidos, assim como a altura variável da distância entre o dossel das plantas e o sensor também podem influenciar os resultados, conforme conclusões de Tangerino (2009). Sendo assim, o manuseio deste tipo de equipamento deve ser rigorosamente controlado.

Ao se comparar os IVs aos teores foliares de N, observa-se resultado semelhante ao observado com o teor de clorofila, apresentando correlação significativa apenas na segunda avaliação, com tendências distintas nas duas áreas experimentais. Solari et al. (2008), ao comparar teor de clorofila mensurada por clorofilômetro e SOAT, afirma que devem ser

esperados resultados diferentes, uma vez que o clorofilômetro (assim como o teor foliar de N) avalia folhas separadamente e previamente determinadas, enquanto que SOATs realizam leituras em todo o dossel da cultura, mensurando folhas de diferentes idades sobre variados substratos. Dessa maneira, no caso específico da cana-de-açúcar, o teor foliar de N e, em menor grau, de clorofila da folha, não se mostraram padrões confiáveis para determinar se os valores obtidos pelo SOAT são coerentes ou não, sendo necessário adotar-se outra estratégia de comparação, talvez teor de N em toda a biomassa.

Analisando-se os dois IVs utilizados, nota-se alta semelhança entre seus resultados, como já discutido no item 4.1.4. Entretanto, os coeficiente de determinação das equações geradas a partir de modelos lineares sofrem, de maneira geral, incrementos quando utiliza-se o $CI_{\text{âmbar}}$. Dessa maneira, buscou-se comparar a sensibilidade dos IVs quando confrontados com o teor de clorofila (Figura 16). Adotando-se um índice de suficiência (SI) de 95%, conforme discutido no item 4.1.3, para os valores SPAD (teor de clorofila), verifica-se que os correspondentes SIs são 92,5 e 87,5% para NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$, respectivamente. Estes resultados indicam um maior intervalo do que deve ser considerado deficiente ou não em N, quando se utiliza o $CI_{\text{âmbar}}$ e, conseqüentemente, aponta para sua maior sensibilidade em estimar a nutrição das plantas por N, corroborando com Gitelson et al. (2005) e Solari et al. (2008). Esse comportamento é atribuído à relação não linear existente entre o NDVI e o teor de clorofila da cultura, ocorrendo saturação do NDVI em altas concentrações de biomassa, ou seja, o valor de NDVI não aumenta na mesma magnitude que a quantidade de clorofila (SOLARI et al., 2008), enquanto o $CI_{\text{âmbar}}$, por sua vez, não satura em altas concentrações de biomassa (VINA; GITELSON, 2005). Entretanto, Eitel et al. (2008), apontam que é difícil se obter um IV que seja sensível ao teor de clorofila e insensível à quantidade de biomassa e cobertura do solo. Desta maneira, ainda se vê a necessidade de mais estudos para comprovar esta inferência preliminar de maior sensibilidade do $CI_{\text{âmbar}}$ em comparação ao NDVI.

Figura 16 - Relação linear entre o teor relativo de clorofila e os índices de vegetação estudados (IVs – NDVI e CI_{âmbar}) mensurados na segunda avaliação, indicando o índice de suficiência (SI) de 95% das leituras realizadas com clorofilômetro e os respectivos SI dos IVs

Dificuldades e dúvidas à parte, quando se visa recomendar N durante a safra com base na demanda da cultura, deve-se buscar a estratégia que melhor se adapte às características das propriedades agrícolas e sua capacidade operacional. A análise foliar demanda demasiado tempo na amostragem, análise em laboratório e recomendação a campo, tornando-se inviável em grandes áreas ou em áreas que necessitam de rápida intervenção em função do acelerado crescimento das plantas que ocorre, predominantemente, na época quente e chuvosa do ano. O mesmo problema é observado com a utilização de medidores portáteis de clorofila. Amaral et al. (2010) afirmam ser necessário um grande número de folhas mensuradas para a obtenção de resultados confiáveis, principalmente, ao se avaliar grandes áreas com o objetivo de criar mapas de variabilidade espacial de clorofila para recomendação de N. Os mesmos autores apontam que esses equipamentos se mostram efetivos como ferramenta para avaliação nutricional de pequenas áreas e parcelas experimentais. Por outro lado, o uso de sensores óticos tem o potencial de

utilização em grandes áreas (SOLARI, 2006), quando montados em máquinas agrícolas (INMAN, 2005), mas possuem um alto custo e uma grande exigência em experimentação.

4.2 Recomendação de nitrogênio em taxa variável com experimentos em forma de faixas

Os parâmetros de fertilidade do solo que apresentaram maior variabilidade espacial e importância foram destacados e estão representados nos mapas das Figuras 17, 18 e 19, correspondendo, respectivamente, ao teor de potássio e fósforo e a saturação por bases, sendo classificados segundo o padrão de caracterização da fertilidade do solo adotado por Raij et al. (1997).

Figura 17 - Teor de potássio no solo, em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com 2 amostras por hectare coletadas de 0 a 0,2 m de profundidade: (a) Área 1; (b) Área 2

Figura 18 - Teor de fósforo no solo, em mg dm^{-3} , com 2 amostras por hectare coletadas de 0 a 0,2 m de profundidade, analisada pela resina trocadora de íons: (a) Área 1; (b) Área 2

Figura 19 - Saturação de bases no solo com 2 amostras por hectare coletadas de 0 a 0,2 m de profundidade: (a) Área 1; (b) Área 2

Verifica-se que as áreas, de maneira geral, apresentam boa fertilidade do solo, com exceção da saturação por bases (V%) apresentada pela Área 2. Os baixos valores de V% podem ser explicados pelo fato de já se ter colhido três cortes nesta área sem a realização da calagem, onde um grande teor de bases (Ca, Mg e K) pode ter sido removido pelas colheitas. Destaca-se a variabilidade do teor de P no solo apresentado na Área 1, indicando acréscimo em seu teor no solo, associado à declividade do terreno observada a campo, com valores mais elevados nas áreas mais baixas.

4.2.1 Recomendação por curva de dose/resposta

Devido à proximidade dos valores de NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$ obtidos entre as áreas experimentais na terceira avaliação (item 4.1.4), utilizou-se os valores médios dessa avaliação para a construção das curvas de dose-resposta (Figura 20). A partir das equações geradas, verifica-se que os valores de NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$ continuam aumentando, respectivamente, até a dose de 193 e 249 kg ha⁻¹ de N. No entanto, estas seriam doses muito elevadas de fertilizante nitrogenado a serem aplicadas, uma vez que a dose máxima recomendada pela literatura, a partir de resposta em experimentos, é de 120 kg ha⁻¹ de N (RAIJ; CANTARELLA, 1997; VITTI; MAZZA, 2002). Por outro lado, em compilação mais recente de dados, Cantarella et al. (2007) afirmam ser provável que as doses de N atualmente praticadas subestimem o potencial de resposta econômica ao N em lavouras com materiais genéticos produtivos, cultivados em ambientes de alto rendimento. De acordo com essa afirmação estão os trabalhos realizados por Orlando Filho et al. (1999) e Vitti (2003), onde foram obtidas respostas da cana-de-açúcar até a dose máxima de N estudada, respectivamente, 150 e 175 kg ha⁻¹, embora os aumentos em produtividade a partir da aplicação de 100 kg ha⁻¹ sejam relativamente pequenos.

Dessa maneira, optou-se por determinar a dose de N recomendada em função da extração e exportação pela colheita. Para tanto, recomendou-se 1 kg de N para cada tonelada de cana colhida na safra anterior (VITTI; MAZZA, 2002; CANTARELLA et al., 2007; VITTI, 2010⁴ informação pessoal), sendo o N máximo recomendado igual a 142 e 125 kg ha⁻¹, respectivamente, para as Áreas 1 e 2.

⁴ VITTI, G.C. Departamento de Ciência do Solo – ESALQ/USP

Calculou-se o N recomendado para cada ponto registrado de NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$, a partir, respectivamente, das equações das Figuras 20a e 20b, onde um valor qualquer do índice de vegetação indica uma quantidade teórica de N fornecido pelo solo, sendo recomendada a diferença entre a dose máxima de N para cada área experimental e a quantidade de N já absorvida. Na Figura 20a exemplificou-se uma situação onde a dose máxima de N recomendada seria 150 kg ha^{-1} enquanto um ponto registra valor de NDVI de aproximadamente 0,520, o que indicaria um teórico suprimento de 50 kg ha^{-1} de N pelo solo, tendo-se como recomendação de aplicação os 100 kg ha^{-1} de N restantes (N necessário). A mesma estratégia foi utilizada com o índice de vegetação $CI_{\text{âmbar}}$.

Figura 20 - Curvas de dose-resposta dos valores médios de NDVI (a) e $CI_{\text{âmbar}}$ (b) mensurados com o sensor ótico na terceira avaliação dos experimentos em parcelas, suas respectivas equações utilizadas para a recomendação de N e uma exemplificação do cálculo efetuado para a determinação do N necessário em função do NDVI (a)

4.2.2 Recomendação por faixa rica em N

Essa estratégia para recomendação de N leva em conta diversos parâmetros, segundo a metodologia proposta por Raun et al. (2002) e adaptada por Povh (2007). Essa metodologia exige a instalação e utilização de uma faixa da cultura rica em N (FRN) para se aferir qual estaria sendo a resposta da cultura ao N em determinada situação. Nesta FRN deve ser aplicada quantidade suficiente de N para o ótimo desenvolvimento da cultura, até mesmo com “consumo de luxo”. No presente experimento foram adotadas as faixas que receberam a dose de 100 kg ha^{-1} de N (dose

recomendada pela usina) para essa finalidade, sendo os valores de NDVI e $CI_{\text{âmbar}}$ para a Área 1 igual 0,499 e 2,027, respectivamente, enquanto que para a Área 2 foram de 0,531 e 2,295.

Segundo Raun et al. (2002), inicialmente deve-se ter uma estimativa da produtividade a ser obtida na safra calculada a partir do INSEY (*in-season estimate of yield*), dividindo-se o valor de IV obtido pelo número de dias compreendidos da semeadura/brotação até a mensuração com o SOAT, onde obtém-se uma equação que correlaciona a produtividade com o INSEY. No presente trabalho, pelo volume de dados ainda ser pequeno (avaliação em apenas duas áreas cultivadas em mesma época – experimentos em parcelas), o INSEY apresentou o mesmo comportamento que a correlação produtividade/NDVI (Figura 21a), sendo que foi adotada essa última correlação para a estimativa da produtividade, oriundos dos dados de IVs obtidos na terceira avaliação, em função da alta correlação produtividade/IVs encontrada nos experimentos em parcelas. A partir daí, estimou-se o potencial produtivo (YP_0) com base no valor de NDVI, mensurado nas faixas que não receberam N ou que receberam uma fração da dose recomendada ($NDVI_{\text{faixas}}$) (eq. 6), seguindo-se o mesmo procedimento para o $CI_{\text{âmbar}}$ (Figura 21b - eq. 7). Dessa maneira, cada ponto registrado pelo SOAT, teve seu potencial produtivo atual estimado (YP_0 - eq. 6 e 7), assim como o índice de resposta (RI - eq. 3), potencial produtivo almejado (YPN - eq. 4) e dose de N a ser aplicada (eq. 5).

Figura 21 - Relação entre a produtividade final média de colmos, obtida nas duas áreas em seus respectivos tratamentos, com os valores de NDVI (a) e $CI_{\text{âmbar}}$ (b), mensurados na terceira avaliação

$$YP_0 = 296,1112735 * NDVI - 60,4881506 \quad (6)$$

$$YP_0 = 31,7312106 * CI + 22,3738808 \quad (7)$$

4.2.3 Comparação entre os métodos de recomendação de N

Adotou-se duas metodologias de recomendação de N que têm como estratégia básica objetivos contrastantes. O método de recomendação com base em curvas de dose/resposta da cultura ao N (Met-CDR) tem como objetivo principal atingir a máxima produção, aplicando quanto fertilizante for necessário, enquanto o método de recomendação a partir de faixa rica em N (Met-FRN) possui como objetivo fundamental economizar fertilizante, aplicando mais N apenas onde a cultura apresentar maior potencial produtivo. Dessa forma, na primeira estratégia, quanto menor o valor do IV mensurado, maior será a dose de N recomendada. Por outro lado, na segunda, quanto menor o valor do IV, menor é a produtividade esperada, e consequentemente, menor será a dose de fertilizante recomendado.

Considerando-se a necessidade em se aplicar N de acordo com a capacidade de resposta da cultura durante a safra, nota-se que a primeira metodologia (Met-CDR) não leva esse ponto em consideração, uma vez que as curvas de dose/resposta são pré-calibradas, podendo ocorrer aplicação excessiva de N, devido à incapacidade da cultura absorver N em determinada situação durante a safra, representando potencial de contaminação ambiental (CANTARELLA, 2007). As doses podem ser superestimadas quando o fator limitante não é o N, ou seja, as plantas podem estar pouco desenvolvidas e com baixo teor de clorofila em razão de uma mancha de solo que propicie encharcamento ou uma reboleira que sofreu ataque de pragas, por exemplo. Outro problema é que a distância do sensor em relação ao alvo pode sofrer pequenas alterações em comparação com a distância utilizada durante o levantamento das curvas de dose/resposta, o que pode ocasionar uma variação no índice de vegetação (TANGERINO, 2009) e, consequentemente, na recomendação de fertilizantes.

A segunda metodologia (Met-FRN) busca adotar essa capacidade de resposta da cultura ao N como fator primordial, ao analisar como uma faixa que recebeu a quantidade adequada de N para o desenvolvimento das plantas responde a essa aplicação. Por outro lado, quando o N for

fator extremamente limitante ao desenvolvimento da cultura, as doses podem ser subestimadas, uma vez que a produtividade esperada será predita como “baixa”, onde com a aplicação de N na dose correta, poderia ser aumentada significativamente.

Estas inferências podem ser verificadas na Tabela 10 e na Figura 22, onde se observa que a dose de N recomendada pelo Met-CDR é muito maior do que pelo Met-FRN. No entanto, destaca-se que a dose de N utilizada como faixa rica em N foi apenas de 100 kg ha^{-1} , o que pode ter reduzido o índice de resposta calculado (RI), já que há trabalhos indicando resposta da cultura a doses superiores a 150 kg ha^{-1} de N (ORLANDO FILHO et al., 1999; VITTI, 2003). Dessa maneira, para a adoção dessa estratégia de recomendação em nível prático, se deve adotar doses mais elevadas do que as frequentemente adotadas pelas usinas, atingindo, talvez, 200 kg ha^{-1} de N (CANTARELLA et al., 2007).

Foi discutido no item 4.1.1 (experimentos em parcelas) que a cultura praticamente não respondeu ao N aplicado, o que pode ser enfatizado pela pequena diminuição da dose recomendada nas faixas que já haviam recebido certa quantidade de N, quando comparadas às faixas que não receberam esse nutriente como tratamento. Na Área 1, quando se utilizou o Met-CDR, não foi observado redução na dose recomendada nas faixas que haviam recebido N como tratamento (Tabela 10), indicando uma sensibilidade limitada dessa metodologia em estimar a real demanda por N em áreas com baixa resposta a esse elemento, pelo fato de as doses serem determinadas por experimentos de calibração (curvas de dose/resposta), em condições controladas, o que resultou em altas doses recomendadas, mesmo com a cultura respondendo pouco ao N. Na Área 2, observou-se significativa queda na quantidade de N recomendada conforme os tratamentos, coincidindo com a pequena, porém existente tendência de resposta da cultura ao N nessa área. Acredita-se que a Met-FRN tenha sido a metodologia mais adequada nas condições do presente experimento, por recomendar doses baixas de N (Figura 23), condizente com a resposta da cultura ao N verificada nos experimentos em parcelas (item 4.1).

Tabela 10 - Estatística descritiva da quantidade de nitrogênio recomendado (kg ha^{-1}), pelas diferentes metodologias de recomendação, entre os tratamentos e em área total para as duas áreas experimentais

(continua)

Método		Recomendação por curva de dose/resposta, usando $\text{CI}_{\text{âmbar}}$						
Área		Área 1				Área 2		
Tratamento	0 kg	25 kg	50 kg	área total*	0 kg	25 kg	50 kg	área total*
Média	130,92	130,13	130,33	128,90	122,24	118,57	93,88	104,03
Mediana	141,90	140,37	140,85	138,17	124,86	123,84	105,82	115,35
Desvio padrão	23,91	24,84	22,87	22,01	11,91	14,54	31,27	25,98
Mínimo	6,98	2,97	19,27	0,09	2,25	0,06	2,99	0,19
Máximo	142,00	142,00	142,00	142,00	125,00	125,00	125,00	125,00
Soma	146633	135988	140102	435034	264046	255408	205126	464494

Método		Recomendação por faixa rica em N, usando $\text{CI}_{\text{âmbar}}$						
Área		Área 1				Área 2		
Tratamento	0 kg	25 kg	50 kg	área total*	0 kg	25 kg	50 kg	área total*
Média	29,81	23,55	21,09	21,64	40,27	30,53	14,87	24,76
Mediana	28,61	16,83	18,67	18,79	40,55	28,92	11,19	23,70
Desvio padrão	17,02	20,83	15,67	15,78	15,75	16,01	12,83	15,20
Mínimo	0,01	0,02	0,19	0,00	0,15	0,01	0,01	0,03
Máximo	95,03	92,13	103,36	98,90	105,64	98,40	84,27	100,04
Soma	33392	24605	22675	73032	86991	65757	32484	110559

Método		Recomendação por curva de dose/resposta, usando NDVI						
Área		Área 1				Área 2		
Tratamento	0 kg	25 kg	50 kg	área total*	0 kg	25 kg	50 kg	área total*
Média	128,84	127,44	127,17	125,37	121,47	116,33	86,55	99,24
Mediana	141,87	140,90	140,33	136,69	124,79	123,28	98,65	112,21
Desvio padrão	27,63	29,70	27,60	26,18	13,60	17,55	35,56	29,66
Mínimo	1,26	2,16	8,10	0,08	0,67	0,06	1,13	0,18
Máximo	142,00	142,00	142,00	142,00	125,00	125,00	125,00	125,00
Soma	144304	133171	136705	423131	262370	250577	189118	443128

Tabela 10 - Estatística descritiva da quantidade de nitrogênio recomendado (kg ha^{-1}), pelas diferentes metodologias de recomendação, entre os tratamentos e em área total para as duas áreas experimentais

(conclusão)

Método		Recomendação por faixa rica em N, usando NDVI						
Área	Área 1				Área 2			
Tratamento	0 kg	25 kg	50 kg	área total*	0 kg	25 kg	50 kg	área total*
Média	12,65	9,96	8,97	9,18	17,31	12,99	6,25	10,55
Mediana	12,36	7,09	7,97	8,00	17,66	12,33	4,63	10,07
Desvio padrão	7,11	8,78	6,63	6,67	6,77	6,91	5,58	6,58
Mínimo	0,01	0,01	0,08	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01
Máximo	33,87	34,27	36,91	36,07	40,93	39,35	34,77	39,56
Soma	14171	10410	9638	30970	37381	27970	13647	47107

*Resultados da interpolação de todos os dados em área total

Figura 22 - Dose média de nitrogênio recomendada pelas diferentes metodologias, em função da prévia quantidade de N aplicada na forma de tratamentos, na Área 1 (a) e Área 2 (b)

Analisando-se os diferentes índices de vegetação (IV – $\text{CI}_{\text{âmbar}}$ e NDVI), nota-se que, ao se utilizar o $\text{CI}_{\text{âmbar}}$, a quantidade de N recomendada foi sempre mais elevada e com maior amplitude de variação entre as doses, indicando, como discutido no item 4.1.4, uma maior sensibilidade desse índice para a cultura da cana-de-açúcar. No entanto, mais estudos são necessários para comprovar essa maior sensibilidade e eficácia do índice CI, uma vez que Eitel et

al. (2008), trabalhando com a cultura do trigo, concluíram que índices simples como o NDVI e o CI são influenciados por outros fatores, como a quantidade de biomassa, sendo necessário o estudo de outros IVs que possam ter melhor adaptação com a cultura da cana-de-açúcar. Os mesmos autores verificaram que o índice composto MCARI/MTV12, que leva em conta a refletância de comprimentos de ondas específicos nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, melhor se correlaciona com o status nutricional por N na cultura do trigo. Na cultura do milho, Wu et al. (2007), verificaram o mesmo resultado, utilizando o índice composto MCARI/OSAVI. Entretanto, salienta-se a dificuldade no desenvolvimento e custo de um sensor ótico terrestre que trabalhe com todos estes comprimentos de onda ao mesmo tempo (hiper-espectral), sendo, até o presente momento, uma tecnologia disponível apenas a nível espacial e aéreo, ou em radiômetros portáteis de elevado custo de aquisição e destinados à pesquisa.

Realizou-se a interpolação dos dados em área total, sem se delimitar as faixas com os tratamentos, e os resultados são apresentados nas Figuras 23 e 24, exemplificando uma situação com alta variabilidade espacial na demanda por N de um talhão. Verifica-se que quando se adotou a Met-CDR (Figuras 23a, 23c, 24a e 24c), a maior parte dos talhões receberiam doses superiores a 100 kg ha^{-1} de N, o que poderia inviabilizar economicamente a adoção dessa estratégia, já que a aplicação de doses superiores a 100 kg ha^{-1} resultam em aumentos de produtividade relativamente pequenos (CANTARELLA et al., 2007). Quanto a adoção da Met-FRN (Figuras 23b, 23d, 24b e 24d), nota-se que a maior parte do talhão receberia doses de N inferiores a 40 kg ha^{-1} , que, se comprovadamente não limitassem a produção, viria a ser um grande atrativo para a adoção dessa metodologia por parte das usinas. Dessa maneira, salienta-se que novos experimentos devem ser conduzidos para verificar se estas baixas doses de N que podem vir a ser recomendadas pela Met-FRN, resultarão em economia no uso de fertilizantes nitrogenados sem prejuízo à produtividade.

Figura 23 - Recomendação de nitrogênio para a Área 1 pelo Met-CDR usando $CI_{\text{âmbar}}$ (a), Met-FRN usando $CI_{\text{âmbar}}$ (b), Met-CDR usando NDVI (c), Met-FRN usando NDVI (d)

Figura 24 - Recomendação de nitrogênio para a Área 2 pelo Met-CDR usando $CI_{\text{âmbar}}$ (a), Met-FRN usando $CI_{\text{âmbar}}$ (b), Met-CDR usando NDVI (c), Met-FRN usando NDVI (d)

É importante destacar a intensa experimentação necessária, caso essa técnica de recomendação de N com base em sensores óticos, seja adotada por usinas localizadas em diferentes regiões, com condições edafoclimáticas e variedades cultivadas distintas. Ao adotar a Met-CDR, em função da variabilidade de resposta ao N poder ser variável em diferentes situações, pode ser necessário que cada região tenha que levantar uma curva de dose/resposta específica, inclusive para cada conjunto de variedades. Já, na Met-FRN, esse intenso

levantamento de mensurações com o SOAT em experimentos com doses de N pode ser substituído por avaliações dos valores dos IVs que representem determinada produtividade, para se gerar equações confiáveis, a exemplo daquelas apresentadas na Figura 21, sendo algo mais simples de ser obtido. De qualquer maneira, em ambas as metodologias, acredita-se que será necessário a obtenção de dados para cada condição edafoclimática e talvez, até mesmo para variedades diferentes, mas apenas um maior levantamento de dados poderá inferir se existirá realmente essa necessidade.

Também é necessário salientar que, com a adoção deste tipo de tecnologia, a aplicação de fertilizantes nitrogenados sofreria significativa mudança operacional, onde seria necessário esperar que a cultura atingisse certa fase de desenvolvimento para a correta mensuração por parte do SOAT, o que encurtaria o período disponível para a execução desta adubação. Outro aspecto importante é que não seria mais possível a utilização de adubos formulados, contendo outros elementos como P e K, exigindo aplicações distintas nesses casos.

5 CONCLUSÕES

A produtividade final de colmos não foi influenciada pelas doses de N aplicadas, com maior produção obtida na área de plantio mais antigo (quarto corte).

Os resultados das análises foliares, para fins de avaliação nutricional da cana-de-açúcar, mostraram-se inconclusivos e contraditórios ao apontar o teor de N como sendo deficitário, mesmo nos tratamentos que receberam 200 kg ha⁻¹. Verificou-se aparente deficiência de enxofre nas áreas estudadas.

Obteve-se correlação abaixo do esperado entre o teor foliar de N e o teor de clorofila nas folhas mensurado com clorofilômetro, sendo necessários maiores estudos acerca da folha a ser amostrada, o local e o número de mensurações realizadas com o medidor portátil de clorofila. Devido a esta inconsistência, a metodologia de amostragem foliar e mensuração com clorofilômetro não se mostrou adequada para avaliar a eficácia do sensor ótico em estimar a nutrição da cana-de-açúcar por N.

O sensor ótico mostrou potencial de utilização em cana-de-açúcar ao diferenciar as doses de N aplicadas. O índice de vegetação $CI_{\text{âmbar}}$ foi, aparentemente, mais sensível nesta diferenciação em comparação com o NDVI. São necessários mais estudos que comprovem essa maior sensibilidade do $CI_{\text{âmbar}}$, assim como analisar outros índices de vegetação propostos pela literatura, e os fatores que neles possam interferir.

A estratégia de recomendar N em taxa variável, a partir de curvas de dose/resposta estabelecida em experimentos com doses de N, mostrou-se problemática por não levar em consideração a resposta da cultura em determinada situação, podendo recomendar a aplicação de doses demasiadamente altas de fertilizantes nitrogenados. Por outro lado, a metodologia de recomendar N, tendo como base a resposta da cultura estimada em uma faixa de cana-de-açúcar na lavoura que tenha recebido dose adequada para seu desenvolvimento pleno, desponta como estratégia mais coerente com a proposta de se incrementar a eficiência de uso do N.

Destaca-se a necessidade de estudos mais aprofundados sobre as estratégias de recomendação de N, avaliando a resposta obtida por meio da colheita e uso de diferentes índices de vegetação que melhor expressem a variabilidade na nutrição por N na cultura da cana-de-açúcar, assim como a necessidade de se desenvolver outros métodos comparativos que validem as mensurações realizadas com sensores óticos.

REFERÊNCIAS

- AG LEADER TECHNOLOGY. **SMS basic/Advanced manual**. Disponível em: <http://www.agleader.com/docs/SMS_Basic_Advanced_Manual_PT.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2010.
- ALVAREZ, V.H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N.F. Enxofre. 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: SBCS, 2007. p. 595-644.
- AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Sensor ótico e clorofilômetro na avaliação da nutrição da cana-de-açúcar por nitrogênio e potássio. In: FERTBIO, 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: FertBio, 2010. 1 CD-ROM.
- AMARAL, L.R. 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, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.
- ARGENTA, G. Monitoramento do nível de nitrogênio na planta como indicador da adubação nitrogenada em milho. 2001. 112 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; MIELNICZUK, J.; BORTOLINI, C.G. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 519-527, 2001a.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 13, n.2, p. 158-167, 2001b.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L.L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 109-119, 2003.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, p. 56-60, 1995.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; WALTER-SHEA, E.A. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 1-5, 1996.
- BRAMLEY, R.G.V. Lessons from 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. **Crop & Pasture Science**, Collingwood, v. 60, p. 197-217, 2009.

- 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: SBCS, 2007. p. 375-470.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. p. 355-412.
- CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; PRIETO, H.E.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. 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: SBCS, 2007. p. 769-850.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar**: Safra 2010/2011, segundo levantamento, agosto de 2010. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 08 out. 2010.
- DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.
- DWYER, L.M.; ANDERSON, A.M.; MA, B.L.; STEWART, D.W.; TOLLENAR, M.; GREGORICH, E. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 1, p. 179-182, 1995.
- 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.
- FONTES, P.C.R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: UFV, 2001. 122 p.
- 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.
- GIRMA, K.; MARTIN, K.L.; ANDERSON, R.H.; ARNALL, D.B.; BRIKEY, K.D.; CASILLAS, M.A.; CHUNG, B.; DOBEY, B.C.; KAMENIDOU, S.K.; KARIUKI, S.K.; KATSALIROU, E.E.; MORRIS, J.C.; MOSS, J.Q.; ROHLA, C.T.; SUDBURY, B.J.; TUBANA, B.S.; RAUN, W.R. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, p. 873-897, 2006.
- GITELSON, A.A.; MERZLYAK, M.N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 148, p. 494-500, 1996.

GITELSON, A.A.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T.J.; RUNDQUIST, D.C.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letter**, New York, v. 30, n. 5, p. 1148, 2003.

GITELSON, A.A.; VIÑA, A.; RUNDQUIST, D.C.; CIGANDA, V.; ARKEBAUER, T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letter**, New York, v. 32, n. 8, p. 4-7, 2005.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101-112, 2009.

GUIMARÃES, T.G. **Nitrogênio no solo e na planta, teor de clorofila e produção do tomateiro, no campo e de estufa, influenciados por doses de nitrogênio**. 1998. 201 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

INAMASU, R.Y.; SOUSA, R.V.; PORTO, A.J.V.; FORTES, C.; LUCHIARI, A.; SCHEPERS, J.S.; SHANAHAN, J.F.; FRANCIS, D.D. Acesso ao estado nutricional da cana-de-açúcar por meio de sensor ativo de refletância. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Nitrogen uptake across site specific management zones in irrigated maize production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 169-176, 2005.

JARRELL, W.M.; BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 34, p. 197-224, 1981.

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

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Rio Claro: Unesp, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Depto. Geologia Aplicada, Lab. Geomatemática, 2000. 20 p. (Texto Didático). Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

LUKINA, E.V.; FREEMAN, K.W.; WYNN, K.J.; THOMASON, W.E.; MULLEN, R.W.; STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; KLATT, A.R.; JOHNSON, G.V.; ELLIOTT, R.L.; RAUN, W.R. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 885-898, 2001.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M.F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, 2007. p. 189-250.

MALLARINO, A.P.; OYARZABAL, E.S.; HINZ, P.N. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. **Precision Agriculture**, New York, v. 1, p. 15–25, 1999.

MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction on nitrogen content for citrus. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 2, p. 455-461, 2005.

MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; JOHNSON, G.V.; SOLIE, J.B. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 1431-1441, 2004.

MOLIN, J.P. **Agricultura de Precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: O Autor, 2001. 83 p.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília: MAPA, ACS, 2009. Encarte técnico.

MOTOMIYA, A.V.A.; MOLIN, J.P.; CHIAVEGATO, E.J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 137-145, 2009.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, J.A.; LAVORENTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v. 17, n. 4, p. 39-41, 1999.

OSBORNE, S.L. Utilization of existing technology to evaluate spring wheat growth and nitrogen nutrition in South Dakota. **Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 38, n. 7, p. 949-958, 2007.

PHILLIPS, S.B.; KEAHEY, D.A.; WARREN, J.G.; MULLINS, G.L. Estimating winter wheat tiller density using spectral reflectance sensors for early-spring, variable-rate nitrogen applications. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 591-600, 2004.

PIEKIELEK, W.P.; FOX, R.H.; TOTH, J.D.; MACNEAL, K.E. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 403-408, 1995.

PIRES, J.L.F.; CUNHA, G.R.; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. **Discutindo agricultura de precisão: aspectos gerais**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2004. (Documentos, 42). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.htm>. Acesso em: 02 set. 2010.

POVH, F.P. **Utilização de sensor óptico ativo em culturas de cereais**. 2007. 86 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

POVH, F.P.; GIMENEZ, L.M.; SALVI, J.V.; FRASSON, F.R.; MOLIN, J.P.; PAULETTI, V. Uso de sensor ótico ativo aplicado ao manejo de nitrogênio em trigo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 343-350.

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.23, n.8, p.1075-1083, 2008.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Informações Agronômicas**, Campinas, v. 110, p. 12-17, 2005.

PRADO, R.M.; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008.

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**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 189-203. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 279 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

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

RAUN, W.R.; SOLIE, 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.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

SCHADCHINA, T.M., DMITRIEVA, V.V. Leaf chlorophyll content as a possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, p. 1427-1437, 1995.

SCHRÖDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O.; STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, p. 277-278, 2000.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção em cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006. 415 p.

SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. FRANCIS, D.D.; VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; TRINGE, J.M.; SCHLEMMER, M.S.; MAJOR, D.J. Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 583-589, 2001.

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

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

SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; NEEDHAM, D.E.; REED, S.; WASHMON, C.N. Real-time sensing and N fertilization with a field scale GreenSeeker applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2002, Minneapolis. **Proceedings ...** Minneapolis: USDA, 2002. Disponível em: <http://nue.okstate.edu/Papers/Minnesota_2002_Solie.htm>. Acesso em: 07 nov. 2010.

STEVEN, M.D. Correcting the effects of field of view and varying illumination in spectral measurements of crops. **Precision Agriculture**, New York, v. 5, p. 55-72, 2004.

STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R.; WHITNEY, R.W.; TAYLOR, S.L.; RINGER, J.D. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1623-1631, 1996.

TANGERINO, G.T. **Sistemas de sensoriamento embarcado para uso em controle de aplicações de insumos agrícolas à taxa variável**. 2009. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SUI, R.; WILKERSON, J.B.; HART, W.E.; WILHELM, L.R.; HOWARD, D.D. Multi-spectral sensor for detection of nitrogen status in cotton. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 167-172, 2005.

TARPLEY, L.; REDDY, K.R.; SASSENATH-COLE, G.F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, Madison, v. 1, n. 40, p. 1814-1819, 2000.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, R.W. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 1488-1494, 2006.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993. 634 p.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Dados e cotações:** estatísticas. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 08 out. 2010.

VARVEL, G.E.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D. Ability for in season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1233-1239, 1997.

VINA, A.; GITELSON, A.A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. **Geophysical Research Letter**, New York, v. 32, n. 17, p. 1325-1331, 2005.

VITTI, A.C. **Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: manejo e efeito na produtividade.** 2003. 114 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.G.; PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. 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.

VITTI, G.C., MAZZA, J.A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar.** Piracicaba: POTAFOS, 2002. 16 p. (Informações Agrônômicas, 97)

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**, New York, v. 27, n. 3, p. 545-560, 1996.

WOOD, C.W.; REEVES, D.W.; HIMELRICK, D.G. Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. In: WHEAT SYMPOSIUM, 8., 1993, Christchurch. **Proceedings...** Palmerston North: Agronomy Society of New Zealand, 1993. p. 1-9.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 47, p. 656-662, 1971.

WRIGHT, D.L. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 4, p. 287-300, 2004.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1230-1241, 2008.

YADAVA, U.L. A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves. **HortScience**, Alexandria, v. 21, n. 6, p. 1449-1450, 1986.