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

**Obtenção de algoritmo agrônômico para sensor foto ativo de
refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na
cultura da cana-de-açúcar**

Gustavo Portz

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas agrícolas

**Piracicaba
2011**

Gustavo Portz
Engenheiro Agrônomo

**Obtenção de algoritmo agrônômico para sensor foto ativo de refletância vegetal
visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2011

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

Portz, Gustavo

Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar / Gustavo Portz. - - Piracicaba, 2011.
120 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Adubação 2. Agricultura de precisão 3. Algoritmos 4. Cana-de-açúcar 5. Fertilizantes nitrogenados 6. Nitrogênio 7. Sensores ópticos 8. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 631.7
P853o

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

DEDICO

A Deus que não deixou de me abençoar com saúde e me iluminar em importantes decisões durante minha caminhada. Também a toda minha família, especialmente meus pais Carlos e Ilaine que não mediram esforços para me ajudar independente de dificuldades e a meus irmãos Elenice e Cristiano pelo apoio incondicional durante minha jornada.

AGRADEÇO

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo por meio do Programa de pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade da realização deste curso de Mestrado.

Ao Professor e amigo José Paulo Molin, pela oportunidade de trabalho conjunto, confiança, por toda orientação e pela relação de amizade, paciência, e experiências que transmitiu e propiciou a mim durante o período de Mestrado.

A minha família, pais Carlos e Ilaine, irmãos Elenice e Cristiano por todo apoio em todos os momentos.

Ao meu padrinho Marco A. Portz pelo apoio e incentivo nesta jornada.

A Tatiane Bagatini que sempre me apoiou e incentivou em todos os momentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro em forma de Bolsa, essencial à condução deste trabalho.

As empresas, Yara Fertilizantes através do seu Centro de Pesquisa de Hanninghof, Duelmen – Alemanha, através dos pesquisadores Joerg Jasper e Stefan Reuch. E a empresa Jacto máquina agrícolas, Pompéia – SP em especial aos engenheiros Denis Yukio Sakuma e Wanderson Tosta. Empresas parceiras e pessoas essenciais à realização deste projeto.

A Usina São Martinho SA, por todo apoio e colaboração na execução do projeto, em especial aos membros da equipe de qualidade agrícola; René de Assis Sordi, Marcos Marcari, Luciano das Graças e Carlos Sardão, e a equipe de tratos culturais; Pedro, Ailton e Sandro.

Aos colegas de curso: Matheus Marrafon Nicolosi, Gilda Brasil Cardoso, Hudson Nardi de Souza, Diego Soriano Cavalcante, Eloi Hungaro, Karan, José Vitor Salvi e em especial ao colega Lucas Rios do Amaral (Firula), que participou de grande parte das

etapas de condução em campo desta pesquisa, pelo constante auxílio e troca de experiências.

Aos meus Amigos e colegas de Esalq; Kelly Justin da Silva, Rafael Dutra de Armas, Éder Santos, Luiz Cesar Bonfim Gottardo, Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida, Tiago Tezotto e Luiz Henrique Marcandalli pela amizade e apoio que foram fundamentais para mim durante esta etapa.

Ao grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão (gMAP) pelas amizades, bons momentos e troca de experiências.

À equipe de auxílio à pesquisa do departamento de Engenharia de Biossistemas, Fernanda, Davilmar, Áureo, Juarez, Chicão, Afonso, Agnaldo e Zé Geraldo.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, especialmente aos professores Marcos Milan e Thiago Libório Romanelli pelos ensinamentos e amizade.

Ao professor Neroli Pedro Cogo, orientador de graduação, pela amizade e apoio incondicional para a realização deste curso de Mestrado. Também aos professores Carlos Ricardo Trein, Renato Levien e Christian Bredemeier da UFRGS pelo apoio e recomendação para a realização deste curso de pós-graduação.

A bibliotecária Eliana Maria Garcia pelas correções na dissertação.

Em fim, a todos aqueles que, mesmo indiretamente, me ajudaram durante ou em parte do percurso de realização deste curso de mestrado, meu MUITO OBRIGADO!

EPIÍGRAFE

Se teus projetos são para um ano – semeia o grão.

Se são para dez anos – plante uma árvore.

Se são para cem anos – instrui o povo.

Semeando uma vez o grão – colherás uma vez.

Plantando uma árvore – colherás dez vezes.

Instruindo o povo – colherás cem vezes.

Se deres um peixe a um homem – comerá, uma vez.

Se o ensinares a pescar – comerá, a vida inteira.

Ensino chinês do século VII antes de Cristo, elaborado por “Kuan Tzu”, que já recomendava a educação como base.

“For those of us on the food production front, let us all remember that world peace will not – and can not – be built on empty stomachs. Deny farmers access to modern factors of production – such as improved varieties, fertilizers and crop protection chemicals – and the world will be doomed – not from poisoning, as some say, but from starvation and social chaos”

Norman E. Borlaug, Prêmio Nobel da Paz, 1970.

Deus não escolhe os capacitados

capacita os escolhidos.

Fazer ou não fazer algo

só depende de nossa vontade

e perseverança

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Nitrogênio	19
2.1.1 Obtenção e custos energéticos	19
2.1.2 Fertilizantes nitrogenados	20
2.1.3 Nitrogênio no solo	22
2.2 Agricultura de precisão.....	29
2.3 Sensoriamento remoto, características e comportamento vegetal.....	30
2.3.1 Sensoriamento remoto, identificação em variações da nutrição nitrogenada e biomassa	32
2.3.2 Sensoriamento remoto da nutrição nitrogenada a partir de sensores opticos terrestres	34
3 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 Local e áreas da pesquisa.....	37
3.2 Sensor de nitrogênio e biomassa	41
3.3 Veículo de transporte do sensor.....	45
3.4 Procedimento amostral.....	46
3.5 Forma de análise dos resultados	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 Distribuição cronológica das atividades.....	51
4.2 Clima da região	53
4.3 Fertilidade do solo	55
4.4 Alturas e número de perfilhos.....	57
4.4.1 Alturas de palmito/colmo	57
4.4.2 Número de perfilhos	60
4.5 Biomassa da cultura	62
4.6 Análises de nitrogênio contido na biomassa	64
4.7 Índice obtido com o clorofilômetro.....	67

4.8 Dados obtidos com o sensor de nitrogênio e biomassa.....	70
4.9 Síntese dos dados avaliados relacionados ao sensor	73
4.9.1 Altura de perfilhos	73
4.9.2 Número de perfilhos.....	74
4.9.3 Clorofilômetro	75
4.9.3.1 Clorofilômetro versus concentrações de nitrogênio na planta	76
4.10 Avaliação da capacidade do sensor em prever biomassa e nitrogênio.	77
4.10.1 Predição de nitrogênio e biomassa para a cana avaliada na estação seca e fria	78
4.10.2 Predição de nitrogênio e biomassa para a cana avaliada na estação chuvosa e quente.....	83
4.10.3 Predição de nitrogênio e biomassa para o ano agrícola	89
4.10.4 Análise estatística para as regressões de predição de nitrogênio e biomassa... 91	
4.10.5 Capacidade do sensor prever a concentração de nitrogênio na planta	94
5 CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS	99
ANEXO	105

RESUMO

Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar.

A nutrição nitrogenada, apesar de intensamente estudada, continua sendo um desafio aos produtores, especialmente em função da variabilidade encontrada no desenvolvimento da cultura nas áreas de produção comercial, muitas vezes em curtas distâncias. Recentemente esta variabilidade vem sendo associada ao uso de sensores ópticos que detectam a refletância do dossel da cultura como forma de estimar a nutrição nitrogenada das plantas, podendo estes serem associados à aplicação em taxa variável em tempo real do fertilizante nitrogenado. Em cana-de-açúcar esses estudos ainda são escassos, e sendo uma cultura voltada para a produção de biomassa para geração de energia, tais sensores podem contribuir para otimizar o saldo positivo em produção de energia e baixar as emissões de carbono no sistema. Este trabalho apresenta o processo e mostra os resultados obtidos utilizando um sensor de nitrogênio e biomassa (N-Sensor™ ALS, Yara International ASA) com o objetivo de indicar exigência na aplicação de nitrogênio em plantações comerciais de cana-de-açúcar. Oito talhões em produção comercial da cultura, localizados na região de Ribeirão Preto, SP, variando de 16 a 21 ha cada, foram monitorados. As condições de solo variaram de arenosos a argilosos, se dando a colheita de quatro deles em maio (período seco e frio) e os demais quatro em outubro de 2009 (estação úmida e quente), incluindo três soqueiras (primeira, segunda e terceira) em cada estação e quatro variedades, duas por estação. Cada talhão foi escaneado com o sensor três vezes durante seu desenvolvimento (0,2, 0,4 e 0,6 m de altura de colmo/palmito). Os dados georreferenciados de cada medição foram interpolados gerando mapas contendo cinco classes e em cada classe foram alocados dois pontos amostrais, dez por área, onde foram avaliados número e altura de perfilhos, teor de clorofila com medidor portátil e colhidas amostras para biomassa e extração de nitrogênio, as quais foram comparadas com os valores apresentados pelo sensor nos mesmos locais. Os resultados demonstram não haver relação significativa entre o medidor de clorofila e os parâmetros avaliados, porém alta correlação entre os valores do sensor e da biomassa de cana e sua absorção de nitrogênio, dando suporte à utilização desses dados em forma de um algoritmo para gerenciar a aplicação em taxa variável e tempo real de nitrogênio baseada nas leituras do sensor em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Nitrogênio; Cana-de-açúcar; Sensores ópticos; Clorofilômetro; Refletância; N-Sensor

ABSTRACT

Calibration of an agronomic algorithm for a photo active reflectance sensor aiming to indicate nitrogen fertilizer in the sugarcane crop

Nitrogen nutrition of sugarcane, although extensively studied, remains a challenge for producers, especially due variability found in commercial production areas, often in short distances. Recently, this variability has been associated with the use of optical sensors that can detect crop canopy reflectance as a way to estimate the nitrogen nutrition of plants, these measurements can be associated with variable rate application on-the-go of nitrogen fertilizer based on sensor readings. On sugarcane those studies are yet scarce and as a biofuel crop the energy input matters, looking for a high positive energy balance production and low carbon emission on the whole production system. This study presents the procedure and shows the results obtained using a nitrogen and biomass sensor (N-SensorTM ALS, Yara International ASA) aiming to indicate nitrogen application demands on commercial sugar cane fields. Eight commercial fields from one Sugar Mill in the state of São Paulo, Brazil, vary from 16 to 21 hectares each, were monitored. Conditions ranging from sandy to heavy soils and the previous harvesting occurred in May (dry and cold season) and October 2009 (wet and warm season), including first, second, and third ratoon stages over four varieties, two per season. Each field was scanned with the sensor three times in the season (0.2, 0.4, and 0.6 m of stem height). The georeferenced data from each measurement was interpolated generating maps containing five classes, in each class two sample points were allocated, ten per area were the stem height and number, chlorophyll content (N-tester) were evaluated followed by tissue sampling for biomass and nitrogen uptake which were compared with the sensor readings for the same locations. The results show no significant relationship between the chlorophyll meter and the parameters evaluated, but high correlation between the sensor values and sugarcane biomass and their nitrogen uptake, supporting the use of these data as an algorithm to manage on-the-go variable rate application of nitrogen based on sensor readings over sugar cane cultivated areas.

Keywords: Sugarcane; Nitrogen management; Optical sensing; Chlorophyll meter; Reflectance; N-Sensor

1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis que venham a reduzir a dependência mundial por combustíveis fósseis é crescente, sendo que o setor energético vem encontrando na agricultura, através da produção e uso de biomassa, um caminho consistente na geração de energias renováveis e ainda muito promissor em função do constante surgimento de novas tecnologias.

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é atualmente a cultura mais importante de clima tropical destinada à produção energética, hoje na forma de biocombustível (etanol), sendo o Brasil o país com as melhores condições de produzir tal fonte, de forma renovável, vindo a diminuir a dependência de fontes fósseis (SEGATO et al., 2006)

O setor sucroalcooleiro brasileiro vem sendo fortemente estimulado pela grande procura mundial por biocombustíveis a serem usados como fonte única, ou complementar ao combustível fóssil. Tal iniciativa visa impedir o aumento de emissões de carbono, forçado por leis criadas nos países que aderiram e estão dispostos a implementar as determinações e metas acordadas no protocolo de Kyoto.

Não bastando o contexto mundial, o consumo nacional de etanol vem crescendo, pois o combustível é financeiramente competitivo, principalmente nas regiões produtoras. Fato que a produção e venda de automóveis bicombustíveis no país, que chegaram à marca de 10 milhões de unidades vendidas no período 2003 – 2010 (ANFAVEA, 2010), sendo estes consumidores ou potenciais consumidores de etanol oriundo da produção canavieira nacional.

A cana de açúcar fornece 19% da energia produzida no Brasil, valor expressivo e superior ao montante fornecido por hidroelétricas ao país (14%) (BEN, 2010). Este fato, além de toda produção de açúcar, que na safra 2008/09 foi de 31,05 milhões/ton, e etanol com 27,5 bilhões/litros (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2010).

A área de cana-de-açúcar a ser cultivada na safra 2010/2011, destinada à produção comercial sucroalcooleira está estimada em 8.033,6 mil hectares, distribuídos no território nacional, somando a quantia de 625 milhões de toneladas, o que

representa um aumento de 8,4% em relação à safra anterior (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010). Tal magnitude de produção coloca o Brasil como maior produtor mundial da cultura, seguido pela Índia com metade da produção brasileira (FAO, 2010)

A média de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil na safra 2009/10 foi de 77,8 ton ha⁻¹ (CONAB, 2010). A maioria das lavouras comerciais bem manejadas apresenta produtividade superior, muitas vezes ultrapassando as 100 ton ha⁻¹. Porém para que estes valores sejam alcançados se torna necessário o uso contínuo de adubação química, pois os solos não possuem naturalmente os nutrientes disponíveis para tal nível de demanda, visto que as variedades da cultura plantadas atualmente foram melhoradas geneticamente e possuem alto potencial produtivo quando adequadamente nutridas.

A produção de cana-de-açúcar em solos minerais e climas úmidos é fortemente influenciada pela disponibilidade de nitrogênio (N). Pesquisas apontam que adubações com nitrogênio usando doses de até 175 kg ha⁻¹ resultam em aumento de produtividade. Por outro lado, a adubação nitrogenada pode ser responsável por grande parte do custo de produção e pode causar danos ambientais. Deste modo, o uso racional desse insumo pode ter grande impacto na rentabilidade da produção e na conservação do meio ambiente, principalmente quando se trata da produção de biocombustível, pois não é interessante produzi-lo à custa de energia fóssil incorporada no fertilizante e com risco de contaminação de solo e água.

Uma das ferramentas do moderno conceito de “agricultura de precisão” é a aplicação dos insumos agrícolas em taxas variáveis, dentre eles o nitrogênio. Porém a prescrição da adubação nitrogenada sempre foi um desafio devido à dificuldade de prever a quantidade de N mineralizada da matéria orgânica do solo durante o ciclo de crescimento da cultura, aliada a mobilidade do nutriente no perfil de solo e a variabilidade especial nas concentrações de nitrato dentro das lavouras.

Atualmente a aplicação de nitrogênio em lavouras de cana-de-açúcar é feita em taxa fixa, tendo como referência valores médios, não se considerando a variabilidade especial existente. Porém, em muitas áreas há mais de um tipo de solo, com diferentes capacidades de suprir N, requerendo assim gerenciamento espacialmente diferenciado

do fertilizante para boas produtividades, que possibilitem um manejo de N economicamente e ecologicamente otimizado.

A determinação das taxas de nitrogênio a serem aplicadas é de crucial interesse visto que N é um dos principais elementos envolvidos na determinação da produtividade, e normalmente as taxas de N disponíveis em solos minerais são insuficientes para alcançar o potencial produtivo e por isso fertilizante nitrogenado deve ser suplementado para garantir a produção da cana-de-açúcar.

Métodos usando medições de refletância por sensores remotos ativos ou passivos têm sido usados para estimar a nutrição de N em plantas. Estes usam dados adquiridos em tempo real por sensores para controlar operações em locais específicos dentro da lavoura enquanto a máquina se desloca, coletando dados sobre o estado atual da planta em alta resolução espacial, permitindo a detecção das necessidades de N em tempo real, transformando estas necessidades em uma taxa de fertilizante nitrogenado a ser aplicada poucos segundos após a medição do sensor. Porém, um algoritmo agrônomo específico para a cultura é necessário visando transformar as leituras do sensor em doses de fertilizante a aplicar. Neste sentido, aplicação em taxa variável de N baseada em sensor de refletância é uma das práticas mais promissoras da agricultura de precisão para aperfeiçoar o uso eficiente de nitrogênio, aumentar produtividade e reduzir impactos ambientais na produção de cana de açúcar.

Pesquisa recente realizada no estado de São Paulo sugere que o setor sucroalcooleiro busca incessantemente tecnologias que foquem em melhor gerenciamento, maior produtividade, menor custo, menor impacto ambiental e safras de melhor qualidade, e diz que 96% do setor quer expandir o uso de práticas de agricultura de precisão (SILVA et al., 2010), o que vem de encontro ao propósito deste estudo.

Entre os sensores óticos atualmente disponíveis, O Yara N-Sensor foi o primeiro a ser lançado no mercado no ano 1999; hoje em sua segunda versão, continua sendo um dos principais sensores destinados à aplicação de nitrogênio em taxa variável e em tempo real, principalmente em culturas anuais de cereais. Cereais, assim como a cana de açúcar pertencem à família Poaceae (Gramíneas) que é altamente dependente de nitrogênio e não é capaz de realizar simbioses eficientes para a geração do nutriente,

havendo um grande potencial de uso de tal ferramenta no manejo da adubação nitrogenada da cana de açúcar.

O uso desse sensor se dá em sua maior parte na Europa, em função da informação já disponível de uso em culturas de cereais, porém não há informação disponível na literatura para o uso do sensor por produtores de cana-de-açúcar nos trópicos, havendo uma grande oportunidade para o uso do equipamento visando à economia na aplicação de nitrogênio em plantações de cana-de-açúcar em países em desenvolvimento, porém antes disso o sensor deve ser calibrado, validado e testado para a cultura da cana-de-açúcar. Tal sensor vem sendo usado com sucesso em cereais de inverno e milho, principalmente na Europa a hipótese proposta é que desempenho semelhante venha a ser observado na cultura da cana-de-açúcar. Assim, busca-se uma forma mais eficiente de uso do fertilizante nitrogenado na cultura da cana-de-açúcar, visando aumentar produtividade, baixar custos e se adequar a futuras legislações ambientais que possam ser restritivas ao uso inadequado de fertilizantes químicos.

Em vista do exposto, este trabalho se propôs a realizar as primeiras medições fazendo uso do sensor N-Sensor ALS sobre lavouras de cana-de-açúcar, com o apoio de dados obtidos de um clorofilômetro, e estabelecer a relação entre as medidas do sensor e os diversos parâmetros da cultura, dando ênfase à extração de nitrogênio.

O objetivo é se gerar um algoritmo que correlacione a extração de nitrogênio pela cultura e os referentes valores das leituras do sensor para o nutriente, visando à aplicação do insumo nitrogenado em taxa variável e em tempo real em função das leituras do sensor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nitrogênio

O elemento químico nitrogênio (N), existe em abundância na natureza, constitui 78% do ar atmosférico, porém encontra-se em sua maior parte na forma gasosa básica ou livre, ou seja, " N_2 " que é química e biologicamente inutilizável (ERISMAN, 2008). Foi descoberto no começo dos anos 1770 independentemente por vários físicos europeus, ficando o principal mérito com o escocês Scotsman Daniel Rutherford. Posteriormente foi batizado de Nitrogênio, pois era um constituinte do ácido nítrico e dos nitratos (do grego, genio, formador de, nitron, de nitratos). Na sua forma básica não possui cor, odor ou sabor, tornando-se líquido a -196°C . Também foi chamado de Azoto, proveniente da palavra francesa azotum, ou seja, sem vida (EUROPEAN FERTILIZERS MANUFACTURERS ASSOCIATION - EFMA, 2003).

O N teve sua essencialidade às plantas demonstrada por Sausurre em 1804, e depois disso seu uso se intensificou, especialmente com a descoberta da síntese química do nutriente. No Brasil o consumo de N aumentou mais de 1000 vezes em cinco décadas sendo produzido no país apenas 35% da demanda em 2005. (MALAVOLTA; MORAIS, 2006)

2.1.1 Obtenção e custos energéticos.

A produção de nitrogenado para a indústria, da forma como é produzida hoje, se origina da síntese da amônia (NH_3) através de nitrogênio e hidrogênio, num processo denominado de Haber-Bosch, por ter sido descoberto pelo cientista alemão Fritz Haber. O processo foi patenteado no ano de 1908, e logo após adaptado para escala industrial com a ajuda do químico industrial Carl Bosch, em uma das fábricas da BASF, na Alemanha (MALAVOLTA; MORAIS, 2006). Para a produção de NH_3 , o N é obtido do ar atmosférico, e o hidrogênio (H) como resultado da reação entre a água (H_2O) e o gás natural (CH_4) conforme eq. (1) e eq. (2):

O processo de síntese da amônia, base da indústria química e de fertilizantes, possui alto custo energético na sua produção, além da geração de monóxido de carbono no processo. Inicialmente eram gastos aproximadamente 100 MJ Kg⁻¹ de NH₃ produzido, atualmente gera-se um quilograma de NH₃ com 27 MJ, o que é próximo do mínimo teórico de 25 MJ Kg⁻¹ de NH₃ (APPL, 1997), (JENSSEN; KONGSHAUG, 2003). Desta forma faz-se necessário que a pesquisa busque alternativas para a redução e melhor uso do insumo nitrogenado na agricultura, visto que o processo de produção industrial já está otimizado, e continua sendo um grande demandador de energia.

2.1.2 Fertilizantes nitrogenados

A amônia (NH₃) sintetizada a partir do processo Haber-Bosch é a base para a produção de todos fertilizantes nitrogenados sintéticos (Figura 1), que podem ser comercializados de várias formas físicas e químicas. Dentre as físicas encontramos as formas líquidas, gasosas e sólidas. Exemplo de líquida é a aquamônia (± 20% N) e gasosa, a amônia anidra (± 80% N), ambas pouco utilizadas no Brasil, e as formas sólidas (granulado, pó ou farelo) que constituem a maior parte dos produtos atualmente disponíveis no mercado nacional, com diversas concentrações de N (ALCARDE et al., 1998).

Dentre os sólidos, existem mais de dez adubos nitrogenados, tendo N como único nutriente ou com alguns nutrientes agregados, estando nas formas: amoniacal, NH₄⁺; nítrica, NO₃⁻; amídica, NH₂ e orgânica (R-COOHNH₂) (NOVAIS et al., 2007). Dentre elas, a ureia (± 45% N) é mais conhecida e utilizada, porém não a mais eficiente se não incorporada ao solo, pois é altamente volátil. No setor canavieiro o nitrato de amônio tem sido muito usado, principalmente por apresentar perdas reduzidas em aplicações fora das condições ideais sobre a palhada da cultura colhida crua.

Ressalta-se ainda que a produção de fertilizantes nitrogenados a partir da amônia requer energia em processos secundários para a elaboração das fórmulas comerciais de aplicação que são realmente usadas, aliado a gastos energéticos embutidos em embalagens, transporte e aplicação do produto ao solo, o que reforça a necessidade do uso racional do insumo nitrogenado.

Figura 1 - Amônia como chave para produção de fertilizantes (MALAVOLTA; MORAIS, 2006)

Segundo (MOSIER; GALLOWAY, 2005) o uso resultante do emprego do insumo nitrogenado na agricultura moderna permite sustentar cerca de 40% da população do planeta, porém a produção de amônia é responsável pelo consumo de cerca de 5% do gás natural mundial, o que representa algo logo abaixo de 2% da produção de energia mundial (INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION - IFA, 2002), o que é um montante considerável em vista das inúmeras aplicações mundiais para energia.

A escolha do fertilizante nitrogenado a ser usado é muito importante, e deve ser uma decisão agrônômica que leva em consideração a cultura, o solo, clima local e o preço do insumo. Porém não se pode deixar de levar em consideração a forma com que o produto deve ser aplicado, pois vai incidir diretamente em máquinas e implementos necessários à atividade, visto que produtos com diferentes características químicas e principalmente físicas requerem equipamentos específicos que devem estar disponíveis e adequadamente calibrados para a correta aplicação do insumo (BALASTREIRE; COELHO, 2000).

2.1.3 Nitrogênio no solo

Apesar de existir em abundância no solo, a dinâmica do N é complexa; o elemento possui diversas formas químicas, reações e processos aos quais está envolvido, o que interfere diretamente na disponibilidade do nutriente à cultura, o que faz com que somente uma pequena porcentagem do N do solo esteja disponível às plantas. É o chamado N inorgânico sob formas lábeis (minerais) e absorvido como NH_4^+ (amônio) e NO_3^- (nitrato) e através de fluxo de massa (99%), sendo apenas 1% pela interceptação do sistema radicular (MALAVOLTA et al., 1997); o restante está complexado com a matéria orgânica, adsorvido aos colóides do solo e em formas combinadas, tais como NH_2 , N_2O e NO , não estando imediatamente disponível, pois é liberado e transformado lentamente principalmente por atividade biológica. As principais transformações do N no solo são:

A) Amonificação, eq. (3) e eq. (4)

A primeira fase do processo de amonificação onde nitrogênio orgânico é transformado em amônia se dá no solo por organismos heterotróficos que obtêm energia no processo.

B) Nitrificação, eq. (5) e eq. (6)

A primeira parte do processo de nitrificação é realizada por bactérias autotróficas denominadas Nitrosomonas, ficando a parte final a ser realizada por bactérias do gênero Nitrobacter.

C) Desnitrificação, eq. (7)

O processo de desnitrificação, juntamente com a extração de N pelas culturas e a lixiviação são as principais formas de perda de N do sistema. Porém o processo de desnitrificação é mais significativo em solos encharcados onde diversos gêneros de bactérias usam nitrato e nitrito comoceptor final de elétrons na cadeia respiratória (RICE; TIEDJE, 1989). Porém mesmo em solos bem drenados há micro sítios no interior dos agregados do solo onde falta oxigênio, sendo o não recuperado, por muitos atribuído a desnitrificação (TRIVELIN et al., 2002).

D) Imobilização

O processo de imobilização de N consiste no uso do N do solo por sua própria biota em sua formação proteica corpórea, e se dá quando a relação carbono/nitrogênio (relação C/N) do solo for maior que 30/1, ou seja, quando houver mais do que 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio, o que normalmente acontece quando há grande formação de resíduo cultural de plantas com baixa relação C/N, como é o caso da palhada de cana-de-açúcar. Desta forma o suprimento de N no solo avaliado através do teor de matéria orgânica do solo pode levar a erros, pois a atividade biológica é dinâmica e fatores como umidade, temperatura, textura e pH influenciam nestas, alterando a disponibilidade desse macro nutriente às plantas. De acordo com a

atividade biológica, tipo de solo, resíduos vegetais, entre outros, as taxas anuais de mineralização variam de 10% a menos de 0,6% (HEBERT, 1982).

O correto manejo da adubação nitrogenada é de crucial importância para o desenvolvimento da cultura, envolvendo aspectos econômicos e ambientais, uma vez que esse nutriente está sujeito a perdas por erosão, lixiviação, desnitrificação e lixiviação.

Porém, não adianta manejar-se corretamente o N, fornecendo doses adequadas à cultura se os demais fatores referentes à fertilidade dos solos não estiverem resolvidos, pois o nutriente mais deficitário irá ditar o desenvolvimento vegetal, suprimindo a expressão do N, como já conhecido de longa data e inicialmente ilustrado por Liebig (Figura 2).

Figura 2 - Representação da “Lei do Mínimo” de Liebig. Fonte: Alcarde et al. (1998)

Em função das inúmeras interações do N com o solo e sua biota, torna-se muito difícil prever a quantidade de N que estará disponível, e a que será necessária à cultura durante seu ciclo de crescimento. Em adição, o N possui variabilidade espacial, que pode se dar em curtas distâncias (SOLIE et al., 1999), principalmente em função de matéria orgânica, e variabilidade temporal devido às suas já citadas transformações no solo. Desta forma, uma previsão da quantidade de N que será exigida pela planta em cada microrregião da lavoura é de difícil obtenção.

Em condições climáticas favoráveis há um maior desenvolvimento vegetal e consequente maior demanda do elemento. Desta forma pode-se ter variabilidade no fornecimento de N pelo solo, na demanda pela cultura ao longo do tempo para diferentes locais e safras (Figura 3).

Figura 3 - Relação genérica entre N disponível no solo e N demandado pela planta e sua variação durante o ciclo vegetativo

Entender a dinâmica de N no solo é primordial para racionalização do uso de fertilizantes nitrogenados, tanto do ponto de vista da produtividade da cultura, como da manutenção da qualidade ambiental (AITA, 1997). Também é necessário manejar o N corretamente em função de suas inúmeras variáveis resultantes da interação solo, planta e ambiente.

Se analisada a biomassa acumulada e vigor da planta e não a análise de solo que contabiliza matéria orgânica ou nitrogênio total, é possível obter-se essa resposta. A planta expressa em vigor a sua nutrição nitrogenada, e em função desse vigor, ou seja, do que a planta realmente consegue extrair do solo para compor o seu

desenvolvimento naquele momento e condições ambientais, pode-se inferir a sua necessidade quanto ao nitrogênio.

2.1.4 Nitrogênio na cana-de-açúcar.

O N é o nutriente mineral mais importante oriundo do solo na nutrição de plantas, denominado de macronutriente primário, vital para o crescimento e produção vegetal. Na cultura da cana-de-açúcar, juntamente com o potássio, é o mais absorvido (MALAVOLTA et al., 1997), porém também é o segundo elemento em importância a causar impacto no ciclo de vida do etanol (OMETTO et al., 2009).

O elemento N está diretamente envolvido na constituição do composto orgânico denominado clorofila, pois este possui em seu núcleo quatro átomos de N circundando um átomo de magnésio. A clorofila, que dá a cor verde à planta, é responsável pelo processo de fotossíntese, onde através da quebra das moléculas de água e gás-carbônico, na presença de luz, acontece liberação de oxigênio e geração dos compostos orgânicos (glicose, frutose, sacarose, amido...) que se busca em plantas para o sustento humano por meio de altas produtividades. Além disso, o N é um dos elementos constituintes dos aminoácidos que dão origem às proteínas, sendo o nitrogênio em média 16% de uma proteína.

Em condições de deficiência de nitrogênio na cana-de-açúcar há clorose das folhas mais velhas e diminui a atividade meristemática da parte aérea, resultando em menores perfilhos, área foliar e longevidade das folhas (MALAVOLTA et al., 1997) e consequentemente resultando em menor produtividade da cultura.

A cana-de-açúcar, por ser uma planta da família das gramíneas (poaceae), não é capaz de fazer simbioses eficientes para obtenção de N, assim como acontece com as leguminosas. Porém há trabalhos relatando a incidência de fixação biológica de N no ciclo da cana relacionado a variedades (URQUIAGA et al., 1992) e fixação biológica em cana-planta (SAMPAIO et al., 1988), porém em cana soca não é tão expressiva sendo relatado pela pesquisa que os atores da fixação biológica ainda não estão bem definidos não havendo subsídio para recomendar algum tipo de inoculação (BODDEY et al., 2003).

Assim, se torna necessária a aplicação de nitrogênio sintetizado industrialmente em lavouras comerciais de cana-de-açúcar visando altas produtividades, pois normalmente as taxas de N disponíveis em solos minerais não são suficientes para alcançar o potencial produtivo da cultura, que conta com variedades melhoradas geneticamente, e por isso fertilizante nitrogenado deve ser suplementado para garantir a produção da cana-de-açúcar (RICE et al., 2002).

2.1.5 Adubação em nitrogênio na cana-de-açúcar

A produção de cana-de-açúcar em solos minerais e climas úmidos é fortemente influenciada pela disponibilidade de N sendo verificado que adubações com nitrogênio usando doses de até 175 kg ha⁻¹ resultam em aumento de produtividade (VITTI et al., 2007), e aumento de produtividade nas safras seguintes (DE MELLO PRADO; PANCELLI, 2008); (VITTI et al., 2007), também propiciando melhorias nos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (FRANCO et al., 2010).

Por outro lado, a adubação nitrogenada pode ser responsável por grande parte do custo de produção. Deste modo, o uso racional desse insumo pode ter grande impacto na rentabilidade da produção. Adicionalmente, o potencial de impacto ambiental deve ser considerado, pelo uso de melhores práticas na agricultura, como o uso mais preciso do fertilizante, especialmente o N, visto que doses superiores ao requerimento da cultura possam contribuir para aumentar os níveis de nitrato no solo causando poluição de mananciais (SPIERTZ, 2010).

Atualmente a adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar é realizada em sua maior parte de acordo com a experiência dos técnicos de cada região. Não há uma recomendação elaborada para a cultura, pois a disponibilidade do nutriente no solo é variável e de difícil quantificação. A dose recomendada em soqueiras, baseada em curvas de respostas, é de 100 kg ha⁻¹ de N. Para cana-planta as doses de nitrogênio são de 60 kg ha⁻¹ de N (BENEDINI; PENATTI, 2008).

Já o manual de adubação e correção de solos do estado de São Paulo (Boletim 100) publicado pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (RAIJ et al., 1996) é um pouco mais específico e considera produtividade esperada como ilustrado na tabela 1.

Tabela 1 - Recomendação de N para cana-de-açúcar segundo Boletim 100 (IAC) (RAIJ, et al., 1996)

Dose de nitrogênio kg ha ⁻¹	Produtividade esperada t ha ⁻¹
60	< 60
80	60 - 80
100	80 - 100
120	> 100

Estas recomendações reforçam a necessidade da pesquisa em buscar soluções para melhor manejar o uso de nitrogênio na cultura.

A maior parte da adubação nitrogenada em cana é aplicada ao solo no plantio, tratando-se de “cana planta”, ou logo após o corte em “cana soca”, devido à facilidade e economia de operações mecanizadas. Alia-se a isso maior facilidade de tráfego de máquinas na lavoura durante este período, além do fato de que a biota do solo retém muito nitrogênio para equilibrar a relação carbono/nitrogênio que viabiliza a decomposição da palhada do corte anterior, vindo à biota do solo a competir com a planta, pela extração de nitrogênio. Mesmo assim, justamente nos momentos onde a extração de nitrogênio pela planta costuma ser menor, pois existe pouco crescimento vegetal, é que se dá a adubação. Resultando muitas vezes em sobra de nutriente no início do ciclo da cultura e deficiência no meio e fim do ciclo vegetativo principalmente em solos de textura franca e arenosa.

O N é de fundamental importância ao desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar e deve ser suprido de modo adequado à cultura, objetivando áreas mais produtivas. Assim é possível baixar custos e aumentar a viabilidade econômica e ambiental das lavouras já existentes, evitando com isto o aumento da fronteira agrícola pela cultura, em virtude da crescente demanda de seus derivados, o que pode vir a causar algum impacto ambiental direto e ou indireto, trazendo argumentos para a comunidade internacional contra o biocombustível brasileiro.

2.2 Agricultura de precisão

Atualmente a ordem na agricultura é a racionalização de insumos e custos, e os conceitos de Agricultura de Precisão (AP) estão mais presentes a cada dia. Segundo (MOLIN, 2001) AP é primeiramente um sistema de gerenciamento da produção agrícola, que conta com equipamentos e procedimentos focados na otimização das áreas de produção tendo como elemento principal o manejo da variabilidade espacial.

O melhor gerenciamento de insumos agrícolas propiciados pela AP pode propiciar redução do impacto ambiental decorrente da atividade agrícola (MOLIN, 2009).

A agricultura de precisão traz oportunidades para melhorar o manejo da produção de cana-de-açúcar (BRAMLEY; QUABBA, 2002).

As áreas plantadas com cana-de-açúcar, apesar de parecerem visualmente homogêneas, são bastante heterogêneas em suas características de solo e nutrientes, com grandes variações, devido a manchas de solo, oriundas principalmente de diferenças de textura e estrutura, teor de matéria orgânica, entre outros nutrientes. (BERNER, 2007)

Uma das técnicas de AP é a aplicação em taxa variável de nutrientes, porém, para que se possa executá-la é necessária a coleta de dados georreferenciados com uso de um sistema que identifique exatamente um ponto e um valor para uma variável, neste caso o nitrogênio.

Esse procedimento pode ser feito por meio de coleta de amostras georreferenciadas, análise em laboratório, interpolação dos dados obtidos das análises com o auxílio de algum software de SIG (sistema de informação geográfica), com a consequente geração de um mapa de aplicação. Porém esse procedimento é trabalhoso, caro devido às análises de laboratório e exige muito conhecimento para ser executado. Além disso, se torna demorado devido ao tempo exigido pelo laboratório para processar as amostras, sendo que quando os resultados estão prontos, as condições de campo já se alteraram devido à dinâmica do próprio nitrogênio e de crescimento vegetal, não gerando mais confiabilidade aos resultados. Desta forma, a

técnica de coleta e amostragem não se torna viável em nível de campo em se tratando de medição de nitrogênio (BREDEMEIER, 2005).

Em vista dessa problemática, atualmente vem se trabalhando com a técnica de sensoriamento remoto através do uso de sensores para substituir as análises de laboratório e criar o mapa de aplicação de nitrogênio em curto espaço de tempo ou em tempo real.

Desta forma cabe a um sensor medir esta variação encontrada na cultura, e baseado em um algoritmo agrônômico previamente calibrado para a cultura, é possível inferir uma dose de nitrogênio a ser aplicada, de acordo com as leituras do sensor em cada ponto de uma lavoura.

Nesse caso não é necessária a geração de mapas de aplicação para futura intervenção, que é realizada no mesmo instante e com a mesma máquina onde o sensor está instalado. É necessário transitar apenas uma vez na lavoura para medir a extração de nitrogênio pela cultura, transformar esta medição em um valor a ser aplicado de fertilizante nitrogenado e aplicá-lo, tudo ao mesmo tempo, gerando-se no final o mapa da operação realizada “as applied”.

2.3 Sensoriamento remoto, características e comportamento vegetal.

A luz incidente sobre a superfície vegetal em seu espectro total pode ser refletida, absorvida ou transmitida. As quantidades relativas refletidas, transmitidas e absorvidas são função da superfície e variam em cada comprimento de onda, como ilustrado na figura 4 (JACKSON; HUETE, 1991; BREDEMEIER, 2005).

Figura 4 - Características ópticas (absorbância, refletância e transmitância) de uma folha verde como função do comprimento de onda detectado. Adaptado de (BREDEMEIER, 2005)

A refletância vegetal é afetada pela estrutura interna das folhas (TUCKER, 1979 apud EITEL et al., 2008), fundamentalmente em função da dispersão no mesófilo das folhas (WOOLLEY, 1971) (Figura 5).

Figura 5 - Interação conceitual entre folha da cultura e luz (Adaptado de material técnico Interno Yara International)

Da luz que incide sobre a folha do vegetal, parte é prontamente refletida pela camada superior da folha (refletância especular) a outra parte sofre interações, sendo que parte da luz que penetra é absorvida no mesófilo, parte transpassa a folha se perdendo e finalmente a última parte é refletida como radiação difusa. Esse comportamento é distinto em diferentes comprimentos de onda (JACKSON; HUETE, 1991), o que forma a base para o uso de bandas do espectro como fonte de informação.

2.3.1 Sensoriamento remoto, identificação em variações da nutrição nitrogenada e biomassa

Plantas expressam sua deficiência por N a partir de alguns indicadores, sendo que o de maior potencial, apontado pela pesquisa e atual indústria do ramo e a mensuração da refletância da luz que incide sobre o vegetal a ser avaliada. Os

chamados sensores de refletância atuam captando a luz na região do visível e/ou do infravermelho próximo, atuando a centímetros ou a poucos metros das plantas, e já são utilizados para a leitura, interpretação e recomendação de N em taxa variável e tempo real em grandes áreas (MOLIN, 2009).

Porém apenas uma pequena faixa do espectro tem sido utilizada para o sensoriamento de nitrogênio em plantas; trata-se da região do visível e do infravermelho próximo compreendidos entre 400 e 850 nm.

Na região do visível (400 – 700 nm) a clorofila é responsável pela absorção de luz, se dando o pico de absorção aproximadamente aos 670 nm, onde então se inicia a transição para o infravermelho próximo, com uma mudança abrupta denominada REIP (red edge inflection point) onde então a absorbância diminui drasticamente e a refletância aumenta na proporção inversa (REUSCH, 1997).

A região de interesse no espectro eletromagnético e a refletância da cultura da cana-de-açúcar para a mesma são apresentadas na figura 6.

Figura 6 - Comportamento espectral da cultura da cana-de-açúcar. Adaptado de (ABDEL-RAHMAN et al., 2010) e (GRISHAN et al., 2010)

Observa-se que entre 400 e 500 nm, que corresponde ao azul no espectro, a refletância é baixa, havendo um aumento significativo entre 500 e 600 nm, que

corresponde à refletância na cor verde. Já entre 600 e 700 nm há um declínio na refletância sendo que essa região, ainda na faixa correspondente ao visível, refere-se à região do vermelho. Aproximadamente aos 700 nm tem-se um aumento abrupto de refletância da cultura que equivale à transição da faixa do visível para o infravermelho, mais especificamente do vermelho, para o infravermelho próximo (REUSCH, 1997).

2.3.2 Sensoriamento remoto da nutrição nitrogenada a partir de sensores ópticos terrestres

A maioria dos sensores ópticos ativos terrestres (SOATs) atuam em comprimentos de onda dentro do visível e infravermelho próximo onde são encontradas significativas diferenças em refletância vegetal (figura 4), possibilitando a combinação de diferentes comprimentos de onda na elaboração de índices de vegetação (IV) que expressam a nutrição nitrogenada (Figura 6). O IV clássico e mais conhecido é o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ou Índice que vegetação por Diferença Normalizada (SOLARI et al., 2008), calculado a partir da normalização de bandas no vermelho e no infravermelho próximo, sendo seus valores adimensionais apresentados na escala de -1 a 1.

Há inúmeros trabalhos em nível mundial realizados com o uso de SOATs, entre os realizados no Brasil; na cultura do algodão (MOTOMIYA, 2009), Nas culturas de trigo e milho (POHV, 2007) e trigo e cevada (GROHS et al., 2009).

Dentre eles (INAMASU et al., 2006), (FRASSON, 2007) e (AMARAL, 2010) trabalharam com SOATs na cultura da cana-de-açúcar, sendo que ambos mostraram que os sensores são capazes de identificar diferenças na cultura oriundas de variabilidade na nutrição nitrogenada. Porém ambos trabalharam com sensores usando faixas do espectro no visível e infravermelho próximo gerando o índice de vegetação clássico NDVI.

Trabalhos mais recentes estão apontando que índices de vegetação que fazem uso de comprimentos de onda situados na região do visível para o infravermelho próximo (REIP) possuem melhor capacidade de estimar nitrogênio e biomassa na

cultura (REUSCH, 2005; JASPER et al., 2006; HEEGE et al., 2008; MOKHEHE; AHMED, 2010). Adicionalmente se mostra não afetado pelo efeito de variedades, densidade de plantio e mostra menor saturação por altas doses de nitrogênio em final de ciclo cultural, comparado às medições feitas com o tradicional NDVI (JASPER et al., 2009).

Trabalho recente comparando mais de 10 índices de vegetação com vistas a estimar nitrogênio e biomassa aponta melhores resultados para os índices fazendo uso de comprimentos de onda situados no REIP comparados com aqueles que utilizam dados de refletância oriundos da região do visível no espectro (STRENNER, 2010).

O uso do N-Sensor se dá em sua maior parte na Europa, em função da informação já disponível de uso em culturas de cereais e o apoio governamental, porém não há informação disponível na literatura para o uso do sensor por produtores de cana-de-açúcar nos trópicos, havendo uma grande oportunidade para o uso do equipamento visando à economia na aplicação de nitrogênio em plantações de cana-de-açúcar em países em desenvolvimento, porém antes disso o sensor deve ser calibrado, validado e testado para a cultura da cana-de-açúcar (SINGH et al., 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e áreas da pesquisa.

A pesquisa foi conduzida em áreas no entorno da usina São Martinho S.A., localizada no município de Pradópolis (21°19'11" S, 48°07'23" O), região de Ribeirão Preto, SP no período 2009/10. Oito talhões em cultivo comercial de cana-de-açúcar (Figura 7) foram avaliados, variando de 16 a 21 hectares cada.

Figura 7 - Distribuição espacial das oito áreas de cana de açúcar estudadas

Dentre os talhões estudados, quatro foram colhidos no início da safra (maio/junho, 2009) o que corresponde à estação seca e fria do ano; os demais quatro

talhões foram colhidos no final da safra (outubro/novembro, 2009), correspondendo ao desenvolvimento da cana na estação quente e chuvosa do ano. A investigação incluiu áreas de primeiro, segundo e terceiro cortes.

Os quatro primeiros talhões foram plantados com as variedades CTC 9 sobre solo arenoso e RB 855453 em solo argiloso, monitorados na primeira e segunda soqueiras (soca) no solo arenoso e primeira e terceira no solo argiloso, todos colhidos na estação seca. Os quatro últimos talhões foram plantados com as variedades CTC 2 em solo arenoso e SP 80-3280 em solo argiloso, também monitorados em primeira e segunda soqueiras no solo arenoso e primeira e terceira no solo argiloso, e colhidos durante a estação chuvosa (Tabela 2).

Tabela 2 - Áreas estudadas no projeto com suas variáveis

Talhão	1	2	3	4	5	6	7	8
Variedade	CTC 9		RB 855453		CTC 2		SP 803280	
Área (ha)	21	16	18	17	20	18	21	16
Colheita	mai/jun (estação seca)				out/nov (estação chuvosa)			
Solo	arenoso		argiloso		arenoso		argiloso	
Soca	1 ^a	2 ^a	1 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	1 ^a	3 ^a

3.1.1 Investigação dos talhões escolhidos

Visando um conhecimento mais amplo dos talhões escolhidos cada um teve o solo amostrado em grade regular de um hectare (100 x 100 m) georreferenciada (Figuras 8) na profundidade de 0 – 0,2 m. Dez sub-amostras foram coletadas a 0,2 m da linha de plantio para formar a amostra, sendo estas coletadas em um círculo com raio de 5 m no entorno do ponto amostral.

Após processadas as análises de macro nutrientes (análise de rotina), foram confeccionados mapas onde os diversos parâmetros relativos à fertilidade do solo foram espacializados através de interpolação pelo método da mínima curvatura (spline). A interpolação foi dividida em classes de acordo com o teor do nutriente indicado na amostra tendo por base a recomendação de adubação e calagem para o estado de São

Paulo (RAIJ et al., 1996). Realizou-se este trabalho visando investigar a variabilidade natural das áreas, com o objetivo de sanar eventuais dúvidas futuras relativas à variabilidade das diversas medições realizadas relacionadas à e ao sensor.

1

2

3

4

5

6

Figura 8 - Contornos das oito áreas investigadas com a respectivos pontos amostrais de solo

3.1.2 Adubação das áreas.

Após a amostragem de solo e antes do início das amostragens de planta, foi realizada a adubação dos oito talhões em doses uniformes de fósforo e potássio, conforme prática de manejo da usina, com base em recomendações do Centro de Tecnologia Canaveira (CTC) e com uma dose uniforme de 100 kg ha^{-1} de nitrogênio, que é a dose mais rentável para todos os tipos de solo (CTC, 2008).

As áreas nos melhores ambientes de produção, ou seja, em solo argiloso receberam vinhaça, sendo o N e K contido nesta descontado da dose de fertilizante mineral aplicada. Talhões em solo arenoso receberam adubação mineral na forma de NPK e os demais em solo argiloso como nitrato de amônia. O fertilizante foi aplicado superficialmente sobre as fileiras da cultura com o veículo aplicador Uniport NPK Canavieiro (Máquinas Agrícolas Jacto, Pompéia, SP) que utiliza mecanismo distribuidor pneumático.

3.2 Sensor de nitrogênio e biomassa

O sensor utilizado foi o Yara N-Sensor™ ALS (Yara International ASA, Duelmen, Alemanha). O N-sensor ALS (Active Light Source) é um sensor que emite sua própria luz e garante mais autonomia ao sistema, pois não depende da luz do sol para atuar.

O sensor é composto de uma armação em estrutura metálica que o fixa no veículo onde é instalado, sobre a base da estrutura metálica é formado o corpo do sensor em fibra de vidro. Internamente em seu centro este possui uma unidade processadora, podendo ter a seu lado um receptor GPS que é opcional. Nas duas extremidades estão instaladas as cabeças de medição (Figura 9).

Figura 9 - Construção interna do N-Sensor ALS. (adaptado de material técnico Yara)

Em cada cabeça de medição (figura 10) é obtida a refletância de luz do dossel da cultura fazendo uso um transmissor emitindo luz de xenon, com facho de luz na frequência de 10 Hz, fornecendo luz multi-espectral (650-1100 nm) de alta intensidade, e um detector com dois filtros de interferência e fotodiodos com 730 e 760 nm de comprimento de onda (JASPER, 2009).

Figura 10 - Detalhe do sistema de medição do N-Sensor ALS (adaptado de material técnico Yara)

O sensor utiliza um sistema automático de compensação da luz ambiente que consiste em fazer as medições do detector no dobro da frequência do emissor de xênon, descontando a luz ambiente nas leituras captadas pelos fotodiodos (Figura 11).

Figura 11 - Diagrama do tempo de medição do detector e do flash de xenon do N-Sensor ALS. (adaptado de material técnico Yara)

O sensor trabalha montado sobre a cabine do veículo que faz a adubação nitrogenada, instalado transversalmente ao equipamento, fazendo com que cada uma das duas cabeças de medição fique apontada para uma lateral da máquina em uma visão oblíqua da cultura projetando uma elipse de medição de aproximadamente três metros para cada lado da máquina quando instalado a cerca de três metros do nível do solo sobre a máquina (figura 12). As cabeças de medição são autônomas e idênticas,

porém normalmente trabalham conjuntamente na geração do índice de vegetação (IV) do sensor.

Figura 12 - Esquema da disposição das áreas amostradas pelo sensor N-Sensor ALS

Há diferenças significativas de refletância vegetal em função da nutrição nitrogenada em meio à amplitude do espectro eletromagnético em seus diversos comprimentos de onda. Essas diferenças no visível são decorrentes do teor de clorofila e no infravermelho próximo são função da biomassa vegetal. O índice de vegetação gerado pelo sensor se baseia na refletância dos comprimentos de onda de 730 e 760 nm, na região do NIR (infravermelho próximo) que é o local onde acontece uma mudança abrupta de refletância em função da transição entre o visível e o infravermelho (Figura 13) Jasper (2009), não havendo influência da região do visível onde existe diferença de tons de verde por características varietais e não por teores de N, o que poderia influenciar negativamente a atuação do sensor.

Figura 13 - Curva de refletância vegetal e variação em função de doses de N. (adaptado de material técnico Yara)

As leituras de refletância são transformadas em uma razão numérica ou índice de vegetação (IV) que expressa variabilidade conforme equação 8 (STRENNER, 2010) apud (JASPER, 2009)

$$IV = 100 * (\ln R760 - \ln R730) \quad (8)$$

O sensor foi montado sobre o veículo e ligado a um computador de campo (monitor interno) e este foi ligado a um receptor GPS e os dados armazenados em uma unidade de memória conforme diagrama da figura 14.

Figura 14 - Diagrama de instalação do sensor. (adaptado de material técnico Yara)

3.3 Veículo de transporte do sensor.

O sensor foi montado atrás da cabine de um veículo Uniport NPK Canavieiro que possui vão livre de 1,4 m e bitola ajustável, não causando dano à lavoura em sua passagem por entre as fileiras de cultura durante o processo de leitura do índice de vegetação (Figura 15).

Figura 15 - Montagem do sensor Atuação do Yara N-Sensor sobre o veículo

3.4 Procedimento amostral

Durante a pesquisa cada talhão foi avaliado (“escaneado”) com o sensor e amostrado três vezes no ciclo inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar, aos 0,2, 0,4 e 0,6 m de altura média de palmito/colmo, ou seja, a altura entre o nível do solo e a primeira folha com aurículas visíveis (figura 16).

Figura 16 - Lavouras de cana-de-açúcar no momento em que foram realizadas as medições com o sensor e amostragens de planta

O veículo fez leituras passando por intervalos de dez fileiras (15 m). Depois de coletados, os dados do IV do sensor e suas coordenadas foram transferidos para o Sistema de Informação Geográfica (SIG) SSToolbox (SST Development Group, Stillwater, OK, USA) e filtrados, eliminando dados de manobras alocados fora dos limites do talhão e pontos discrepantes próximo das bordas, onde o sensor escaneou superfícies não cultivadas. Os dados válidos foram interpolados pelo método do inverso da distância ao quadrado, pois devido ao grande volume de dados obtidos pelo sensor (aproximadamente 300 ha^{-1}), não se faz necessário o uso de técnicas de geoestatística na interpolação. A superfície foi gerada no formato raster, em células de $10 \times 10 \text{ m}$ (100 m^2) divididas em cinco classes, classificadas por quebras naturais, visando expor a variabilidade encontrada do IV em cada talhão (figura 17).

Figura 17 - Leitura com sensor (A), trajeto na lavoura (B), mapa interpolado (C)

Após a obtenção do mapa, dois pontos de amostragem foram alocados no meio de áreas representativas de cada classe gerada na interpolação, somando 10 pontos amostrais por talhão em cada altura de medição. Estes pontos foram exportados a um computador de mão ou PDA (personal digital assistant) utilizando o programa operacional Windows Mobile 5.0™ contendo um software de navegação (Field Rover II, SST Development Group, Stillwater, OK, USA) conectado a um receptor GPS e com este se navegou até cada ponto amostral. Nestes estabeleceu-se uma parcela constituída de quatro fileiras da cultura (4 x 1,5 m) por 5 m de comprimento (30 m²) onde definiu-se o número de perfilhos contados nos 20 metros de fileiras e a altura média dos perfilhos foi mensurada. Amostras destrutivas de planta foram retiradas e a biomassa acima do solo quantificada pelo corte de sub-parcelas de 1,5 m em três fileiras, somando 4,5 m de biomassa colhida (figura 18).

Figura 18 - Mapa com pontos amostrais (A), arquivo exportado para navegação (B), ponto amostral (C)

As amostras de biomassa foram pesadas no campo logo após a colheita, com o objetivo de obter o dado de matéria fresca utilizando-se uma balança digital portátil de gancho com resolução de 0,02 kg previamente calibrada. Em seguida as amostras foram levadas ao laboratório, moídas e misturadas visando homogeneização e sub amostras de 250g foram retiradas, desidratadas em estufa a 65 C° por 72 horas para quantificar a matéria seca da parte aérea. Posteriormente o teor de N total de cada amostra foi obtido (método Kjeldahl) e a extração de N calculada. O teor de N contido na biomassa (matéria seca) pelo seu peso serviu de base para obtenção de dados para correlacionar a real absorção de N com absorção estimada de N obtida a partir das leituras do sensor. Leituras do sensor nos pontos amostrais foram relacionadas com os reais parâmetros da cultura amostrados, funções de calibração específica foram obtidas, e a capacidade do sensor em prever a biomassa vegetal e absorção de N foi investigada.

Adicionalmente introduziu-se o uso de um clorofilômetro manual (N-Tester, Yara International ASA, Duermen, Alemanha) com a finalidade de confrontar as leituras do sensor nos pontos amostrais com as leituras do teor de clorofila e teores de nitrogênio das amostras vegetais obtidas dos pontos amostrais. O clorofilômetro consiste em um equipamento manual portátil de estimativa do teor de clorofila, que está relacionada a

nutrição nitrogenada da planta, Mensurando a transmitância de bandas de luz através do limbo foliar da planta. Trabalhos com o aparelho indicam que pode haver relação entre teor de clorofila e o teor de nitrogênio no limbo foliar e consequentemente na planta (ARGENTA et al., 2001a). A mensuração de clorofila consiste basicamente em colocar a folha da planta entre duas superfícies na área de medição do equipamento, sendo que uma possui luzes de LEDs com os comprimentos de onda de luz desejados e a outra superfície possui uma célula fotovoltaica que detecta o quanto de luz passou o limbo foliar e o quanto foi impedido ou absorvido pela folha analisada (Figura 19).

Figura 19 - Forma de uso do clorofilômetro manual em cana-de-açúcar

Em cada ponto amostral, foi obtido o teor de clorofila pela média de 30 repetições de leitura do aparelho realizadas no limbo foliar de diferentes folhas, porém sempre no terço médio da folha +1 sem permitir interferência da nervura central.

3.5 Forma de análise dos resultados

Inicialmente os dados foram analisados individualmente, e posteriormente analisados em comparação com o sensor em estudo. As análises individuais foram realizadas levando em consideração as alturas médias de palmito/colmo como

tratamentos e dentro destes a existência de variáveis implantadas para obter variabilidade (estação, solo, soqueira e variedade).

Os dados são apresentados em forma de box plot visando apresentar o comportamento das variáveis implantadas. Posteriormente uma análise de variância (ANOVA) foi executada, para revelar a existência de significância, sendo os dados significativos, foi realizada a análise de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância dentro dos tratamentos. Esse teste revela comportamentos semelhantes e distintos dentro da significância estipulada e tem por objetivo comparar os parâmetros da mesma avaliação entre si e fornecer uma ideia de comportamento para as diferentes variáveis implantadas na mesma avaliação.

Para estudar o sensor em relação aos tratamentos com suas variáveis, especialmente biomassa e extração de N, adotou-se modelos de regressão linear comparando parâmetros mensurados em campo e preditos pelo sensor utilizando o software Sigma Plot 10.

Foram verificados os valores obtidos para o coeficiente de determinação, a significância do intercepto e do coeficiente angular da reta e o erro padrão da estimativa (RMSE). Os testes de normalidade dos resultados foram realizados antes da adoção dos modelos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição cronológica das atividades.

As atividades de pesquisa nos oito talhões comerciais de cana-de-açúcar avaliados se iniciaram logo após o corte/colheita da cultura, tendo como primeira atividade a amostragem de solo georeferenciada (tabela 3).

Tabela 3 - Distribuição temporal da colheita e amostragem de solo

Lavouras					Data	
Nº	solo	soca	estação	variedade	colheita	Amostragem de solo
1	arenoso	1 ^a .	seca	CTC 9	4/6/2009	3/7/2009
2	arenoso	2 ^a .			13/7/2009	21/7/2009
3	argiloso	1 ^a .		RB	27/5/2009	1/6/2009
4	argiloso	3 ^a .			29/5/2009	2/6/2009
5	arenoso	1 ^a .	chuvosa	CTC 2	22/10/2009	27/10/2009
6	arenoso	2 ^a .			24/10/2009	27/10/2009
7	argiloso	1 ^a .		SP	4/11/2009	16/11/2009
8	argiloso	3 ^a .			14/11/2009	16/11/2009

As colheitas referentes à época seca do ano se deram entre final de maio até início de julho de 2009, já para a época das chuvas, entre final de outubro e início de novembro do mesmo ano. As amostragens de solo foram executadas logo que possível, após o corte da cultura e liberação do talhão, porém antes de qualquer aplicação de insumo agrícola.

Após colhidos e amostrados para solo, os talhões foram monitorados quanto à altura da cultura, sendo executadas as leituras do sensor e amostragem de planta para as diferentes alturas de palmito/colmo nas datas presentes na tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição temporal das medições com o sensor e amostragem vegetal

Lavouras					Data da avaliação		
Nº	solo	soca	estação	variedade	0,2 m	0,4 m	0,6 m
1	arenoso	1 ^a .	seca	CTC 9	11/8/2009	5/10/2009	3/11/2009
2	arenoso	2 ^a .			11/8/2009	5/10/2009	3/11/2009
3	argiloso	1 ^a .		RB	18/8/2009	29/9/2009	21/10/2009
4	argiloso	3 ^a .			31/8/2009	13/10/2009	3/11/2009
5	arenoso	1 ^a .	chuvosa	CTC 2	25/11/2009	16/12/2009	4/2/2010
6	arenoso	2 ^a .			25/11/2009	16/12/2009	4/2/2010
7	argiloso	1 ^a .		SP	30/11/2009	-----	6/1/2010
8	argiloso	3 ^a .			16/12/2009	6/1/2010	4/2/2010

No período seco e frio do ano, a cultura necessitou cerca de dois meses para chegar a altura da primeira avaliação (0,2 m) em áreas de solo arenoso e 2,5 meses em áreas sobre solo argiloso. Posteriormente, com o início das chuvas e aumento das temperaturas, aguardou-se aproximadamente um mês e meio até a segunda avaliação (0,4 m) e mais um mês para a terceira avaliação (0,6 m).

Já no período chuvoso e quente do ano foi necessário apenas um mês entre o corte e a primeira avaliação (0,2 m) e aproximadamente mais um mês para a segunda avaliação (0,4 m). A última avaliação deveria ter sido executada aproximadamente 20 dias após a segunda, devido às altas temperaturas e precipitação do período, porém ocorreram problemas mecânicos no veículo que provocaram a sua parada total. Tentativas de conserto local foram ineficazes e alternativamente optou-se por deslocar uma segunda máquina para a usina, transferir e instalar o sensor na mesma e dar continuidade com os trabalhos. Porém quando isso foi possível a cultura que estava em estágio adiantado de crescimento o que resultou em problemas de saturação do sinal do sensor.

4.2 Clima da região

Segundo Rolin et al. (2007) que refinou a classificação climática de Köppler para o estado de São Paulo, o clima da região onde o estudo foi conduzido é o AW (clima tropical com estação seca de inverno).

O ano agrícola em que foi realizada a pesquisa, ou seja, abril de 2009 a março de 2010 foi considerado chuvoso para a região onde se localizam os talhões estudados. A figura 20 mostra as médias mensais de precipitação e temperatura para ano agrícola pesquisado e média histórica para um período de 30 anos obtida a partir da integração da média histórica 1961-1990 para Ribeirão Preto – SP e média histórica 1941-1970 para Jaboticabal – SP, oriundos de dados meteorológicos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011). Ambas as cidades estão a nordeste e noroeste, respectivamente, da região onde se situam os talhões avaliados, como pode ser visto na figura que mostra a distribuição das mesmas na região. Os dados meteorológicos locais foram obtidos da estação meteorológica da Fazenda Aparecida, pertencente à usina, que se localiza ao leste de Pradópolis em uma área central em relação às áreas da cultura amostradas.

Figura 20 - Precipitação e temperatura mensal, 2009/10 e históricas da região

Observa-se na figura XX que as temperaturas entre abril de 2009 e março de 2010 seguiram o padrão histórico de uma forma geral, tendo por exceção o mês de junho que foi mais frio que a média, o que veio a atrasar a brotação da cana colhida em maio, porém em julho as temperaturas foram acima da média. Ainda percebe-se que o mês de novembro apresentou temperaturas salientes acima da média. Outra observação interessante é que, com exceção do mês de junho, todos os meses avaliados apresentaram temperaturas superiores à média histórica oriunda de dados coletados no século passado em distâncias lineares não superiores a 25 km de onde os dados atuais foram obtidos.

Quanto às precipitações, o ano agrícola 2009/10 começou tendo chuvas semelhantes às médias históricas até o mês de julho, que aliado às baixas temperaturas do período atrasou o rebrote inicial da cana colhida na estação seca. Em agosto e setembro as chuvas foram superiores ao dobro da média histórica, já em outubro quando se deu a colheita das lavouras do período chuvoso, a precipitação ficou um pouco abaixo da média histórica, porém não houve déficit hídrico em virtude da

água armazenada dos meses anteriores. Em novembro e dezembro a precipitação chegou perto do dobro da média histórica, chovendo mais de 450 mm no mês de dezembro de 2009. Em janeiro a precipitação retornou a valores normais para o período e voltou a subir em fevereiro, ficando um terço acima da média histórica. Em março a precipitação caiu para um terço da média do período, porém não teve mais influência sobre o trabalho de pesquisa, pois as últimas avaliações (aos 0,6 m de altura) foram realizadas no começo de fevereiro. Em resumo o ano agrícola teve ótima disponibilidade hídrica, propiciando bom desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar.

4.3 Fertilidade do solo

As amostras de solos coletadas geraram mapas dos diversos atributos do solo (anexo) que se mostram importantes na medida em que revelam a existência e origem de variabilidade espacial dos diversos fatores importantes ao desenvolvimento da cultura. A Capacidade de troca de cátions (CTC) mostrou-se bastante variável dentro dos talhões, apontando áreas de maior potencial produtivo e áreas que necessitam de investigação. A CTC apresentou-se consideravelmente mais alta nas áreas de solo argiloso, o que já era esperado em função da maior área superficial e quantidade de cargas existentes nestes solos.

A matéria orgânica (MO) também apresentou variabilidade de até 40% dentro de um mesmo talhão e assim como para a CTC, os maiores valores de MO foram encontrados nos solos argilosos, que propiciam uma maior proteção contra a oxidação da MO dentro de seus coloides e essa MO também contribui com a CTC desses solos argilosos.

Em sete dos oito talhões observou-se presença de alumínio em algum ponto do talhão; este é tóxico à cultura da cana e prejudica a produção. No talhão 3, em que não se encontrou alumínio, houve presença de hidrogênio, o que indica que este talhão também não está na condição de fertilidade ideal, visto que o hidrogênio ocupa cargas do solo que poderiam estar ocupadas por bases.

A saturação por bases (V%) se apresentou níveis entre baixo e médio de forma geral para todos os talhões, com a presença de áreas de nível considerado alto em alguns talhões, sem distinção de solo. Já locais de V% muito baixo, ou muito alto não foram encontrados, o que indica que não há bases sobrando e nem áreas com problemas muito sérios de fertilidade.

Quanto ao potencial de hidrogênio (pH), que no caso dos solos tropicais normalmente apresentam problemas de acidez, observou-se acidez de alta a muito baixa, porém não muito alta, o que indica o uso de corretivos nas áreas. Porém foi possível encontrar variabilidade, de alta a muito baixa dentro do mesmo talhão, indicando à necessidade da correção do solo em taxa variável do corretivo, existindo o problema de acidez em ambas as classes de solo.

Magnésio (Mg) se apresentou-se de forma geral com valores altos para ambas as texturas de solo, porém em talhões de ambos solos apareceram manchas de médios e baixos teores do elemento que deveriam receber atenção.

Cálcio (Ca) foi o único elemento do solo que se apresentou com altos teores em todos os oito talhões trabalhados, não devendo ser fonte de variabilidade na produção da cana-de-açúcar nestas áreas.

Umas das maiores variações entre os nutrientes foi para o Enxofre (S), sendo observadas áreas dentro de um mesmo talhão com teores baixos a altos, assim como talhão somente com altos teores e talhão com baixos teores, com tendência de solos arenosos apresentarem maiores deficiências do nutriente em relação aos solos argilosos.

Os solos brasileiros costumam ser fracos em fósforo (P), o que não foi diferente para os oito talhões avaliados; teores altos e muito altos foram apenas encontrados em pequenas áreas isoladas dentro de talhões. De forma geral os solos argilosos apresentaram valores médios e baixos e os solos arenosos valores baixos e muito baixos de P.

O potássio, que é bastante extraído pela cana-de-açúcar apresentou, da mesma forma que o P, valores reduzidos após o corte da cultura quando da amostragem de solo. Nos quatro talhões situados em solo arenoso, os valores do elemento se encontraram entre baixo e muito baixo, indicando grande perda do elemento em solos de textura arenosa. Nos solos argilosos foram encontrados teores altos, médios e

baixos, e manchas de teores muito altos em dois talhões; nestes mesmos, os teores altos predominaram, já nos demais dois talhões em solo argiloso teores médios e baixos tiveram maior expressão.

Tais características de variabilidade da fertilidade dos solos mostra que deve-se esperar variabilidade na produção de biomassa dentro e entre talhões, oriunda de fatores que não nitrogênio. Porém o que irá guiar a calibração do sensor é a biomassa, pois o mesmo é majoritariamente um sensor de biomassa e posteriormente o teor de N contido nesta biomassa será usado como indicador da extração de N pela cultura no local, vindo este a servir de parâmetro para relacionar com as leituras do sensor, desta forma mitigando a influência de demais fatores.

4.4 Alturas e número de perfilhos

4.4.1 Alturas de palmito/colmo.

Assim como definido na metodologia, as amostragens deveriam se dar quando a altura entre o solo e a folha +1, ou seja, a altura do colmo/palmito fosse, de 0,2, 0,4, e 0,6 m, respectivamente. Porém não foi possível realizar todas as medições exatamente nas alturas médias estipuladas como pode ser visto na figura 21 que expressa a amplitude dos dados de altura com 5% a 95% dos dados concentrados entre o primeiro e terceiro quartis, apresentando a mediana entre estes.

Figura 21 - Altura média dos perfis nos pontos amostrais em box-plot nas três avaliações (0,2, 0,4, e 0,6 m) para os oito talhões avaliados

Na estação seca, devido ao baixo desenvolvimento da cultura as alturas em suas médias foram menores que o estipulado de 0,2 m. O terceiro talhão apresentou um desenvolvimento mais lento que o quarto, porem ambos foram amostrados nas mesmas datas, pois estavam próximos um do outro, mas distantes da usina. Na estação chuvosa as amostragens decorreram normalmente até o momento em que o veículo apresentou problemas mecânicos impossibilitando os trabalhos durante aproximadamente três semanas. Em consequência, a medição a 0,4 m de altura no talhão 7 foi perdida e as demais medições de 0,6 m foram realizadas com alturas acima do estipulado, principalmente nos solos arenosos.

A tabela 5 apresenta os valores da análise de variância para os dados de altura das plantas de cana-de-açúcar.

Tabela 5 - Análise de variância para os dados de altura das plantas de cana-de-açúcar nas avaliações

Altura (m)	0,2 m		0,4 m	0,6 m			
GL resíduo	72		72	72			
F tratamentos	5,10 **		3,73 **	14,31 **			
Média geral	0,16		0,36	0,74			
Desvio-padrão	0,04		0,09	0,17			
DMS (5%)	0,05		0,12	0,24			
CV (%)	24,35		23,85	23,30			
Teste de Tukey a 5%:							
Nº	solo	soca	estação	variedade			
1	arenoso	1ª	seca	CTC 9	0,15 abc	0,44 a	0,65 cd
2	arenoso	2ª			RB	0,14 bc	0,42 a
3	argiloso	1ª		0,12 c		0,29 b	0,46 d
4	argiloso	3ª		0,13 c	0,34 ab	0,61 cd	
5	arenoso	1ª	chuvosa	CTC 2	0,19 ab	0,42 a	1,08 a
6	arenoso	2ª			0,16 abc	0,38 ab	1,00 ab
7	argiloso	1ª		SP	0,20 a	----- ---	0,71 c
8	argiloso	3ª			0,16 abc	0,33 ab	0,76 bc

Nível de significância: **: 1%; *: 5%.

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Obs: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias na mesma avaliação (colunas).

A análise de variância revelou que os dados de altura das plantas de cana-de-açúcar são significativos, fato que levou à análise de médias pelo teste de Tukey a 5%. Nesta observa-se que o terceiro talhão difere de vários outros, principalmente os da época chuvosa em especial aos 0,6 m de altura das plantas de cana-de-açúcar, e do primeiro e segundo talhões aos 0,4 m. No quinto e sexto talhões onde a medição de 0,6 m de altura das plantas foi muito atrasada, a altura das plantas diferem dos demais, exceção ao sexto que não difere do oitavo. Outra observação é que ao nível de 5% de significância talhões que compartilham variedades e solos não diferem, ou seja, parece que a soqueira não causou diferença significativa entre as alturas das plantas avaliadas.

4.4.2 Número de perfilhos

Foi contado o número de perfilhos por ponto amostral e os resultados são apresentados na figura 22.

Figura 22 - Número de perfilhos por ponto amostra (20 m de fileira, 30 m²) em box-plot nas três avaliações (0,2, 0,4, e 0,6 m) para os oito talhões avaliados

Na estação seca e fria de 2009 houve a tendência da brotação começar baixa, crescendo durante as avaliações, principalmente nos solos arenosos, já no argiloso a número de perfilhos aumentou da primeira para a segunda avaliação estabilizando na terceira avaliação. Na estação chuvosa e quente, nos solos arenosos o número de perfilhos aumentou da primeira para a segunda avaliação, vindo a diminuir na terceira, o que indica aborto de perfilhos. Já nos solos argilosos a brotação se manifestou máxima logo após o corte pelas boas condições hídricas e de temperatura vindo a

estabilizar no talhão 7 e decrescer o número de perfilhos no talhão 8. A análise estatística dos dados de número de perfilhos é apresentada na tabela 6.

Tabela 6 - Análise de variância para o número de perfilhos nas avaliações

Número de perfilhos					0,2 m	0,4 m	0,6 m
GL resíduo					72	72	72
F tratamentos					31,33 **	5,89 **	5,15 **
Média geral					393,64	509,84	460,84
Desvio-padrão					77,76	131,11	78,66
DMS (5%)					108,63	183,15	109,88
CV (%)					19,76	25,72	17,07
Teste de Tukey a 5%:							
Nº	solo	soca	estação	variedade			
1	arenoso	1 ^a	seca	CTC 9	256,80 d	348,50 c	445,70 bc
2	arenoso	2 ^a			257,30 d	413,00 bc	485,20 abc
3	argiloso	1 ^a		RB	285,40 cd	428,20 bc	429,50 bc
4	argiloso	3 ^a			389,80 bc	592,50 ab	570,60 a
5	arenoso	1 ^a	chuvosa	CTC 2	414,50 b	534,10 ab	384,60 c
6	arenoso	2 ^a			486,00 b	634,80 a	453,20 bc
7	argiloso	1 ^a		SP	392,50 bc	----- ---	423,20 bc
8	argiloso	3 ^a			666,80 a	563,80 ab	494,70 ab

Nível de significância: **: 1%; *: 5%.

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Obs: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias na mesma avaliação (colunas).

A análise de variância foi significativa entre os diferentes talhões na mesma avaliação, sendo que o teste comparativo de médias de Tukey aponta que o número de perfilhos foi significativamente maior na primeira avaliação (0,2 m) na época chuvosa em relação à época seca, exceto o quarto talhão que não diferiu da estação chuvosa, fato que pode ser explicado pelos maiores teores de fósforo e potássio no mapa de solos do talhão. Na segunda avaliação se manteve a tendência de maior número de perfilhos na estação chuvosa, porém não tão pronunciada. Já na terceira avaliação (0,6 m de altura de plantas) somente o quarto e quinto talhão diferiram, o que aponta uma estabilização do número de perfilhos em um mesmo patamar, indiferente de época e solo até este estágio de desenvolvimento. Igualmente à altura dos perfilhos, o número de perfilhos não foi estatisticamente significativo entre soqueiras de mesmo solo e

estação, exceto para os talhões 7 e 8 na primeira avaliação. Em relação a isso chama atenção o fato de que em ambas as estações e solos, as soqueiras que haviam recebido mais cortes estavam com um maior número de perfilhos, mesmo que não estatisticamente significativo.

4.5 Biomassa da cultura

O número de perfilhos e sua altura formam a fitomassa aérea (biomassa) que é apresentada em forma de box plot para as três avaliações de ambos os talhões na figura 23.

Figura 23 - Biomassa colhida (matéria seca) por ponto amostral em box-plot nas três avaliações (0,2, 0,4, e 0,6 m) para os oito talhões avaliados

Quanto à biomassa, na estação seca, os talhões em solos arenosos tiveram um comportamento semelhante. Já em solos argilosos, o quarto talhão avantajou-se, pois teve um maior número de perfilhos e altura de perfilhos, como já visto, apesar de serem colhidos com diferença de poucos dias o crescimento foi um pouco mais avantajado para o quarto talhão. A explicação para isso provavelmente esteja nos mapas de atributos do solo (anexos) que apontam maiores teores de fósforo e potássio para o quarto talhão em relação ao terceiro. Em relação às áreas da estação chuvosa os dados foram bastante semelhantes para a primeira e segunda avaliação, exceto a perda da segunda avaliação no sétimo talhão. Já a terceira avaliação que foi bastante atrasada, principalmente nos talhões de solo arenoso, mostrou grande dispersão de dados e maior biomassa. A análise de variância para os dados de biomassa é apresentada na tabela 7.

Tabela 7 - Análise de variância da biomassa (matéria seca) colhida nas avaliações

Tabela 1. Efeito do tamanho da biomassa (matéria seca) colhida nas áreas de solo							
Biomassa (Kg ha ⁻¹)		0,2 m	0,4 m	0,6 m			
GL resíduo		72	72	72			
F tratamentos		6,45 **	1,04	6,69 **			
Média geral		671,12	2 313,22	5 152,56			
Desvio-padrão		258,70	1 389,34	1 719,89			
DMS (5%)		361,39	1 940,83	2 402,59			
CV (%)		38,55	60,06	33,38			
Teste de Tukey a 5%:							
Nº	solo	soca	estação	variedade			
1	arenoso	1 ^a .	seca	CTC 9	690,37 abc	2 251,01 a	4 828,24 bcd
2	arenoso	2 ^a .			362,97 c	2 226,75 a	4 365,10 bcd
3	argiloso	1 ^a .		RB	381,48 bc	1 970,39 a	3 333,05 d
4	argiloso	3 ^a .			727,41 ab	2 975,48 a	6 704,52 ab
5	arenoso	1 ^a .	chuvosa	CTC 2	990,15 a	2 623,09 a	7 435,46 a
6	arenoso	2 ^a .			789,53 a	2 815,38 a	5 972,39 abc
7	argiloso	1 ^a .		SP	700,31 abc	----- --	4 134,28 cd
8	argiloso	3 ^a .			726,73 ab	1 821,82 a	4 447,48 bcd

Nível de significância: **: 1%; *: 5%.

GL: grau de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Obs: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias na mesma avaliação (colunas).

A análise de variância para os dados de biomassa mostra que os mesmos não foram significativos para a segunda avaliação (0,4 m de altura de plantas) sendo os mesmo iguais ao nível de 5% de significância. Na primeira avaliação, o segundo e terceiro talhões diferiram de alguns, porém os demais são iguais ao mesmo nível de significância. Isso acontece, pois estes dois talhões tiveram baixos valores de altura e número de perfilhos conjuntamente. Na terceira avaliação na estação seca o quarto talhão difere do terceiro, pois, como já comentado, parece estar em condição de fertilidade superior. Na estação chuvosa, a terceira avaliação difere para o quinto talhão, tendo o sexto a mesma tendência, provocada pelo atraso da mensuração, como pode ser visto na tabela 4 que mostra as datas das respectivas avaliações.

Aparentemente as diferenças estatísticas em biomassa só apareceram quando não foi possível respeitar as alturas estipuladas para as amostragens, ou seja, solo, soqueira e variedade aparentam não estar afetando significativamente a biomassa.

4.6 Análises de nitrogênio contido na biomassa

A concentração de nitrogênio presente nas amostras de biomassa colhidas nos pontos amostrais de cada avaliação é apresentada na figura 24.

Figura 24 - Valores de concentração de N (g Kg^{-1}) em box-plot nas três avaliações (0,2, 0,4, e 0,6 m) para os oito talhões avaliados

Observamos que a concentração de N nas plantas vai decrescendo com o desenvolvimento destas. Nos oito talhões avaliados, independente de estação do ano, variedade ou soqueira, a concentração de N foi maior na primeira avaliação (0,2 m), diminuindo na segunda (0,4 m) e apresentando valores ainda mais baixos na terceira avaliação. A tabela 8 apresenta a análise de variância para os dados de concentração de N nas plantas.

Tabela 8 - Análise de variância para os dados de concentração de N nas plantas nas avaliações

Concentrações de N (g Kg ⁻¹)					0,2 m	0,4 m	0,6 m
GL resíduo					72	72	72
F tratamentos					5,59 **	6,05 **	12,38 **
Média geral					17,09	14,45	12,54
Desvio-padrão					1,34	1,66	1,12
DMS (5%)					1,87	2,32	1,56
CV (%)					7,83	11,48	8,90
Teste de Tukey a 5%:							
Nº	solo	soca	estação	variedade			
1	arenoso	1 ^a	seca	CTC 9	17,70 a	15,76 ab	11,99 bc
2	arenoso	2 ^a			16,82 ab	15,34 abc	14,25 a
3	argiloso	1 ^a		RB	17,01 a	13,20 c	12,81 ab
4	argiloso	3 ^a			15,02 b	13,78 bc	11,03 c
5	arenoso	1 ^a	chuvosa	CTC 2	17,07 a	13,60 bc	11,34 bc
6	arenoso	2 ^a			16,90 a	13,44 c	11,52 bc
7	argiloso	1 ^a		SP	17,73 a	----- --	13,82 a
8	argiloso	3 ^a			18,44 a	16,68 a	13,58 a

Nível de significância: **: 1%; *: 5%.

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Obs: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias na mesma avaliação (colunas).

Apesar dos dados de concentração de nitrogênio apresentarem uma mesma tendência, houve diferença estatística entre os talhões dentro das mesmas avaliações. Porém os gráficos de alturas e número de perfilhos podem explicar parte das variações encontradas. Na primeira avaliação, o quarto talhão diferiu dos demais, porém foi o que teve o maior número de perfilhos na estação fria e seca quando os nutrientes são oriundos da soqueira, vindo possivelmente a diluir mais o N presente. Na segunda avaliação, lavouras que diferiram apenas pelo número da soqueira não se distanciaram, havendo explicações também no número de perfilhos, como pode ser observado na menor concentração de N no terceiro talhão, porém o mesmo também apresentou um maior número de perfilhos na mesma avaliação. Fato igual acontece na terceira avaliação entre os talhões 3 e 4, onde não só o número de perfilhos é maior no quarto, mas também a sua altura, vindo a explicar a menor concentração diferente estatisticamente entre estes. Porém a mesma explicação não cabe para o primeiro e

segundo talhões na última avaliação, sendo a explicação para tal diferença encontrada na data em que foi realizada a adubação do segundo talhão (06.10.2009), logo depois da segunda avaliação, o que acabou deixando os teores mais altos na terceira avaliação. Este fato aconteceu, pois esta área está a aproximadamente 50 km da usina e por razões de logística a adubação não ocorreu logo após o corte, como é a prática usual. Com estas justificativas pode-se deduzir que os teores de N estavam um pouco mais altos na terceira avaliação em áreas de solo argiloso, o que mostra uma maior capacidade retenção e nutrição em N para este solo.

4.7 Índice obtido com o clorofilômetro

A dispersão dos dados do clorofilômetro é apresentada na figura 25 para os oito talhões em suas três avaliações.

Figura 25 - Valores do índice medido pelo clorofilômetro em box-plot nas três avaliações (0,2, 0,4, e 0,6 m) para os oito talhões avaliados

Ao contrário dos demais, os dados obtidos com o clorofilômetro parecem ser divergentes, mas com tendências bem definidas. Observa-se, no box plot, a mesma tendência para diferentes soqueiras dentro da mesma época, solo e variedade. Porém, entre solos, variedades e estações existem grandes diferenças. Na estação seca as diferenças entre solo e variedade na média são superiores à dispersão encontrada em uma avaliação onde estão os pontos abrangendo os dois extremos dos valores lidos pelo clorofilômetro. Também se observa tendências diferentes entre solos e variedades para estações diferentes; como os solos foram escolhidos com texturas semelhantes, tudo indica que as diferenças encontradas se devem às variedades.

Observa-se estabilidade de valores em ambas as épocas nos solos argilosos; nos solos arenosos, na primeira estação observa-se aumento no teor de clorofila da primeira para a segunda avaliação e um declínio para a terceira. Já na condição de solo arenoso em estação chuvosa, decresceram os teores de clorofila mensurados pelo clorofilômetro da primeira para a última avaliação, sendo esta a única situação em que os valores do clorofilômetro seguiram os padrões de concentração de nitrogênio encontrados na parte aérea da cultura. Ressalta-se que o clorofilômetro avaliou o limbo foliar e a concentração de N mensurada nas análises de laboratório se refere à biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar na avaliação.

Os resultados da análise de variância para os dados obtidos com o clorofilômetro são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Análise de variância para os dados obtidos com o clorofilômetro nas avaliações

Avaliações com o clorofilometro					0,2 m	0,4 m	0,6 m
GL resíduo					72	72	72
F tratamentos					110,14 **	56,37 **	28,06 **
Média geral					525,80	538,15	498,38
Desvio-padrão					18,19	20,15	36,91
DMS (5%)					25,42	28,14	51,56
CV (%)					3,46	3,74	7,41
Teste de Tukey a 5%:							
Nº	solo	soca	estação	variedade			
1	arenoso	1 ^a .	seca	CTC 9	490,70 c	545,60 b	493,00 cd
2	arenoso	2 ^a .			423,70 d	503,00 c	486,10 cd
3	argiloso	1 ^a .		RB	589,20 a	610,00 a	581,60 a
4	argiloso	3 ^a .			598,20 a	608,60 a	566,80 ab
5	arenoso	1 ^a .	chuvosa	CTC 2	573,00 a	535,40 b	385,60 e
6	arenoso	2 ^a .			543,20 b	517,60 bc	454,90 d
7	argiloso	1 ^a .		SP	488,10 c	----- ---	517,30 bc
8	argiloso	3 ^a .			500,30 c	492,50 c	501,70 cd

Nível de significância: **: 1%; *: 5%.

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Obs: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias na mesma avaliação (colunas).

Para os solos argilosos, nas três avaliações, tanto na estação seca quanto na estação chuvosa, os dados mesurados pelo clorofilômetro não diferiram entre soqueiras, mas diferiram entre estações. Já nos solos arenosos os valores foram menos estáveis apresentando diferenças estatisticamente significativas entre soqueiras, na primeira e segunda avaliações no solo arenoso da estação seca e primeira e terceira avaliações no solo arenoso da estação chuvosa, o que é condizente com uma menor estabilidade do N em solos leves.

Ao contrário das demais análises onde talhões em solos iguais tinham comportamentos semelhantes, a análise referente ao índice obtido com o clorofilômetro mostra maiores semelhanças entre os talhões em solos arenosos da primeira estação com os de solos argilosos da segunda, assim como os talhões de solos argilosos da primeira estação com os de solos arenosos da segunda estação, ressalva a última avaliação deste que teve atrasos. O fato de os padrões não respeitarem totalmente soqueira, solo, ou estação, indica que o clorofilômetro é afetado pelo fator variedade. Como este trabalha com comprimentos de onda dentro do visível, parece que as tonalidades das diferentes variedades estão causando resultados mais influentes que a variação em nitrogênio dentro e entre talhões.

Ressalta-se que o clorofilômetro lê teor de clorofila que está intimamente associado ao teor de N, o que não parece ser o caso neste estudo, assim como já relatado em outros com cana-de-açúcar (RODRIGUES JÚNIOR; MAGALHÃES, 2010) e milho (ARGENTA et al., 2001b).

4.8 Dados obtidos com o sensor de nitrogênio e biomassa

A dispersão dos dados obtidos com o sensor de nitrogênio e biomassa é apresentada na figura 26 para os oito talhões em suas três avaliações.

Figura 26 - Valores do índice de vegetação (IV) do sensor em box-plot nas três avaliações (0,2, 0,4, e 0,6 m) para os oito talhões avaliados

Observa-se que em seu limite inferior, os dados do sensor seguem aqueles da biomassa, como pode ser visto comparando sensor e biomassa para os talhões 3 e 4. Já o limite superior apresenta um patamar estável apesar das diferenças em biomassa encontradas na terceira avaliação, especialmente nos talhões onde houve atrasos nas mensurações. Esse fato indica que o patamar é o ponto de saturação do sensor, que não apresenta sensibilidade à variação na biomassa da cultura acima desse estágio de desenvolvimento. O fenômeno de saturação de sensor espectral (MUTANGA; SKIDMORE, 2004) se dá quando o sensor perde a capacidade de mensurar a biomassa, sendo que esta continua a aumentar, porém o sensor não é mais sensível a este aumento, ficando seus valores estáveis ou com pequeno acréscimo não

acompanhando mais o aumento da biomassa na mesma escala. A tabela 10 apresenta a análise de variância para os dados obtidos com o sensor.

Tabela 10 - Análise de variância para os dados obtidos com o sensor de nitrogênio e biomassa nas avaliações

Avaliações do sensor					0,2 m	0,4 m	0,6 m
GL resíduo					72	72	72
F tratamentos					11,48 **	1,86	1,46
Média geral					12,84	25,54	31,61
Desvio-padrão					3,18	5,84	3,40
DMS (5%)					4,45	8,15	4,75
CV (%)					24,79	22,85	10,77
Teste de Tukey a 5%:							
Nº	solo	soca	estação	variedade			
1	arenoso	1 ^a	seca	CTC 9	13,14 b	27,33 a	31,70 a
2	arenoso	2 ^a			8,19 c	22,71 a	30,68 a
3	argiloso	1 ^a		RB	8,14 c	23,31 a	31,52 a
4	argiloso	3 ^a			11,49 bc	30,51 a	33,55 a
5	arenoso	1 ^a	chuvosa	CTC 2	17,97 a	25,10 a	31,97 a
6	arenoso	2 ^a			14,32 ab	26,47 a	31,12 a
7	argiloso	1 ^a		SP	14,46 ab	----- --	32,95 a
8	argiloso	3 ^a			14,98 ab	24,44 a	29,36 a

Nível de significância: **: 1%; *: 5%.

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Obs: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias na mesma avaliação (colunas).

Na primeira avaliação obtida na estação seca houve diferença estatística entre os valores obtidos nos talhões, igualmente aos dados de biomassa na mesma situação. Assim como na segunda estação da primeira avaliação e na segunda avaliação como um todo, os dados do sensor foram iguais entre si ao nível de 5% de significância, como também com os dados de biomassa, o que vem a comprovar que o sensor utilizado é basicamente um sensor de biomassa.

Na terceira avaliação, os dados do sensor não diferiram estatisticamente entre si, porém os dados de biomassa sim, o que reforça a hipótese de que o sensor tenha atingido seu patamar de saturação em alguns talhões, especial aqueles em que ocorreu atrasos na amostragem.

4.9 Síntese dos dados avaliados relacionados ao sensor

4.9.1 Altura de perfilhos

Entre as variáveis mensuradas nas áreas, a altura dos perfilhos foi um importante parâmetro para avaliar o desenvolvimento da cultura. Na figura 27 são apresentados os valores de alturas de plantas dos oito talhões em relação às medições do sensor para os dados das três avaliações, com a união das áreas dentro do mesmo tipo de solo e variedade.

Figura 27 - Comparação entre a altura dos perfilhos e a leitura do sensor de nitrogênio e biomassa nos oito talhões avaliados: estação seca (A); estação chuvosa (B)

Observa-se nos gráficos correspondentes à primeira estação (época seca e fria do ano) que o crescimento dos perfilhos em solo arenoso foi mais vigoroso, possivelmente pelo maior vigor inicial da variedade (CTC 9) e uma possível maior temperatura no solo arenoso. Já na segunda época, correspondente à estação chuvosa e quente do ano, nota-se desenvolvimento semelhante para os dois solos com diferentes variedades estudadas, possivelmente por não haver limitação hídrica ou de temperatura, havendo boa correlação entre o crescimento da cultura e aumento dos valores das leituras do sensor.

4.9.2 Número de perfilhos

Igualmente apresentados para altura, na Figura 28 são apresentados os dados de número de perfilhos por ponto amostral.

Figura 28 - Comparação entre o número de perfilhos e a leitura do sensor de nitrogênio e biomassa nos oito talhões avaliados: estação seca (A); estação chuvosa (B)

As áreas de segunda época seguiram um mesmo padrão, com número de perfilhos estável desde a primeira medição até a última, não apresentando correlação com o sensor. Provavelmente, devido ao calor e chuvas constantes, a brotação foi rápida e homogênea logo após o corte, mantendo-se estável. Na primeira época, quando a umidade era menor e a temperatura baixa, na medida em que a cultura crescia, o número de perfilhos aumentava linearmente, mantendo-se crescente da primeira medição aos 0,2 m até a última medição aos 0,6 m de altura de colmo/palmito.

Comparando-se a altura e o número de perfilhos para a primeira estação (estação seca) (Figuras 27A e 28A), observa-se que em solo arenoso a altura dos perfilhos foi maior, porém seu número foi menor em relação aos do solo argiloso, que teve mais perfilhos de menor altura nas mesmas medições. Esses valores se compensaram, não havendo grandes diferenças em biomassa amostrada e estimada pelo sensor entre as

duas condições. Desta forma observa-se que altura e número perfilhos se somam para formar o total de biomassa presente.

4.9.3 Clorofilômetro

Em cada ponto de amostragem foi realizada a leitura do teor de clorofila. Esses resultados comparados com os valores obtidos com o sensor de nitrogênio e biomassa são apresentados na Figura 29, para as oito talhões estudados. Nesse caso a variável soqueira também foi unida visando simplificar, porém as variáveis; solo e época do ano e consequentemente variedade foram mantidas separadas.

Figura 29 - Comparação entre as leituras obtidas com o clorofilômetro e as leituras obtidas com o sensor de nitrogênio e biomassa nos oito talhões avaliados: estação seca (A); estação chuvosa (B)

Analisando os resultados verifica-se que existem quatro tendências, uma em cada variedade, se comportando distintamente na medida em que os valores do sensor de biomassa e clorofila vão aumentando gradativamente durante as avaliações, sendo que nos solos argilosos a tendência se mostrou estável da primeira à última avaliação realizada em cada talhão, porém em patamares diferentes entre estações. Já nos solos

arenosos, durante a primeira estação (Figura 29 A) a tendência foi de aumento do teor de clorofila durante as medições com o clorofilômetro, fato não verificado nas concentrações de N na planta, provavelmente devido à falta de umidade e baixa temperatura no início do ciclo, quando os valores foram os mais baixos, aumentando progressivamente como o aumento de temperatura e umidade. Como o tempo decorrido entre a primeira medição (0,2 m) e a última (0,6 m) foi longo (63 dias) o solo arenoso conseguiu suprir a demanda de N.

Na segunda estação do ano (Figura 29 B) no solo arenoso, os valores do teor de clorofila foram baixando do começo do ciclo até a última medição, provavelmente devido ao crescimento acelerado que demandou mais N do que o solo arenoso podia prover no período. Devido às altas temperaturas e quantidade de chuvas o crescimento da cultura foi rápido, diluindo a concentração de N na planta, porém não apresentando diferença em relação a solos argilosos neste quesito. Entre a primeira medição e a última houve um intervalo de 66 dias, porém nesse período a cana já estava com mais de 1,0 m de altura em alguns pontos devido ao atraso que houve na última avaliação. Esta deveria ter sido realizada cerca de 50 dias depois da primeira avaliação para a cana estar com 0,6 m de altura de colmo/pamito, assim como na mesma área da primeira estação.

4.9.3.1 Clorofilômetro versus concentrações de nitrogênio na planta

Em cada ponto amostral foram realizadas medições com o clorofilômetro e obtidas análises da concentração de N das plantas do mesmo local. Os dados do clorofilômetro comparados às concentrações de N da cana-de-açúcar nos pontos amostrais são apresentados na figura 30.

Figura 30 - Comparação entre as leituras do clorofilômetro e as concentrações de N nos pontos amostrais dos oito talhões avaliados: estação seca (A); estação chuvosa (B)

Observa-se que o clorofilômetro não foi capaz de quantificar o teor de nitrogênio contido na planta para os solos e variedades da estação seca, assim como no solo argiloso da estação chuvosa. Em solo arenoso, plantado com a variedade CTC 2 apresentou baixa relação (R^2 0,43), neste o crescimento foi rápido e as duas últimas avaliações foram realizadas aquém do estipulado. Apresentando plantas mais velhas no momento das avaliações e uma consequente maior amplitude dos dados, o que pode ter ajudado o clorofilômetro e ter alguma sensibilidade ao N nesta situação.

É importante ressaltar novamente que as mensurações com o clorofilômetro foram feitas nas folhas e as análises de N correspondem às plantas como um todo, porem no mesmo local dentro de talhões de cana-de-açúcar.

4.10 Avaliação da capacidade do sensor em prever biomassa e nitrogênio.

O sensor avalia bem a fitomassa vegetal, pois o comportamento do índice de vegetação se relaciona muito bem com a biomassa presente, assim como as bandas

espectrais que o mesmo usa, que estão na região da rampa do visível para o infravermelho próximo (“red edge”) e no próprio infravermelho próximo, que é uma região do espectro fortemente relacionada com biomassa. Com base neste fato, foi usado o valor de biomassa e a concentração de N nesta para se obter o N total. Assim o sensor quantifica a biomassa e indiretamente estima N, como pode ser observado na comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelas leituras do índice de vegetação (IV) nos pontos amostrais de cada talhão aos 0,2 m, 0,4 m e 0,6 m para extração de nitrogênio e biomassa nos oito talhões avaliados.

O objetivo desta pesquisa é obter o algoritmo de extração de nitrogênio versus as leituras do sensor, porém para facilitar entendimento e visualização são apresentados os dados de extração de nitrogênio reais mensurados em campo plotados contra os dados preditos pelo sensor oriundos da equação da linha de tendência dos valores do sensor para a extração de nitrogênio; da mesma forma para os dados de biomassa.

4.10.1 Predição de nitrogênio e biomassa para a cana avaliada na estação seca e fria

Nas figuras 31 a 38 são apresentados mapas do IV do sensor de nitrogênio e biomassa para as três avaliações realizadas em cada talhão e seus respectivos pontos amostrais, juntamente são apresentadas as regressões de predição do sensor para nitrogênio e biomassa contra os reais valores dos parâmetros avaliados em campo.

Figura 31 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 1, referente às três avaliações realizadas

A

B

Figura 32 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) no talhão 1

Figura 33 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 2, referente às três avaliações realizadas

Figura 34 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 2

Figura 35 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 3, referente às três avaliações realizadas

Figura 36 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 3

Figura 37 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 4, referente às três avaliações realizadas

Figura 38 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 4

Observa-se nas figuras referentes a predições do sensor para a estação seca e fria que tanto para a biomassa como para a extração de N o sensor foi capaz de prever, com um coeficiente de determinação variando de 76% a 95%, a real biomassa, e de 80% a 84%, a extração de nitrogênio pela cultura nos quatro talhões investigados na estação seca e fria.

Observa-se que em todos os talhões, independentemente de suas variáveis (solo, variedade, e soqueira), que os valores obtidos com o sensor foram mensurados numa mesma escala. Os valores dos coeficientes de determinação podem ser considerados elevados, o que confere confiabilidade aos resultados, mostrando que o sensor é capaz de prever a biomassa real e a extração de nitrogênio real encontrados em campo.

A figura 39 apresenta os mesmos valores de nitrogênio em biomassa, porém agrupados para a estação seca e fria.

Figura 39 - Valores de nitrogênio real versus nitrogênio predito pelo sensor para as medições de 0,2, 0,4 e 0,6 m de altura da cana para a estação seca e fria (A); valores de biomassa real versus biomassa predita pelo sensor para as três medições da mesma área (B)

Observa-se que os resultados obtidos com o sensor de nitrogênio e biomassa nos quatro talhões ao longo da estação seca seguiram uma mesma tendência, apesar da variabilidade implantada em solos, variedades e soqueiras nesta estação. O coeficiente de determinação foi igualmente alto para nitrogênio e biomassa.

4.10.2 Predição de nitrogênio e biomassa para a cana avaliada na estação chuvosa e quente

Nas figuras 40 a 47 são apresentados mapas do índice de vegetação do sensor de nitrogênio e biomassa para as três avaliações realizadas em cada talhão e seus respectivos pontos amostrais, juntamente são apresentadas as regressões de predição do sensor para nitrogênio e biomassa contra os reais valores dos parâmetros avaliados em campo.

Figura 40 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 5, referente às três avaliações realizadas

A

B

Figura 41 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 5

Figura 42 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 6, referente às três avaliações realizadas

Figura 43 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 6

Figura 44 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 7, referente às três avaliações realizadas

Figura 45 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 7

Figura 46 - Mapas dos valores de índice de vegetação (IV) interpolados e pontos amostrais para o talhão 8, referente às três avaliações realizadas

A

B

Figura 47 - Comparação entre valores reais amostrados em campo e valores estimados pelo sensor para extração de nitrogênio (A) e biomassa (B) na lavoura 8

Igualmente ao observado nos dados obtidos nas lavouras monitoradas na estação seca, observa-se nas Figuras referentes à estação chuvosa, que tanto para a biomassa como para a extração de nitrogênio o sensor foi capaz de prever com um coeficiente de determinação variando de 75% a 97% a real biomassa e de 75% a 94% a extração de nitrogênio pela cultura nos quatro talhões investigados na estação chuvosa e quente.

Observa-se que em todos os talhões, independentemente de suas variáveis em solo, variedade e soqueira, novamente os valores do sensor foram mensurados uma mesma escala, sendo os valores dos coeficientes de determinação elevados. Porém houve uma perda significativa de precisão dos dados do sensor nos talhões onde houve atraso da medição e sua consequente saturação. Mesmo assim o sensor foi capaz de prever a biomassa real e extração de nitrogênio real encontrados nos quatro talhões da estação quente e chuvosa.

A figura 48 apresenta os mesmos valores de nitrogênio em biomassa, porém agrupados para a estação quente e chuvosa.

Figura 48 - Valores de nitrogênio real versus nitrogênio predito pelo sensor para as medições de 0,2, 0,4 e 0,6 m de altura da cana para a estação chuvosa e quente (A); valores de biomassa real versus biomassa predita pelo sensor para as três medições da mesma área (B)

Na segunda época do ano os coeficientes de determinação entre biomassa e extração de nitrogênio medidos em campo e preditos pelo sensor foram mais amplos, devido à maior dispersão dos dados que se deu em função da saturação da leitura do sensor na última medição da época, que deveria ter sido feita aos 0,6 m de altura da

cultura, porém houve atraso devido a problemas mecânicos com o veículo que portava o sensor. Quando as medições puderam ser realizadas as alturas estavam muito maiores, passando de 1,0 m em muitos locais, ocorrendo total cobertura do solo pela cultura e não sendo possível ao sensor diferenciar solo de planta, pois o solo não estava mais visível. Dessa forma ocorreu o aumento de biomassa sem o paralelo aumento dos valores lidos pelo sensor (saturação). Outro fator que ainda interferiu foi o fato da cultura mais velha ter uma maior proporção de colmos em relação a folhas, e estas serem menos viçosas, vindo a ocorrer alta biomassa e baixo valor na leitura do sensor o que fez com que a biomassa predita fosse menor que a biomassa real.

A Saturação ocorrida no sensor não foi tão grave para a predição de nitrogênio (Figura 48 A) devido a concentração de nitrogênio na planta ir decaindo com seu desenvolvimento, porém a quantidade total vai aumentando, pois a biomassa aumenta em uma razão maior que o decréscimo da concentração de nitrogênio na cultura em estágio mais avançado. Assim, apesar da maior quantidade de biomassa, a concentração de nitrogênio nesse estágio estava menor, fazendo com que os dados de nitrogênio não se distanciassem tanto na terceira avaliação, semelhantes aos da primeira época.

A exceção ficou por conta da sétima lavoura onde houve a perda da segunda avaliação, porém a terceira avaliação pode ser realizada aproximadamente dentro da altura inicialmente estipulada de 0,6 m fazendo com que a tendência dos dados desta área ficasse superior às demais da estação e semelhantes as quatro da estação seca.

4.10.3 Predição de nitrogênio e biomassa para o ano agrícola

A Figura 49 mostra a capacidade do sensor em prever a biomassa da cana-de-açúcar para os oito talhões avaliados. Observando-se que mesmo com os problemas ocorridos na segunda época de medição houve uma tendência de ajuste. O mesmo ocorreu para a extração de nitrogênio (Figura 50). Os resultados obtidos são semelhantes àqueles obtidos por Jasper et al. (2010), trabalhando com várias culturas com diferentes estágios de desenvolvimento, usando sensor semelhante.

Figura 49 - Relação entre os valores de biomassa medida em campo e biomassa de cana de açúcar predita pelo sensor para as oito talhões

Figura 50 - Relação entre os valores de extração de nitrogênio mensurados nas amostras de campo e a extração de nitrogênio predita pelo sensor para os oito talhões

Os resultados obtidos são semelhantes àqueles obtidos por (JASPER et al., 2010), trabalhando com várias culturas com diferentes estágios de desenvolvimento, usando sensor semelhante.

Apesar das enormes diferenças que existem entre as áreas estudadas em função de época, solo, variedade número da soqueira, o sensor conseguiu trabalhar em uma mesma escala sem ser afetado pelas variáveis, assim como citado por Jasper et al. (2009). Tal fato tem grande importância operacional, visto que os modelos são significativamente simplificados na medida em que fatores culturais e ambientais não os afetam. Observa-se que o método proposto está produzindo dados com boa quantidade, que estão propiciando a medição adequada dos parâmetros para modelar a biomassa e a extração de nitrogênio pela cana-de-açúcar.

De acordo com os dados o sensor é capaz de detectar a variabilidade de biomassa e suprimento de nitrogênio pelo solo em lavouras comerciais de cana de açúcar, indicando que existe variabilidade em produção de biomassa e extração de nitrogênio pela cana-de-açúcar em diferentes variedades, solos e períodos. Essas diferenças não estão afetando o sensor na estimativa da biomassa e extração de nitrogênio. Os resultados sugerem que é possível programar um algoritmo matemático para conduzir aplicação de nitrogênio em taxa variável e tempo real baseado nas leituras do sensor.

4.10.4 Análise estatística para as regressões de predição de nitrogênio e biomassa

Os valores obtidos pela predição do sensor foram relacionados com os valores de biomassa e nitrogênio reais mensurados em campo e laboratório por regressão linear, conforme proposto por (MILLER; MILLER, 2000). Os parâmetros de R^2 , da interceptação do eixo y (A) e do coeficiente angular da reta (B) foram avaliados. Quando os resultados a partir dos diferentes métodos são iguais, os parâmetros devem apresentar valores de $R^2 = 1$, $B = 1$, e $A = 0$. Os valores dos parâmetros das regressões realizadas para os oito talhões amostrais para nitrogênio e biomassa são apresentados nas tabelas 11 e 12. Os dados se ajustam ao modelo linear, conforme visualizado nas figuras 49 e 50 para nitrogênio e biomassa.

Tabela 11 – Faixas de valores de nitrogênio (kg ha⁻¹) determinados e valores dos parâmetros da análise de regressão linear (RL) entre o estimado pelo sensor e medido em campo

Talhões					Erro	Parâmetros da análise de RL		
Nº	solo	soca	estação	variedade	RMSE	R²	A	B
1	arenoso	1ª	seca	CTC 9	9,97	0,8472	- 2,8717 ^{ns}	1,1198*
2	arenoso	2ª		RB	6,62	0,9432	+ 1,648 ^{ns}	0,9528*
3	argiloso	1ª			6,63	0,8972	+ 0,372 ^{ns}	1,0036*
4	argiloso	3ª		14,04	0,7974	- 0,898 ^{ns}	1,0732*	
Estação seca					9,69	0,8668	- 0,1252 ^{ns}	1,032*
5	arenoso	1ª	chuvosa	SP	14,94	0,7498	- 4,0756 ^{ns}	1,128*
6	arenoso	2ª			12,29	0,7619	- 1,2066 ^{ns}	1,0574*
7	argiloso	1ª			6,45	0,9432	- 0,8745 ^{ns}	1,0419*
8	argiloso	3ª			9,70	0,8598	- 1,1428 ^{ns}	1,0711*
Estação chuvosa					11,30	0,8192	- 1,7439 ^{ns}	1,0761*
Nitrogênio para o ano agrícola					10,45	0,8442	- 0,8127 ^{ns}	1,0513*
Igualdade de dados					0	1	0	1

Análise de regressão: Regressão linear (A: interseção em y, B: Coeficiente angular da reta)

RMSE (root mean square error) ou Erro padrão da estimativa na mesma unidade (kg ha⁻¹)

*p<0,05; **p<0,01; NS: não significativo

Observa-se na tabela 11 que o intercepto não foi significativo para nem uma das regressões, já o coeficiente angular da reta foi significativo a 1% para todas as regressões realizadas com os dados de nitrogênio.

O mais baixo coeficiente de determinação encontrado foi inferior a 0,75 no talhão número cinco, o mesmo também apresentou o maior erro padrão da estiva de 14,94 kg ha⁻¹ de N, o que não é ruim em vista da quantidade de variáveis envolvidas como processamento de dados coleta de amostras em campo e análises de laboratório, na determinação destes valores.

Tabela 12 – Faixas de valores de biomassa (kg ha⁻¹) determinados e valores dos parâmetros da análise de regressão linear (RL) entre o estimado pelo sensor e medido em campo

Talhões					Erro	Parâmetros da análise de RL		
Nº	solo	soca	estação	variedade	RMSE	R²	A	B
1	arenoso	1ª	seca	CTC 9	845,75	0,844	- 248,39 ^{ns}	1,1479*
2	arenoso	2ª			445,53	0,9479	+ 101,93 ^{ns}	0,9560*
3	argiloso	1ª		RB	394,18	0,9338	+ 136,93 ^{ns}	0,9219*
4	argiloso	3ª			1329,20	0,7655	+ 25,05 ^{ns}	1,0554*
Estação seca					839,00	0,8507	- 2,91 ^{ns}	1,0323*
5	arenoso	1ª	chuvosa	CTC 2	1402,40	0,7541	- 439,25 ^{ns}	1,2038*
6	arenoso	2ª			1119,71	0,7687	- 132,38 ^{ns}	1,0774*
7	argiloso	1ª		SP	353,84	0,967	+ 27,33 ^{ns}	1,0014*
8	argiloso	3ª			762,03	0,8728	- 173,25 ^{ns}	1,1350*
Estação chuvosa					1007,66	0,8146	- 189,04 ^{ns}	1,1170*
Biomassa para o ano agrícola					922,22	0,8312	- 86,10 ^{ns}	1,0716*
Igualdade de dados					0	1	0	1

Análise de regressão: Regressão linear (A: interseção em y, B: Coeficiente angular da reta)

RMSE (root mean square error) ou Erro padrão da estimativa na mesma unidade (kg ha⁻¹)

*p<0,05; **p<0,01; NS: não significativo

Observa-se na tabela 12 que, assim como para os dados de N, o intercepto não foi significativo para nem uma das regressões, já o coeficiente angular da reta foi significativo a 1% para todas as regressões realizadas com os dados de nitrogênio, o que é plenamente compreendido, pois os dados de nitrogênio são obtidos da multiplicação dos teores nas amostras pela biomassa.

O mais baixo coeficiente de determinação encontrado, igualmente foi superior a 0,75 no talhão número cinco, o mesmo também apresentou o maior erro padrão da estiva de 1402,40 kg ha⁻¹ de biomassa em uma escala onde foram medidos valores de biomassa maiores que 8000 kg ha⁻¹ em campo.

Esta relação prova que o sensor é preciso em prever a biomassa real encontrada em talhões comerciais de cana de açúcar, assim como a sua concentração em nitrogênio.

4.10.5 Capacidade do sensor prever a concentração de nitrogênio na planta

Apesar de o sensor estudado ser predominantemente voltado para mensurar biomassa, ele foi capaz de prever a concentração de nitrogênio sem o auxílio da quantidade de biomassa (Figura 51).

Figura 51 - Relação entre os valores da concentração de nitrogênio mensurados nas amostras de campo e a concentração de nitrogênio predita pelo sensor para as oito áreas estudadas, somando 230 amostras

No trabalho de calibração do sensor, foi usada a concentração de nitrogênio multiplicada pela biomassa para correlacionar sensor e nitrogênio, pois este está mais relacionado à biomassa em função dos comprimentos de onda nos quais trabalha. Porém o sensor foi capaz de prever a concentração de nitrogênio nos pontos amostrais com um baixo coeficiente de determinação $R^2 = 0,44$, referente a todas as áreas amostradas, devido a uma ampla dispersão dos pontos. Apesar do baixa coeficiente de determinação, a linha de tendência média dos 230 pontos amostrados e

escaneados pelo sensor mostra igualdade entre os valores reais de campo e os estimados pelo sensor para média total.

O sensor mede biomassa, e a variabilidade desta está diretamente relacionada à produtividade da cultura, visto que as doses da adubação nitrogenada recomendadas para o estado de São Paulo levam em conta a produtividade esperada, o sensor pode variar as doses do fertilizante nitrogenado em função da biomassa em tempo real, para cada mancha em biomassa que o mesmo detectar na área, fazendo assim um uso muito mais exato da recomendação de adubação, do que a aplicação de dose única pela média onde acontecem aplicações acima e abaixo das necessidades de sítios heterogêneos encontrados dentro de um talhão de cana considerado e tratado homogeneamente.

Acredita-se que se os talhões estudados estivessem com uma condição de fertilidade mais homogênea, e não com tanta variabilidade como demonstrado nos mapas de solos dos anexos, a dispersão dos dados de concentração de N nas amostras seria bem menor, pois a diferença de biomassa que o sensor leria e que guiou as amostragens seria mais influenciada pelo elemento nitrogênio e menos por outros fatores de fertilidade do solo.

Da mesma forma, é importante que se tenha cuidado com fatores físicos do solo, como compactação, que provocam um desenvolvimento inferior da cultura, reduzindo a biomassa no local vindo a causar a leitura de valores menores do índice de vegetação do sensor, sem que o problema esteja na carência de N.

Apesar da dispersão na comparação dos teores de N reais e preditos, a calibração do sensor foi bem sucedida, devido ao grande número de amostras levantadas em campo e as boas correlações que estas apresentaram.

Acredita-se que produtores de cana-de-açúcar detentores de áreas com problemas básicos de física e fertilidade já resolvidos, através do correto preparo e tráfego de máquinas, assim como através da aplicação em taxa variável de insumos mais fáceis de manejar (calcário, gesso, P, K, CA, Mg e S) poderão obter bons resultados no uso da tecnologia de aplicação de nitrogênio em taxa variável guiada pelas leituras do sensor através do algoritmo aqui levantado para a cultura.

5 CONCLUSÕES

O método implementado neste estudo, permitiu uma boa quantidade de dados e forneceu as devidas medidas de parâmetros para a modelagem da biomassa e a absorção de nitrogênio.

O clorofilômetro utilizado não mostrou ser uma alternativa confiável para estimar o estado nutricional da cana-de-açúcar em nitrogênio em escala de talhão, pois parece ser governado por mais fatores, em especial a variedade da cultura.

De acordo com os dados coletados, o sensor de nitrogênio e biomassa é capaz de detectar a variabilidade da biomassa e extração de nitrogênio do solo existente em talhões comerciais de cana-de-açúcar.

Os resultados indicam que existe pequena variabilidade na produção de biomassa e absorção de N pela cultura em distintas variedades, solos e estações, mas essas diferenças não estão afetando a detecção da biomassa e absorção de N preditas por parte do sensor.

A boa correlação entre sensor, biomassa e nitrogênio indica que os dados obtidos na pesquisa são válidos como algoritmo agrônomo para o sensor em talhões comerciais de cana-de-açúcar. A equação da linha de tendência entre valores do sensor e extração de nitrogênio (apresentada como valores reais e preditos pelo sensor) deve ser usada de base no programa computacional de aplicação em taxa variável do sensor, instalado no monitor do veículo adubador. Desta forma este poderá conduzir a adubação nitrogenada das lavouras de cana-de-açúcar, em taxa variável e em tempo real, baseado nas leituras do sensor.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F.B.; VAN DEN BERG, M. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 12, p. S52-S57, Feb. 2010.
- AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Departamento de Solos. **Atualização em adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria, 1997. p. 76-111.
- ALCARDE, J.C.; GUIDOLIN, J.A.; LOPES, A.S. Os adubos e a eficiência das adubações. **ANDA. Boletim Técnico**, São Paulo, n. 3, 1998. Disponível em <http://www.anda.org.br/boletins/boletim_03.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2011.
- AMARAL, L.R. **Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura de cana-de-açúcar**. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – BRASIL. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>> Acessado em: 16 dez. 2010.
- ARGENTA, G. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13. p. 158-167, 2001.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BRASIL. Disponível em <https://www.ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2010.
- BALASTREIRE, L.A.; COELHO, J.L.D. Aplicação mecanizada de fertilizantes e corretivos. **ANDA. Boletim Técnico**, n. 7, São Paulo, 2000. Disponível em <http://www.anda.org.br/boletins/boletim_07.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2011.
- BENEDINI, M.S.; PENATTI, C.P. Recomendação de adubação da cana-de-açúcar pela estimativa d produtividade. **Revista Coplana**, Guariba, p. 20-21, jan. 2008.
- BERNER, P.G.M. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, 2007.
- BODDEY, R.M. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, The Hague, v. 252, n. 1, p. 139-149, May 2003.

BRAMLEY, R.G.V.; QUABBA, R.P. Opportunities for improving the management of sugarcane production through the adoption of precision agriculture - An Australian perspective. **International Sugar Journal**, Glamorgan, v. 104, n. 1240, p. 152-+, 2002.

BREDEMEIER, C. **Leser-induced chlorophyll fluorescence as a tool for site-specific nitrogen fertilization**: evaluation under controlled environmental and fields conditions in wheat and maize. Munique: Die Deutsche Bibliothek, 2005. 219 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar, safra 2010/11 terceiro levantamento, dezembro de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em <<http://www.conab.gov.br/conteudos>>. Acessado em: 20 jan. 2010.

DE MELLO PRADO, R.; PANCELLI, M. A. Sugarcane ratoon response to nitrogen application in a no burn harvesting system. **Assessing Lifecicly Journal**, Dordrecht, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008.

EITEL, J.U.H. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 6, p. 1694-1702, Nov./Dec. 2008.

EMBRAPA. **Banco de dados climatológicos do Brasil**. Disponível em <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/index.php?UF=sp>>. Acesso em: 24 fev. 2011.

ERISMAN, J.W. How a century of ammonia synthesis changed the world. **Nature Geoscience**, London, v. 1, n. 10, p. 636-639, Oct. 2008.

EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS' ASSOCIATION. **Understanding nitrogen and its use in agriculture**. Paris, 2003. Disponível em: <<http://www.efma.org/>>. Acesso em: 16 fev. 2011

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>> Acessado em: 03 fev. 2010.

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

GRISHAM, M.P.; JOHNSON, R.M.; ZIMBA, P.V. Detecting sugarcane yellow leaf virus infection in asymptomatic leaves with hyperspectral remote sensing and associated leaf pigment changes. **Journal of Virological Methods**, Amsterdam, v. 167, n. 2, p. 140-145, Aug. 2010.

GROHS, D.S. Molelo 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.

HEBERT, J. Nitrogen. In: BONNEAU, M.; SOUCHER, B. (Ed.). **Constituents and properties of soil**. New York: Academic Press, 1982. p. 435-442.

HEEGE, H.J.; REUSCH, S.; THIESSEN, E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 9, n. 3, p. 115-131, June 2008.

INAMASU, R.Y. Acesso ao estado nutricional da cana-de-açúcar por meio de sensor ativo de refletância. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 5., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION . **Fertilizer indicators. IFA - Statistics - Fertilizer Indicators - Details Row material reserves**. Disponível em: <www.fertilizer.org>. Acesso em: 21 abr. 2002.

JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indexes. **Preventive Veterinary Medicine** [S.l.], v. 11, n. 3/4, p. 185-200, 1991.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. N-Sensor ALS-Active sensing of crop N status using optimized wavelength combination. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER PRECISION RESOURCES MANAGEMENT, 8., 2006, Saint Paul. **Proceedings...** Saint Paul: University of Minnesota, Precision Agriculture Center, 2006.

_____. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination – impact of seed rate, variety and growth stage. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2009, Wageningen. **Precision agriculture '09: proceedings...** Wageningen, 2009. p. 23-30.

_____. Estimating crop biomass and nitrogen uptake using Cropspc™, a new developed active crop -canopy reflectance sensor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. 1 CD-ROM.

JENSSEN, T.K.; KONGSHAUG, G. **Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production**. New York: International Fertilizer Society, 2003. (Proceedings, 509).

MALAVOLTA, E.; MORAIS, M.F.D. **O nitrogênio na agricultura brasileira**. Brasília: CETEM/MCT, 2006. 72 p. (Série Estudos e Documentos, SED – 70).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MILLER, J.N.; MILLER, J.C. **Statistic and chemometrics for analytical chemistry**. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 288 p.

MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Amsterdam, v. 4, p. 18, Nov. 2010.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da Variabilidade**. Piracicaba: O autor, 2001. 83 p.

_____. **Agricultura de precisão**. V. Encarte técnico. Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2009.

MOSIER, A.; GALLOWAY, J. **Setting the scene: the international nitrogen initiative**. international workshop on enhanced-efficiency fertilizers. Frankfurt: International Fertilizer Industry Association, 2005. 10 p.

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.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, Amsterdam, v. 25, n. 19, p. 3999-4014, Oct. 2004.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. b471-550.

POHV, 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.

RAIJ, B. van. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 1996. 285 p.

REUSCH, S. **Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen**. Thesis (Ph. D) - Kiel, 1997.

_____. Optimum waveband selection for determining the nitrogen uptake in winter wheat by active remote sensing. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2005, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen: Academic Publishers, 2005. p. 261-266.

RICE, R.W. **Nutritional requirements for Florida sugarcane**. Gainesville: University of Florida, Florida Coop. Ext. Serv., Inst Food Agric. Sci, 2002. (UF/IFAS, Doc SS ARG – 228).

RICE, C.W.; TIEDJE, J.M. Regulation of nitrate assimilation by ammonium in soils and isolated soil microorganisms. **Soil Biology and Biochemistry**, Buderin, v. 21, p. 597-602, 1989.

ROBERTO OMETTO, A.; ZWICKY HAUSCHILD, M.; NELSON LOPES ROMA, W. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 236-247, 2009.

RODRIGUES JÚNIOR, F.A.R.; MAGALHÃES, P.S.G. Análise de variabilidade espacial e correlação entre índice de clorofila e nitrogênio foliar na cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Engenharia, 2010. 1 CD-ROM>

ROLIM, G.S.; CCAMARGO, M.B.P.; LANIA, D.G.; MORAIS, J.F.L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 6, n. 4 p. 711-720, 2007.

SAMPAIO, E. Redistribution of the nitrogen reserves of n-15-enriched stem cuttings and dinitrogen fixed by 90-day-old sugarcane plants. **Plant and Soil**, The Hague, v. 108, n. 2, p. 275-279, 1988.

SEGATO, S.V. **Atualização em produção em cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livroceres, 2006. 415 p.

SILVA, C.B.; DE MORAES, M.A.F.D.; MOLIN, J.P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, Denver, v. 12, n. 1, p. 67-81, 2011

SINGH, I. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: Potential and constraints. **Sugar Tech**, New York, v. 8, n. 4, p. 299-302, 2006.

SOLARI, F. 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.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Submeter spatial variability of selected soil and Bermuda grass production variables. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 6, p. 1724-1733, Nov./Dec. 1999.

SPIERTZ, J. H. J. Nitrogen, sustainable agriculture and food security: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 43-55, 2010.

STRENNER, M. Comparison of different vegetation indices and their suitability to describe N-uptake in winter wheat for precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. Denver: Colorado State University, 2010.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W. de; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.D.; BENDASSOLLI, J.A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>> 2010. Acesso em: 16 dez. 2010.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S.; BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen-fixation to sugar-cane - n-15 and nitrogen-balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1, p. 105-114, 1992.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.D.; FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

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

ANEXO

Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para os oito talhões

Figura 1 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 1

Figura 2 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 2

Figura 3 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 3

Figura 4 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 4

Figura 5 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 5

Figura 6 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 6

Figura 7- Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 7

Figura 8 - Mapas de variabilidade dos atributos químicos de solo para o talhão 8