

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE NUTRIENTES  
NAS CULTURAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E ALGODÃO**

**OTAVIO BAGIOTTO ROSSATO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Campus de  
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP  
Novembro - 2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU**

**METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE NUTRIENTES  
NAS CULTURAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E ALGODÃO**

**OTAVIO BAGIOTTO ROSSATO**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol  
Co-orientador Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra  
Co-orientador Prof. PhD Pedro Andrade-Sanchez

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP  
Novembro – 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

R823m      Rossato, Otavio Bagiotto, 1965-  
Metodologias de avaliação e aplicação de nutrientes nas culturas de cana-de-açúcar e algodão / Otavio Bagiotto  
Rossato. - Botucatu : [s.n.], 2011  
xii, 98 f. : il. color., gráfs., tabs., maps., fots.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011  
Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol  
Co-orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra  
Inclui bibliografia

1. Agricultura de precisão. 2. Algodão - Adubação.  
3. Cana-de-açúcar - Adubação. 4. Fluorescência.  
5. Refletância. 6. Taxa variável. I. Crusciol, Carlos Alexandre Costa. II. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE NUTRIENTES NAS  
CULTURAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E ALGODÃO"

ALUNO: OTÁVIO BAGIOTTO ROSSATO


ORIENTADOR: PROF. DR. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ALBERTO KAZUSHI NAGAOKA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. CARLOS ALBERTO CERETTA

Data da Realização: 25 de novembro de 2011

**DEDICO**

Aos meus pais, Valmor P. Rossato (in memória) e Neiva M. B. Rossato exemplos de honestidade e dedicação. Aos meus irmãos, Oberdan, Melania e Marisa, e cunhados pelo apoio nesta caminhada.

**OFEREÇO**

A minha esposa Jaqueline C. Adorna Rossato e ao meu filho Pedro Otavio

## AGRADECIMENTOS

A Deus por guiar o meu caminho.

Ao Professor Crusciol, exemplo de dedicação e entusiasmo com a pesquisa, pela orientação, amizade, apoio e ensinamentos.

Ao professor Saulo Guerra pela co-orientação, conselhos, oportunidades e aprendizado proporcionado.

A FCA/UNESP e ao programa de pós-graduação em Agronomia – Energia na Agricultura pela oportunidade de cursar o doutorado e a CAPES pelo apoio financeiro concedido.

A Universidade do Arizona e ao Centro de Agricultura de Maricopa, Arizona, EUA, pela oportunidade de desenvolver parte deste trabalho. Aos pesquisadores Pedro Andrade-Sanchez e John Heun pelos ensinamentos, paciência, receptividade, atenção e amizade.

Aos professores Kléber P. Lanças, Célia R. Zimback, Carlos A. Ceretta e Alberto K. Nagaoka pelos conselhos e contribuições a este trabalho.

Aos professores Marco Biaggioni, Roberto Lyra Villas Boas, Rogério Peres Soratto, Maura Esperancini e Sérgio Hugo Benez pelos ensinamentos.

Ao Grupo Raízen - Unidade Barra, pela cessão das áreas agrícolas, a Sebastião Ribeiro, Adauto Biega e demais colaboradores pelo apoio e contribuição para o desenvolvimento dos estudos com cana-de-açúcar.

Aos colegas de pós-graduação Rone, Alessandra, Fabrício e Waylson pela amizade e convívio.

A minha esposa e colega Jaqueline pela ajuda no desenvolvimento dos trabalhos. Ao meu sogro, minha sogra e cunhados pelo acolhimento, convivência e apoio.

Aos amigos Felipe Motta e Rafael Milantonio pelo convívio, amizade, saudade compartilhada, aventuras e andanças pelos EUA. Aos amigos Jacqueline, Matt, Fabrizia, Rusty e Sarah pela receptividade e acolhida.

A todos os colaboradores do departamento de agricultura, biblioteca e da seção de Pós Graduação da FCA/UNESP.

## EPÍGRAFE

*"Seu tempo é limitado, portanto não o desperdice vivendo a vida de alguém. Não caia na armadilha do dogma - que é viver com os resultados dos pensamentos de outras pessoas. Não deixe que o barulho da opinião dos outros cale a sua própria voz. E o mais importante, tenha coragem de seguir seu coração e intuição. Eles de alguma maneira sabem o que você realmente quer se tornar. Tudo o resto é secundário"*

*Steve Jobs (1955-2011)*

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE FIGURAS .....	IX
1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	3
3 INTRODUÇÃO .....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	8
4.1 Adubação fosfatada e potássica na cultura da cana-de-açúcar .....	8
4.2 Adubação nitrogenada no algodoeiro.....	10
4.3 Variabilidade dos atributos do solo.....	13
4.4 Agricultura de precisão.....	14
4.5 Aplicação de fertilizantes a taxa variável .....	16
4.6 Uso de sensores óticos remotos na agricultura.....	18
4.6.1 Sensores óticos de refletância.....	20
4.6.2 Sensores óticos de fluorescência.....	23
5 MATERIAL E MÉTODOS .....	27
5.1 Experimento 1: Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar.....	27
5.1.1 Localização e caracterização experimental.....	27
5.1.2 Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos.....	29
5.1.2.1 Aplicação a taxa fixa - sem amostragem de solo (ATF).....	29
5.1.2.2 Aplicação a taxa fixa baseada em uma amostra média (ATFM).....	30
5.1.2.3 Aplicação a taxa fixa baseada em uma amostra média por talhão (ATFT).....	30
5.1.2.4 Aplicação por zonas de manejo (AZM).....	32
5.1.2.5 Aplicação a taxa variável (ATV).....	35
5.1.3 Excessos e déficits de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O nos diferentes modos de aplicação de fertilizantes.....	41
5.1.4 Custos dos fertilizantes nos diferentes modos de aplicação.....	41

5.2 Experimento 2: Avaliação de sensores óticos de refletância e fluorescência no algodoeiro.....	41
5.2.1 Localização e caracterização experimental.....	41
5.2.2 Avaliações realizadas.....	42
5.2.2.1 Coleta de dados com o sensor de refletância (Crop Circle) e fluorescência (Multiplex) .....	43
5.2.3 Análise estatística.....	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
6.1 Experimento 1: Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar.....	46
6.1.1 Correlações entre P e K e os demais atributos do solo.....	46
6.1.2 Análise descritiva.....	47
6.1.3 Parâmetros geoestatísticos.....	50
6.1.4 Excessos e déficits de $P_2O_5$ e $K_2O$ nos diferentes modos de aplicação de fertilizantes.....	52
6.1.5 Custos com fertilizantes nos diferentes modos de aplicação.....	66
6.2 Experimento 2: Avaliação de sensores óticos de refletância e fluorescência no algodoeiro.....	71
6.2.1 Influência das variedades de algodão nos índices dos sensores de refletância e fluorescência.....	73
6.2.2 Índices dos sensores de refletância e fluorescência na avaliação dos teores de $N-NO_3^-$ no pecíolo, biomassa e produtividade de plantas de algodão.....	74
7 CONCLUSÕES.....	83
7.1 Experimento 1: Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar.....	83
7.2 Experimento 2: Avaliação de sensores óticos de refletância e fluorescência no algodoeiro.....	84
8 REFERÊNCIAS.....	85

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Descrição dos índices fornecidos pelo sensor de fluorescência Multiplex 3.0.....	44
Tabela 2. Análise de correlação entre os atributos do solo em área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009.....	47
Tabela 3. Análise descritiva dos dados teores de P e K, necessidades, excessos e déficits de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O nos diferentes modos de adubação em área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009.....	49
Tabela 4. Parâmetros geoestatísticos dos teores de P e K, necessidades, excessos e déficits de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O nos diferentes modos de adubação em área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009.....	51
Tabela 5. Déficit e excessos em kg na área total (35,09 ha) e porcentagem da área com adubação adequada para P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009.....	63
Tabela 6. Custos dos fertilizantes nos diferentes modos de adubação em área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009.....	69
Tabela 7. Análise descritiva e análise da variância para os índices fornecidos pelos sensores de refletância e fluorescência em variedades de algodão e doses de N. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	72
Tabela 8. Índices dos sensores de refletância e fluorescência em três variedades de algodão. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	74
Tabela 9. Correlação entre os índices dos sensores de refletância e fluorescência e os teores de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> no pecíolo, biomassa e produtividade de plantas de algodão. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro de emissão de fluorescência em folhas de trigo.....	24
Figura 2. Emissão de fluorescência na seção transversal (A) e na superfície (B) de uma folha de trigo quando excitado pela luz ultravioleta.....	25
Figura 3. Pontos amostrais (1 amostra a cada 0,5 ha) em uma área de reforma de cana- de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	28
Figura 4. Necessidades de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , de acordo com a necessidade média dentro de cada talhão e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	31
Figura 5. Zonas de manejo baseadas no índice Argila + MOS, em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	33
Figura 6. Necessidades de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , de acordo com a necessidade média dentro de cada zona de manejo e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de- açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	34
Figura 7. Equações de regressão adaptadas das classes propostas por Espironello et al. (1996), para a recomendação de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) para a cultura da cana- de-açúcar.....	36
Figura 8. Pontos amostrais (1 amostra a cada 3 ha), em uma área de reforma de cana-de- açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	37
Figura 9. Necessidades de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , considerando uma grade de amostragem de 0,5 ha e recomendações conforme equações de regressão adaptadas das classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	38
Figura 10. Necessidades de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , considerando uma grade de amostragem de 0,5 ha, e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em	

Igaraçu do Tiete – SP, 2009.....	39
Figura 11. Necessidades de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , considerando uma grade de amostragem de 3 ha e recomendações conforme equações de regressão adaptadas das classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaraçu do Tiete – SP, 2009.....	40
Figura 12. Coleta de dados com os quatro sensores de refletância Crop Circle ACS-470 montados na frente de um trator na cultura do algodão, Arizona - EUA.....	43
Figura 13. Vista frontal de um sensor de fluorescência Multiplex (A) e coleta de dados com o sensor de fluorescência Multiplex 3.0 no algodoeiro (B).....	45
Figura 14. Excessos de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado $500\ kg\ ha^{-1}$ do formulado (00-25-25) a taxa fixa, sem considerar a amostragem de solo, em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaraçu do Tiete – SP, 2009.....	53
Figura 15. Excessos e déficits de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado $320\ kg\ ha^{-1}$ do formulado (00-25-25) a taxa fixa, baseado nos teores de uma amostra média e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaraçu do Tiete – SP, 2009.....	54
Figura 16. Excessos e déficits de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado $333\ kg\ ha^{-1}$ do formulado (00-24-18) a taxa fixa, baseado nos teores de uma amostra média e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaraçu do Tiete – SP, 2009.....	55
Figura 17. Excessos e déficits de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B) em $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado os formulados adequados a fim de suprir as necessidades médias dentro de cada talhão, de acordo com as classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaraçu do Tiete – SP, 2009.....	56
Figura 18. Excessos e déficits de $P_2O_5$ (A) e $K_2O$ (B), quando aplicado o formulado 00-25-25 a fim de suprir as necessidades médias dentro de cada zona de manejo, de acordo com as classes de recomendação propostas por Espironello et al.	

(1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	57
Figura 19. Excessos e déficits de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (A) e K <sub>2</sub> O (B) em kg ha <sup>-1</sup> , quando aplicado os formulados adequados (00-20-30, 00-30-20 e 00-41-00) a fim de suprir as necessidades médias dentro de cada zona de manejo, de acordo com as classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	58
Figura 20. Excesso e déficit de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (A) e K <sub>2</sub> O (B) em kg ha <sup>-1</sup> , quando aplicado o formulado (00-25-25) a taxa variável, baseado na grade de amostragem de 0,5 ha, e recomendações conforme equações adaptadas das classes propostas por Espironello et al. (1996) a fim de adequar às necessidades de K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , respectivamente, em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	60
Figura 21 Excessos e déficits de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (A) e K <sub>2</sub> O (B) em kg ha <sup>-1</sup> , quando aplicado SFT e KCl a taxa variável, baseado na grade de amostragem de 0,5 ha, e recomendações conforme as classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar, em Igaracú do Tiete – SP, 2009....	61
Figura 22. Excessos e déficits de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (A) e K <sub>2</sub> O (B) em kg ha <sup>-1</sup> , quando aplicado SFT e KCl à taxa variável, baseado na grade de amostragem de 3,0 ha, e recomendações conforme as equações de regressão adaptadas das classes propostas por Espironello et al. (1996) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.....	62
Figura 23. Teor de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> no pecíolo (A), biomassa (B) e produtividade (C) do algodoeiro quando submetido a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	77
Figura 24. Índices do sensor de refletância NDVI (A) e Clorofila (B) em plantas de algodão submetidas a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	78
Figure 25. Índices do sensor de fluorescência RF_UV (A), FRF_UV (B), NBI_G (C) e NBI_R (D) em plantas de algodão submetidas a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	79

Figure 26. Índices do sensor de fluorescência BRR_FR (A), FER_RUV (B), FLAV (C) e ANTH (D) em plantas de algodão submetidas a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.....	80
--	----

## 1 RESUMO

A adubação nitrogenada, fosfatada e potássica representam parte considerável dos custos de produção e tanto o excesso quanto a carência de nutrientes as plantas podem reduzir a qualidade e produtividade refletindo em menor lucratividade. Os teores de fósforo e potássio no solo são os parâmetros mais confiáveis para a recomendação de adubação fosfatada e potássica da maioria das culturas. Porém, para o nitrogênio, devido à sua alta mobilidade no solo, e, portanto variabilidade temporal, existe grande dificuldade em definir um único parâmetro de solo para manejar a adubação nitrogenada. Por isso, o uso de sensores óticos remotos capazes de detectar o estado nutricional das plantas, pode ser uma importante ferramenta no diagnóstico e aplicação de nitrogênio. Porém, para maioria das áreas cultivadas no Brasil, a adubação é feita de forma uniforme sem considerar a variabilidade existente dentro de cada área. Por isso, o presente trabalho visa avaliar diferentes critérios para a aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar, bem como, avaliar o potencial de utilização dos sensores de refletância e fluorescência na determinação dos teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro. No experimento realizado em cana-de-açúcar, foi feita a amostragem de solo em uma área de 35,09 ha em Igaracú do Tietê, SP, Brasil, com uma grade 0,5 ha, e posteriormente de posse dos teores de P e K no solo, e com auxílio do programa Campeiro 6.0 foram criados mapas de necessidades, déficits e

excessos de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  comparados com um modo de adubação padrão. Além disso, foi avaliado o custo com fertilizantes em cada modo de aplicação de fertilizante. O experimento realizado na cultura do algodoeiro foi conduzido no Centro Agrícola de Maricopa, Arizona, EUA. Em um experimento com delineamento blocos ao acaso, com três variedades de algodão e 4 doses de N (0, 45, 90 e  $135 \text{ kg ha}^{-1}$ ), foram realizadas, 120 dias após a semeadura, as leituras com os sensores óticos de refletância (Crop Circle) e de fluorescência (Multiplex), a coleta de pecíolos para posterior determinação dos teores de  $N-NO_3^-$  e a biomassa das plantas de algodão. Na maturação fisiológica o algodoeiro foi colhido. Após a obtenção desses dados foram realizadas as correlações entre os índices dos sensores de refletância e fluorescência e os teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro, bem como, a relação entre os índices dos sensores de refletância, fluorescência, os teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro com as doses de N aplicadas em cobertura. Os resultados do experimento conduzido em cana-de-açúcar evidenciam que a recomendação de fertilizantes sem amostragem de solo é um método que propicia aplicação de fertilizante acima das necessidades das plantas e elevado custo com fertilizante. Por outro lado, a amostragem de solo e aplicação de fertilizantes por talhões e por zonas de manejo propiciam melhora significativa na adequação da adubação as necessidades das plantas e redução de custos com fertilizantes quando comparado aos métodos tradicionais de amostragem e aplicação de fertilizantes. A amostragem de solo e aplicação a taxa variável baseada em uma grade de 3,0 ha propicia melhor adequação as necessidades das plantas que os demais modos de amostragem, exceto quando utilizado a grade de amostragem de 0,5 ha. Apesar do custo adicional com aquisição dos componentes eletrônicos e amostragem de solo, a aplicação a taxa variável de KCl e SFT no sulco de plantio baseada na amostragem em grade, apresenta grande potencial em maximizar a eficiência no uso de fertilizantes em cana-de-açúcar. Os resultados obtidos com os sensores de refletância e fluorescência no algodoeiro evidenciam que as variedades influenciam nas leituras dos índices dos sensores de refletância e fluorescência, bem como, esses sensores foram capazes de detectar variações nos teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro quando aplicado doses de N.

Palavras-chave: agricultura de precisão, adubação, taxa variável, refletância e fluorescência.

METODOLOGY EVALUATION AND FERTILIZER APPLICATION FOR SUGARCANE AND COTTON. Botucatu, 2011. 98 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: OTAVIO BAGIOTTO ROSSATO

Advisor: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Co-advisor: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

Co-advisor: PEDRO ANDRADE- SANCHEZ

## **2 SUMMARY**

The phosphorus, potassium and nitrogen represent a considerable part of production costs of most cultures. The phosphorus and potassium in the soil are the most reliable parameters its fertilization. There is a great difficulty in defining a single parameter to manage the soil nitrogen due to its high mobility in soil and therefore temporal variability. Therefore the use of remote optical sensors able to detect the nutritional status of plants can be an important tool in the diagnosis and application of nitrogen. However, for nitrogen and phosphorus and potassium for a majority of cropland in Brazil, the fertilization is done uniformly without considering the variability within each area. Therefore, this study aims to evaluate different criteria for the application of phosphate and potassium fertilizers in sugarcane, as well as assess the potential of using reflectance and fluorescence sensors in determining the levels of  $\text{N-NO}_3^-$  in the petiole, biomass and cotton yield. In one experiment, which evaluated different ways of applying phosphate and potassium fertilizers in sugarcane was done soil sampling in an area of 35.09 ha in Igarapu Tiete, Sao Paulo, Brazil, with 0.5 ha grid, and later in possession of the contents of P and K in the soil, and supported by software Campeiro 6.0 maps were created needs, deficits and excesses of  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{K}_2\text{O}$  compared to a standard mode of fertilization, as well as estimated costs fertilizers in each mode of fertilizer application. The second experiment, which evaluated the potential use of sensors and fluorescence reflectance in cotton, was conducted at the Agricultural Center in Maricopa, Arizona, USA. In an experiment with a randomized block design with three cotton varieties and N levels (0, 45, 90 and  $135 \text{ kg ha}^{-1}$ ), were performed 120 days after sowing, the readings

with ground-based optical sensors reflectance (Crop Circle) and fluorescence (Multiplex), the collection of stalks for subsequent determination of the levels of  $\text{N-NO}_3^-$  and biomass of cotton plants. At physiological maturity the cotton was harvested. After obtaining these data were performed correlations between parameters of fluorescence and reflectance sensors, and the levels of  $\text{N-NO}_3^-$  in the petiole, biomass and cotton yield and the relationship between the parameters of the sensor reflectance, fluorescence, levels  $\text{N-NO}_3^-$  in the petiole, biomass and cotton yield with N rates applied in cover. The results of experiment conducted in sugarcane show that fertilizer recommendations without soil sampling is a method that provides fertilizer application above the needs of plants and high cost of fertilizer. On the other hand, soil sampling and fertilizer application for plots and management zones provide significant improvement in the adequacy of the fertilizer needs of plants and reduce fertilizer costs compared to traditional methods of sampling and fertilizer application. The soil sampling and variable rate application based on a 3.0 ha grid provides better match the needs of plants as other modes of sampling, except when using the grid sampling of 0.5 ha. Despite the additional cost with the purchase of electronic components and soil sampling, variable rate application of KCl and TSP in the furrow-based sampling grid, has great potential to maximize the efficient use of fertilizers in sugarcane. The results obtained in Experiment 2, with optical sensors of reflectance and fluorescence in cotton show that the cotton varieties influence the readings of the indices of fluorescence and reflectance sensors and these sensors can detect different concentrations of  $\text{N-NO}_3^-$  in the petiole, biomass and cotton yield when applied doses of N.

Key words: sugarcane, cotton, fertilizer, variable rate, reflectance and fluorescence.

### **3 INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas, vivencia-se um aumento na competitividade mundial no setor do agronegócio, induzido pelo crescente nível de exigência dos consumidores com relação à qualidade dos produtos, às políticas de conservação do meio ambiente e aos preços competitivos internacionalmente. Estas demandas fazem com que o produtor seja pressionado a aperfeiçoar a utilização de recursos disponíveis buscando aumentar a eficiência nas atividades agrícolas.

A cana-de-açúcar é uma das culturas que mais tem expandido em área e produção nos últimos anos no Brasil, em especial nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil. A expansão se deve ao aumento da demanda provocada pelo aumento do consumo mundial de açúcar e etanol e importante aporte de recursos nacionais e internacionais para a expansão do setor. Outra cultura de grande importância no cenário atual é o algodoeiro, pois representa uma das principais matérias primas para a vestidura da humanidade. A cultura caracteriza-se por apresentar rigorosos critérios de avaliação de qualidade e altos custos de produção.

Os fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos são responsáveis por uma fatia considerável nos custos de produção das culturas. Além dos custos de produção, tanto o excesso quanto a carência de nutrientes as plantas podem reduzir a qualidade e

produtividade, e por consequência, lucratividade do setor. Ambos os fatores, associados à questão ambiental, perdas de nutrientes e contaminação de ambientes aquáticos, reforçam a idéia de se maximizar a eficiência no uso dos fertilizantes.

A agricultura ainda é enfocada em áreas entendidas como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação de insumos, não considerando as necessidades específicas de cada parte da lavoura. O manejo localizado, que consiste em aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários a produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos permitam, surge como alternativa para aumentar a eficiência na adubação das culturas.

Para isso, nos últimos anos, a amostragem do solo georreferenciada em grade tem sido utilizada como parâmetro principal para a recomendação de adubação e calagem em algumas regiões do Brasil. Além da amostragem em grade, amostragem em zonas de manejo baseadas em dados de produtividade e/ou atributos do solo e/ou sensoriamento remoto tem sido utilizada para a recomendação de fertilizantes.

Para a recomendação de fertilizantes nitrogenados em cobertura, os atributos do solo mensurados antes da semeadura das culturas não são parâmetros adequados, devido à grande mobilidade deste elemento no solo, e, portanto, variabilidade temporal. Dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados para desenvolver índices de vegetação como indicadores de crescimento da cultura, estado nutricional e estimativa da produtividade. Os sensores baseados na refletância das culturas estão sendo utilizados principalmente em países da Europa e EUA, em culturas como o milho e o trigo. Outro tipo de medida é a fluorescência, a qual ainda está em fase inicial de testes a campo em relação a métodos que usam a refletância para a diagnose nutricional.

A aplicação a taxa variável surge como uma alternativa para a melhoria da eficiência da adubação das culturas, porém, a caracterização adequada da variabilidade, seja ela com a amostragem de solo ou dados de sensoriamento remoto, associada ao conhecimento da dinâmica dos nutrientes no solo são fatores que definem a eficiência da aplicação a taxa variável.

No Brasil, a aplicação a taxa variável de fertilizantes tem sido realizada com equipamentos de aplicação a taxa fixa dentro de zonas de manejo ou com

equipamentos dotados de controladores eletrônicos capazes de aplicar diferentes dosagens de produtos de acordo com as necessidades em cada local. Este último tipo de aplicação tem sido feita, predominantemente, com aplicação a lanço (em área total), causando questionamento quanto à disponibilidade do fósforo no solo, visto que esse possui elevada capacidade de fixação aos colóides do solo, fato agravado quando este nutriente é aplicado a lanço. Com isso, principalmente em culturas anuais, surgiram recentemente semeadoras capazes de distribuir mais de um nutriente, de forma isolada, a taxa variável no sulco de plantio.

Os trabalhos de pesquisa relacionados a manejo localizado e uso de sensores óticos, no Brasil, ainda são escassos, por isso, com a finalidade de contribuir com mais informações sobre esses assuntos, foi que se idealizou o presente trabalho que visa avaliar os critérios para a aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar, bem como, avaliar o potencial de utilização dos sensores de refletância e fluorescência na determinação dos teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Adubação fosfatada e potássica na cultura da cana-de-açúcar**

Muitos países desenvolvidos e em desenvolvimento estão analisando a possibilidade de programas de biocombustíveis em sua matriz energética. Os principais fatores motivadores são a necessidade de redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa e a estratégia dos países em diversificar sua matriz energética, tornando-a menos dependente do petróleo, sendo a utilização de etanol a partir de cana-de-açúcar uma das principais alternativas. Além do etanol, o consumo mundial de açúcar tem aumentado, fato que põe a cana-de-açúcar como uma das grandes fontes de divisas para o Brasil.

A produção nacional de cana-de-açúcar destinada ao setor sucroalcooleiro e a outros fins na safra 2009/2010 foi de cerca de 604 milhões de toneladas, sendo estimado um aumento de 9,9% para a safra 2010/2011 (CONAB, 2010). A área destinada à colheita foi de 8,9 milhões de hectares, sendo que desse total, 85% estão na região Centro-Sul e 54% no estado de São Paulo. Em termos de custo de produção, a utilização de fertilizantes e corretivos é responsável por cerca de 70% do custo com insumos e 20% do custo total de produção da cultura (AGRIANUAL, 2008).

A escolha do fertilizante mais adequado, bem como a adubação balanceada visando à máxima produtividade são pontos cada vez mais abordados e revisados. Macronutrientes como o fósforo e o potássio possuem grande importância para o aumento na produtividade e representam grande parte dos custos com fertilizantes em cana-de-açúcar.

O fósforo (P) é o elemento que atua na fotossíntese, na respiração, no armazenamento e transferência de energia e na divisão celular. O suprimento adequado de P desde o início do desenvolvimento vegetal é importante para a formação dos primórdios das partes reprodutivas. O P promove a formação e o crescimento prematuro das raízes. Em áreas com históricos de veranicos e em épocas que ocorram déficits hídricos o rápido desenvolvimento do sistema radicular é fundamental, pois assim, as raízes penetram nas camadas mais profundas, com maior disponibilidade de água (BARNES, 1974; RAIJ, 1987). Além disso, o fósforo tem grande importância na qualidade da matéria prima, pois teores de  $P_2O_5$  acima de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  facilitam a clarificação do caldo.

Apesar de, comparativamente aos outros nutrientes, o fósforo ser exigido em menores quantidades são necessárias adubações pesadas com esse nutriente, devido aos solos brasileiros serem naturalmente pobres nesse nutriente, além de sua grande habilidade de reagir com outros nutrientes, como Al, Ca, Fe, silicatos e argilas, formando compostos insolúveis (LOPES, 1989; SUGUITANI, 2001). Por outro lado, tem sido observado que alta concentração de P pode induzir ou aumentar a deficiência de Zn, particularmente em condições de baixa disponibilidade deste (CAKMAK; MARSCHNER, 1987).

O K é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura da cana-de-açúcar, apesar de não fazer parte de nenhum composto orgânico presente na cultura (ORLANDO FILHO, 1993). Participa da síntese de açúcares e proteínas, no aumento da clorofila bruta e conversão de energia nos cloroplastos, e na abertura e fechamento de estômatos. É cofator de aproximadamente 60 enzimas, principalmente ligadas ao metabolismo de açúcares, transformações anabólicas e catabólicas de sacarose e hexose. Baixos níveis de sacarose são associados à deficiência de K. A cana-de-açúcar, mais que a maioria das outras plantas, parece ter maior necessidade de metabolizar glicose em seus primeiros meses de crescimento e desenvolvimento (ALEXANDER, 1965; VIEIRA, 1983). Além disso, o K acelera a lignificação das células esclerenquimáticas e aumenta a espessura das paredes

celulares do colmo, especialmente na parte inferior o que explica a maior resistência oferecida pela planta ao tombamento pelo vento (MALAVOLTA, 1980).

A interação entre K, Ca e Mg ocorre tanto nas plantas quanto no solo, e é objeto de vários estudos. Íons cujas propriedades químicas são similares competem por sítios de adsorção, absorção e transporte na superfície radicular, o que normalmente ocorre entre  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  (FAGERIA et al., 1991). Devido à dinâmica das reações de troca iônica nos solos, é importante considerar as inter-relações entre  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , pois o excesso de um poderá prejudicar os processos de adsorção do outro e, conseqüentemente, influir diretamente nos processos de absorção pelas plantas (ORLANDO FILHO et al., 1996).

Na cana-de-açúcar, o uso do resíduo agroindustrial denominado vinhaça é de grande importância, para o fornecimento de água e nutrientes, em especial K. Porém, em muitas áreas a aplicação é realizada de maneira desuniforme e altas dosagens, propiciando áreas com excesso de K. Esse excesso de K pode provocar retardamento do processo de maturação da planta, o que leva à queda no teor de sacarose e comprometimento da qualidade da matéria-prima (ROSSETO; SANTIAGO, 2010). Além disso, o uso contínuo de vinhaça pode provocar a lixiviação de vários íons, sobretudo do nitrato e do potássio quando as dosagens ultrapassarem a capacidade de retenção do solo (SILVA, 2007).

As quantidades de fertilizantes aplicadas ao solo são de grande importância para o desenvolvimento e produtividade das culturas, bem como para o ambiente, visto que este é afetado por tais práticas. As sub ou super adubações geralmente ocorrem por falta de informação detalhada dos atributos do solo e as reais necessidades das plantas no momento da aplicação dos fertilizantes, bem como o uso de equipamentos inapropriados para aplicação.

#### **4.2 Adubação nitrogenada no algodoeiro**

A produção global de algodão na safra 2010/2011 deve crescer 10,5%, atingindo 113,5 milhões de fardos (2,47 milhões de toneladas), segundo o USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em seu Fórum de Perspectivas Agrícolas. O principal motivo seria a elevação os preços globais da commodity.

O algodoeiro é uma das principais plantas domesticadas pelo homem e uma das mais antigas, tendo registros de seu uso a mais de 4.000 anos, sendo cultivado comercialmente em mais de 65 países. Essa cultura representa mundialmente mais de 40% da vestidura da humanidade, no Brasil representa mais de 60% dos insumos têxteis, já nos Estados Unidos da América 65%, de acordo com as informações do Anuário Brasileiro do Algodão (2003). A cultura caracteriza-se por apresentar rigorosos critérios de avaliação de qualidade e altos custos de produção. Em termos de custos de produção, a utilização de fertilizantes e corretivos é responsável por 30% do custo com insumos e cerca de 15% do custo total de produção da cultura (CARVALHO; FERREIRA, 2006).

Em geral, o nitrogênio é considerado fator limitante para a produtividade do algodoeiro, tanto em áreas irrigadas como no cultivo de sequeiro, entretanto, aplicações excessivas podem reduzir a produção e a qualidade da fibra (HUTMACHER et al., 2004).

A adubação nitrogenada é um componente importante tanto no custo de produção quanto na qualidade e produtividade de algodão. O excesso de adubação nitrogenada faz com que seja aumentado o tamanho dos frutos na parte superior da planta, com um aparente aumento na produtividade. No entanto, ao mesmo tempo em que os frutos da parte superior da planta são aumentados, o excesso do nutriente faz com que o tamanho dos frutos da parte de baixo e da parte mediana da planta seja diminuído, sem efeito significativo na produção (BOQUET et al., 1994). O excesso de nitrogênio estimula o crescimento vegetativo com prolongamento do ciclo do algodoeiro, o que nem sempre é desejável, principalmente em regiões onde podem ocorrer chuvas durante a colheita ou ataques tardios de pragas e/ou doenças. Neste sentido, Frye e Kairuz (1990) comentam que o excesso de nitrogênio produz plantas vigorosas, porém com pouca frutificação e abertura tardia e irregular dos capulhos.

O nitrogênio é um dos nutrientes aplicados em grandes quantidades na cultura do algodoeiro, que extrai, em média, 60 a 70 kg ha<sup>-1</sup> de N para a produção de uma tonelada de algodão em caroço, havendo necessidade de adubação para complementar a quantidade fornecida pelo solo (CARVALHO et al., 2007). Além do incremento da produtividade, a adubação deve ser realizada de forma racional evitando desperdícios de fertilizantes, contaminações ambientais, perda de competitividade devido ao aumento

excessivo de custos, dentre outros. Quando o suprimento de N excede a necessidade da cultura, o excesso é perdido por escoamento superficial e lixiviação, podendo contaminar ecossistemas aquáticos e o lençol freático (WOOD et al., 1993). Essa perda de nitrogênio para o meio ambiente representa também perda econômica para os agricultores. Entretanto, redução inapropriada no suprimento de nitrogênio poderia resultar em redução de produtividade, e por consequência, perda econômica. Com esse dilema, a solução seria um método adequado de avaliar os teores de nitrogênio e sua variabilidade na propriedade. Para aumentar a eficiência no uso do nitrogênio em sistemas agrícolas é necessária uma maior sincronia entre a demanda de N pela cultura e o fornecimento dos nutrientes por todas as fontes durante a safra (CASSMAN et al., 2002).

Na região sul do Brasil, o teor de matéria orgânica do solo (MOS) tem sido utilizado para prever a disponibilidade de N no solo, na ausência de melhores índices (ANGHINONI, 1985). Porém, a mineralização do N, é influenciada por vários fatores como a textura do solo, temperatura, umidade e pH, além do método de preparo do solo e cultura antecessora de forma heterogênea na lavoura. Assim o método tradicional pode ocorrer em determinações incorretas para determinados pontos da lavoura, uma vez que a disponibilidade de N é muito influenciada durante o desenvolvimento da cultura. Segundo Kluthcouski et al. (2006), em condições climáticas adversas, condicionadas pelo teor de MOS, textura do solo, época e método de aplicação do fertilizante, o N torna-se um nutriente que é facilmente perdido por lixiviação, volatilização e desnitrificação no solo, atingindo perdas nas regiões subtropicais, que podem alcançar entre 20 a 78% da quantidade total aplicada (FONTOURA, 2009). Como decorrência disso, a eficiência da adubação é reduzida situando-se nas melhores situações entre 50 a 60% (KLUTHCOUSKI et al., 2006).

A absorção de nitrogênio pelas culturas é variável em uma safra, entre safras, entre locais dentro de um mesmo talhão e entre culturas, mesmo quando o fornecimento de N, tanto do solo quanto aplicações adicionais de fertilizantes são abundantes (GASTAL; LEMAIRE, 2002). A deficiência de nitrogênio causa mudanças previsíveis no desenvolvimento e composição das folhas das plantas e, indiretamente, mudanças na distribuição espectral de radiação refletida pelas folhas de plantas deficientes (TARPLEY et al., 2000). Portanto, métodos que avaliam a distribuição espectral de radiação refletida pelas

plantas são um bom indicador para estimar doses de N a serem aplicadas nas culturas (SCHÄCHTL et al., 2005).

### **4.3 Variabilidade dos atributos do solo**

As propriedades do solo, além de variar no espaço, podem variar no tempo, para uma dada posição no espaço. Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em algumas propriedades que em outras (BRAGATO; PRIMAVERA, 1998).

A variabilidade de propriedades do solo tem sido abordada por vários autores sendo atribuída a diversos fatores, tais como características do material de origem e os fatores de formação, os quais não atuam pontualmente, mas sim segundo um determinado padrão. Propriedades do solo, no entanto, podem apresentar dependência espacial em escalas que variam da ordem de poucos metros a alguns quilômetros. Além disso, é importante constatar que o solo é resultante da ação de alguns fatores que atuam em larga escala, cujo efeito é alterado por fatores que atuam em escalas menores; em diferentes níveis de superposição de efeitos, o que proporciona um caráter hierárquico para a estrutura de variação das propriedades no espaço (GONÇALVES, 1997).

Segundo Vieira (1995) e Ribeiro Junior (1995) a quantificação da variabilidade espacial é útil por dois motivos: O primeiro é que o conhecimento dos erros associados ao modelo permite avaliar a qualidade dos resultados, definindo se estes atendem ao esperado, e se a qualidade é superior à necessária. Neste caso, nos próximos trabalhos, pode-se adotar uma amostragem menos intensa, reduzindo custos. Por outro lado, a qualidade pode ser inferior à necessária. Neste caso, talvez seja necessário coletar mais dados, calibrar melhor o modelo, usar melhor o modelo, trabalhar em uma resolução espacial diferente ou até mesmo, escolher melhor um método de predição (VIEIRA, 1995; RIBEIRO JUNIOR, 1995). O segundo é que o mapeamento dos atributos em questão, para agricultura de precisão, é a base para se gerar mapas de prescrição. Tomando como referência este segundo motivo, Goering e Hans (1993) partem do princípio de que, levando-se em conta a variabilidade natural dos fatores de produção, podem-se aplicar apenas as quantidades efetivamente

necessárias em cada ponto e que, portanto, as técnicas de aplicação localizada de insumos se tornam muito importantes para uma agricultura rentável.

O número de amostras de solo necessárias para representar a variabilidade do campo tem sido matéria de discussão desde o início do século XX (LINSLEY; BAUER, 1929). Com o aumento da densidade amostral a variação entre as amostras diminuem (MCINTYRE, 1967) e segundo Sawyer (1994) o sucesso econômico da aplicação a taxa variável dependerá da habilidade da amostragem em representar a área que responderá a adubação evitando áreas onde não é necessária adubação.

De acordo com Molin (2001), a investigação da variabilidade espacial pode ser feita por amostragens de solo georreferenciadas ou pelo uso do sensoriamento remoto. A amostragem de solo em grade pode fornecer uma base acurada para a geração de mapas de aplicação de fertilizantes em taxa variável, porém medidas indiretas e não destrutivas fornecidas pelo uso de sensores são uma alternativa para tomada de decisão sobre o manejo de uma determinada cultura (MOGES et al., 2004).

#### **4.4 Agricultura de Precisão**

Antes mesmo da revolução industrial e do processo de mecanização da atividade agrícola, os agricultores já se mostravam capazes de reconhecer a variabilidade espacial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas. A própria divisão dessas áreas em talhões reflete essa capacidade de discernimento. Até então, o uso de trabalho braçal e/ou tração animal permitia aos agricultores tratar áreas com menor ou maior fertilidade ou com infestação de pragas, doenças e plantas daninhas de forma diferenciada (FRAISSE, 1998).

Os fundamentos da agricultura de precisão moderna (AP), segundo a literatura, surgiram com Linsley e Bauer (1929) apresentaram a Circular 346 da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (USA) onde os autores concluíram que: os requisitos de aplicação variavam bastante para um mesmo talhão em sua necessidade de calcário; e a necessidade de que fossem feitos testes sistemáticos e detalhados no campo, de forma que o calcário pudesse ser aplicado de acordo com a sua necessidade. Essa idéia permaneceu no esquecimento por muitos anos, até o momento em que a disponibilidade de

microcomputadores, sensores e sistemas de posicionamento via satélite se tornaram disponíveis a custos acessíveis.

Surgiu desse modo, o conceito de Agricultura de Precisão (AP), o qual vem sendo definido de diferentes maneiras por diversos autores. Schueller (1992) definiu a Agricultura de Precisão como um método de administração cuidadosa e detalhada do solo e da cultura para adequar as diferentes condições encontradas em cada ponto da lavoura, tendo em vista a desuniformidade intrínseca dos solos. Para Goering e Hans (1993) a Agricultura de Precisão tem como meta final aplicar sementes, fertilizantes, e outros insumos variavelmente em cada talhão, nas taxas adequadas à produtividade do solo em cada ponto do talhão.

Segundo Searcy (1995) a Agricultura de Precisão é a tecnologia que possibilita modular a aplicação dos insumos agrícolas numa base pontual em resposta a necessidades altamente localizadas das plantas. De acordo com Blackmore e Larscheid (1997) os conceitos da Agricultura de Precisão estão relacionados à variabilidade da produtividade e dos atributos do solo e das plantas. Segundo estes autores, existem três tipos de variabilidade: espacial, temporal e preditiva. A variabilidade espacial é observada ao longo do campo e pode ser facilmente constatada em qualquer mapa de produtividade ou fertilidade. A variabilidade temporal é observada quando se comparam mapas de produtividade de vários anos; a variabilidade preditiva é a diferença entre a previsão de algum fator e o que realmente aconteceu. Os autores relatam que, para gerenciar cada uma das variabilidades é necessário entendê-las e, sobretudo, mensurá-las.

Em uma visão mais voltada para os equipamentos, Strauss et al. (1998) disseram que a Agricultura de Precisão envolve sistemas automáticos, basicamente compostos por microcontroladores, sensores e atuadores acoplados ao implemento agrícola pré-existente e interligado ao Sistema de Posicionamento Global “Global Positioning System”. Para Molin (2001), Agricultura de Precisão é um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados.

Outro fato que tem impulsionado a utilização desse conceito é a crescente preocupação com fatores ambientais, pois, com essa técnica, as aplicações de produtos químicos são efetuadas de modo a satisfazer a necessidade de cada ponto do talhão e

com isso, diminuir a probabilidade desses produtos serem lixiviados e contaminarem o ambiente (BOUMA, 1998).

Portanto, a agricultura de precisão pode ser definida como um sistema de gerenciamento que leva em consideração a variabilidade espacial que existe dentro de uma área de produção, independente de seu tamanho e trata de maneira localizada essa variabilidade.

#### **4.5 Aplicação de fertilizantes a taxa variável**

A variabilidade espacial de atributos químicos do solo geralmente é intrínseca a cada local e condições de solo e clima. A visão predominante de qualidade do solo, na atualidade, refere-se à natureza dinâmica dos solos, influenciada pelo uso e manejo praticado pelo homem (REICHERT et al., 2003).

O conhecimento detalhado da variabilidade química e suas relações com a produtividade pode permitir implantar o manejo em sítio específico ou a taxa variada (COELHO, 2003), com ganhos no manejo dos insumos, redução nos custos de produção e minimização dos riscos ambientais (VIANA, 2005; BISCARO; GARZELLA, 2006).

A condição elementar que rege a adoção da agricultura de precisão é a variabilidade espacial. Em sistemas de produção que visam o incremento da eficiência por meio de manejo regionalizado de insumos e práticas agrícolas, como no sistema de AP, as alternativas para se estimar e definir as causas da heterogeneidade na produtividade das culturas, em condições de campo, têm se baseado em mapas de rendimento (MOLIN, 2002) ou no conhecimento da distribuição espacial e das relações dos principais atributos químicos, usados na avaliação da fertilidade (ORTEGA, 1997; LIMA; SILANS, 1999; VIANA, 2005).

O entendimento de que a propriedade não é homogênea, possibilita que, por exemplo, a quantidade de fertilizantes deixe de ser utilizada em quantidade média para toda a área, atendendo apenas as necessidades médias e não considerando, desta forma, as necessidades específicas de cada gleba (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002).

A estratégia de controle das necessidades de insumos e das taxas a serem aplicadas pode ser efetuada por meio de mapas definidos a partir de informações de atributos da fertilidade do solo, rendimentos obtidos e esperados. Neste sentido, as aplicações

podem ser comandadas por meio de dispositivos nas máquinas de aplicação que comandam as decisões de variação da aplicação, processando os dados dos sensores existentes e os dados inseridos pelo usuário (DALLMEYER; SCHLOSSER, 1999), ou seja, exige equipamento de localização do aplicador no campo (GPS), bem como de equipamento que armazene o mapa de variabilidade com as taxas programadas (MOLIN, 1997). Para Focht et al. (2004), sistemas mais simples, como a demarcação das zonas de manejo através do “método de rastros” ou zonas de manejo e a aplicação das taxas definidas em cada zona utilizando os equipamentos disponíveis na propriedade pode também ser um sistema eficaz e econômico.

A amostragem composta de solo significando uma média para toda a área faz da recomendação agrônômica e da aplicação de fertilizantes, um processo excessivamente simplista. Conseqüentemente, a aplicação de uma taxa fixa de fertilizantes em um solo espacialmente variável, causa efeitos de superfertilização em algumas áreas e em outras, de subfertilização. Atherton et al. (1999) identificaram os tipos de informações necessárias para a prática da AP e dentre os principais fatores listados que influenciam a variabilidade da produtividade, os autores incluíram a movimentação de nutrientes através de processos erosivos e lixiviação, o pH do solo, a profundidade da camada superior do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC), a distribuição de tamanhos e a mineralogia das partículas primárias, a população e atividade de micro e macro organismos, bem como a porosidade do solo. Conhecendo a extensão da variabilidade desses fatores dentro de uma gleba, é possível suprir os produtores com as informações e recomendações necessárias para a fertilização desta gleba.

A aplicação de fertilizantes em taxa variável, baseada na variabilidade do solo dentro de um campo, tem um potencial para reduzir sub e super fertilizações, e assim melhorar a eficiência de uso de fertilizantes, o rendimento das culturas e o lucro líquido da propriedade (FIEZ et al., 1994). Apesar do grande potencial dessa tecnologia no meio agrícola, não se encontram no Brasil muitas pesquisas e publicações que demonstrem seus reais benefícios.

No Brasil, a agricultura de precisão está sendo difundida no que se refere a monitores de produtividade e aplicações em taxas variáveis (ATV) de calcário e fertilizante, utilizando-se máquinas que realizam a aplicação a lanço. Mais recentemente, a indústria de máquinas agrícolas começou a disponibilizar a possibilidade de realizar ATV no

sulco de plantio, utilizando-se semeadoras. Esta possibilidade vem solucionar um dos problemas da ATV de fertilizantes que é a aplicação de fósforo (P) a lanço, visto que esse nutriente possui elevada capacidade de fixação aos colóides do solo, tornando-se indisponível às plantas (COPETTI, 2010).

O controle da aplicação dos insumos é feito por dispositivos responsáveis pela variação da vazão, montados em equipamentos especializados para aplicação, principalmente de produtos sólidos, ou mesmo em semeadoras-adubadoras, e normalmente acionados por potência hidráulica. Para o caso de mapas com base em zonas de manejo ou mesmo unidades de aplicação, a presença do controle automatizado não é obrigatória, pois as vazões de insumo serão alteradas apenas na transição entre unidades (COPETTI, 2010).

A premissa da aplicação de técnicas de agricultura de precisão é a aplicação de insumos agrícolas em locais específicos e nas quantidades requeridas. O insumo aplicado de maneira inadequada, principalmente agrotóxicos e fertilizantes, pode gerar impactos ambientais severos e aumento do custo de produção das culturas (BIERMACHER et al., 2006). Menegatti et al. (2006) e Barbieri et al. (2008) mencionam que, na experiência de usinas que implantaram as técnicas de agricultura de precisão, utilizando critérios localizados e detalhados de aplicação de insumos, houve redução no uso desses insumos sem causar queda na produtividade.

#### **4.6 Sensores óticos remotos na agricultura**

O sensoriamento remoto é a aquisição de informações sobre um objeto sem que haja contato físico (COLWELL, 1983). As informações obtidas geralmente dependem da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos de interesse (CAMPBELL, 1987).

O sensor remoto é um dispositivo capaz de responder à radiação eletromagnética de determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada à interpretação pelo usuário (STEFFEN et al., 1981). Cada objeto apresenta um comportamento frente à radiação nele incidente, que depende de diversos fatores, muitos dos quais não são controlados. As frações de energia transmitida, refletida e

absorvida pelos objetos variam com suas propriedades físico-químicas, estrutura e posição em relação à fonte de radiação (NOVO, 1992). Mesmo assim, dentro de determinadas condições é possível estabelecer a característica espectral de alguns alvos.

Diversos produtos podem ser obtidos com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto na agricultura. Segundo Epiphanyo e Formaggio (1988), muita informação pode ser retirada a partir da análise de apenas uma banda espectral, porém a disponibilidade de várias bandas permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, ou seja, quanto maior o número de bandas espectrais dispuser um sistema sensor, mais possibilidades de extração de informações do objeto de estudo ele poderá abranger.

A mensuração da refletância espectral é a abordagem sem contato e não destrutiva mais promissora para a determinação de características das culturas, como a deficiência de nitrogênio (TUMBO et al., 2002). Em estudos onde foi avaliada a resposta espectral de folhas verdes, constatou-se que no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm (faixa do visível - VIS) a refletância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (550 nm) (MOREIRA, 2005). A queda da refletância está associada à absorção pelos pigmentos foliares, principalmente pela clorofila. Na região do azul, a absorção ocorre nas proximidades do comprimento de onda de 445 nm e está associada à presença dos pigmentos xantofila, carotenos, clorofilas  $\alpha$  e  $\beta$  e na região do vermelho (V) apenas a clorofila atua, absorvendo energia em torno de 645 nm. Na faixa do infravermelho próximo (IVP), de 700 a 1300 nm, ocorre outro aumento na refletância para valores próximos a 50%, devido à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células, e à quantidade de espaços intercelulares). Daí em diante, até 2500 nm (infravermelho médio - IVM), há um gradual decréscimo, na refletância aparecendo algumas feições de absorção pelo conteúdo de água líquida.

Os índices espectrais de vegetação, ou simplesmente índices de vegetação (IVs), podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais dessas bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com as variáveis da vegetação. Um índice de vegetação ideal deve ser capaz de responder a sutis variações no estado fenológico da vegetação, independentemente da situação temporal ou

espacial, e não pode sofrer fortes influências por variações de tipos de solo, na geometria de iluminação e visada e nas condições atmosféricas (HUETE, 1996).

Com o trabalho de Rouse et al. (1973) surgiu o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), o qual preconizava uma relação entre medidas espectrais de duas bandas que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e também diminuía as influências da atmosfera e das variações sazonais do ângulo do sol. No entanto, a influência do solo, da atmosfera e da geometria de iluminação e visada não foi adequadamente eliminada, tendo surgido diversas variações para o NDVI, na tentativa de obter um índice menos sensível a tais influências. Atualmente, utiliza-se qualquer par de bandas do V e do IVP, proveniente de qualquer sensor ótico, e alguns estudos mais recentes têm investigado a aplicabilidade de bandas do IVM (MIURA et al., 1998).

Os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para caracterizar dados espaciais de uma cultura (STEVEN, 2004; YOUNAN; KING, 1999), e a informação obtida pode ser usada para melhorar a qualidade das culturas, monitorar a irrigação, processos de fertilização e o manejo de plantas daninhas (YOUNAN; KING, 1999).

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para estimar variáveis das culturas como radiação fotossinteticamente ativa, índice de área foliar (BARET; GUYOT, 1991), conteúdo de clorofila nas folhas (TUMBO et al., 2002), cobertura do solo (BOISSARD et al., 1992), acumulação total de matéria seca (TUCKER et al., 1981), conteúdo de água (WAHEED et al., 2006), produtividade (FISCHER et al., 1993), conteúdo de nitrogênio (SOLIE et al., 2002) e falhas de plantio (FRASSON, 2007).

O uso de sensores óticos terrestres propicia maiores correlações com as variáveis das culturas, quando comparado com fotografias aéreas e imagens de satélite (WRIGHT et al., 2004), além de não ser possível obter sempre as imagens de satélite com a qualidade desejada devido a condições climáticas, como a presença de nuvens. A aquisição de dados com sensores manuais, acoplados em tratores, são menos dependentes das condições climáticas do que dados orbitais ou sub-orbitais (STEVEN, 2004).

#### **4.6.1 Sensores óticos de refletância**

A espectrometria ótica se baseia na premissa de que pigmentos como a clorofila, absorvem a radiação nos comprimentos de onda dentro do espectro do visível, enquanto que a radiação no infravermelho próximo é refletida pela folha (MINOLTA, 1989). Dessa forma, através da determinação da clorofila pode-se obter uma estimativa indireta do estado nutricional da planta, pois grande parte do nitrogênio está presente nessa molécula (MINOLTA, 1989; LEMAIRE, 1997; ARGENTA et al., 2003; RAMBO et al., 2004). Os aspectos positivos desta tecnologia quanto a outros métodos de diagnose se referem à pequena necessidade de procedimentos laboratoriais e, conseqüentemente, menores custos; além disso, o tempo entre amostragens e resultados é muito menor do que quando são feitas análises de indicadores do solo, essencial para a correção de deficiência de N (SCHRÖDER et al., 2000).

Nos últimos anos têm surgido alguns sensores óticos terrestres de refletância para uso na agricultura, com o objetivo principal de detectar deficiências de N e recomendar doses de N. Consideráveis pesquisas tem sido diretamente feitas para desenvolver algoritmos que traduzam o valor fornecido pelo sensor em decisões de quanto aplicar de N para as culturas do trigo (RAUN et al., 2002), milho (KITCHEN et al., 2010; SOLARI et al., 2008) e algodão (OLIVEIRA, 2008). Além disso, o teor de clorofila na planta é um dos fortes indicativos de deficiência ou suficiência de N no solo (SCHEPERS; SHANAHAN, 2005), pois integra os atributos de solo como pH, matéria orgânica, taxa de mineralização de nitrogênio, umidade entre outros.

O uso de sensores de refletância nas principais culturas ainda é restrito devido ao elevado custo dos sensores. Hoje, existem três principais sensores de refletância disponíveis comercialmente, o Crop Circle, o GreenSeeker e o Yara N sensor. As versões mais recentes desses sensores são ativas, ou seja, possuem a própria fonte de luz a qual possibilita à aplicação a taxa variável sem considerar as condições de luz do ambiente (LINK; REUSCH, 2006).

O Crop Circle ACS 470 é um equipamento que possui três bandas selecionáveis a partir de 420 a 800 nm. Para a dose a ser recomendada para cada unidade e em cada estágio das culturas existe um banco de dados indicando a quantidade a ser aplicada de N quando a leitura do sensor indica um determinado valor. Porém, esses dados estão disponíveis principalmente para as culturas do trigo e milho, nas condições de cultivo dos EUA e Europa. Shanahan et al. (2008) desenvolveu um algoritmo para converter os valores obtidos pelo Crop

Circle em taxas recomendadas para corrigir a deficiência de N em um determinado estágio do milho. Estes autores encontraram redução de 26 a 45% na adubação nitrogenada dependendo do local, quando comparado a adubação tradicional.

O "GreenSeeker®" é um sensor, desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA), na década de 1990. Este aparelho utiliza diodos de emissão de radiação nas faixas do vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (770 nm). A leitura de refletância é calculada por microprocessador interno, fornecendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é transmitido a um computador portátil adaptado ao sensor (NTECH INDUSTRIES, 2009). Atualmente, esse sensor vem sendo amplamente utilizado para aplicações de nitrogênio a taxa variável em diversos países.

O sensor de N Yara (YARA INTERNATIONAL ASA, OSLO, NORWAY) é um escaner multiespectral montado sobre o trator (ZEBARTH et al., 2003; BERNTSEN et al., 2006). Este equipamento consiste em dois diodos com espectrômetros, sendo que um analisa a luz refletida por quatro lentes com um ângulo oblíquo sobre as culturas. Aproximadamente 25% do total da área é escaneada. O segundo espectrômetro é usado para mensurar o ambiente luminoso para correção do sinal de refletância e assegurar leituras estáveis com a mudança de condições de irradiância (REUSCH et al., 2002; ZILLMAN et al., 2006). Este sensor pode determinar o estatus de N das culturas através das características da refletância nos comprimentos de onda selecionados entre 450 a 900 nm, e calcular o NDVI e outros índices usados para criar algoritmos e determinar a dose ideal de N a ser aplicada.

Em plantas com deficiência de N ocorre redução dos teores de clorofila, diminuindo também a refletância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células da planta, e esse decréscimo induz a um aumento na refletância no vermelho (AYALA-SILA et al., 2005). Alguns trabalhos constataram que os sensores de refletância foram capazes de detectar a deficiência de nitrogênio, em milho (BLACKMER et al., 1996), trigo (STONE et al., 1996), feijão (THAI et al., 1998), algodão (SUI, 2005) e citros (MIN; LEE, 2005).

A utilização de sensores de refletância montados na frente de um trator propiciou correlações de 0,64 a 0,81 com os teores foliares de N em variedades de trigo (STONE et al., 1996) e correlações de 0,75 em pastagens (TAYLOR et al., 1998). Kim et al.

(2005), estudando dados de coleta com o sensor GreenSeeker em três épocas diferentes e dois tipos de sistema sem irrigação em cevada, encontraram correlações entre o NDVI e a dose de nitrogênio aplicado na semeadura de 63 a 90%.

Além dos teores de N das plantas os índices dos sensores de refletância têm sido utilizados para estimar biomassa e produtividade. Schwab et al. (2000) correlacionando os valores de NDVI coletados com o GreenSeeker, não obtiveram boas correlações com a produtividade final, mas correlacionando com o INSEY (in-season estimate of grain yield), que é calculado dividindo o NDVI pelo número de dias após a semeadura, dizem haver uma correlação ( $R^2 = 0,55$ ). Bronson et al. (2005) observaram também que o NDVI foi mal correlacionado com biomassa e produtividade do algodoeiro. Por outro lado, Khalilian et al. (2007) observaram forte correlação entre o NDVI e altura de plantas e produtividade de algodão. Zhao et al. (2005) verificaram que as mudanças na produtividade de fibras do algodoeiro foram fortemente relacionadas com valores de NDVI porém relatam que no estágio inicial de desenvolvimento da cultura as correlações não foram boas.

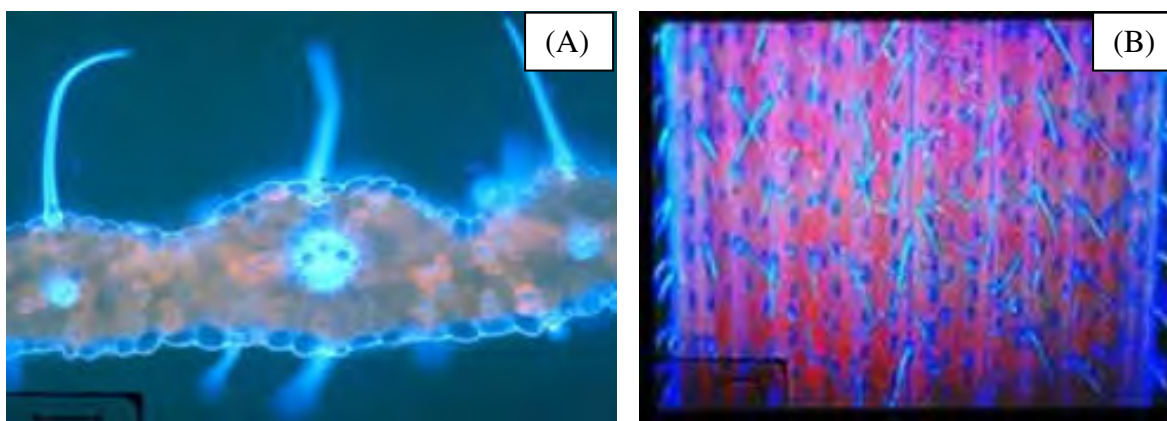
#### **4.6.2 Sensores óticos de fluorescência**

No passado lasers indutores de fluorescência da clorofila foram usados para o estudo do declínio de florestas (LICHTENTHALER et al., 1990) e para detecção de diferentes estresses nutricionais em plantas (SCHUERGER et al., 2003; SUBHASH; MOHANAN, 1994). O princípio de avaliação é que a luz emitida pelo laser é absorvida pelas moléculas de clorofila as quais dissipam a energia emitida pela luz fluorescente.

O espectro da fluorescência da clorofila é caracterizado por picos na região do vermelho (685 nm) e infravermelho próximo (720-740 nm) (BRIANTAIS et al., 1986). A luz vermelha fluorescente é seletivamente reabsorvida pela clorofila, sendo que a luz do infravermelho próximo é pouco afetada (AGATI et al., 1993). O grau de reabsorção é fortemente dependente a concentração de clorofila (LICHTENTHALER; RINDERLE, 1988), por isso a medida da intensidade de luz fluorescente nos comprimentos de onda vermelho e infravermelho próximo fornece informação sobre a concentração de clorofila (GUNTHER et al., 1994; SUBHASH; MOHANAN, 1994).

A concentração de clorofila de uma planta pode servir como uma ferramenta para prever a dose ótima de adubação nitrogenada (BLACKMER; SCHEPERS, 1995; PELTONEN et al., 1995). Diferentes grupos de pesquisa estão desenvolvendo sistemas sensores para aplicações de campo (BREDEMEIER; SCHMIDHALTER, 2003, CORP et al., 2000). Estes dispositivos são caracterizados por apresentarem excitação através de diferentes comprimentos de onda. Corp et al. (2000) usando uma fonte de excitação-UV determinou os teores de nitrogênio em plantas de milho. Para Bredemeier e Schmidhalter (2003), um sensor de luz vermelha foi hábil em detectar a matéria seca, o conteúdo de N e a absorção de N em plantas de trigo.

As folhas quando sob excitação UV mostram uma emissão específica e complexa de luz, chamada de fluorescência (Figura 1A e 1B). Existem dois tipos diferentes de fluorescência: a fluorescência verde-azulada e a fluorescência vermelha. A imagem fluorescente reflete a anatomia da folha, mostrando que a fluorescência verde-azulada vem principalmente da epiderme, tricomas, feixes vasculares e células da parede, enquanto a fluorescência vermelha vem predominantemente de cloroplastos das células do mesofilo (AGATI et al., 2007).

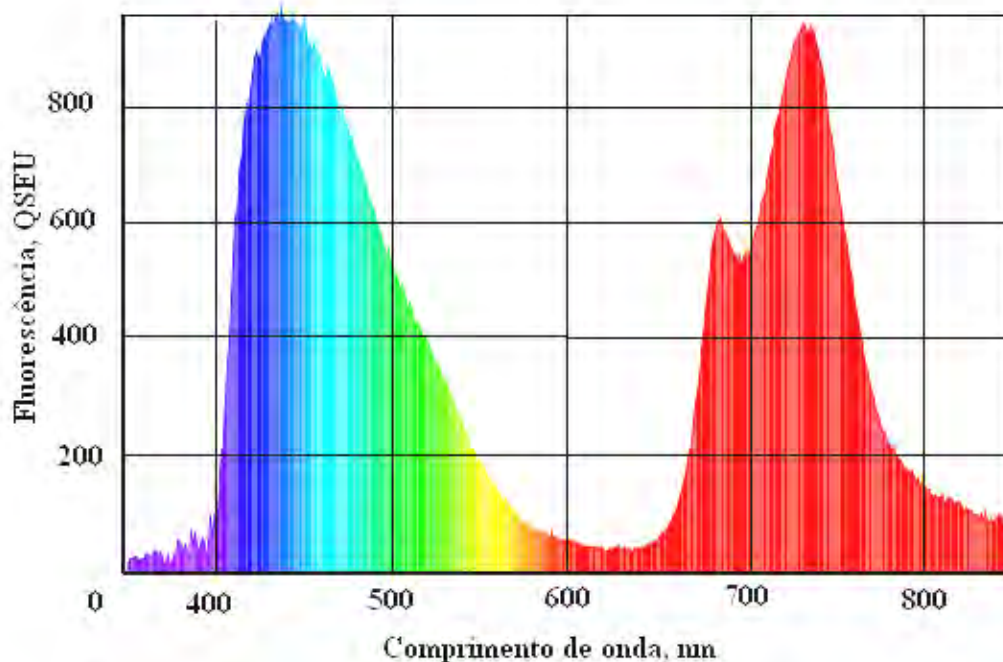


**Figura 1** - Emissão de fluorescência na seção transversal (A) e na superfície (B) de uma folha de trigo quando excitado pela luz ultravioleta (FORCE A).

O sensor de fluorescência Multiplex® é um equipamento manual da Force-A (Orsay, France) que emite fluorescência nos tecidos das plantas usando múltiplas

excitações (ultravioleta, azul, verde e vermelho) para estimar simultaneamente e de forma não destrutiva, vários compostos como antocianinas, flavonóis, clorofila, bem como outros parâmetros que funcionam como indicativo do estado fisiológico das plantas.

O princípio de funcionamento é baseado na fluorescência da clorofila (AGATI et al. 2007; CEROVIC et al. 2008). O método é válido para folhas (KOLB, 2005) e frutos (KOLB et al. 2003; AGATI et al. 2007). Um feixe visível é usado como referência para deixar a epiderme transparente. A presente versão do sensor possui 6 feixes de luz de 375 nm UV-A (UV), 3 vermelho Vermelho-Azul-Verde (RGB) emitindo luz a 470 nm (Azul, B); 516 nm (Verde, G) e 625 nm (vermelho, R).



**Figura 2** - Espectro de emissão de fluorescência em folhas de trigo. *QSEU*: unidades equivalentes de sulfato quinina (FORCE A).

O espectro de emissão de fluorescência em folhas de trigo (Figura 2) mostra que a fluorescência verde-azulada é emitida na faixa de 400-630 nm, ao passo que a fluorescência vermelha é emitida na região do vermelho e vermelho-extremo (630-800 nm) do espectro. Um espectro de fluorescência induzida por UV típico das folhas tem três picos, em 440-450 nm, 687 nm e 735 nm e um ombro em 530 nm, que pode ser mais ou menos

pronunciada. Com uma banda larga de detecção da fluorescência estas características espectrais são usualmente chamadas fluorescência azul (BF), fluorescência verde (GF), fluorescência azul-verde ou amarelo quando consideradas em conjunto (YF), fluorescência vermelha (RF) e fluorescência vermelho-extremo (FRF).

A fluorescência vermelha é emitida somente pela clorofila. Durante muitos anos esta fluorescência da clorofila foi usada como um teste preciso e não destrutivo de eficiência fotossintética, direta ou indiretamente relacionada com muitos tipos de estresses da planta. Os dois picos de fluorescência (687 e 735 nm) são devido à presença de dois fotossistemas no aparelho fotossintético, PSI e PSII. A fluorescência azul-esverdeada, descoberta mais recentemente, tem uma origem muito heterogênea, com um grande número de candidatos entre eles fluoróforos, e ácidos hidroxicinâmicos (caféico, ferúlico), cromonas, estilbenos (resveratrol), cumarinas, isoflavonas, nicotinamides, flavinas, pteridinas e alcalóides (CEROVIC et al., 1999).

O conteúdo de clorofila em folhas é conhecidamente relacionado à disponibilidade de N nas plantas (SCHLEMMER et al., 2005). Polifenóis incluindo antocianinas e flavonóis na camada da epiderme, os quais são emitidos a partir do metabolismo secundário da planta, são também afetados pela disponibilidade de N na planta (CEROVIC et al., 1999).

Os sensores de fluorescência são eficientes em detectar tanto baixas quanto altas concentrações de N foliar sem que ocorra saturação nas curvas, como ocorre com as medidas de refletância. Outra vantagem deste tipo de sensor é que, mesmo nos estádios iniciais das culturas as correlações são elevadas, uma vez que somente o material vivo emite fluorescência, então, o solo descoberto não exerce influência sobre as medidas (LIMBRUNNER; MAIDL, 2007).

Os sensores de fluorescência surgem como uma ferramenta auxiliar para a diagnose nutricional das culturas. Porém, ainda faltam estudos de como deve ser usado a campo e qual a sensibilidade para medidas agronômicas.

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

Para a avaliação e aplicação de nutrientes foram analisadas duas metodologias: modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar e utilização de sensores óticos de refletância e fluorescência na determinação dos teores de nitrogênio no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro.

### **5.1 Experimento 1: Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar**

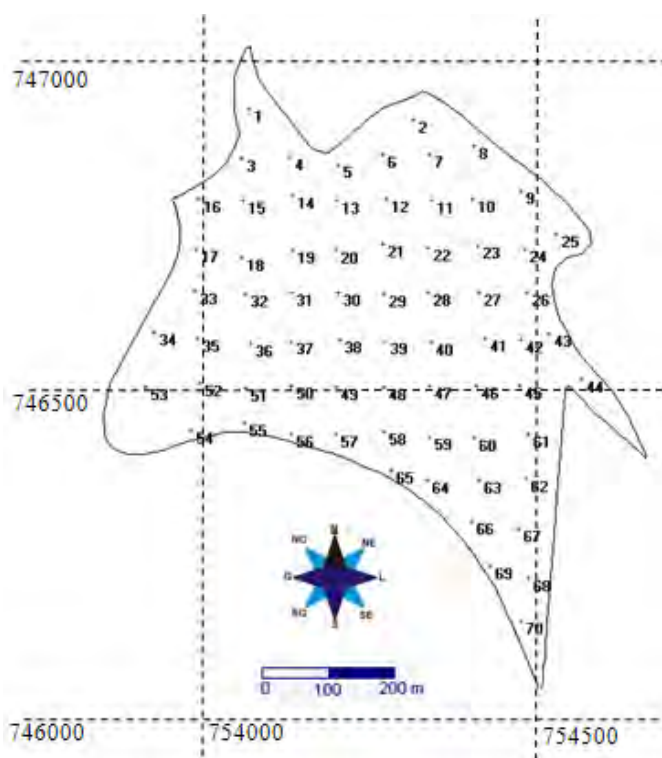
#### **5.1.1 Localização e caracterização experimental**

Para avaliar os diferentes modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos foi escolhida uma área no município de Igarçu do Tietê, SP pertencente à Usina da Barra ( $22^{\circ}37'01,37''S$ ,  $48^{\circ}31'34,54''W$  e 542 m acima do nível do mar). O local apresenta histórico de vários anos com cultivo de cana-de-açúcar, com uma área de 35,09 ha em um Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2006).

Utilizou-se o aparelho GPSMAP GARMIM 60CSx, para a definição do contorno da área. Posteriormente, no programa CAMPEIRO 6.0 (GIOTTO, 2006), foram

descarregados os dados do contorno da área. Neste programa definiu-se a grade amostral, de 1 ponto a cada 0,5 ha (Figura 3), sendo que esses dados foram descarregados para o GPS. Na área experimental, com o auxílio do GPS foi coletado o solo com um trado tipo holandês, nas camadas de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo coletadas 5 subamostras distanciadas 10 m do local definido pelo programa Campeiro 6.0.

A amostragem foi realizada no mês de agosto de 2009, no período de reforma da cana-de-açúcar, após a aração e gradagem da área. Estas amostras foram identificadas e enviadas para análise laboratorial, sendo determinado os teores de P, K, Ca, Mg, S, CTC, V%, pH, Argila e Matéria Orgânica do Solo (MOS). De posse destes dados foi determinada a correlação entre estes atributos, com o programa computacional STATISTICA 6.0 (STATSOFT, 2001).



**Figura 3** - Pontos amostrais (1 amostra a cada 0,5 ha) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete - SP, 2009.

Para elaboração dos mapas temáticos de necessidades de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , e déficit e excesso de  $K_2O$  e  $P_2O_5$  foi utilizado os programas GPS TrackMaker e Campeiro 6.0.

A análise geoestatística foi realizada com intuito de verificar a existência e quantificar o grau de dependência espacial entre as observações, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela **Equação 1**, segundo Vieira et al. (1983).

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i+h)$  separados por uma distância  $h$ . O variograma é representado pelo gráfico  $\gamma^*(h)$  versus  $h$ . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\gamma^*(h)$  são estimados os coeficientes efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C_1$ ) e alcance ( $a$ ) do modelo teórico para o variograma.

Para a escolha do variograma considerou-se o que apresentava os menores valores da média dos desvios absolutos, da média dos desvios observados, do índice residual normalizado e do desvio padrão.

Para interpolação, nos casos em que houve dependência espacial, ou seja, a grade amostral foi menor que o alcance utilizou-se a krigagem, já onde não houve dependência espacial utilizou-se o inverso do quadrado da distância como método de interpolação.

## 5.1.2 Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos

### 5.1.2.1 Aplicação a taxa fixa - sem amostragem de solo (ATF)

Em muitas usinas e produtores de cana-de-açúcar a amostragem de solo para fins de recomendação não é utilizada, sendo que neste caso, são aplicados  $500 \text{ kg ha}^{-1}$  de um formulado com 25% de  $P_2O_5$  e 25% de  $K_2O$  no plantio da cana-de-açúcar. Por isso, este modo de aplicação de fertilizante foi considerado como padrão de taxa fixa sem amostragem do solo.

### **5.1.2.2 Aplicação a taxa fixa baseada em uma amostra média (ATFM)**

A recomendação convencional é retirar amostras que representem uma área homogênea. Na maioria das unidades produtoras, quando realizada a amostragem de solo, uma amostra é composta por 1 subamostra a cada 2,0 ha, sendo representativa de 30 a 35 ha.

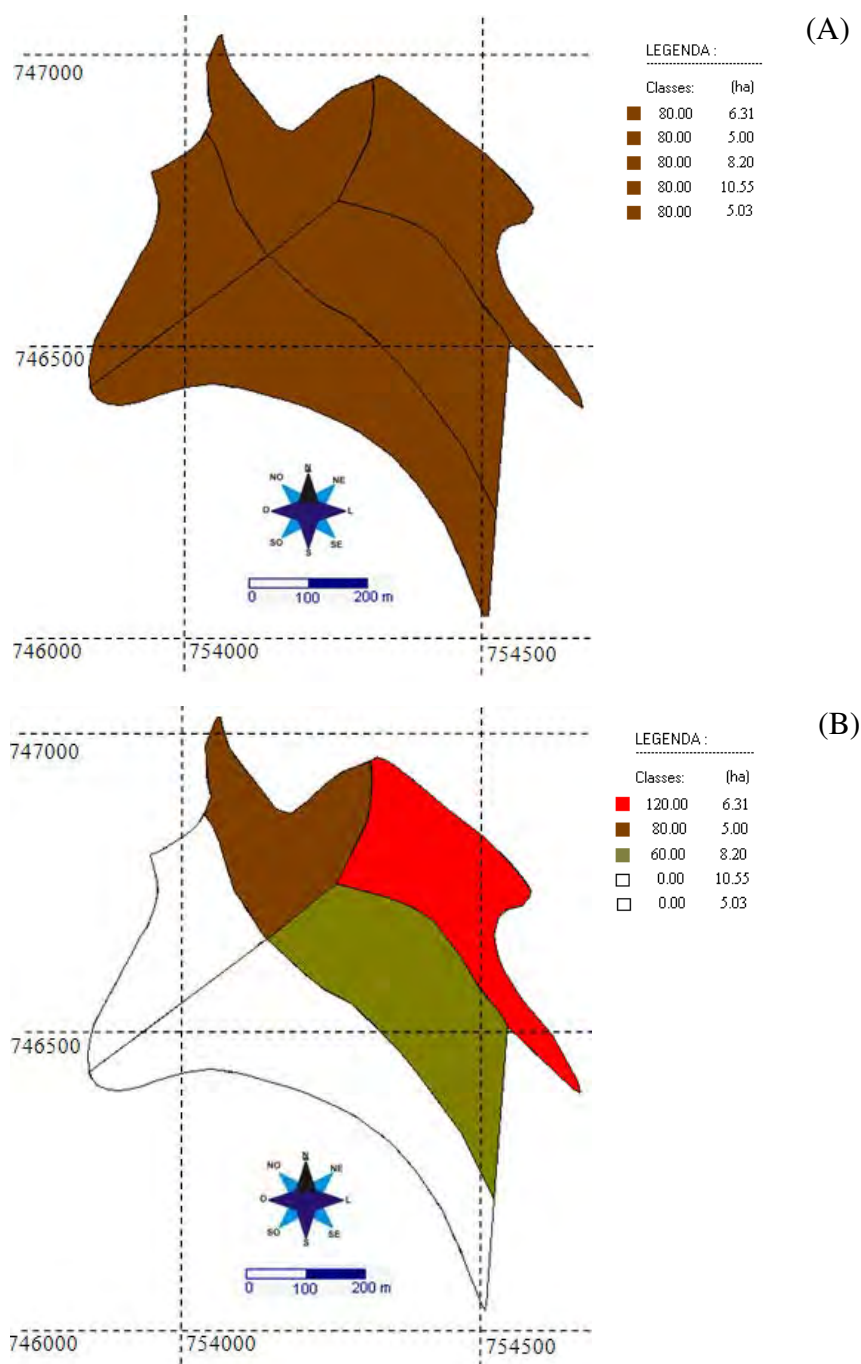
Neste caso, em uma área de 35,09 ha foram retiradas 15 subamostras para compor uma amostra média, cujo teor de P foi de  $29 \text{ mg dm}^{-3}$  e o teor de K foi de  $4,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Segundo recomendações propostas por Espironello et al. (1996), seriam necessários  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . Como a necessidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$  foi superior a de  $\text{K}_2\text{O}$ , foi utilizada a necessidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para adequação da quantidade do formulado 00-25-25 a ser aplicada, sendo necessários  $320 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Adotando esta mesma metodologia de amostragem de solo, mas considerando a utilização de um formulado adequado as necessidades das plantas, no caso o formulado 00-24-18, seriam necessários  $333 \text{ kg ha}^{-1}$ .

### **5.1.2.3 Aplicação a taxa fixa baseada em uma amostra média por talhão (ATFT)**

Na cultura da cana-de-açúcar as áreas são divididas por talhões. Em geral, os talhões de cana-de-açúcar são subdivididos quanto à topografia e homogeneidade do solo visando à otimização das operações mecanizadas. Os talhões, geralmente são menores em áreas mais declivosas e maiores em áreas planas, o que de forma geral reflete a variabilidade existente em um solo. A área que pode ser representada por uma amostra de solo depende da variabilidade existente, porém, talhões grandes, não representam de forma adequada os teores no solo, sendo necessária a divisão destes talhões. Como os talhões geralmente possuem estradas e terraços, estes seriam utilizados nesta divisão. Além disso, com a divisão das áreas pelos terraços e ou estradas é possível aplicar taxas fixas dentro de cada talhão sem a necessidade de aquisição de equipamentos de aplicação a taxa variável.

No presente estudo foram definidos 5 talhões, onde posteriormente foi usado 4 subamostras na composição dos teores médios dentro de cada talhão. Os teores encontrados no talhão 1, foram de  $27 \text{ mg dm}^{-3}$  para P e  $1,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para K, sendo necessários, conforme classes de recomendação de Espironello et al. (1996),  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 4A) e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (Figura 4B).



**Figura 4** - Necessidades de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , de acordo com a necessidade média dentro de cada talhão e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009.

Os teores de P encontrados para os talhões 2, 3, 4 e 5 foram de 31, 20, 37 e 18, respectivamente, sendo necessários, 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para todos os talhões. Os teores de K encontrados para os talhões 2, 3, 4 e 5 foram de 2,9; 5,7; 7,4 e 6,8 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente, sendo necessários, 80, 60, 0 e 0 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

Para suprir essas necessidades seriam necessários aplicar 400 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 00-20-30 no talhão 1. Nos talhões 2, 3, 4 e 5 seriam necessários 320 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 00-25-25, 333 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 00-24-18, 195 kg ha<sup>-1</sup> de SFT e 195 kg ha<sup>-1</sup> de SFT, respectivamente.

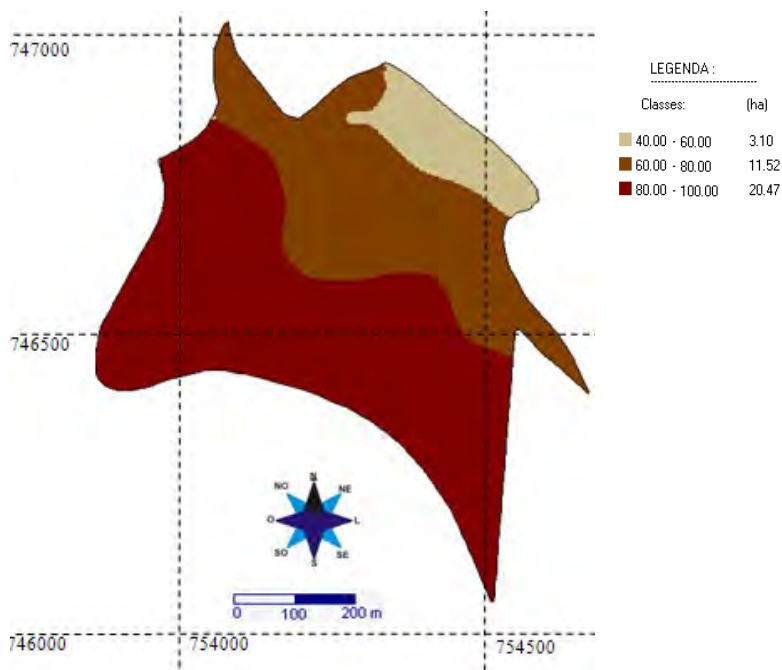
#### 5.1.2.4 Aplicação por zonas de manejo (AZM)

Para a criação de zonas de manejo geralmente é utilizado o histórico de produtividade, levantamentos de solos e/ou dados de sensoriamento remoto das culturas, entre outros parâmetros. Como estes dados não estavam disponíveis, nesse trabalho foram criadas três zonas de manejo determinadas através dos teores de argila e matéria orgânica do solo (MOS) presentes nesta área. Usaram-se esses atributos, visto que esses possuem boas correlações principalmente com K, além de serem de lenta mudança no curto espaço de tempo, permitindo que a partir de uma caracterização inicial possam-se estabelecer zonas de manejo que podem ser utilizadas por diversos anos. Com isso, foram criadas zonas de manejo onde, além da aplicação diferenciada de P e K, pode se alocar diferentes variedades e aplicar diferentes quantidades de resíduos orgânicos.

Para a definição das zonas de manejo foram considerados os teores de argila e MOS em %, na camada de 0-40 cm, onde se considerou 50% de importância para cada fator, sendo que o valor máximo tanto para Argila quanto MOS representava 100% (**Equação 2**).

$$\text{Índice Argila + MOS} = \frac{(\text{Argila} \times 50)}{(\text{Valor máximo de Argila})} + \frac{(\text{MOS} \times 50)}{(\text{Valor Máximo de MOS})} \quad (2)$$

As três zonas foram criadas agrupando-se os índices de 40-60; 60-80 e 80-100 (Figura 5).

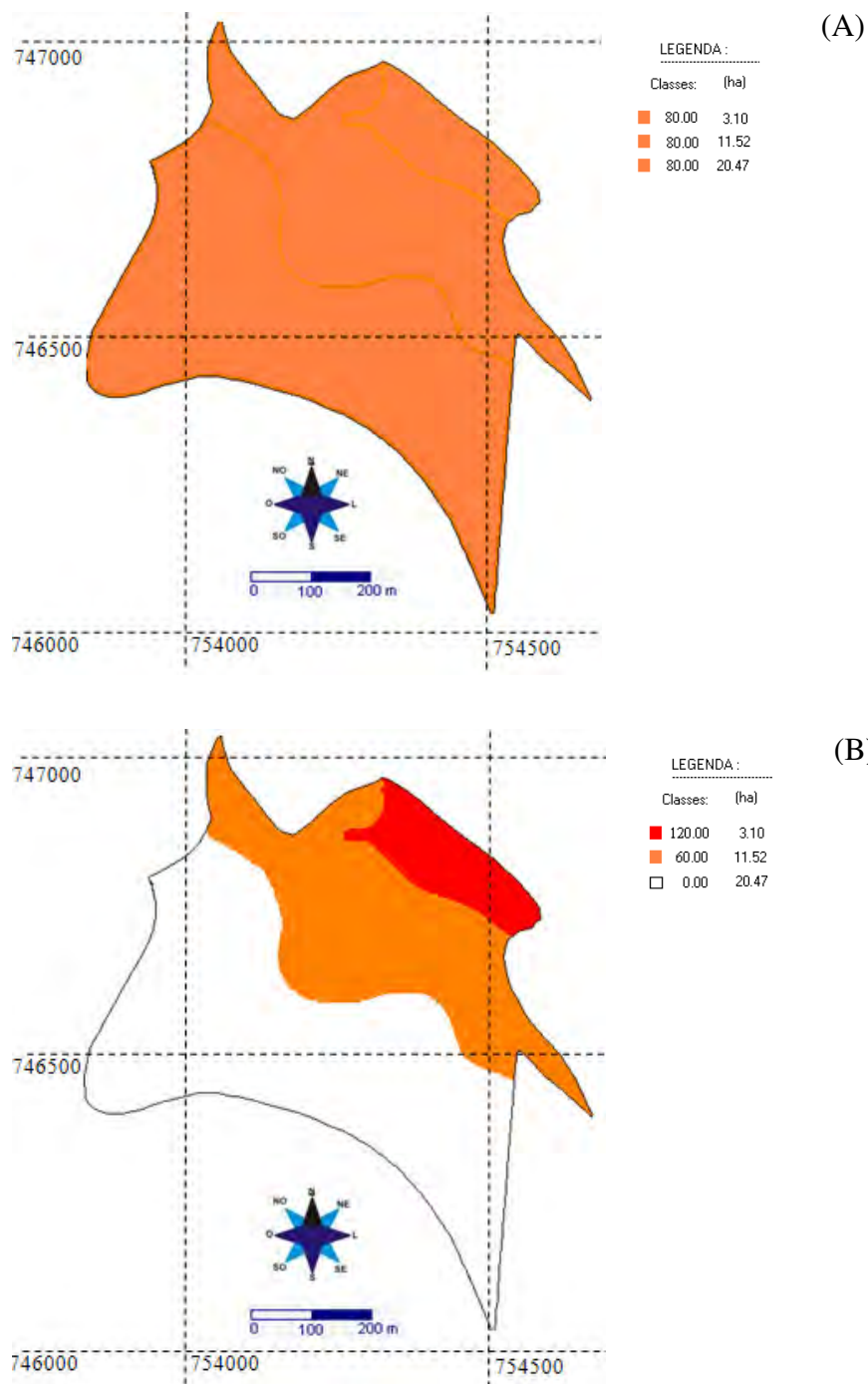


**Figura 5** - Zonas de manejo baseadas no índice Argila + MOS, em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.

Após a divisão em zonas de manejo, foram considerados 10 subamostras dentro de cada zona de manejo para a determinação dos teores médios de P e K e recomendado a adubação para adequar esses teores através de formulados.

Os teores encontrados na zona de manejo 1, onde o índice (Argila + MOS) está entre 40-60% foram de  $18 \text{ mg dm}^{-3}$  para P e  $1,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para K, sendo necessários, conforme classes de recomendação de Espironello et al. (1996),  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 6A) e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (Figura 6B).

Na zona de manejo 2, onde o índice está entre 60 e 80%, os teores eram de  $25 \text{ mg dm}^{-3}$  para P e  $3,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para K, sendo necessários  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . Na zona de manejo 3, onde o índice está entre 80 e 100%, os teores eram de  $26 \text{ mg dm}^{-3}$  para P e  $6,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para K, sendo necessários  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ .



**Figura 6** - Necessidades de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , de acordo com a necessidade média dentro de cada zona de manejo e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.

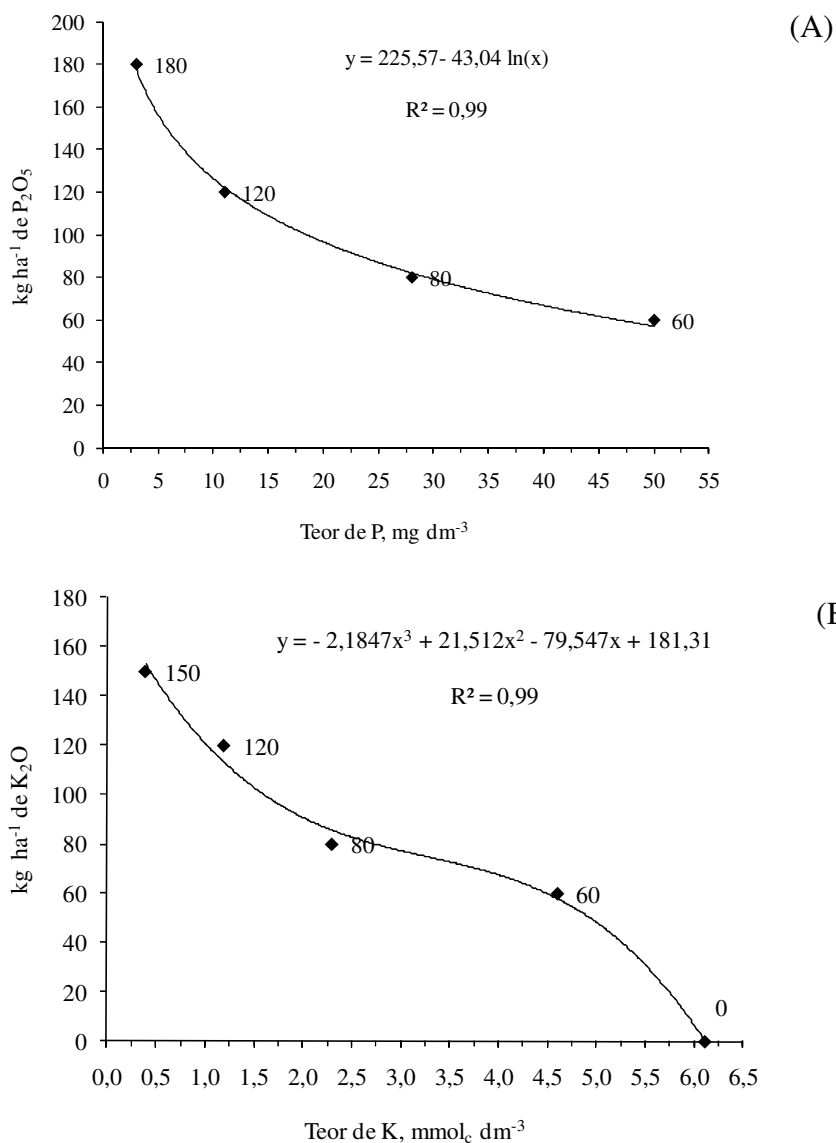
Para adequar as maiores necessidades de  $P_2O_5$  (Figura 6A) ou  $K_2O$  (Figura 6B) dentro de cada zona de manejo, seriam necessários 480, 320 e 320 kg  $ha^{-1}$  do formulado 00-25-25 para as zonas de manejo 1, 2 e 3, respectivamente. Por outro lado, quando a unidade produtiva tem a sua disposição formulados e ou fertilizantes simples adequados as necessidades, as quantidades a serem aplicadas nas zonas de manejo 1, 2 e 3 seriam de 400, 285, 195 kg  $ha^{-1}$  dos formulados 00-20-30, 00-30-20, e superfosfato triplo (SFT), respectivamente.

#### 5.1.1.5 Aplicação a taxa variável (ATV)

A aplicação a taxa variável, considerando a amostragem em grade, de um ponto amostral a cada 0,5 ha e recomendação das doses de fertilizantes baseada nas equações de regressão (Figuras 7A e 7B), com aplicação de SFT e Cloreto de Potássio (KCl) para suprir as necessidades de  $P_2O_5$  (Figura 9A) e  $K_2O$  (Figura 9B) foi considerado o modo de aplicação a taxa variável padrão para comparação com os demais modos de aplicação de fertilizantes.

As equações de regressão utilizadas para a recomendação de fósforo (Figura 7A) e potássio (Figura 7B) foram adaptadas das recomendações propostas por Espironello et al. (1996), sendo que para a confecção destas equações de regressão utilizou-se o teor médio da classe, com a respectiva quantidade recomendada de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  com a expectativa de produtividade de 100-150 ton  $ha^{-1}$ . Por exemplo, para a classe de 0-6 mg  $dm^{-3}$  de P a recomendação é aplicar 180 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , então, foi considerado que o teor de 3 mg  $dm^{-3}$  corresponde 180 kg  $ha^{-1}$ . Quando os teores são menores deverão aplicar-se maiores quantidades de  $P_2O_5$ , sendo que o inverso também é válido.

O objetivo principal da utilização das equações de regressão é aproveitar o potencial que os equipamentos de aplicação a taxa variável possuem para adequar a quantidade aplicada com as necessidades das plantas, visto que para algumas classes os intervalos utilizados atualmente são amplos, ou seja, tanto para o menor quanto para o maior teor no solo dentro de uma classe é recomendado à mesma quantidade de fertilizante. Ao criar-se as equações de regressão buscou-se subdividir as atuais classes de recomendação sem perder o referencial teórico-experimental já adquirido e apresentado por Espironello et al. (1996) para a cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

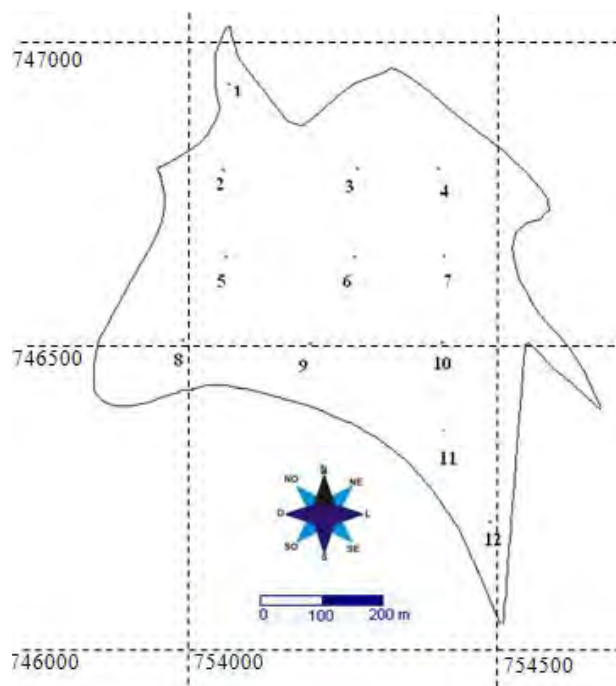


**Figura 7** - Equações de regressão adaptadas das classes propostas por Espironello et al. (1996), para a recomendação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (A) e  $\text{K}_2\text{O}$  (B) para a cultura da cana-de-açúcar.

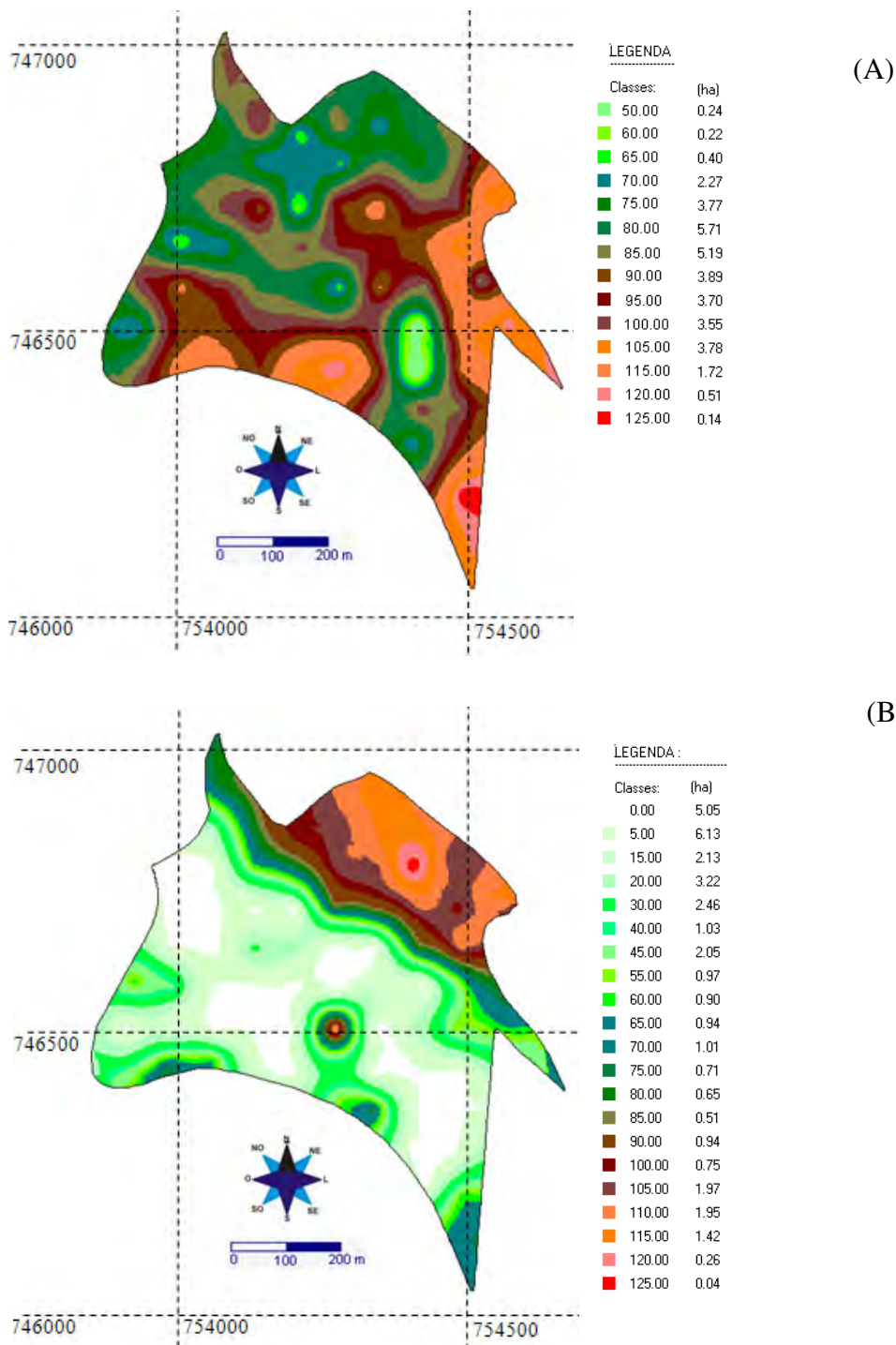
Em outro modo de aplicação a taxa variável de fertilizantes foi considerada a mesma grade de amostragem, porém, baseada nas classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), com aplicação de SFT e KCl para suprir as necessidades de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 10A) e  $\text{K}_2\text{O}$  (Figura 10B).

Além desses dois modos de aplicação a taxa variável baseado na amostragem em grade de 0,5 ha, outro considerado, foi a aplicação a taxa variável baseada nas equações de regressão (Figuras 7A e 7B), porém, com aplicação do formulado 00-25-25, visando adequar primeiro as necessidades de  $P_2O_5$  (Figura 9A) e depois as necessidades de  $K_2O$  (Figura 9B).

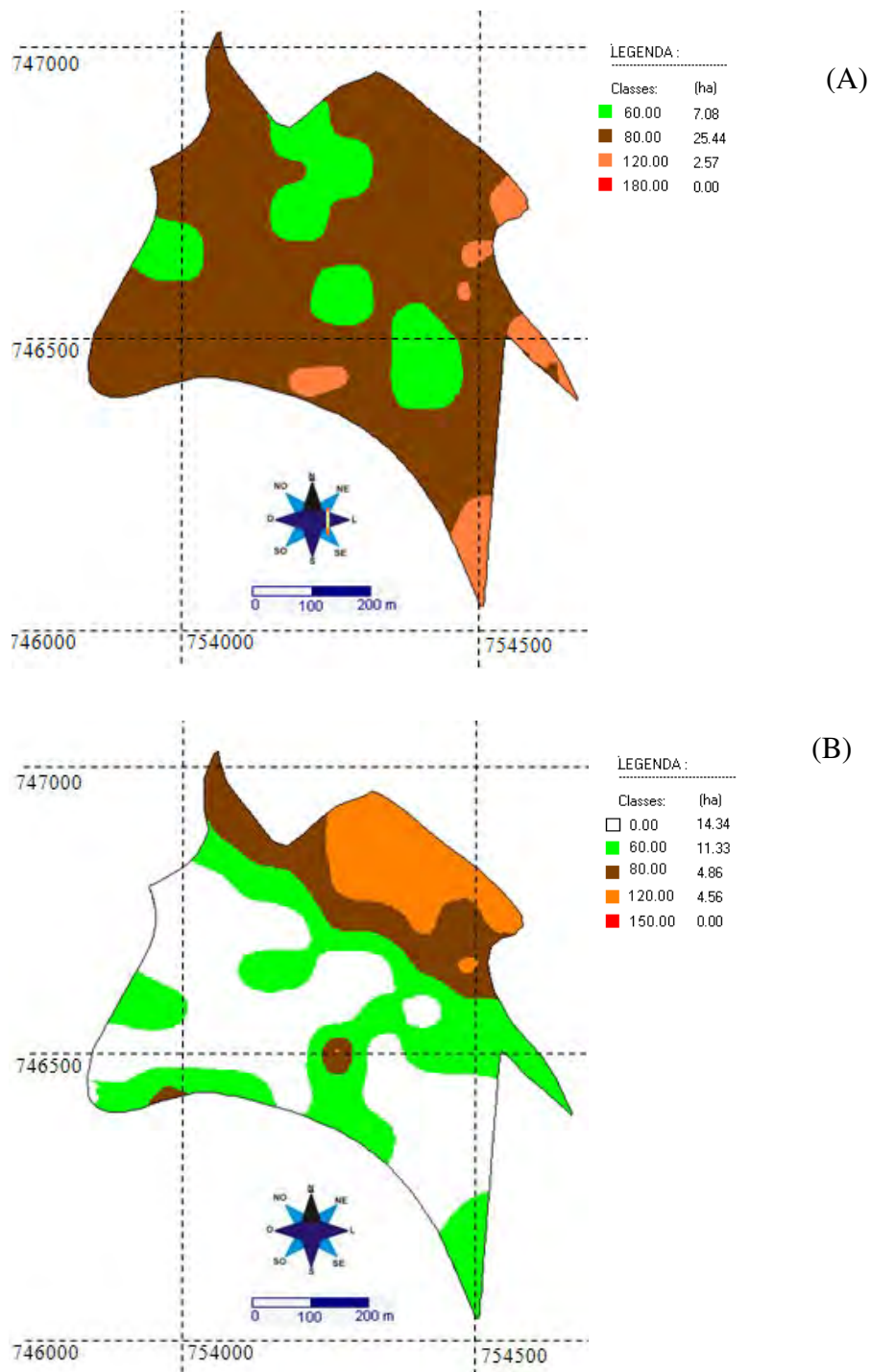
No último modo de aplicação a taxa variável foi considerado os teores apontados pela amostragem em grade de um ponto a cada 3 ha (Figura 8), com posterior recomendação baseada nas equações de regressão (Figuras 7A e 7B), com a aplicação de SFT e KCl, para suprir as necessidades de  $P_2O_5$  (Figura 11A) e  $K_2O$  (Figura 11B). Para todos esses modos de aplicação de fertilizantes a taxa variável, exceto o terceiro citado, foi considerado, que seriam aplicados no sulco de plantio as quantidades necessárias de forma isolada de KCl e SFT. No entanto, para isso, seria necessária a adaptação ou aquisição de uma plantadora equipada com controladores de fluxo de fertilizantes e caixas isoladas para aplicação de fertilizantes simples.



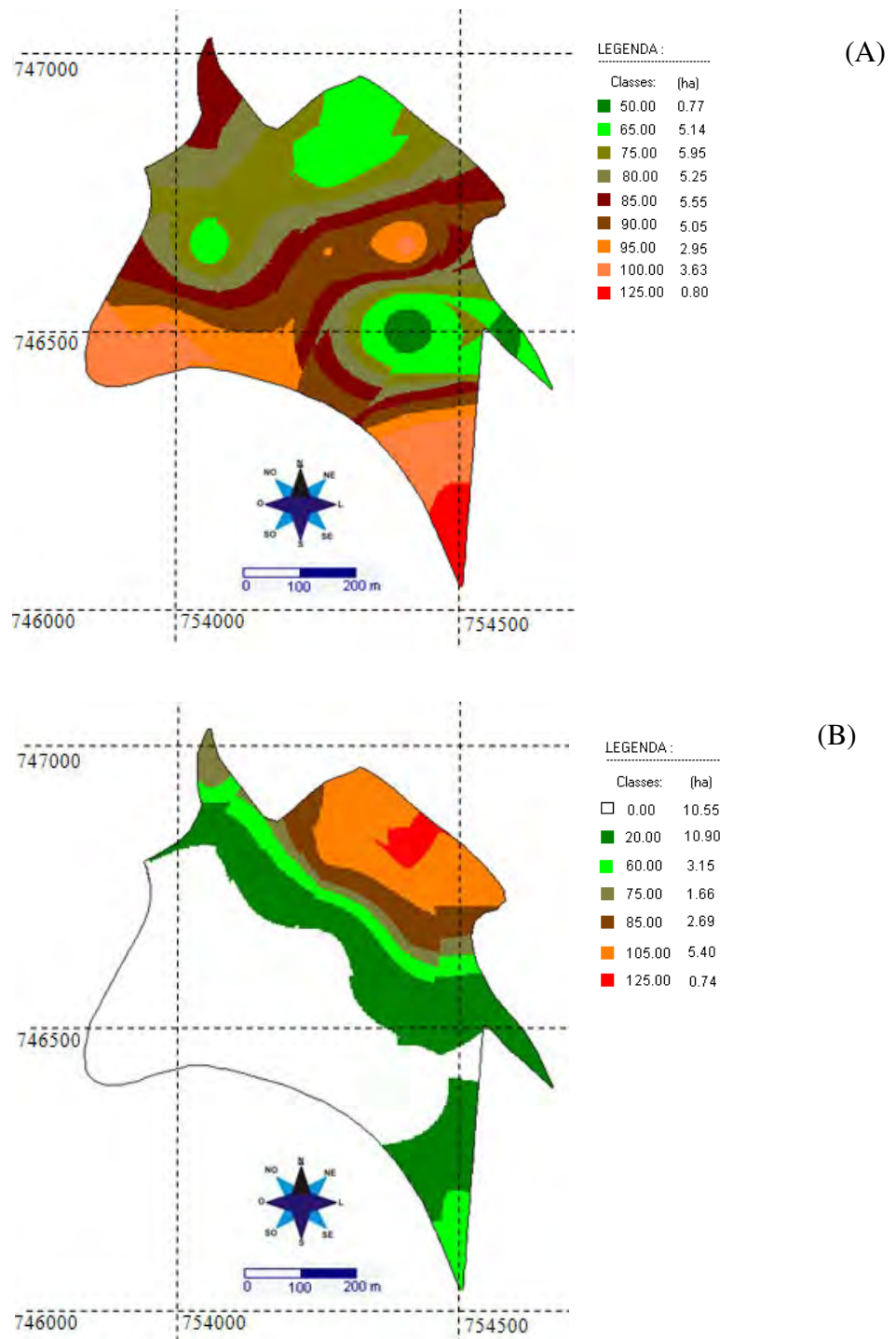
**Figura 8** - Pontos amostrais (1 amostra a cada 3 ha), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tietê – SP, 2009.



**Figura 9** - Necessidades de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , considerando uma grade de amostragem de 0,5 ha e recomendações conforme equações de regressão adaptadas das classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarajú do Tiete – SP, 2009.



**Figura 10** - Necessidades de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , considerando uma grade de amostragem de 0,5 ha, e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009.



**Figura 11** - Necessidades de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , considerando uma grade de amostragem de 3 ha e recomendações conforme equações de regressão adaptadas das classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarajú do Tiete – SP, 2009.

### **5.1.3 Déficit e excessos de $P_2O_5$ e $K_2O$ nos diferentes modos de aplicação de fertilizantes**

Todos os mapas de excesso e déficit de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  foram realizados fazendo-se um comparativo das necessidades de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  entre o modo de aplicação de fertilizante a taxa variável, baseado na amostragem em grade de 0,5 ha (Figura 9A e 9B) e recomendações baseadas nas equações de regressão (Figura 7), com os demais modos de aplicação de fertilizantes, dentro da função análise comparativa de modelos digitais – células, no programa Campeiro 6.0. Este modo de aplicação de fertilizante foi utilizado como padrão, pois, possui informações mais detalhadas dos atributos do solo (grade de 0,5 ha) e recomendações mais fragmentadas que atuais classes de recomendação utilizadas (equações de regressão).

### **5.1.4 Custos dos fertilizantes nos diferentes modos de aplicação**

Os preços dos formulados, SFT e KCl foram baseados nas cotações para o mês de agosto de 2009, para o estado de São Paulo (IEA, 2009). Os preços considerados para o SFT, KCl, formulados: 00-25-25, 00-24-18, 00-20-30 e 00-30-20 foram, respectivamente, R\$ 655,00 reais  $ton^{-1}$ , R\$ 1290,00 reais  $ton^{-1}$ , R\$ 1006,00 reais  $ton^{-1}$ , R\$ 831 reais  $ton^{-1}$ , R\$ 1031,00 reais  $ton^{-1}$  e R\$ 980,00 reais  $ton^{-1}$ .

A partir desses dados foram realizados os cálculos do custo com fertilizantes por hectare para os diferentes modos de adubação. A essas cotações foi adicionado o valor de R\$ 56,00 por tonelada de adubo referente ao custo do transporte do terminal portuário até o município de Igarçu do Tietê – SP (SIFRECA, 2009).

## **5.2 Experimento 2: Avaliação de sensores remotos de refletância e fluorescência no algodoeiro**

### **5.2.1 Localização e caracterização experimental**

Os sensores óticos de refletância e fluorescência foram testados no algodoeiro em área pertencente à Universidade do Arizona (33°03'52,18"N, 111°58'15,82"W, 363 m acima do nível do mar), junto ao centro de Agricultura de Maricopa, Arizona, EUA.

O experimento foi instalado em um solo de textura franco-arenosa (71% areia, 12% argila e 17% silte) em um delineamento blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo as parcelas constituídas por 4 linhas com 5 m lineares e espaçamento entre linhas de 1m.

A irrigação por sulcos foi realizada a fim de providenciar suficiente disponibilidade de água para o bom desenvolvimento da cultura. O teor médio de nitrato da água de irrigação é de 1,25 ppm, sendo que foram aplicados em torno de 1500 mm de água por hectare durante o ciclo da cultura o que representa em torno de 19 kg ha<sup>-1</sup> de N. Além disso, a quantidade de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contido no solo antes da implantação do experimento, era de 45 kg ha<sup>-1</sup> de N.

O algodão (*Gossypium hirsutum* L.) foi plantado em 23 de abril de 2010, com as variedades ST 4288-B2RF (Variedade 1), ST 4498-B2RF (Variedade 2) e DP 164-B2RF (Variedade 3), com uma densidade de 122.000 plantas ha<sup>-1</sup>. As parcelas foram adubadas com nitrogênio na forma de nitrato de amônio na metade de julho de 2010, durante o estágio de crescimento do primeiro botão floral, com as doses de (0, 45, 90 e 135 kg N ha<sup>-1</sup>).

### 5.2.2 Avaliações realizadas

O conteúdo de nitrato no pecíolo do algodoeiro foi determinado aos 120 dias após a semeadura. Os pecíolos foram coletados em 25 folhas por parcela na primeira folha totalmente expandida (+1). Após a coleta, o material foi levado para a estufa e seco à 70 °C até massa constante e então determinado o nitrato nos pecíolos das plantas.

A análise de solo e de planta foi determinada pelo método do N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> via redução de Cd, método modificado de Griess-Ilsovoy usando o Alpkem modelo 320 RFA II (Alpkem Corp., Silver Spring, MD) seguindo metodologia proposta por Miller e Kotuby-Amacher (1994).

A determinação da biomassa foi realizada com a coleta das plantas em 1 metro quadrado aos 120 dias após a semeadura. Após a coleta, o material foi levado para a

estufa e seco a 70 °C até massa constante. Aos 180 dias após a semeadura foi realizada a colheita mecânica, em uma área de 20 m<sup>2</sup> (4 linhas com 5 m lineares e espaçamento entre linhas de 1m), com posterior pesagem para determinação da produtividade final de algodão.

### 5.2.2.1 Coleta de dados com sensores óticos de refletância (Crop Circle) e fluorescência (Multiplex 3.0)

A coleta de dados com os sensores de refletância e fluorescência foi realizada aos 120 dias após a semeadura, no estágio de emissão do primeiro capulho. Os dados de refletância no algodoeiro foram coletados por quatro sensores de refletância Crop Circle modelo ACS-470 instalados na frente de um trator (Figura 12) e o datalogger dentro da cabine do trator registrou os dados de refletância das plantas de algodão. Foram feitas 36 leituras por parcela. O sensor de refletância Crop Circle fornece dados de três bandas de refletância a 670 nm; 720 nm e 820 nm. A partir desses dados foram calculados os índices NDVI e Clorofila conforme **Equações 3 e 4**, respectivamente:

$$\text{NDVI} = (\rho \text{ 820 nm} - \rho \text{ 670 nm}) / (\rho \text{ 820 nm} + \rho \text{ 670 nm}) \quad (3)$$

$$\text{Clorofila} = (\rho \text{ 820 nm} / \rho \text{ 720 nm}) - 1 \quad (4)$$

Onde:  $\rho$  = refletância



**Figura 12** - Coleta de dados com os quatro sensores de refletância Crop Circle ACS-470 montados na frente de um trator na cultura do algodão, Arizona - EUA.

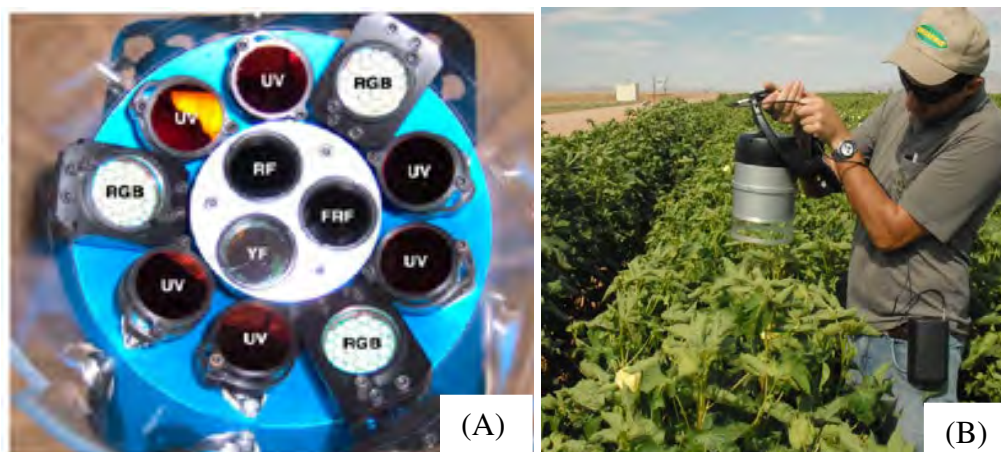
O Multiplex é um novo equipamento que trabalha com a detecção de fluorescência das plantas fornecendo 22 índices, os quais estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1** - Descrição dos índices fornecidos pelo sensor de fluorescência Multiplex 3.0

Índice	Descrição	Excitação	Fórmula
YF_UV	Fluorescência Amarela	UV	-
RF_UV	Fluorescência Vermelha	UV	-
FRF_UV	Fluorescência Vermelho-distante	UV	-
YF_B	Fluorescência Amarela	B	-
RF_B	Fluorescência Vermelha	B	-
FRF_B	Fluorescência Vermelho-distante	B	-
YF_G	Fluorescência Amarela	G	-
RF_G	Fluorescência Vermelha	G	-
FRF_G	Fluorescência Vermelho-distante	G	-
YF_R	Fluorescência Amarela	R	-
RF_R	Fluorescência Vermelha	R	-
FRF_R	Fluorescência Vermelho-distante	R	-
SFR_G	Simples relação de Fluorescência	G	$FRF_G/RF_G$
SFR_R	Simples relação de Fluorescência	R	$FRF_R/RF_R$
BRR_FRF	Fluorescência Azul/vermelho	UV	$YF_{UV}/FRF_{UV}$
FER_RUV	Fluorescência do Vermelho/UV	R & UV	$FRF_R / FRF_{UV}$
FLAV	Flavonóides	R & UV	$\text{Log}(FRF_R/FRF_{UV})$
FER_RG	Fluorescência do Vermelho/Verde	R & G	$FRF_R / FRF_G$
ANTH	Antocianinas	R & G	$\text{Log}(FRF_R/FRF_G)$
NBI_G	Índice - balanço de N	UV & G	$FRF_{UV}/RF_G$
NBI_R	Índice - balanço de N	UV & R	$FRF_{UV}/RF_R$
FERARI	Taxa de excitação da fluorescência	R	$\text{Log}(5000/FRF_R)$

UV: ultravioleta; B: azul; G: verde; R: Vermelho.

O Multiplex possui diodos emissores de luz (LEDs) - 6 ultravioleta (UV) e 3 Vermelho/Verde/Azul (RGB), e três detectores de fluorescência - Amarelo (YF), 590 nm; - vermelho (RF), 685 nm; - vermelho-extremo (FRF), 735 nm (Figura 13A). Com o sensor de fluorescência, foram coletados manualmente (Figuras 13B) 12 pontos por parcela sobre as plantas na linha de cultivo do algodoeiro.



**Figura 13** - Vista frontal de um sensor de fluorescência Multiplex 3.0 (A) e coleta de dados com o sensor no algodoeiro (B).

### 5.2.3 Análise estatística

Para avaliar a variabilidade dos índices dos sensores de refletância e fluorescência nas três variedades de algodão os dados foram submetidos à análise de variância e, quando os efeitos foram significativos, utilizou-se o teste de comparação de médias Tukey tomando por base os níveis de significância maiores que 95% ( $p < 0,05$ ).

A correlação existente entre os índices do sensor de refletância, os índices do sensor de fluorescência e a concentração de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro foram realizadas usando a matriz de correlação de Pearson ( $r$ ). Para identificar as variações dos índices fornecidos pelos sensores de fluorescência, refletância e os teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro quando aplicado doses N, foram ajustadas equações de regressão, quando da significância dos efeitos apontados pela análise de variância. Para escolha das equações, foram testados os modelos lineares e quadráticos pelo teste F, escolhendo-se aquele com maior significância.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Experimento 1: Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar**

#### **6.1.1 Correlações entre P e K e os demais atributos do solo**

Na análise de correlação (Tabela 2) um atributo pode explicar o outro em menor ou maior grau. Para os teores de P e K na camada de 0,0-0,20 m, observaram-se elevadas correlações com os teores na camada de 0,20-0,40 m, provavelmente devido à homogeneização provocada pelo preparo do solo. Para P, houve baixa correlação com os teores de K no solo, o que sugere que o histórico de aplicação destes nutrientes foi inadequado. Para P, também houve elevadas correlações com o pH e V%, e isso pode ser explicado porque nas condições de reação ácida a moderadamente ácida os óxidos de ferro e alumínio apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions, com predomínio de íons fosfatos. Com a elevação do pH do solo ocorre redução nos sítios de fixação via precipitação do P, favorecendo, conseqüentemente, o desenvolvimento vegetal (ERNANI et al., 1996). Os teores de P, também

apresentaram pequenas correlações negativas com os teores de argila no solo, indicando maior fixação de P quando ocorre o aumento nos teores de argila.

Os teores de K foram correlacionados positivamente com os teores de MOS, Argila e CTC do solo. Os teores de MOS aumentam com o aumento dos teores de argila (NICHOLS, 1984) e a MOS e a Argila são os componentes principais da CTC do solo (KLAMT; REEUWIJK, 2000). Baseado nessas informações observa-se que, o aumento da CTC propicia maior adsorção de K e por consequência menor perda por lixiviação.

**Tabela 2** - Análise de correlação entre os atributos do solo em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete - SP, 2009

Atributos	P, 0, 0 - 0,2 m	P, 0,2 - 0,4 m	K, 0, 0 -0,2 m	K, 0,2 - 0,4 m
P, 0,0-0,20 m	1,00			
P, 0,2 - 0,4 m	0,79*	1,00		
K, 0,0-0,20 m	0,13	0,07	1,00	
K, 0,2 - 0,4 m	0,10	0,10	0,80*	1,00
pH CaCl <sub>2</sub> , 0,0-0,20 m	0,60*	0,44*	0,15	0,09
pH CaCl <sub>2</sub> , 0,2 - 0,4 m	0,58*	0,53*	0,14	0,17
V%, 0,0-0,20 m	0,64*	0,47*	0,22*	0,11
V%, 0,2 - 0,4 m	0,62*	0,55*	0,21*	0,21*
CTC, 0,0-0,20 m	0,21*	0,06	0,65*	0,53*
CTC, 0,2 - 0,4 m	0,02	-0,15	0,35*	0,28*
MOS, 0,0-0,20 m	0,05	0,05	0,70*	0,71*
MOS, 0,2 - 0,4 m	0,03	0,12	0,66*	0,73*
Argila, 0,0-0,20 m	-0,10	-0,15	0,57*	0,58*
Argila, 0,2 - 0,4 m	-0,09	-0,15	0,58*	0,58*

\* Valores marcados apresentam correlações significativas ( $p < 0,05$ ). Número de observações = 70.

### 6.1.2 Análise descritiva

A análise descritiva dos dados utilizados direta ou indiretamente na construção dos mapas foi descrita na Tabela 3. Os valores dos atributos químicos P e K

apresentaram grande amplitude, sendo que para P os valores variaram de 10 até 63 mg dm<sup>-3</sup> e para K de 0,9 até 10,3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Segundo Coelho (2003), esta grande amplitude de valores revela os problemas que podem ocorrer quando se usa a média dos valores dos atributos como base para a tomada de decisão sobre a realização do manejo químico do solo, podendo ocorrer áreas com quantidades excessivas de fertilizantes ou com déficit.

O K apresentou o maior CV (57,11%), superior aos 43,60 e 29,00% encontrados por Marques Junior et al. (2008) e Barbieri et al. (2008), respectivamente, em solos cultivados com cana-de-açúcar. A grande variabilidade para o K se deve a variabilidade existente para a textura do solo nesta área, a qual influencia diretamente a capacidade de retenção deste nutriente. Os CVs foram classificados segundo os critérios estabelecidos por Warrick e Nielsen (1980). Sendo assim, tanto os teores de P quanto os de K na amostragem mais densa (0,5 ha) quanto mais ampla (3 ha) apresentaram moderada variabilidade, entre 12 a 60%.

Para os teores de P, em ambas as grades de amostragem, a assimetria foi positiva, com a média maior que a mediana dos dados, o que indica existência de uma elevada frequência de valores abaixo da média. Para K, a assimetria foi negativa, com a média menor que a mediana dos dados, o que indica existência de uma elevada frequência de valores acima da média. Por isso, novamente observa-se que a utilização dos teores médios para P e K propiciaria áreas com quantidades excessivas ou com déficit de fertilizantes.

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), o coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos do que a média e o desvio padrão, uma vez que um único valor pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência. Para o presente trabalho foram encontrados valores próximos a zero para maioria dos atributos estudados. Isto demonstra que a maioria dos atributos envolvidos no estudo estão aproximando-se de uma distribuição normal indicando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística. Outra indicação de normalidade é que os valores de média e mediana, para a maioria das variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas.

**Tabela 3** - Análise descritiva dos teores de P e K, necessidades, excessos e déficits de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O nos diferentes modos de adubação em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete – SP, 2009

Atributos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV%	Cs	Ck
Fósforo, grade 0,5 ha <sup>(1)</sup>	25,76	23,50	10,00	63,00	41,64	1,22	1,88
Potássio, grade 0,5 ha <sup>(1)</sup>	5,18	5,60	0,90	10,30	52,95	-0,06	-1,17
Fósforo, grade 3 ha <sup>(1)</sup>	28,42	24,00	10,00	59,00	46,36	1,11	1,50
Potássio, grade 3 ha <sup>(1)</sup>	5,63	6,15	0,90	10,30	57,11	-0,03	-1,22
Necessidade P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , grade 0,5 ha <sup>(2)</sup>	89,24	90,00	47,00	126,00	19,10	-0,13	-0,15
Necessidade K <sub>2</sub> O, grade 0,5 ha <sup>(2)</sup>	42,70	26,50	0,00	126,00	104,77	0,42	-1,44
Necessidade P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , grade 0,5 ha <sup>(3)</sup>	82,57	80,00	60,00	120,00	17,94	1,55	2,62
Necessidade K <sub>2</sub> O, grade 0,5 ha <sup>(3)</sup>	46,86	60,00	0,00	120,00	96,92	0,31	-1,28
Necessidade P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , grade 3 ha <sup>(2)</sup>	85,42	87,50	50,00	125,00	23,48	0,10	0,35
Necessidade K <sub>2</sub> O, grade 3 ha <sup>(2)</sup>	39,17	10,00	0,00	125,00	121,94	0,70	-1,20
Zonas de Manejo – Índice ARG +MOS	79,47	83,00	44,00	98,00	15,56	-0,96	0,51
ATF - 00-25-25 - sem amostragem de solo - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	35,76	35,00	-1,00	77,00	47,66	0,13	-0,15
ATF - 00-25-25 - sem amostragem de solo - ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	82,30	98,50	-1,00	125,00	54,36	-0,42	-1,44
ATFM - 00-25-25 - 1 amostra de solo - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	-9,24	-10,00	-46,00	32,00	-184,39	0,13	-0,15
ATFM - 00-25-25 - 1 amostra de solo - ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	37,24	53,30	-45,00	80,00	120,23	-0,42	-1,44
ATFM - 00-24-18 - 1 amostra de solo - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	-9,24	-10,00	-46,00	32,00	-184,39	0,13	-0,15
ATFM - 00-24-18 - 1 amostra de solo - ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	17,30	33,50	-66,00	60,00	258,60	-0,42	-1,44
ATFT - form. adeq. - 1 amostra por talhão - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	-9,21	-10,00	-45,00	32,00	-185,37	0,16	-0,11
ATFT - form. adeq. - 1 amostra por talhão - ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	3,10	0,00	-120,00	80,00	-1273,59	-0,42	0,70
AZM - 00-25-25 - 1 amostra por zona - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	-5,81	-9,00	-46,00	51,00	-362,75	0,61	0,23
AZM - 00-25-25 - 1 amostra por zona - ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	40,73	53,50	-41,00	80,00	99,67	-0,41	-1,36
AZM - form. adeq. - 1 amostra por zona - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	-7,41	-7,00	-47,00	32,00	-232,43	0,09	-0,21
AZM - form. adeq. - 1 amostra por zona - ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	-4,37	0,00	-121,00	86,00	-867,87	0,04	1,73
ATV - 00-25-25 acertar K <sub>2</sub> O - grade 0,5 ha - ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)(4)</sup>	-46,49	-59,00	-115,00	50,00	-98,73	0,56	-0,96
ATV - 00-25-25 acertar P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - grade 0,5 ha - ± K <sub>2</sub> O <sup>(2)(4)</sup>	46,49	59,00	-50,00	115,00	98,73	-0,56	-0,96
ATV, SFT - grade 0,5 ha ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(3)(4)</sup>	-6,66	-6,50	-27,00	12,00	-162,87	-0,03	-0,70
ATV, KCl - grade 0,5 ha ± K <sub>2</sub> O <sup>(3)(4)</sup>	4,16	0,00	-20,00	47,00	338,23	1,55	2,93
ATV - SFT - grade 3 ha ± P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)(4)</sup>	-5,09	-4,00	-45,70	22,00	-256,07	-0,52	1,12
ATV - KCl - grade 3 ha ± K <sub>2</sub> O <sup>(2)(4)</sup>	6,61	0,90	-36,00	62,00	332,47	1,11	1,17

ATV = aplicação a taxa variável; ATF = aplicação a taxa fixa; ATFM = aplicação a taxa fixa média; ATFT = Aplicação a taxa fixa por talhões; AZM = aplicação por zonas de manejo; CV: coeficiente de variação (%); Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; <sup>(1)</sup>teores usados apenas como base para a criação dos mapas de necessidades, déficits e excessos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O; <sup>(2)</sup> recomendação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O baseada nas equações de regressão adaptadas - Figura 7; <sup>(3)</sup> recomendação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O baseada nas classes propostas por Espironello et al. (1996); <sup>(4)</sup>Déficits e excessos comparado às necessidades de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O de acordo com as equações de regressão adaptadas de Espironello et al. (1996), com grade de amostragem de 0,5 ha.

### 6.1.3 Parâmetros geoestatísticos

O modelo esférico foi o que apresentou os menores valores da média dos desvios absolutos, da média dos desvios observados, do índice residual normalizado e do desvio padrão em todas as variáveis analisadas (Tabela 4). Segundo Grego e Vieira (2005), o modelo matemático esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo. Mcbratney e Webster (1986) estudaram modelos de ajuste do variograma para os atributos do solo e relataram que os modelos esféricos e exponenciais são os mais encontrados.

O patamar ( $C_0 + C_1$ ) corresponde ao ponto onde toda variância da amostra é de influência aleatória, correspondendo a variância total obtida pela estatística clássica (TRANGMAR et al., 1985). O efeito pepita ( $C_0$ ) é um parâmetro importante do variograma e indica variabilidade não explicada considerando a distância de amostragem utilizada (VIEIRA, 2000). Para avaliar a dependência espacial Zimback (2001) propôs o índice de dependência espacial (IDE) dos atributos, o qual utiliza a relação  $(C_1/(C_0+C_1)) \times 100$ , sendo forte dependência quando maior que 75%, moderada dependência entre 25 e 75% e baixa dependência para relação menor que 25%.

Para a maioria dos atributos avaliados (Tabela 4) observou-se moderada dependência espacial, indicando uma baixa contribuição do efeito pepita ( $C_0$ ) na variabilidade dos dados o que melhora a inferência de valores para locais não amostrados utilizando krigagem ordinária.

O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos variogramas, indicando a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (SOUZA et al., 1997; VIEIRA, 1997). Os atributos P e K avaliados apresentaram valores de alcance variando de 160 a 180 m para P e 320 a 360 m para K nas grades de amostragem de 0,5 e 3,0 ha, respectivamente. Isto evidencia uma menor continuidade estrutural para a variável P, ou seja, a grade amostral necessita ser menor para o P do que para o K. Estes resultados concordam com os encontrados por Campos et al. (2008) em áreas de plantio de cana-de-açúcar. Porém, discordando dos dados encontrados Marques Junior et al. (2008) encontraram maior alcance para P em relação a K.

**Tabela 4** - Parâmetros geoestatísticos dos teores de P e K, necessidades, excessos e déficits de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  nos diferentes modos de aplicação de fertilizantes em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009

Variáveis	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0+C_1^{(2)}$	$a(m)^{(3)}$	IDE% <sup>(4)</sup>
Fósforo, grade 0,5 ha <sup>(5)</sup>	ESF.	60,2	115,0	160	48
Potássio, grade 0,5 ha <sup>(5)</sup>	ESF.	2,22	7,5	320	70
Fósforo, grade 3 ha <sup>(5)</sup>	ESF.	86,2	173,5	180	50
Potássio, grade 3 ha <sup>(5)</sup>	ESF.	5,6	10,3	360	46
Necessidade $P_2O_5$ , grade 0,5 ha <sup>(6)</sup>	ESF.	131,3	290,4	400	55
Necessidade $K_2O$ , grade 0,5 ha <sup>(6)</sup>	ESF.	597,3	2001,4	320	70
Necessidade $P_2O_5$ , grade 0,5 ha <sup>(7)</sup>	ESF.	80,7	219,4	560	63
Necessidade $K_2O$ , grade 0,5 ha <sup>(7)</sup>	ESF.	652,2	2062,4	400	68
Necessidade $P_2O_5$ , grade 3 ha <sup>(6)</sup>	ESF.	161,7	392,7	720	59
Necessidade $K_2O$ , grade 3 ha <sup>(6)</sup>	ESF.	1249,9	2291,7	360	45
Zonas de Manejo – Índice ARG + MOS	ESF.	25,8	153,0	400	83
ATF - 00-25-25 - sem amostragem de solo - $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	131,3	290,4	400	55
ATF - 00-25-25 - sem amostragem de solo - $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	597,3	2001,5	320	70
ATFM – 00-25-25 - 1 amostra de solo - $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	131,3	290,4	400	55
ATFM – 00-25-25 - 1 amostra de solo - $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	598,7	2004,5	320	70
ATFM – 00-24-18 - 1 amostra de solo - $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	131,3	290,4	400	55
ATFM – 00-24-18 - 1 amostra de solo - $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	597,3	2001,5	320	70
ATFT – form. adeq. - 1 amostra por talhão - $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	131,6	290,4	400	55
ATFT – form. adeq. - 1 amostra por talhão - $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	753,7	1546,8	300	51
AZM - 00-25-25 - 1 amostra por zona - $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	176,8	444,8	480	60
AZM - 00-25-25 - 1 amostra por zona - $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	598,1	1647,7	320	64
AZM- form. adeq. - 1 amostra por zona - $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	129,0	296,9	400	57
AZM- form. adeq. - 1 amostra por zona - $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	771,5	1439,3	160	46
ATV - 00-25-25 acertar $K_2O$ - grade 0,5 ha - $\pm P_2O_5^{(6)(8)}$	ESF.	624,2	2106,4	320	70
ATV - 00-25-25 acertar $P_2O_5$ - grade 0,5 ha - $\pm K_2O^{(6)(8)}$	ESF.	624,2	2106,4	320	70
ATV, SFT - grade 0,5 ha $\pm P_2O_5^{(7)(8)}$	ESF.	61,0	117,6	160	48
ATV, KCl - grade 0,5 ha $\pm K_2O^{(7)(8)}$	ESF.	110,4	197,7	80	44
ATV - SFT - grade 3 ha $\pm P_2O_5^{(6)(8)}$	ESF.	72,9	172,3	480	58
ATV - KCl - grade 3 ha $\pm K_2O^{(6)(8)}$	ESF.	224,7	491,0	400	54

ESF = Esférico; ATF = aplicação a taxa fixa; ATFM = aplicação a taxa fixa média; ATFT = aplicação a taxa fixa por talhões; AZM = aplicação por zonas de manejo; ATV = aplicação a taxa variável; <sup>(1)</sup>Efeito pepita; <sup>(2)</sup>Patamar; <sup>(3)</sup>Alcance; <sup>(4)</sup>Índice de dependência espacial (Zimback, 2001); <sup>(5)</sup>teores usados apenas como base para a criação dos mapas de necessidades, déficits e excessos de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ ; <sup>(6)</sup> recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  baseada nas equações de regressão adaptadas - Figura 7; <sup>(7)</sup> recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  baseada nas classes propostas por Espironello et al. (1996); <sup>(8)</sup>Déficits e excessos comparado às necessidades de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  de acordo com as equações de regressão adaptadas de Espironello et al. (1996), com grade de amostragem de 0,5 ha.

#### **6.1.4 Excessos e déficits de $P_2O_5$ e $K_2O$ nos diferentes modos de aplicação de fertilizantes**

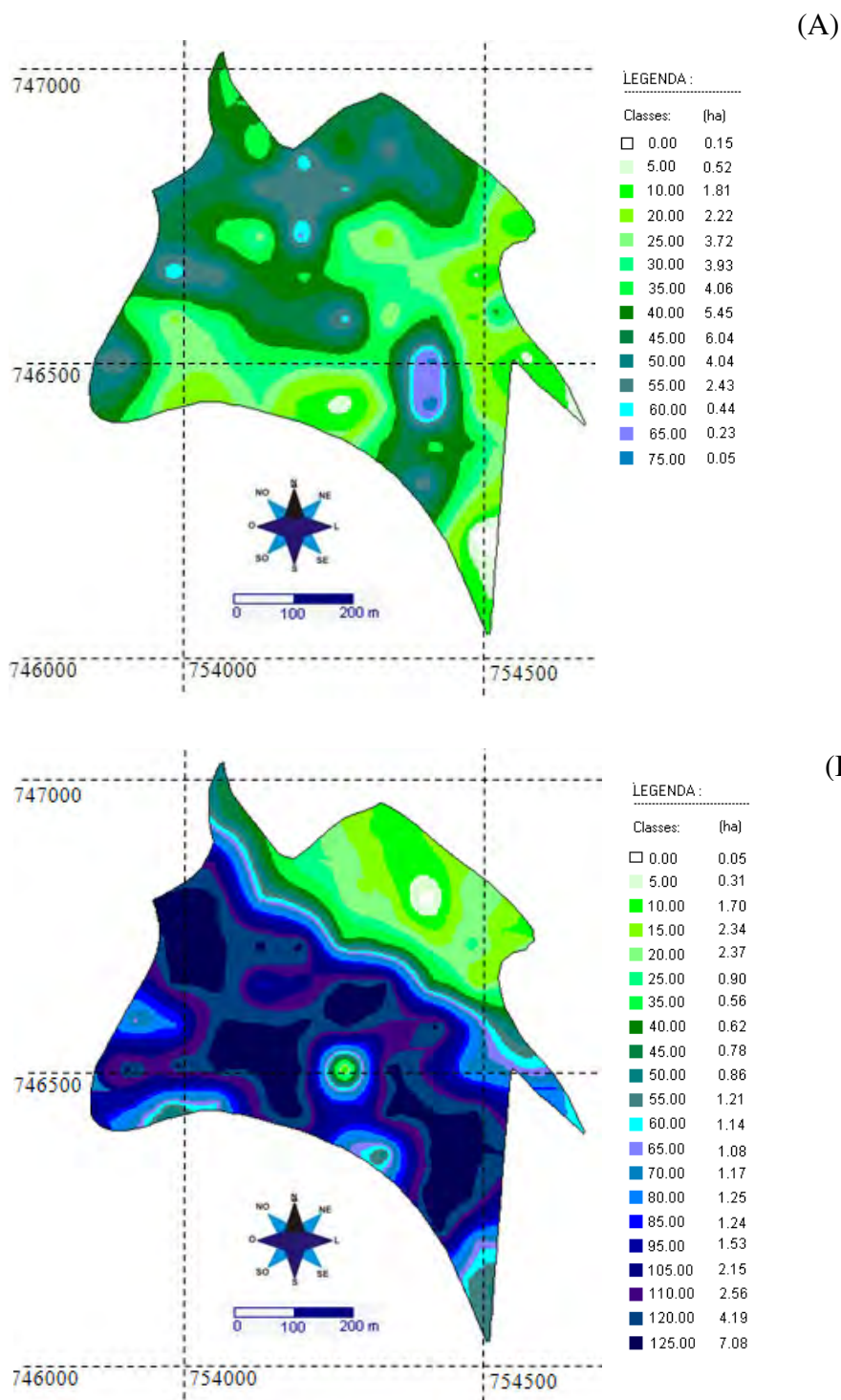
A aplicação a taxa fixa, sem amostragem de solo, considerada como adubação usada por algumas usinas (Figuras 14A e 14B), propiciou valores superiores as necessidades das plantas para praticamente toda a área e para ambos os nutrientes, o que é reflexo de uma recomendação de segurança, ou seja, aplicam-se elevadas quantidades, pois não se conhece os teores presentes no solo.

A aplicação de fertilizantes usando os teores médios de P e K do solo, também propicia sub e super adubações tanto, quando usado um formulado de uso padrão pelas usinas (Figura 15A e 15B) quanto pelo uso de um formulado adequado as necessidades médias (Figura 16A e 16B) de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . A aplicação do formulado 00-25-25 propiciou déficits máximos de 45 e 45  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 30 e 80  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente. Já quando aplicado o formulado adequado as necessidades médias observou-se déficits máximos de 45 e 65  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 30 e 60  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente.

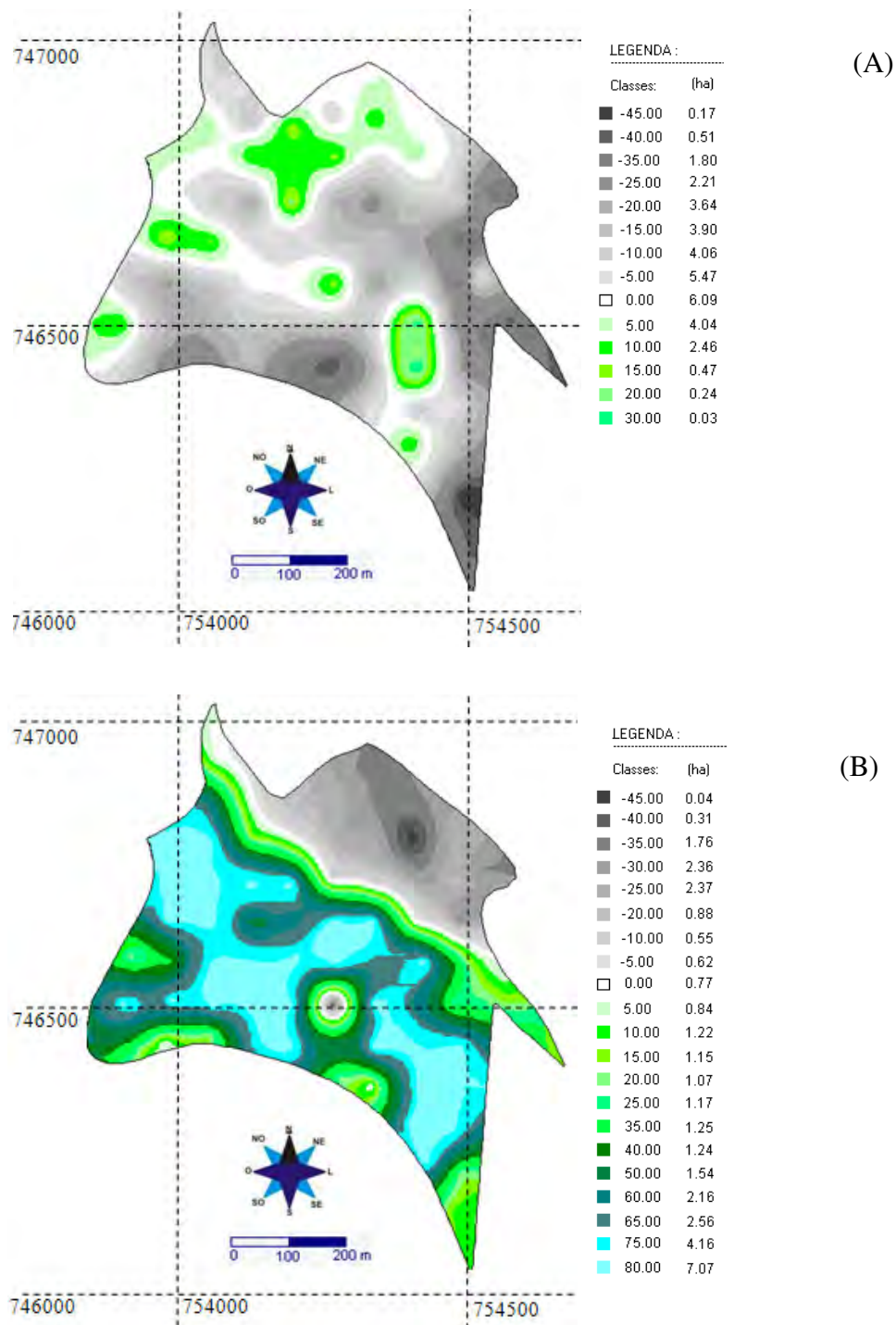
A aplicação de formulados adequados às necessidades médias dentro dos talhões (Figura 17A e 17B) propiciou déficits máximos de 45 e 120  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 30 e 80  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente.

A divisão de uma área em zonas de manejo mediante os teores de argila e MOS, com a aplicação do formulado 00-25-25, propiciou déficits máximos de 45 e 40  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 50 e 80  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  (Figura 18A) e  $K_2O$  (Figura 18B), respectivamente. Já, quando aplicado, o formulado adequado às necessidades médias dentro das zonas de manejo (Figura 19A e 19B) observou-se déficits máximos de 45 e 120  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 30 e 85  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente.

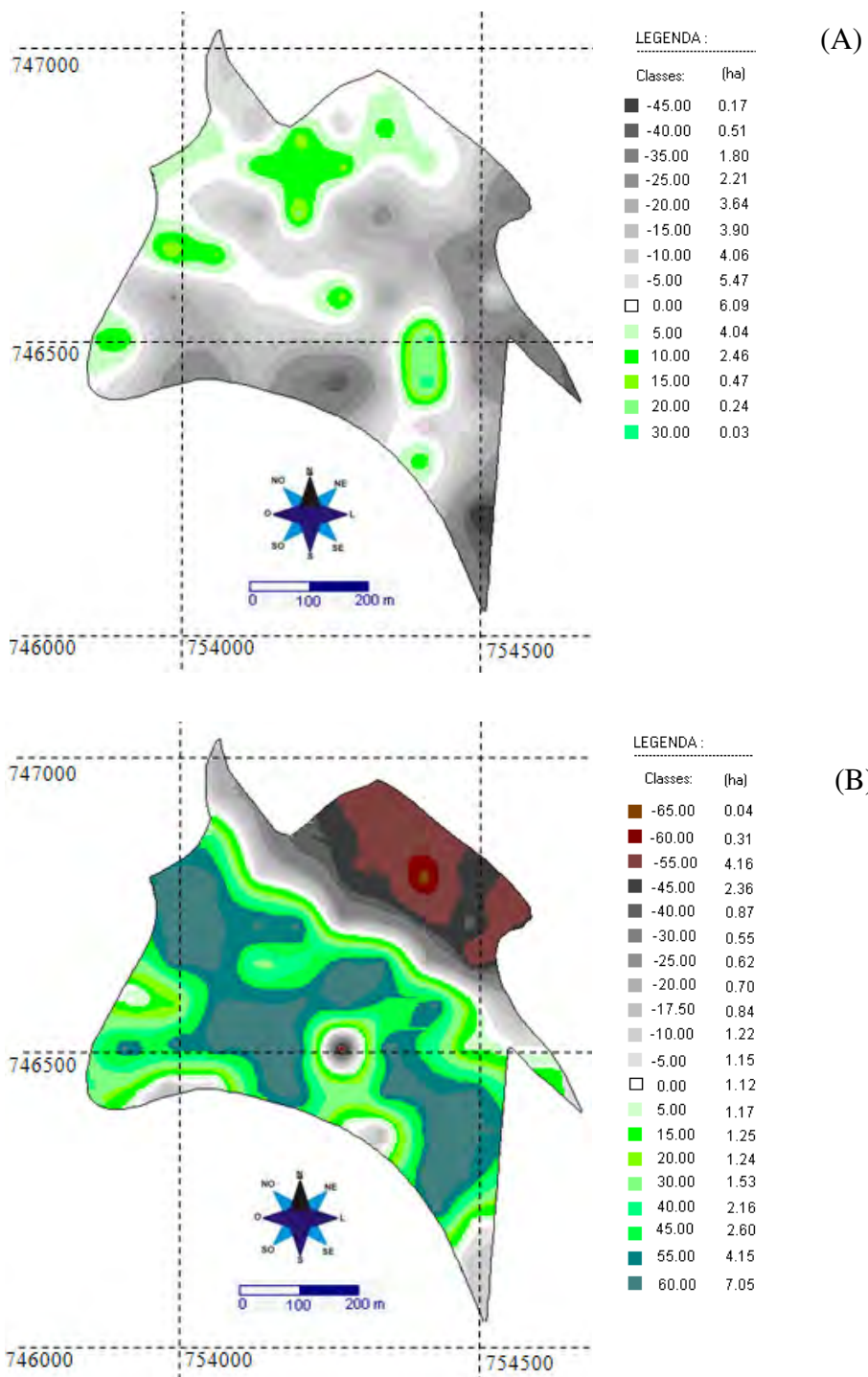
Para este caso, embora tenha se buscado adequar o formulado às necessidades médias dentro das zonas de manejo, ocorreram pontos onde os déficits foram maiores que quando aplicado o formulado padrão. Porém, tanto quando aplicado por talhões quanto zonas de manejo, além da observação dos déficits e excessos máximos, se faz necessário, verificar o tamanho da área em que ocorreu esse déficit ou excesso, sendo que, por exemplo, o déficit de 120  $kg\ ha^{-1}$  para  $K_2O$  ocorreu em apenas 0,01 ha.



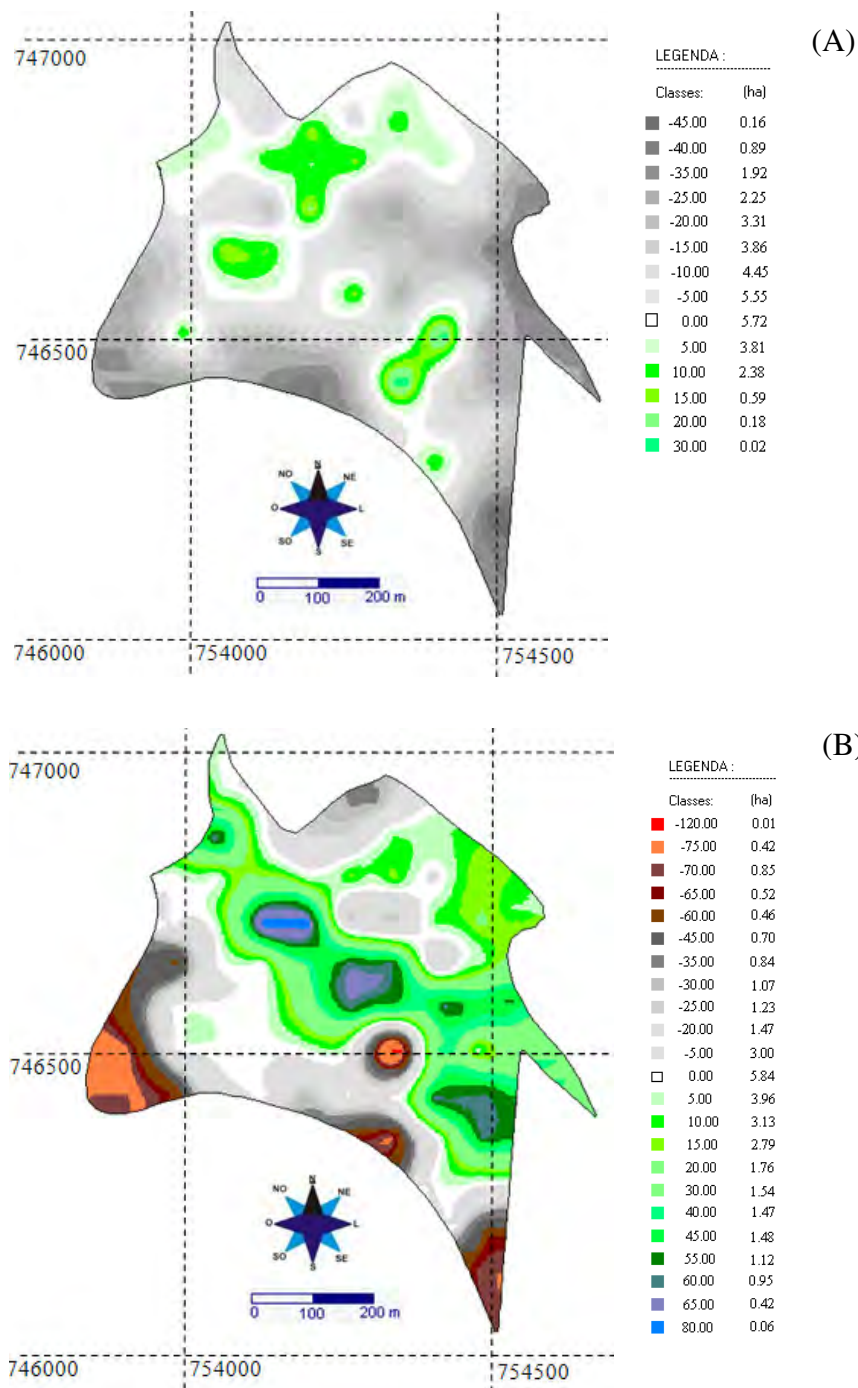
**Figura 14** - Excessos de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado  $500\ kg\ ha^{-1}$  do formulado (00-25-25) a taxa fixa, sem considerar a amostragem de solo, em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tietê - SP, 2009.



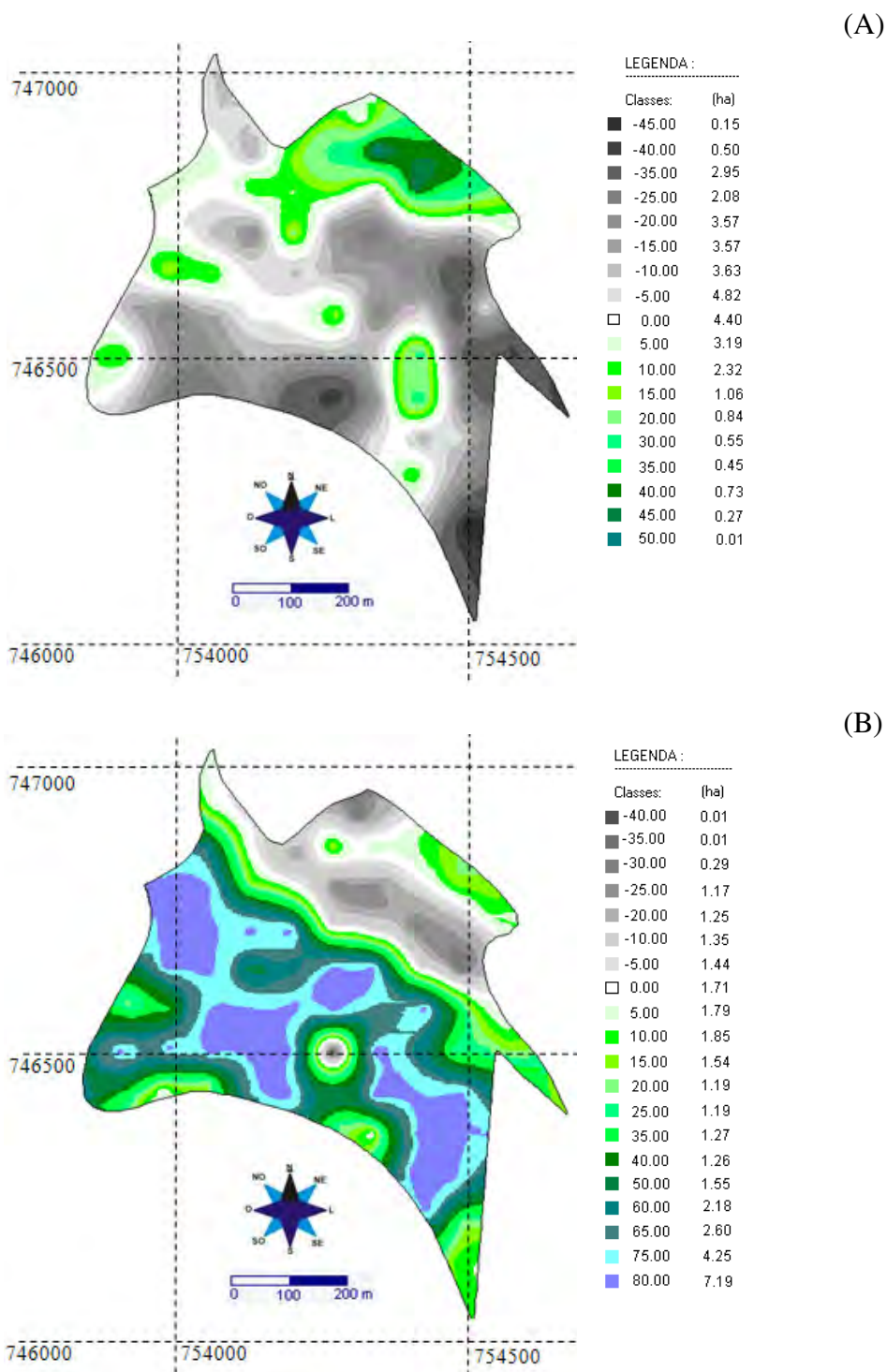
**Figura 15** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado  $320\ kg\ ha^{-1}$  do formulado (00-25-25) a taxa fixa, baseado nos teores de uma amostra média e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete - SP, 2009.



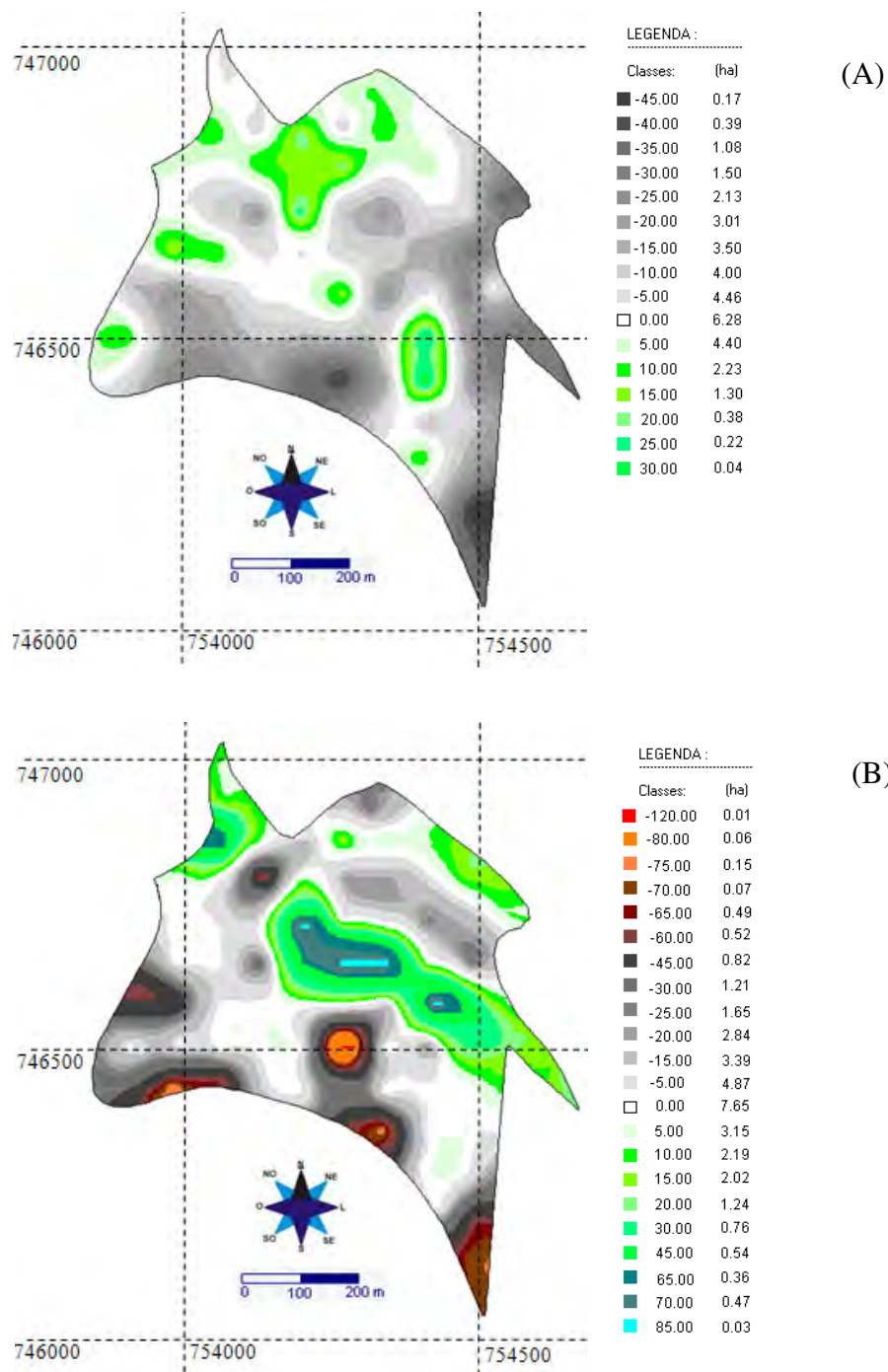
**Figura 16** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado  $333\ kg\ ha^{-1}$  do formulado (00-24-18) a taxa fixa, baseado nos teores de uma amostra média e recomendações conforme classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarajú do Tiete - SP, 2009.



**Figura 17** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado os formulados adequados a fim de suprir as necessidades médias dentro de cada talhão, de acordo com as classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarazú do Tiete - SP, 2009.



**Figura 18** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B), quando aplicado o formulado 00-25-25 a fim de suprir as necessidades médias dentro de cada zona de manejo, de acordo com as classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarajú do Tiete - SP, 2009.



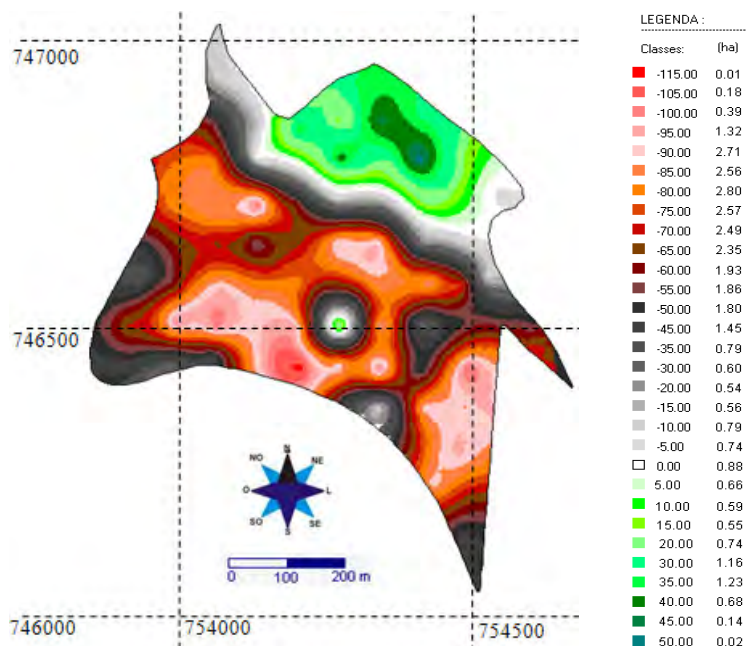
**Figura 19** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado os formulados adequados (00-20-30, 00-30-20 e 00-41-00) a fim de suprir as necessidades médias dentro de cada zona de manejo, de acordo com as classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete - SP, 2009.

A aplicação a taxa variável do formulado 00-25-25 no sulco de plantio (Figuras 20A e 20B) propiciou grandes desbalanços de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , sendo encontrados valores de déficits máximos de 115 e 50  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 50 e 115  $kg\ ha^{-1}$ , respectivamente, para  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . Ou seja, a aplicação de formulados a taxa variável pode corrigir ou adequar as necessidades de um dos nutrientes (P ou K), mas jamais os dois, sendo impraticável a sua adoção com objetivo de reduzir a variabilidade dos atributos químicos do solo.

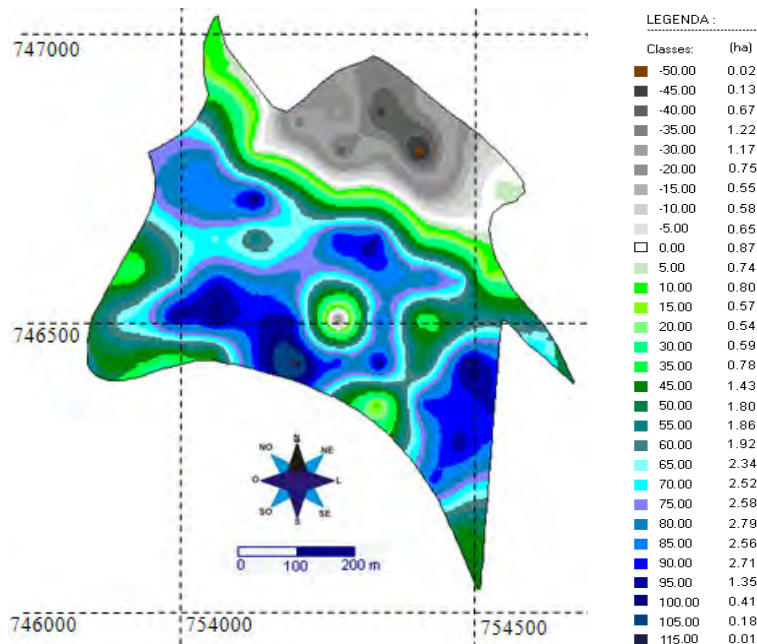
Com a introdução de controladores hidráulicos eletrônicos de aplicação a taxa variável de fertilizantes e sistemas de dosagem mais precisos, existe a possibilidade de aplicar doses de fertilizantes com maior acurácia e precisão. Com isso, as recomendações, podem ser configuradas para se utilizar as equações de regressão e não mais classes de recomendação de fertilizantes, ou seja, fragmentar as atuais classes de recomendação a fim de se obter maior adequação entre as necessidades das plantas e as quantidades aplicadas. Nesse trabalho, observando-se as diferenças entre as atuais classes de recomendação propostas por Espironello et al. (1996) e as equações de regressão adaptadas a partir dessas classes (Figuras 21A e 21B) constatou-se valores de déficits máximos de 25 e 20  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 10 e 45  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente. Embora as diferenças não sejam tão expressivas, pode-se aproveitar o potencial dos mecanismos de aplicação para melhorar o ajuste entre as quantidades aplicadas às necessidades das plantas. Além disso, cada usina, baseado nas suas experiências em adubação, associado às recomendações propostas por Espironello et al. (1996), poderiam criar equações de regressão para a recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  adaptadas as suas condições de cultivo.

O tamanho da grade de amostragem tem sido tema de discussão desde o início da utilização dos resultados de análise de solo para a recomendação de adubação nas culturas, tornando-se mais constante após a introdução do conceito de agricultura de precisão. Segundo Sawyer, (1994) o sucesso econômico da aplicação a taxa variável dependerá da habilidade da amostragem em representar a área que responderá a adubação evitando áreas onde não é necessária adubação. Nesse estudo, a utilização de uma grade amostral de 3,0 ha e aplicação a taxa variável de SFT e KCl propiciou déficits máximos de 45 e 35  $kg\ ha^{-1}$  e excessos máximos de 20 e 60  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  (Figura 22A) e  $K_2O$  (Figura 22B), respectivamente.

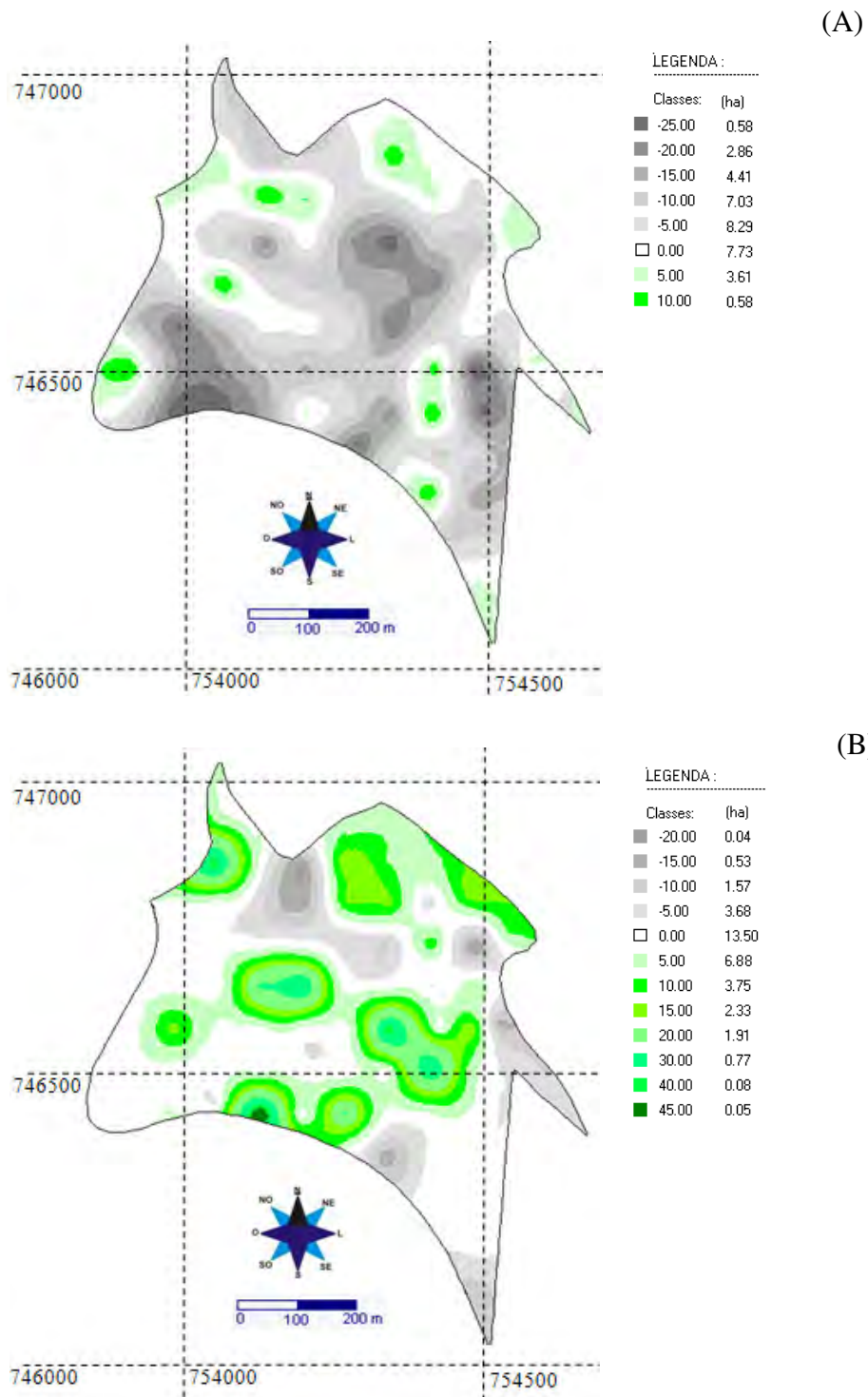
(A)



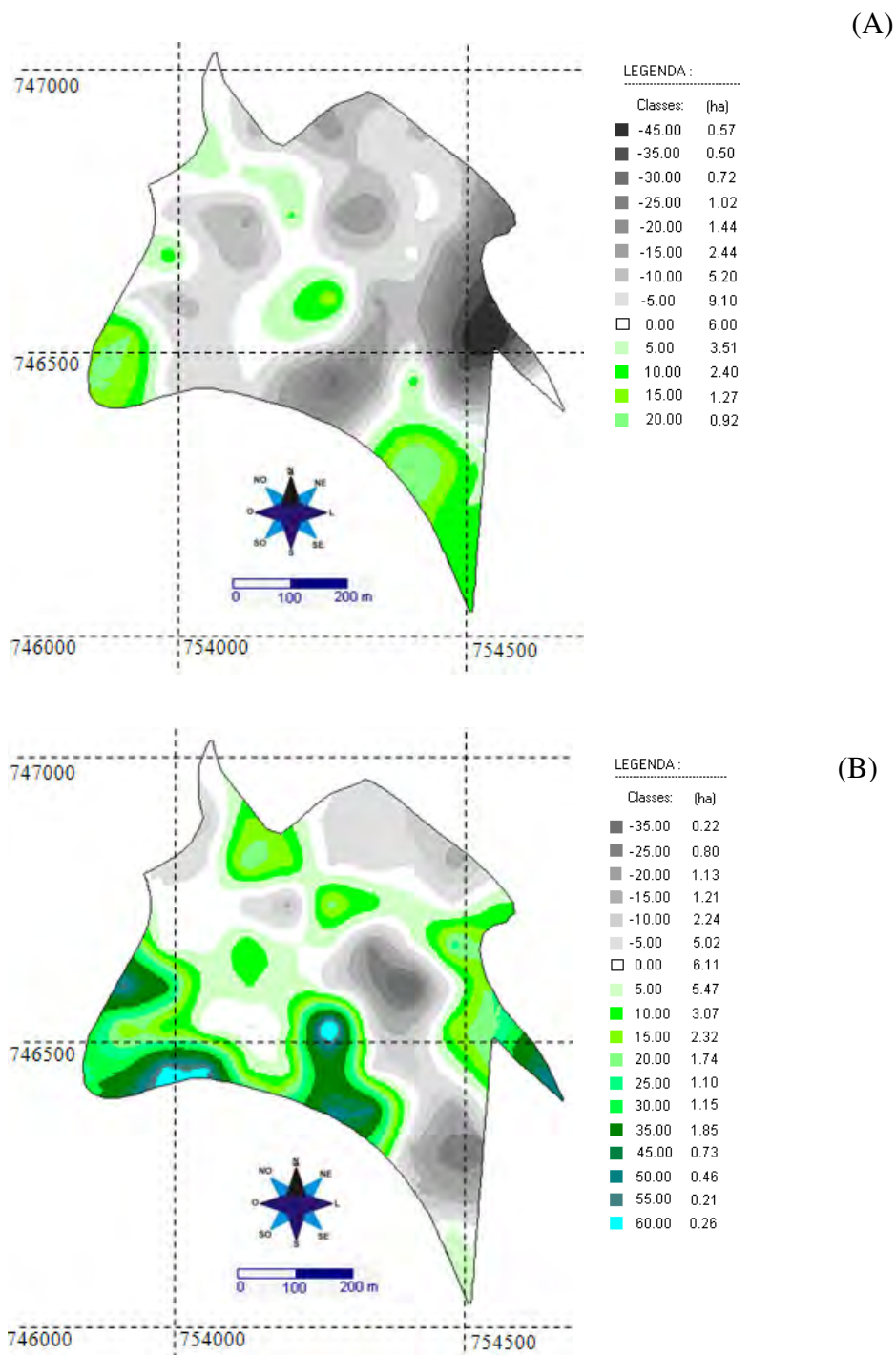
(B)



**Figura 20** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado o formulado (00-25-25) a taxa variável, baseado na grade de amostragem de 0,5 ha, e recomendações conforme equações adaptadas das classes propostas por Espironello et al. (1996) a fim de adequar às necessidades de  $K_2O$  e  $P_2O_5$ , respectivamente, em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarapé do Tiete - SP, 2009.



**Figura 21** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado SFT e KCl a taxa variável, baseado na grade de amostragem de 0,5 ha, e recomendações conforme as classes propostas por Espironello et al. (1996), em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igarajú do Tiete - SP, 2009.



**Figura 22** - Excessos e déficits de  $P_2O_5$  (A) e  $K_2O$  (B) em  $kg\ ha^{-1}$ , quando aplicado SFT e KCl a taxa variável, baseado na grade de amostragem de 3,0 ha, e recomendações conforme as equações de regressão adaptadas das classes propostas por Espironello et al. (1996) em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete - SP, 2009.

Na Tabela 5, estão os dados de déficits e excessos de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  em kg, nos 35,09 ha e porcentagem da área com adubação adequada. Em ambos os casos, foi considerado que a variação de  $10 \text{ kg ha}^{-1}$ , para mais ou para menos, como sendo um erro de aplicação de fertilizantes aceitável e que isso não interferiria na produtividade da cultura em questão. Para a aplicação a taxa fixa ( $500 \text{ kg ha}^{-1}$  do formulado 00-25-25) constatou-se excessos de 1268,00 e 2760,00 kg para  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente, e percentuais de acerto de apenas 7% para  $P_2O_5$  e 6% para  $K_2O$ , sendo estes os menores percentuais de acerto encontrados.

**Tabela 5.** Déficit e excessos em kg na área total (35,09 ha) e porcentagem da área com adubação adequada para  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009

Modo de aplicação de fertilizante	Déficit <sup>(1)</sup>		Excesso <sup>(1)</sup>		Acerto <sup>(1)</sup>	
	$P_2O_5$	$K_2O$	$P_2O_5$	$K_2O$	$P_2O_5$	$K_2O$
	kg				%	
ATV, KCl e SFT, grade 0,5 ha <sup>(2) (3)</sup>	0	0	0	0	100	100
ATF, 00-25-25, sem amostragem de solo <sup>(4)</sup>	0	0	1268	2760	7	6
ATFM, 00-25-25, uma amostra de solo <sup>(4)</sup>	-278	-223	13	1412	63	11
ATFM, 00-24-18, uma amostra de solo <sup>(4)</sup>	-278	-450	13	944	63	13
ATFT, formulado adeq., uma amostra por talhão <sup>(4)</sup>	-290	-307	4	399	62	45
AZM, 00-25-25, uma amostra por zona <sup>(4)</sup>	-307	-64	107	1443	52	23
AZM, formulado adeq., uma amostra por zona <sup>(4)</sup>	-272	-345	34	162	61	51
ATV, 00-25-25 adequar $K_2O$ , grade 0,5 ha <sup>(3)</sup>	-1774	0	143	0	10	100
ATV, 00-25-25 adequar $P_2O_5$ , grade 0,5 ha <sup>(3)</sup>	0	-151	0	1758	100	10
ATV, KCl e SFT, grade 0,5 ha <sup>(4)</sup>	-138	-9	0	102	78	84
ATV, KCl e SFT, grade 3 ha <sup>(3)</sup>	-156	-68	37	279	75	62

ATV = aplicação a taxa variável; ATF = aplicação a taxa fixa; ATFM = aplicação a taxa fixa baseada em uma amostra média; ATFT = aplicação a taxa fixa por talhões; AZM = aplicação por zonas de manejo; <sup>(1)</sup> faixa de  $\pm 10 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  como adubação adequada; <sup>(2)</sup> adubação considerada padrão para comparação com os demais modos de aplicação de fertilizante <sup>(3)</sup> recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  baseada nas equações de regressão adaptadas - Figura 7; <sup>(4)</sup> recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  baseada nas classes propostas por Espironello et al. (1996).

Para a adubação a taxa fixa, usando uma amostra média, tanto com a aplicação de um formulado da usina, quanto com o uso de formulado adequado, observou-se baixos índices de acerto, principalmente, para  $K_2O$ . Isso comprova a importância de

amostragens que caracterizem de forma adequada os atributos do solo. A amostragem e aplicação de fertilizantes pela média propiciou locais de super e sub adubações como também encontrado por outros autores como Chang et al. (2003), Wang et al. (2006) e Biscaro e Garzella (2006).

A aplicação de fertilizantes, considerando os teores médios dentro dos talhões, reduziu consideravelmente os excessos e carências, e aumentou em 32% à área em que houve adequação entre as necessidades e as quantidades aplicadas para  $K_2O$ , em relação à adubação a taxa fixa, usando uma amostra média e formulados adequados às necessidades médias. Esses resultados sinalizam para uma melhoria considerável na eficiência da aplicação de fertilizantes quando realizado a amostragem e aplicação de fertilizantes adequados a taxa fixa dentro de talhões divididos por estradas e ou terraços.

Para a aplicação por zonas de manejo observou-se que houve um aumento considerável no percentual de acerto da adubação, principalmente para  $K_2O$ , comparado com a aplicação a taxa fixa sem amostragem de solo e a taxa fixa usando uma amostra média para recomendar a adubação. Também se observa neste caso, que a utilização de formulados adequados dentro das zonas de manejo reduziu os excessos de  $K_2O$  em 1281,00 kg e aumentou em 9% para  $P_2O_5$  e 28% para  $K_2O$  a área com adubação adequada. Isso demonstra a importância da utilização de formulados adequados às necessidades médias dentro de cada zona de manejo.

Além disso, esses resultados indicam que, embora as zonas de manejo possam não ser a forma de caracterização ideal, elas melhoram consideravelmente a predição da adubação em relação à adubação a taxa fixa usando uma amostra média para a recomendação. O uso das zonas de manejo pode ser uma alternativa interessante, visto que, não se faz necessário o uso de equipamentos para aplicação a taxa variável. É um modo simplificado, mas que pode melhorar o manejo da adubação que atualmente vem sendo utilizado por muitas usinas e produtores.

Para a aplicação a taxa variável, usando o formulado 00-25-25, o percentual de acerto foi muito baixo indicando novamente que a aplicação a taxa variável deve ser feita com o uso de fertilizantes simples, visto que a variabilidade dos atributos P e K geralmente não seguem o mesmo padrão de variação, o que impossibilita a adequação das quantidades aplicadas com as necessidades das plantas. Esse modo de adubação propiciou

déficits de 1774,00 para  $P_2O_5$  e 1758,00 kg para excessos de  $K_2O$ , sendo que em apenas 10% da área houve adequação das quantidades aplicadas com as necessidades.

A adubação utilizando as classes sugeridas por Espironello et al. (1996) usadas atualmente propiciaram cerca de 80% de acerto ( $P_2O_5$  e  $K_2O$ ) quando comparado a aplicação de fertilizante baseada nas equações de regressão. Embora neste caso, houve redução de cerca de 20% na área com adubação adequada, observa-se pequenos excessos e déficits de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  nos 35,09 hectares. Com a introdução de mecanismos capazes de variar menores quantidades de fertilizantes, de forma eletrônica, existe a possibilidade de não mais usar faixas ou classes de recomendação de adubação, mas equações de regressão, e com isso propiciar um melhor ajuste entre as quantidades recomendadas e as necessidades das plantas. Pois, por exemplo, para cana-de-açúcar a recomendação (Espironello et al. 1996) é que nos teores de P no solo de 16 a 40  $mg\ dm^{-3}$  seja aplicado a mesma quantidade de fertilizante. Com as equações de regressão cada teor no solo refletiria uma dose de fertilizante, onde para 16  $mg\ dm^{-3}$  seria aplicado mais fertilizante e para 40  $mg\ dm^{-3}$  seria aplicado menos fertilizante fosfatado.

Para a aplicação a taxa variável, baseada na amostragem em grade a cada 3 ha, observa-se redução considerável nos percentuais de acerto em relação a amostragem em grade a cada 0,5 ha. Isso mais uma vez, indica que a amostragem para adubação deve ser capaz de detectar as variações existentes no terreno, caso contrário a aplicação de fertilizantes será realizada de forma equivocada. Este modo de adubação propiciou déficits e excessos de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  similares a aplicação de fertilizante adequado dentro de cada zona de manejo, porém, os percentuais de acerto foram superiores, o que indica, que quando se avalia apenas os déficits e excessos, seria preferível a aplicação baseada nos teores de P e K da amostragem em grade a cada 3 ha, do que a aplicação de fertilizantes por talhões ou zonas de manejo.

O número de amostras de solo necessário para representar a variabilidade do campo, é um fator que muitas vezes é ignorado, porém muito importante para o sucesso da aplicação a taxa variável. Pois, se a amostragem não representa o teor no solo, as recomendações não representarão as necessidades das plantas. Por isso, deve-se considerar o quanto a informação fornecida pela amostragem de solo adequada, pode propiciar de aumento na produtividade.

Os resultados para este estudo indicam que a melhor forma de caracterizar a área, para P e K é por meio da amostragem em grade. Além disso, segundo Dinkins e Jones (2008) a amostragem em zonas de manejo deve ser feita quando se tem informações anteriores da área, como mapas de produtividade, solos e topografia, caso contrário a amostragem em grade é a melhor forma de avaliar os teores de nutrientes no solo, desde que, seja adensado o suficiente para que informações importantes não sejam perdidas. Uma prática que algumas empresas vêm adotando, é a amostragem mais adensada no primeiro ano de cultivo, a fim de caracterizar a variabilidade existente, e posterior a essa caracterização, o monitoramento de alguns pontos na área a fim de acompanhar a evolução da fertilidade do solo desta área. Para cana-de-açúcar esta amostragem é de suma importância visto que grande parte da adubação, principalmente fosfatada, é realizada no plantio desta cultura, a qual permanece sendo cultivada por 5 a 6 anos.

#### **6.1.5 Custos com fertilizantes nos diferentes modos de aplicação**

O Brasil bateu o recorde na utilização de fertilizantes agrícolas em 2010, atingindo cerca de 25 milhões de toneladas. Somente a cana-de-açúcar consumiu cerca de 2,93 milhões de toneladas de adubo (ANDA, 2010). Os fertilizantes representam uma fatia considerável nos custos de produção, em especial na cultura da cana-de-açúcar. No ano agrícola de 2008 houve aumentos exagerados nos preços dos fertilizantes, sendo que segundo ANDA (2010) para o ano agrícola 2007, a necessidade em toneladas de cana-de-açúcar para pagar uma tonelada de adubo era em torno de 20 toneladas, já para o ano de 2008, essa necessidade subiu para 37 toneladas. Por isso a questão da eficiência no uso de fertilizantes tem sido cada vez mais abordada. O que se busca, não necessariamente é reduzir custos com fertilizantes, mas que com cada unidade de insumo investida tenha-se o máximo de retorno econômico.

Nesse trabalho não foi avaliado a produtividade, e por conseqüência o retorno econômico, porém, as recomendações da pesquisa geralmente consideram a dose a ser aplicada visando o máximo retorno econômico, que geralmente é encontrado de 80 a 95% da produtividade máxima (LOBATO, 1982). Por isso, a importância, de se caracterizar de forma

adequada os teores presentes no solo e, posteriormente, aplicar as quantidades adequadas a fim de se atingir o máximo retorno econômico.

Na Tabela 6, verificou-se que o custo com fertilizantes quando aplicado a adubação a taxa fixa sem amostragem de solo, foi 112% superior quando comparado com a aplicação a taxa variável de KCl e SFT, baseado na amostragem em grade de 0,5 ha e recomendações conforme equações de regressão (modo de adubação padrão de comparação com os demais). A aplicação a taxa fixa também apresentou custo com fertilizantes, 80 e 146% superior a adubação, a taxa fixa usando uma amostra média e zonas de manejo, respectivamente, considerando a aplicação de um formulado adequado. Esses resultados reforçam a importância da amostragem de solo para fins de recomendação de adubação e para este caso, redução no custo com fertilizantes.

A adubação a taxa fixa considerando uma amostra média propiciou aumento no custo com fertilizantes de 36 e 18% quando utilizado um formulado padrão (00-25-25) e um formulado adequado, respectivamente, quando comparado com a aplicação a taxa variável, padrão de comparação. Porém, com o uso de apenas uma amostra de solo a fim de representar os 35,09 ha e a aplicação de um formulado adequado as necessidades apontadas pela análise de solo, houve redução de R\$ 236,00 ha<sup>-1</sup> no custo com fertilizantes em relação à aplicação a taxa fixa de 500 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 00-25-25.

A aplicação de fertilizantes a taxa fixa dentro de cada talhão propiciou redução de R\$ 256,00 e 25,00 ha<sup>-1</sup> nos custos com fertilizantes em relação à aplicação a taxa fixa de 500 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 00-25-25 e a aplicação de um formulado adequado as necessidades apontadas por uma amostra média, respectivamente. Além da capacidade de detectar os teores dos nutrientes presentes no solo com maior confiabilidade, outra vantagem deste modo de adubação é que a aplicação de fertilizantes pode ser realizada com equipamentos convencionais, não havendo a necessidade de equipamentos para aplicação a taxa variável.

Para a aplicação do formulado 00-25-25, baseado nas necessidades apontadas pela análise de solo dentro de cada zona de manejo, houve um aumento de 42% nos custos com fertilizantes em relação à aplicação a taxa variável padrão de comparação. Além disso, houve um aumento no custo com fertilizantes de 20 e 4%, quando comparado a aplicação a taxa fixa baseada nos valores de uma amostra de solo usando o formulado 00-25-

25 e o formulado adequado (00-24-18), respectivamente. Por outro lado, ocorreu uma redução de 33% em relação à aplicação a taxa fixa de 500 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 00-25-25.

Porém, para este mesmo modo de aplicação de fertilizantes, mas usando formulados adequados dentro de cada zona de manejo constatou-se o segundo menor custo com fertilizantes sendo 146% inferior a aplicação a taxa fixa de um formulado padrão utilizado para cana-de-açúcar. Essa redução nos custos com fertilizantes também foi citada por Dellamea (2008) que encontrou que a aplicação de fertilizantes por zonas de manejo na cultura da soja acarretou uma economia de 17% na quantidade total de insumos e uma redução de R\$ 28,05 ha<sup>-1</sup> quando comparado a aplicação a taxa fixa de um formulado padrão.

Para esse mesmo modo de aplicação de fertilizantes verificou-se redução de 37% no custo com fertilizantes em relação à aplicação a taxa fixa baseada nos valores de uma amostra de solo. Além disso, a aplicação por zonas de manejo, de um formulado adequado às necessidades apontadas pela análise de solo propiciou reduções de 16 e 8% em relação à aplicação à taxa variável considerando uma grade de amostragem de 0,5 e 3,0 ha, respectivamente. Esses resultados associados aos dados de excessos e déficits de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O sugerem que as zonas de manejo podem melhorar consideravelmente a eficiência no uso de fertilizantes. Para Focht et al. (2004), sistemas mais simples, como a demarcação física das zonas de manejo através do “método de rastros” e a aplicação das taxas definidas em cada zona utilizando equipamentos disponíveis na propriedade pode também ser um sistema eficaz e econômico.

Para a aplicação de fertilizantes a taxa fixa considerando uma amostra média e por zonas de manejo usando formulados adequados às necessidades apontadas pelas análises de solo, observam-se reduções de R\$ 45,00 (39%) e 139,00 (13%) ha<sup>-1</sup> no custo com fertilizantes quando comparado ao uso de um formulado padrão (00-25-25). Esse resultado indica que, apenas a disponibilidade ou a capacidade de mistura de formulados na unidade produtiva reduziria, significativamente, o custo com fertilizantes, além de propiciar menores sub e super fertilizações com P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (Tabela 5).

A aplicação do formulado 00-25-25 a taxa variável propiciou o menor custo quando o objetivo era adequar às necessidades de K<sub>2</sub>O. Porém, aliado ao custo com fertilizantes, é importante observar a adequação as necessidades das plantas, visto que, quando

aplicado o formulado a taxa variável observa-se que em apenas 10% da área houve acerto entre as necessidades e as quantidades aplicadas de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  (Tabela 5).

**Tabela 6.** Custo dos fertilizantes nos diferentes modos de adubação em uma área de reforma de cana-de-açúcar em Igaracú do Tiete – SP, 2009

Modo de aplicação de fertilizante	Custo R\$ ha <sup>-1</sup>
ATF, 00-25-25, sem amostragem de solo <sup>(1)</sup>	531,00
ATFM, 00-25-25, uma amostra de solo <sup>(1)</sup>	340,00
ATFM, 00-24-18, uma amostra de solo <sup>(1)</sup>	295,00
ATFT, formulado adequado, uma amostra por talhão <sup>(1)</sup>	275,00
AZM, 00-25-25, uma amostra por zona <sup>(1)</sup>	355,00
AZM, formulado adequado, uma amostra por zona <sup>(1)</sup>	216,00
ATV, 00-25-25 adequar $K_2O$ , grade 0,5 ha <sup>(2)</sup>	182,00
ATV, 00-25-25 adequar $P_2O_5$ , grade 0,5 ha <sup>(2)</sup>	378,00
ATV, KCl e SFT, grade 0,5 ha <sup>(1)</sup>	240,00
ATV, KCl e SFT, grade 3 ha <sup>(1)</sup>	234,00
ATV, KCl e SFT, grade 0,5 ha <sup>(2)</sup>	250,00

ATV = aplicação a taxa variável; ATF = aplicação a taxa fixa; ATFM = aplicação a taxa fixa baseada em uma amostra média; ATFT = aplicação a taxa fixa por talhões; AZM = aplicação por zonas de manejo; <sup>(1)</sup> recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  baseada nas classes propostas por Espironello et al. (1996). <sup>(2)</sup> recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  baseada nas equações de regressão adaptadas - Figura 7;

A aplicação a taxa variável de P e K, baseada na amostragem em grade de 0,5 ha e nas classes de recomendação de adubação propostas no B100 (Espironello et al. 1996) propiciaram redução menor que 10% no custo com fertilizantes, sendo o mesmo resultado observado quando feita a amostragem em grade de 3 ha e recomendação de adubação baseada nas equações de regressão adaptadas do B100.

A adaptação de uma plantadora para aplicação da adubação a taxa variável pode facilitar a aplicação de fontes de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  no plantio da cana-de-açúcar, bem como aplicar quantidades mais equilibradas de acordo com as necessidades das plantas para cada local, podendo esses benefícios, propiciarem maior produtividade e qualidade a cana-de-açúcar. Além dessas possíveis vantagens, a aplicação de fertilizantes simples (KCl e SFT) implicaria em menores custos, pois não há a necessidade prévia de mistura de produtos, fato que ocorre nos fertilizantes formulados. Além disso, com o uso de fertilizantes minerais

simples, geralmente mais concentrados, poderia haver a redução no volume e custo de transporte, tanto antes de chegar à usina quanto dentro da própria usina. Outro fator que pode ser citado, como possível vantagem, é que a compra de fertilizantes simples tornaria a empresa menos dependente da utilização de uma única formulação de adubo, fato que vem sendo utilizado de forma corriqueira pelas usinas.

Muitas vezes é questionado o elevado custo da amostragem e análise de solo, porém ao se considerar uma grade de amostragem de 1 ha e um custo de amostragem e análise laboratorial de R\$ 20,00 a 30,00 reais por hectare, isso representa apenas 3,8 a 5,7% do custo com fertilizantes que atualmente vem sendo utilizado por algumas usinas, quando não se considera a amostragem de solo. Isso, apenas considerando o custo do fertilizante e não da operação e de outros insumos como o calcário. Por outro lado, outros custos, com a contratação ou treinamento de mão-de-obra para o mapeamento e recomendação da adubação não foram considerados neste trabalho, mas devem ser levantados para situação de cada unidade produtiva.

Outra opção que vem sendo utilizada é a terceirização de serviços de coleta de amostras e geração de mapas de recomendação. Em 2010, os preços praticados pelas empresas estavam em torno de R\$ 55,00 a 65,00 reais ha<sup>-1</sup>, considerando uma grade de amostragem de 1 ha (Informação verbal) <sup>1</sup>. Esses custos representam em torno de 10,4 a 12,2% do custo com fertilizantes utilizado atualmente pelas usinas quando não se consideram os teores existentes no solo.

Além disso, outras informações importantes são obtidas com a análise de solo. Por isso, a amostragem de solo que caracterize os atributos químico-físicos é de suma importância, visto que além de representar um percentual muito baixo em relação aos demais custos dessa cultura, aumenta a probabilidade de adequar as quantidades a serem aplicadas com necessidades das plantas e, por consequência, todos os benefícios advindos dessa adequação.

O uso de controladores eletrônicos facilitaria a aplicação de KCl e SFT de acordo com as necessidades apontadas pela análise de solo. Porém, é necessário um investimento adicional, devido aos equipamentos necessários para a variação nas quantidades

---

<sup>1</sup>Informação fornecida por empresas que fornecem serviço de amostragem de solo e recomendação de fertilizantes no RS, em dezembro de 2010.

a serem aplicadas. O custo para adaptar uma máquina de plantio de cana-de-açúcar para aplicar a taxa variável P e K de forma isolada no sulco de plantio é de aproximadamente R\$ 23.000,00 (Informação verbal) <sup>2</sup>. Além disso, o custo das amostragens e análise laboratorial adicionais representariam em torno de 40 reais ha<sup>-1</sup> (2 amostras por ha).

Esse custo adicional, caso existisse o mesmo padrão de aplicação de fertilizantes para outras áreas a serem avaliadas, seria pago após o plantio de, aproximadamente, 95 hectares, comparado ao que é adotado como adubação de plantio por algumas Usinas (500 kg ha<sup>-1</sup> de um formulado, 00-25-25). Já, quando compararmos com amostragem de um ponto representativo dos 35,09 ha observa-se que seriam necessários 460 hectares, quando usado o formulado 00-25-25 e, 4600 hectares, quando usado um formulado adequado. Além do custo com fertilizantes, deve-se considerar o retorno econômico advindo da adequação as necessidades nutricionais das plantas e conseqüente aumento da produtividade. Esse aumento é variável, e depende de uma série de fatores, dentre eles, a variabilidade existente na área. Porém, o aumento na produtividade proporcionado pela utilização de amostragens mais adensadas e aplicações de fertilizantes adequados as necessidades, reduziria consideravelmente o tamanho da área e o tempo necessários para pagar o investimento adicional em equipamentos e amostragens.

## **6.2 Experimento 2: Avaliação de sensores óticos de refletância e fluorescência no algodoeiro**

Na análise descritiva dos dados (Tabela 7) são apresentados os valores médios, a mediana, os valores mínimos e máximos e o CV% em diferentes variedades de algodão submetidas a aplicação de doses de N. Para o CV% observa-se o menor valor para o índice NDVI, indicando ocorrer menor variação para este índice quando as leituras foram realizadas em diferentes variedades e doses de N. Para a maioria dos índices, os coeficientes de variação ficaram entre 12 e 62%, sendo classificados como médios, conforme Warrick e Nielsen (1980).

---

<sup>2</sup> Informação fornecida pela Empresa Verion, em outubro de 2010.

**Tabela 7** - Análise descritiva e análise da variância para os índices fornecidos pelos sensores de refletância e fluorescência em variedades de algodão e doses de N. Maricopa, AZ - EUA, 2010

Parâmetros	Análise descritiva					Análise da variância		
	Média	Mediana	Min.	Máx.	CV%	Variedade	Doses N	Var. x N
						Valores de F		
NDVI	0,819	0,820	0,779	0,835	1,51	21,35**	3,74*	0,39
CLR	2,688	2,682	2,363	2,897	4,70	49,69**	12,92**	0,59
YF_UV	5,93	5,96	5,18	6,55	4,70	1,56	0,03	0,28
RF_UV	30,55	30,45	21,69	36,78	12,37	0,62	16,08**	0,87
FRF_UV	147,69	145,91	100,37	189,46	14,36	0,14	12,44**	0,46
YF_B	17,19	17,15	12,71	23,68	14,91	3,43*	0,94	0,31
RF_B	593,64	584,97	441,59	788,18	12,62	4,36*	1,30	0,52
FRF_B	2934,07	2912,59	2182,65	3792,16	12,42	2,52	1,66	1,18
YF_G	703,82	690,36	488,27	1045,78	16,95	3,80*	0,96	0,46
RF_G	201,05	198,41	151,30	282,16	12,75	3,62**	0,29	0,38
FRF_G	1913,24	1898,27	1458,75	2377,80	11,51	7,28**	0,42	0,57
YF_R	206,71	210,80	127,26	279,57	16,95	2,24	2,40	0,61
RF_R	300,32	296,42	224,19	375,22	13,40	0,85	0,48	0,46
FRF_R	2612,20	2637,25	2019,59	3361,99	12,78	1,92	0,97	0,77
SFR_G	9,56	9,42	8,05	11,62	8,42	0,68	0,36	0,31
SFR_R	8,74	8,59	6,71	12,19	9,89	0,66	0,48	0,47
BRR_FRF	0,04	0,04	0,03	0,06	15,52	0,63	14,02**	1,00
FER_RUV	18,10	17,71	12,34	27,55	20,61	1,92	10,53**	1,28
FLAV	1,25	1,25	1,09	1,44	7,15	1,77	9,87**	0,86
FER_RG	1,37	1,37	1,17	1,53	6,77	3,01	3,05	0,28
ANTH	0,13	0,14	0,07	0,18	22,08	3,29*	3,71*	0,31
NBI_G	0,75	0,72	0,47	1,00	19,21	2,31	7,29**	0,41
NBI_R	0,50	0,48	0,30	0,79	22,25	0,39	5,94**	0,29
FERARI	0,29	0,28	0,17	0,39	19,70	2,11	0,85	0,79
N pecíolo	9220	9345	2766	14670	34,04	1,01	28,43**	0,88
Biomassa	565	546	421	835	16,91	2,72	3,13*	0,15
Produtividade	4943	4989	4324	5536	5,61	9,72**	3,80*	0,74

Min. = valor mínimo; Máx. = valor máximo; CV% = coeficiente de variação; Var. x N = interação entre o fator variedade e o fator doses de N. \*\*significativo a 1% de probabilidade e \*significativo a 5% de probabilidade.

Na análise da variância observa-se que para todos os índices e parâmetros avaliados não houve interação entre os fatores variedades e doses de N. As leituras para os índices NDVI, CLR, YF\_B, RF\_B, YF\_G, RF\_G, FRF\_G e ANTH e produtividade foram significativamente afetadas pelas variedades de algodão. Porém, por outro lado, as

variedades não influenciaram as leituras dos demais índices do sensor de fluorescência (Tabela 7) indicando que estes são menos afetados, no estágio de emissão do primeiro capulho.

As leituras dos índices NDVI, CLR, YF\_UV, RF\_UV, FRF\_UV, BRR\_FRF, FER\_RUV, FLAV, ANTH, NBI\_G e NBI\_R, teores de N no pecíolo, biomassa e produtividade do algodoeiro foram significativamente afetadas quando aplicado doses de N.

### **6.2.1 Influência das variedades de algodão nos índices dos sensores de refletância e fluorescência**

Como apontado por Fontana et al. (1998), as mudanças estruturais da vegetação no decorrer da estação de crescimento resultam em uma diferenciação da sua refletância, o que permite empregar o NDVI para o monitoramento da vegetação, bem como distinguir diferentes tipos de vegetação e detectar possíveis problemas de crescimento.

As variedades interferiram nas leituras de NDVI sendo que a variedade 2 apresentou valores superiores quando comparada as demais variedades (Tabela 8). Para os índices fornecidos pelo sensor de fluorescência RF\_B, FRF\_G e ANTH a variedade 1 diferiu das variedades 2 e 3. A clorofila mensurada pelo sensor de refletância foi à única variável capaz de diferenciar as três variedades de algodão. Se por um lado, este fato demonstra a capacidade dos sensores em detectar diferentes variedades, por outro lado, demonstra a necessidade de uma calibração do sensor para o uso em diferentes variedades. Frasson (2007) na cana-de-açúcar, Schächtl et al. (2005) no trigo e Ramirez (2010) no algodoeiro também verificaram a interferência do fator variedade nas leituras de um sensor de refletância.

Do mesmo modo, para a recomendação de N (RAUN et al., 2001; FREEMAN et al., 2003; MOGES et al., 2004; INMAN et al., 2005) recomendam a calibração das doses de N para cada variedade, pois existe diferença nas leituras de NDVI para cada variedade.

As três variedades de algodão apresentaram produtividades distintas, sendo que a variedade 2 apresentou a maior produtividade, seguida pela variedade 1 e posteriormente variedade 3, sendo que nenhum dos parâmetros foi capaz de diferenciar as variedades quanto a produtividade.

**Tabela 8** - Índices dos sensores de refletância e fluorescência em três variedades de algodão. Maricopa, AZ - EUA, 2010

	Variedade 1	Variedade 2	Variedade 3	CV%
NDVI	0,811 b	0,830 a	0,816 b	0,88
Clorofila	2,80 a	2,69 b	2,57 c	2,44
YF_B	16,2 b	18,3 a	17,1 ab	13,26
RF_B	554 b	612 a	615 a	11,54
YF_G	642 b	752 a	717 ab	16,23
RF_G	188 b	210 a	205 ab	11,81
FRF_G	1766 b	1990 a	1984 a	10,25
ANTH	0,15 a	0,13 b	0,12 b	15,34
Produtividade	4983 b	5150 a	4695 c	3,81

Variedade 1 = ST 4288-B2RF; Variedade 2 = ST 4288-B2RF; Variedade 3 = DP 164-B2RF. Letras minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 6.2.2 Índices dos sensores de refletância e fluorescência na avaliação dos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no pecíolo, biomassa e produtividade de plantas de algodão

As correlações entre as variáveis das culturas e os índices determinados pelos sensores de refletância e fluorescência proporcionam condições para identificar quais os índices têm maior sensibilidade na determinação das variações nos teores de nitrogênio, biomassa e produtividade.

Os índices fornecidos pelo sensor de refletância, NDVI e clorofila (Tabela 8), a partir de leituras realizadas no estágio de emissão do primeiro capulho, apresentaram correlações significativas com a produtividade. Segundo Zhao et al. (2005) a correlação entre produtividade e os índices de refletância dependem do estágio de crescimento em que as leituras são realizadas, sendo que, quanto mais tardia esta leitura, maiores as correlações.

Além da produtividade, houve correlação significativa do NDVI com a biomassa. Por outro lado, as correlações tanto para o NDVI quanto para a clorofila mensurada pelo sensor de refletância não foram significativas com os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no pecíolo. Khalilian et al. (2007) usaram um sensor de refletância para medir NDVI e encontraram uma forte correlação entre NDVI e parâmetros de planta como altura de planta e produtividade de algodão. Zhao et al. (2005), avaliando o efeito de adubação nitrogenada e aplicação de

regulador de crescimento no algodoeiro verificaram que as mudanças na produtividade de fibras do algodoeiro foram fortemente relacionadas com valores de NDVI no início da floração. Motomiya et al. (2009) também encontraram relação linear positiva ( $R^2 = 0,61$ ) com os teores de N nas folhas do algodoeiro. Por outro lado, Bronson et al. (2005) relataram que o NDVI medido com o sensor de refletância GreenSeeker foi mal correlacionado com N foliar, biomassa e produtividade do algodoeiro.

**Tabela 9** - Correlação entre os índices dos sensores de refletância e fluorescência e os teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo, biomassa e produtividade de plantas de algodão. Maricopa, AZ - EUA, 2010.

Índice	NDVI	Clorofila	Biomassa	$N-NO_3^-$ pecíolo	Produtividade
NDVI	1,00	-	0,39*	0,21	0,32*
CLR	0,07	1,00	0,21	0,27	0,41*
YF_UV	0,19	0,07	-0,09	-0,14	0,34*
RF_UV	0,22	0,38*	0,26	0,57*	0,18
FRF_UV	0,28	0,31*	0,39*	0,54*	0,25
YF_B	0,18	-0,18	-0,15	-0,06	-0,13
RF_B	0,14	-0,18	-0,16	0,34*	-0,04
FRF_B	0,10	-0,07	-0,18	0,21	0,02
YF_G	0,21	-0,26	-0,22	-0,11	-0,17
RF_G	0,15	-0,19	-0,27	0,06	0,02
FRF_G	0,20	-0,30*	-0,15	0,20	-0,04
YF_R	0,11	-0,03	-0,25	-0,41*	0,10
RF_R	-0,04	-0,13	-0,44*	-0,16	0,03
FRF_R	-0,02	-0,21	-0,29*	-0,03	0,05
SFR_G	0,08	-0,13	0,22	0,20	-0,08
SFR_R	0,06	-0,11	0,22	0,16	0,05
BRR_FRF	-0,25	-0,30*	-0,38*	-0,61*	-0,18
FER_RUV	-0,23	-0,38*	-0,44*	-0,44*	-0,19
FLAV	-0,22	-0,37*	-0,45*	-0,43*	-0,17
FER_RG	-0,38*	0,10	-0,31*	-0,42*	0,14
ANTH	-0,38*	0,11	-0,30*	-0,43*	0,14
NBI_G	0,14	0,37*	0,49*	0,39*	0,19
NBI_R	0,23	0,26	0,53*	0,45*	0,18
FERARI	0,00	0,22	0,28	0,04	-0,04

\* Valores marcados apresentam correlações significativas ( $p < 0,05$ ). Número de observações = 48.

O NDVI apresentou correlações significativas com os índices FER\_RG e ANTH, e a clorofila apresentou correlação significativa com RF\_UV, FRF\_UV, FRF\_G, BRR\_FRF, FER\_RUV, FLAV e NBI\_G. Através dessas correlações pode se inferir que, quando se está trabalhando com um desses sensores é possível estimar os índices do outro, sem que ocorra perda significativa de informação.

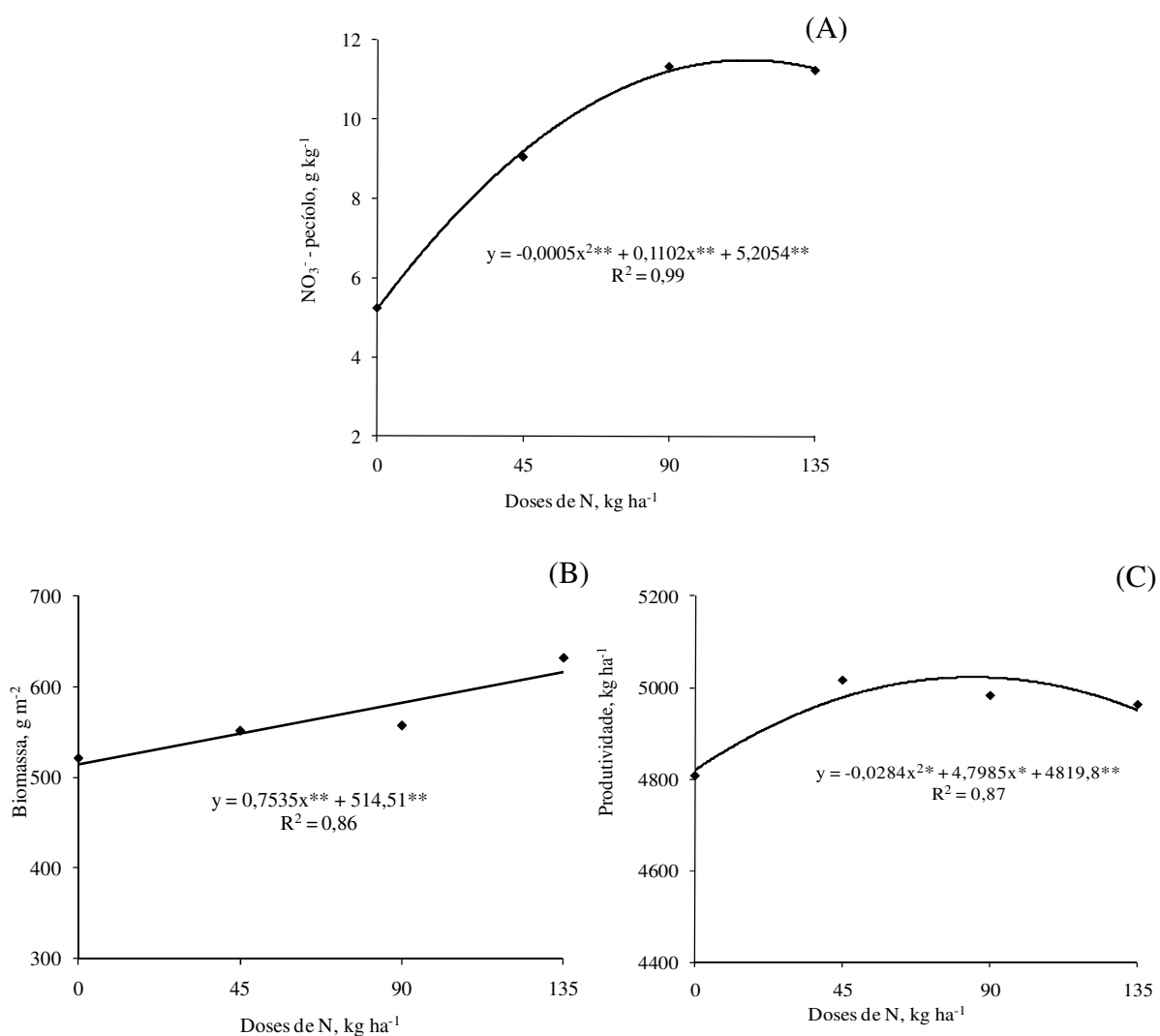
Para a mensuração da biomassa de plantas de algodão, além do NDVI, os índices FRF\_UV, RF\_R, FRF\_R, BRR\_FRF, FER\_RUV, FLAV, FER\_RG, ANTH, NBI\_G e NBI\_R apresentaram correlações significativas. Se a biomassa e a produtividade das plantas de algodão puderem ser preditas usando medidas de refletância e fluorescência em estádios iniciais de crescimento, isto poderia ajudar os produtores a tomarem decisões de manejo, como irrigação, adubação foliar e aplicação de reguladores de crescimento visando à máxima produtividade.

Os índices do sensor de fluorescência que melhor explicaram a concentração de  $\text{N-NO}_3^-$  nos pecíolos foram RF\_UV, FRF\_UV e BRR\_FRF, pois apresentaram as maiores correlações. Esses índices possuem como fonte de excitação UV e a detecção da fluorescência ocorre na faixa do vermelho, vermelho distante e a relação entre amarelo e o vermelho distante, respectivamente. Essas maiores correlações, quando a detecção da fluorescência ocorre na faixa do vermelho, esta vinculada ao fato que a fluorescência vermelha é emitida somente pela clorofila, e o conteúdo de clorofila em folhas é conhecidamente relacionado à disponibilidade de N nas plantas (SCHLEMMER et al., 2005).

Além destes três índices, outros como o YF\_R, FER\_RUV, FER\_RG, RF\_B, NBI\_G, NBI\_R, FLAV e ANTH foram correlacionadas com teor de N no pecíolo. Segundo Cerovic et al. (1999), além da clorofila, os polifenóis, incluindo antocianinas (ANTH) e flavonóis (FLAV) presentes na epiderme são também afetados pela disponibilidade de N na planta. Quando sob baixa disponibilidade de N, plantas alocam o excesso de C na síntese de polifenóis. Por outro lado, alto conteúdo de polifenóis é, portanto um potencial indicador de baixos teores de N nas culturas.

Para os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo (Figura 23A) observou-se resposta quadrática a aplicação de N, sendo que os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo reduziram a partir da dose de  $90 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Segundo Pennington e Tucker (1984), os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo durante a emissão dos primeiros capulhos devem estar acima de  $8 \text{ g kg}^{-1}$  para ser

considerado adequado, sendo que para o presente estudo esse valor foi superior ao recomendado já na menor dose, 45 kg ha<sup>-1</sup> de N. Isto, provavelmente ocorra pois, além do N presente na água de irrigação, o solo possuía antes da semeadura 45 kg ha<sup>-1</sup> de N, o que pode suprir grande parte das necessidades de N requeridas pelo algodão.

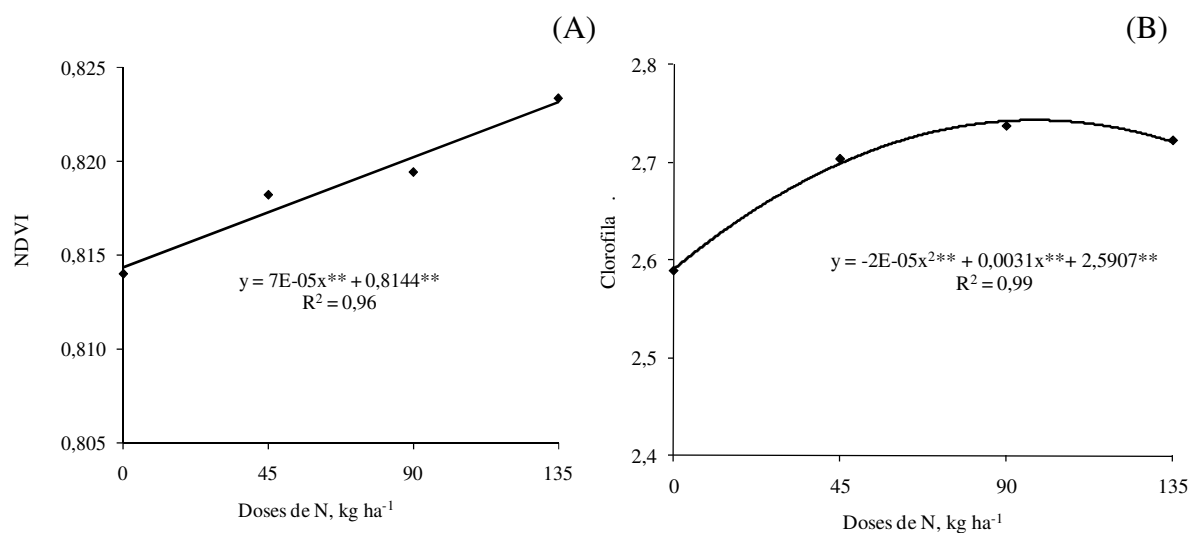


**Figura 23** - Teor de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no pecíolo (A), biomassa (B) e produtividade (C) do algodoeiro quando submetido a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.

A máxima produção de biomassa (Figura 23B) ocorreu na maior dose (135 kg ha<sup>-1</sup>), porém, isso não refletiu em máxima produtividade que foi atingida na dose de

84 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 23C). Segundo Staut e Kurihara (2001), o nitrogênio quando aplicado em doses elevadas aumenta o desenvolvimento vegetativo da planta em detrimento da produção e formação tardia dos frutos do algodoeiro. Além disso, Cisneros e Godfrey (2001) salientaram que o excesso de N pode afetar indiretamente a qualidade das fibras pelo aumento da infestação de pulgões (*Aphis gossypii* Glover), os quais, segundo Slosser et al. (1999), prejudicam a desfolha e podem causar problemas de pegajosidade no algodoeiro em virtude das secreções açucaradas liberadas por este inseto.

Além da correlação significativa existente entre NDVI e biomassa (Tabela 8), o NDVI apresentou ajuste linear com a aplicação de doses crescentes de N (Figura 24A), semelhante ao que ocorreu com a biomassa das plantas de algodão. Além do NDVI, os índices do sensor de fluorescência FRF\_UV, NBI\_G, NBI\_R, BRR\_FRF, FER\_RUV, FLAV e ANTH também apresentaram correlação significativa (Tabela 8) e ajuste linear (Figuras 25B, 25C, 25D, 26A, 26B, 26C e 26D) com a aplicação de doses de N. Esses resultados apontam para a utilização desses índices na determinação da biomassa de plantas de algodão.

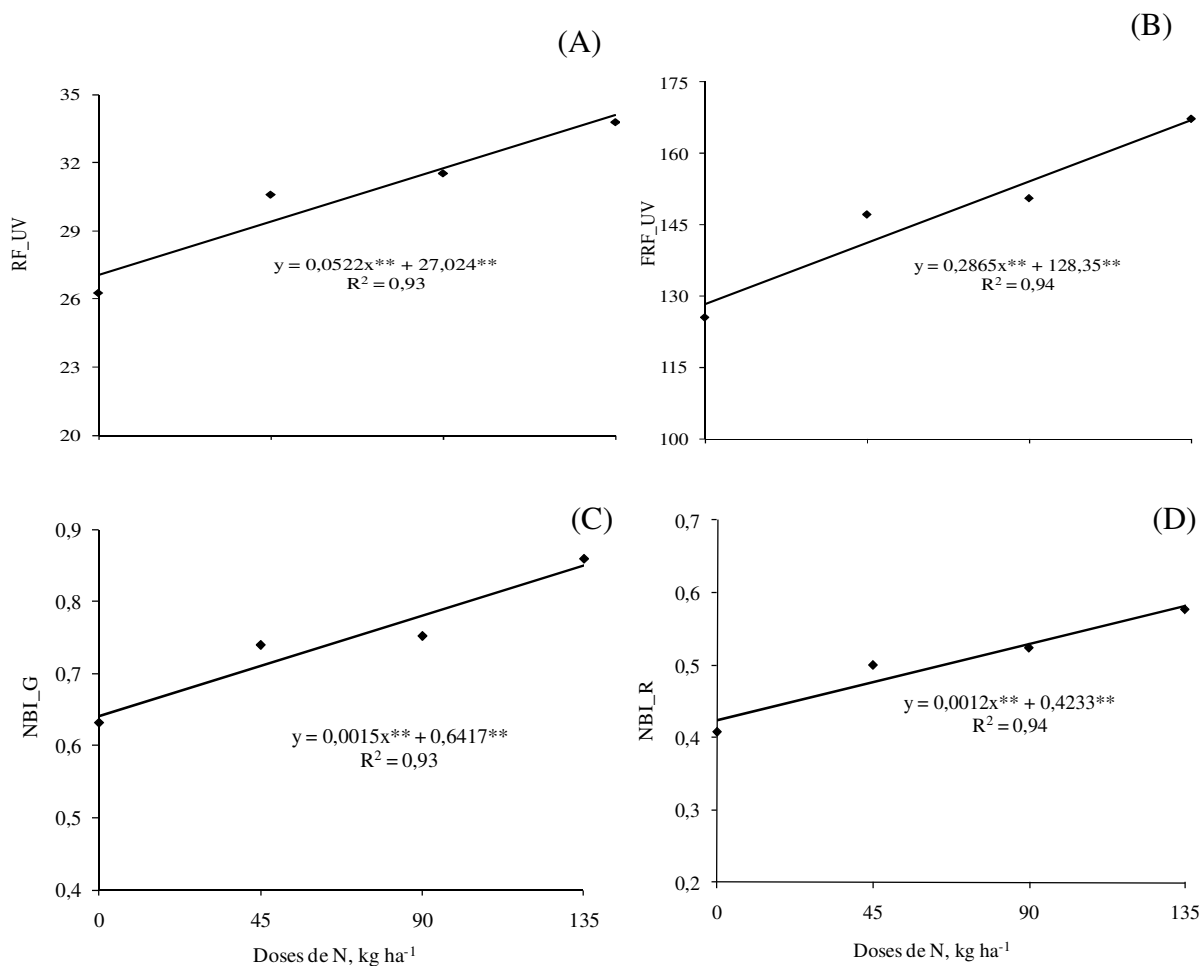


**Figura 24** - Índices do sensor de refletância NDVI (A) e Clorofila (B) em plantas de algodão submetidas a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.

As correlações significantes entre a clorofila e a produtividade (Tabela 8) associadas ao ajuste quadrático, tanto para o índice clorofila (Figura 24B) quanto para a produtividade (Figura 23C), quando aplicado doses de N, permitem afirmar que o índice

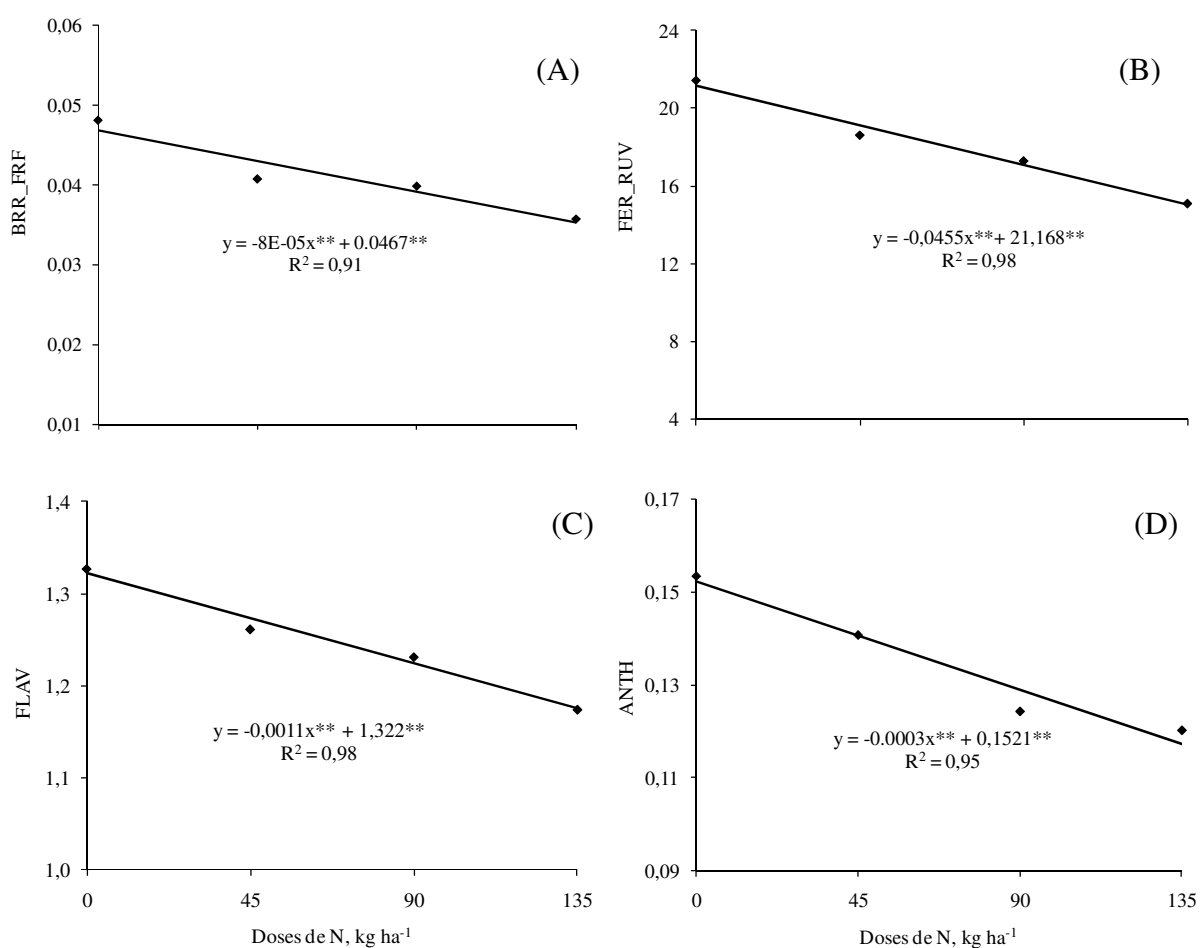
clorofila apresentou maior capacidade de detectar a variação da produtividade de plantas de algodão que os demais índices fornecidos pelos sensores de refletância e fluorescência. Além disso, observa-se que as doses de N onde ocorreram a máxima produtividade e o valor máximo do índice clorofila foram próximas, 84 e 78 kg de N ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

O índice clorofila também apresentou ajuste quadrático com as doses de N (Figura 24B), fato também observado para os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no pecíolo (Figura 23A). Porém, observa-se que o máximo índice clorofila foi encontrado na dose de 78 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto para os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no pecíolo o máximo teor foi atingido na dose de 110 kg ha<sup>-1</sup>, indicando, neste caso, não ser um bom índice na predição dos teores de N.



**Figura 25** - Índices do sensor de fluorescência RF\_UV (A), FRF\_UV (B), NBI\_G (C) e NBI\_R (D) em plantas de algodão submetidas a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.

Além da correlação estatisticamente significativa com os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo (Tabela 8), os índices RF\_UV (Figura 25A), FRF\_UV (Figura 25B), NBI\_G (Figura 25C) e NBI\_R (Figura 25D) apresentaram relação estatisticamente significativa com as doses de N, com ajuste dado pela equação de regressão linear positiva. Por outro lado, os índices BRR\_FRF (Figura 26A), FER\_RUV (Figura 26B), FLAV (Figura 26C), ANTH (Figura 26D) apresentaram relação estatisticamente significativa com as doses de N, porém, com ajuste dado pela equação de regressão linear negativa.



**Figura 26** - Índices do sensor de fluorescência BRR\_FRF (A), FER\_RUV (B), FLAV (C) e ANTH (D) em plantas de algodão submetidas a doses de nitrogênio. Maricopa, AZ - EUA, 2010.

O ajuste linear entre doses de N e os índices do sensor de fluorescência indicam que a dose onde ocorre o valor máximo ou mínimo dos índices é superior ao encontrado quando realizado a coleta e determinação laboratorial dos teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo. Porém, quando se observa os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo (Figura 23A), verifica-se um incremento linear nos teores de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo até  $11,07 \text{ g kg}^{-1}$  ( $90 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ) indicando que até este teor os índices do sensor de fluorescência representam de forma adequada os teores de N nas plantas de algodão.

O sensor de fluorescência surge como uma ferramenta com potencial de utilização na detecção de deficiências de nitrogênio no algodoeiro, concordando com Limbrunner e Maidl (2007) que observaram boas correlações entre N absorvido e medidas de fluorescência da clorofila em trigo. Schächtl et al. (2005) também observaram que o sensor de fluorescência possui capacidade de detectar os teores de N em plantas de trigo e Zhang e Tremblay (2010) em plantas de milho.

O sensor de fluorescência utilizado mostrou-se eficiente na detecção da quantidade de N absorvida pelas plantas de algodoeiro, informação que pode ser útil para que, combinada com um algoritmo de fertilização, indicar as doses de N a serem aplicadas à cultura, em tempo hábil, dentro do ciclo da cultura. Porém, fontes de variação como as variedades, datas de semeadura e efeitos espaciais e sazonais podem exercer impacto sobre as leituras (MOTOMIYA et al., 2009). Por isso, mais estudos devem ser realizados a fim de que os dados obtidos possam ser utilizados de forma confiável na recomendação de adubação nitrogenada.

A máxima produtividade estimada com a equação ajustada entre produtividade e doses de N (Figura 23C) foi atingida quando aplicado  $84 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Porém, a máxima eficiência econômica (MEE) ocorre abaixo da máxima produtividade. Por isso, para a determinação da dose de MEE, Raij (1991), sugere que se iguale a derivada primeira da equação de regressão, correspondente a produtividade (Figura 23C) ao valor zero, e a relação entre preços do insumo (US\$/kg de N na forma de Nitrato de Amônia) e do produto (US\$/kg algodão em caroço), sendo os preços vigentes no estado do Arizona – EUA, no mês de março de 2010 (USDA, 2010). A fórmula obtida para a dose de máxima eficiência econômica foi:  $\text{Dose de N} = (4,7985 - Y) / (2 \times 0,0284)$ , onde Y é a relação entre os preços do insumo e do

produto, que no caso é 1,62. Com isso, no presente trabalho a dose de máxima eficiência econômica foi de 56 kg de N ha<sup>-1</sup>.

Para o estágio de emissão do primeiro capulho, os valores dos índices do sensor de refletância na dose de máxima eficiência econômica foram de 0,8183 para o NDVI e 2,702 para a Clorofila. Para os índices do sensor de fluorescência os valores foram de 24,9 para RF\_UV, 144,5 para FRF\_UV, 0,726 para NBI\_G, 0,490 para NBI\_R, 0,0466955 para BRR\_FRF, 18,62 para FER\_RUV, 1,260 para FLAV e 0,135 para ANTH.

## 7 CONCLUSÕES

De acordo com as condições em que foram realizados os estudos, é possível concluir que:

### **7.1 Experimento 1: Modos de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos em cana-de-açúcar**

A recomendação de fertilizantes sem amostragem de solo é um método que propicia aplicação de fertilizante acima das necessidades das plantas e elevado custo com fertilizante.

A amostragem de solo e aplicação de fertilizantes por talhões e por zonas de manejo propiciam melhora significativa na adequação da adubação as necessidades das plantas e redução de custos com fertilizantes quando comparado aos métodos tradicionais de amostragem e aplicação de fertilizantes.

A amostragem de solo e aplicação a taxa variável baseada em uma grade de 3,0 ha propicia melhor adequação as necessidades das plantas que os demais modos de amostragem, exceto quando utilizado a grade de amostragem de 0,5 ha.

O simples uso de formulados adequados as necessidades apontadas pelos diferentes modos de amostragem de solo propiciam redução considerável nos déficits e excessos de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  e custo com fertilizantes.

Com a introdução de equipamentos de aplicação a taxa variável capazes de variar menores quantidades de fertilizantes é possível não mais usar classes de recomendação, mas equações de regressão baseadas nessas classes propiciando melhor ajuste entre as quantidades aplicadas e as necessidades das plantas.

Apesar do custo adicional com aquisição dos componentes eletrônicos e amostragem de solo, a aplicação a taxa variável de KCl e SFT no sulco de plantio baseada na amostragem em grade, apresenta grande potencial em maximizar a eficiência no uso de fertilizantes em cana-de-açúcar.

## **7.2 Experimento 2: Avaliação de sensores óticos de refletância e fluorescência no algodoeiro**

As variedades de algodão influenciam nas leituras dos índices do sensor de refletância e em alguns índices do sensor de fluorescência.

Os índices do sensor de fluorescência proporcionam maiores correlações com os teores de  $N-NO_3^-$  no pecíolo de plantas de algodão que os índices do sensor de refletância.

Os sensores de refletância e fluorescência apresentam capacidade de detectar a variação da biomassa de plantas de algodão quando aplicado doses de N.

O índice clorofila, mensurado com o sensor de refletância, apresenta maior capacidade de detectar a variação da produtividade de plantas de algodão que os demais índices de ambos os sensores.

O sensor de fluorescência apresenta grande potencial de ser usado na predição e recomendação de N, porém mais estudos devem ser realizados a campo, a fim de determinar a influência de fatores climáticos, épocas de amostragem, entre outros fatores, nas leituras com este sensor.

## 8 REFERÊNCIAS

AGATI, G.; FUSI, F.; MAZZINGHI, P. A simple approach to the evaluation of the re-absorption of chlorophyll fluorescence spectra in intact leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, Malden, v. 17, p. 163-171, 1993.

AGATI, G. et al. Assessment of anthocyanins in grape (*Vitis vinifera* L.) berries using a non-invasive chlorophyll fluorescence method. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 55, p. 1053-1061, 2007.

ALEXANDER, M. Persistence and biological reaction of pesticides in soil. **Soil Science**, Philadelphia, v. 29, p. 1-7, 1965.

ANGHINONI, I. Adubação nitrogenada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: SANTANA, M. B. M. **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: CEPLAC-SBCS, 1985. p. 244-273.

ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2003. 83 p.

ARGENTA, G. et al. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 109-119, 2003.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Principais indicadores para o setor de fertilizantes. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/estatisticas.aspx>>. Acesso em: 17 jan. 2010.

ATHERTON, B. C. et al. Site-specific farming: A perspective on information needs, benefits and limitations. **Journal Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 54, n. 2, p. 455-461, 1999.

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

BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de propriedades químicas de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.

BARNES, A. C. **The sugarcane**. 2. ed. London: International Textbook Limited, 1974.

BERNTSEN, J. et al. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. **Precision Agriculture**, New York, v. 7, p. 65-83, 2006.

BIERMACHER, J. T. et al. Maximum benefit of a precise nitrogen application system for wheat. **Precision Agriculture**, New York, v. 7, p. 193-204, 2006.

BISCARO, A. S.; GARZELLA, T. C. Agricultura de precisão: uma valiosa ferramenta para redução de contaminação ambiental decorrente do uso de fertilizantes minerais nitrogenados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, n. 1, p. 56-60, 1995.

BLACKMER, T. M. et al. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 1-5, 1996.

BLACKMORE, B. S.; LARSCHIED, G. Strategies for managing variability. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE 1997, 1., 1997, Warwick. **Proceedings...** London: BIOS Scientific, 1997. p. 851-859.

BOISSARD, P.; POINTEL, J. G.; TRANCHEFORT, J. Estimation of the ground cover ratio of a wheat canopy using radiometry. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 13, n. 9, p. 1681-1692, 1992.

BOQUET, D. J.; MOSER, E. B.; BREITENBECK, G. A. Boll weight and within-plant yield distribution in field-grown cotton given different levels of nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 20-36, 1994.

BOUMA, J. Precision agriculture: a unique tool to unify production and environmental requirements in agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 4., 1998, Minnesota. **Proceedings...** Minnesota: ASA; CSSA; SSSA, 1998. v. 1, p. 595-601.

BRAGATO, G.; PRIMAVERA, F. Manuring and soil type influence on spatial variation of soil organic matter properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1313-1319, 1998.

BREDEMEIER, C.; SCHMIDHALTER, U. Non-contacting chlorophyll fluorescence sensing for sitespecific nitrogen fertilization in wheat and maize. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 2003, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen: Academic Publishers, 2003. p. 103-108.

BRIANTAIS, J.-M. et al. Chlorophyll a fluorescence of higher plants: chloroplasts and leaves. In: GOVINDJEE, J.; AMESZ D.; FORK, C. **Light emission by plants and bacteria**. Orlando: Academic Press, 1986. p. 539-583.

BRONSON, K. F. et al. Cotton canopy reflectance at landscape scale as affected by nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 654-660, 2005.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. III. Changes in physiological availability of zinc in plants. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 70, n. 1, p. 13-20, 1987.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: Virginia Polytechnic Institute, 1987. 551 p.

CAMPOS, M. C. C. et al. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas geoestatísticas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 974-980, 2008.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B. **Calagem e adubação do algodoeiro no cerrado**. Campina Grande: EMBRAPA/CNPA, 2006. 16 p. (Circular Técnica, n. 92).

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Org.). **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília, DF: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão, 2007. cap. 16. p. 581-647.

CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D. T. Agroecosystems, nitrogen - use efficiency, and nitrogen management. **AMBIO**, Stockholm, v. 31, n. 2, p. 132-140, 2002.

CEROVIC Z. G. et al. Ultraviolet-induced fluorescence for plant monitoring: present state and prospects. **Agronomie**, Paris, v. 19, p. 543-578, 1999.

CEROVIC Z. G. et al. New portable optical sensors for the assessment of winegrape phenolic maturity based on berry fluorescence. **Journal of Food Composition and Analysis**, Roma, v. 21, p. 650-654, 2008.

CHANG, J. et al. Different techniques to identify management zones impact nitrogen and phosphorus sampling variability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1550-1559, 2003.

CISNEROS, J. J.; GODFREY, L. D. Mid-season pest status of the cotton aphid (Homoptera: Aphididae) in California cotton: Is nitrogen a key factor? **Environmental Entomology**, Lanham, v. 30, p. 501-510, 2001.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: NOVAIS, R. F et al. (Orgs.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 1, p. 249-290.

COLWELL, R. N. Manual of remote sensing. **American Society of Photogrammetry**, Falls Church, v. 2, p. 138-336, 1983.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Levantamento da safra 2010/11. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2010.

COPETTI, E. Taxa variável em semeadoras. Disponível em: <<http://inovacaoagricola.blogspot.com/2009/09/taxa-variavel-em-semeadoras.html>>. Acesso em: 20 maio de 2010.

CORP, L. A. et al. Advances in fluorescence sensing systems for the remote assessment of nitrogen supply in field corn. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2000, Honolulu. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2000. v. 1, p. 351-353.

DALLMEYER, A. U.; SCHLOSSER, J. F. Mecanización para la agricultura de precisión. In: BLU, R. O.; MOLINA, L. F. (Orgs.). **Agricultura de precisión: introducción al manejo sitio-específico**. Chillán: INIA, 1999.

DELLAMEA, R. B. C. **Eficiência da adubação a taxa variável em áreas manejadas com agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

DINKINS, C. P.; JONES, C. **Soil sampling strategies**. Disponível em: <<http://msuextension.org/publications/agandnaturalresources/mt200803AG.pdf>>. 2008. Acesso em: 23 dez. 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 374 p.

- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1988. p. 400-405.
- ERNANI, P. R. et al. Decréscimo da retenção de P pelo aumento do pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p.159-162, 1996.
- ESPIRONELLO, A. et al. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van et al. (Orgs.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. p. 237-239. (Boletim, 100).
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. New York: Marcel Dekker, 1991. 476 p.
- FIEZ, T. E.; MILLER, B. C.; PAN, W. L. Assessment of spatially variable nitrogen fertilizer management in winter wheat. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 7, n.1, p. 86-93, may, 1994.
- FISCHER, R. A.; HOWE, G. N.; IBRAHIM, Z. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer: I - Grain yield and protein content. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 33, p. 37-56, 1993.
- FLUORESCENCE and polyphenols. Force-A. Disponível em <<http://www.force-a.eu/an/fluorescence.html>>. Acesso em: 20 nov. 2010.
- FOCHT, D.; ROLOFF, G.; SCHIEBELBEIN, L. M. Benefícios agronômicos e ambientais e monetários do uso da agricultura de precisão em diferentes cenários brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, Piracicaba, 2004. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 1 CD-ROM.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o Índice de Vegetação Global e Condições Hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 8, 1399-1405, 1998.
- FONTOURA, S. M. V. Uréia apresenta melhor custo benefício. **Revista do Produtor Rural**, Guarapuava, n. 13, maio-jun, 2009.
- FRAISSE, C. Agricultura de Precisão: a tecnologia de GIS/GPS chega às fazendas. **Revista Fator GIS**, Curitiba, n. 21, p. 28-33, 1998.
- FRASSON, F. R. **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

FREEMAN, K. W. et al. Late-season prediction of wheat grain yield and grain protein. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 1837-1852, 2003.

FRYE, I. A. A.; KAIRUZ, I. A. G. Manejo de suelos y uso de fertilizantes. In: FEDERACIÓN NACIONAL DE ALGODONEROS. **Bases técnicas para el cultivo del algodón en Colombia**. Bogotá: Guadalupe, 1990. p. 113-202.

GASTAL, G.; LEMAIRE G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal Experimental Botany, Inorganic Nitrogen Assimilation**, Oxford, v. 53, p. 789-799, 2002.

GIOTTO, E. **Manual de agricultura de precisão - CAMPEIRO 6.0**. Santa Maria: UFSM, 2006.

GOERING, C. E.; HANS, S. A field information system for SSCM. In: INTERNATIONAL OFFHIGHWAY & POWERPLANT CONGRESS & EXPOSITION, 1993, Milwaukee. **Proceedings...** Warrendale: SAE, 1993. (SAE Technical Paper Series n. 932422).

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação**. 1997. 118 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 169-177, 2005.

GUNTHER, K. P.; DAHN, H. G.; LUDEKER, W. Remote sensing vegetation status by laser-induced fluorescence. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 47, p. 10-17, 1994.

HAMMOND, M. W. Comparison of phosphorus and potassium utilization with conventional and variable fertility management. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 78, n. 4. p. 22-30, 1994.

HUETE, A. R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1996.

HUTMACHER, R. B. et al. Response of recent Acala cotton cultivars to variable nitrogen rates in the San Joaquin valley of California. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 48-62, 2004.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D. G. Nitrogen uptake across site specific management zones in irrigated maize production systems, **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 169-76, 2005.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Preços médios pagos fertilizantes. Disponível em: <[http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea/Precos\\_Medios.aspx?cod\\_sis=5](http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea/Precos_Medios.aspx?cod_sis=5)>. Acesso em: 01 dez. 2009.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**: introduction to applied geostatistics. Oxford: University Press, 1989. 561 p.

KHALILIAN, A.; HENDERSON, W.; HALLMAN, R. Site-specific application of plant growth regulators in cotton. **Beltwide Cotton Conferences**, Louisiana, 2007.

KIM, Y.; EVANS, R. G.; WADDELL, J. **Evaluation of in-field optical sensor for nitrogen assessment of barley in two irrigation systems**. Saint Joseph: ASAE, 2005. p. 22-25. (ASAE Paper, PNW05-1004).

KITCHEN, N. R. et al. Groundbased canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, p.71-84, 2010.

KLAMT, E.; REEUWIJK, L. P. V. Evaluation of morphological, physical and chemical characteristics of ferral soils and related soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 3, p. 573-587, 2000.

KLUTHCOUSKI, J. et al. **Manejo antecipado do nitrogênio nas principais culturas anuais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 64 p.

KOLB, C. A.; PFUNDEL, E. E. Origins of non-linear and dissimilar relationships between epidermal UV absorbance and UV absorbance of extracted phenolics in leaves of grapevine and barley. **Plant, Cell and Environment**, Malden, v. 25, p. 580-590, 2005.

KOLB, C. A. et al. UV screening by phenolics in berries of grapevine. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, p. 1177-1186, 2003.

LEMAIRE, G. **Diagnosis of the nitrogen status in crops**. New York: Springer, 1997. 239 p.

LICHTENTHALER, H. K.; RINDERLE, U. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. **Critical Reviews of Analytical Chemistry**, London, v. 19, p. 29-85, 1988.

LICHTENTHALER, H. K.; HAK, R.; RINDERLE, U. The chlorophyll fluorescence ratio F690/F730 in leaves of different chlorophyll content. **Photosynthesis Research**, Amsterdam, v. 25, p. 295-298, 1990.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. de. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 12, p. 2311-2320. 1999.

LIMBRUNNER, B.; MAIDL, F. X. Non-contact measurement of the actual nitrogen status of winter wheat canopies by laserinduced chlorophyll fluorescence. In: EUROPEAN

CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 6., 2007, Skiathos. **Proceedings...** Skiathos: Academic Publishers, 2007. p. 7.

LINK, A.; REUSCH, S. Implementation of site-specific nitrogen application: status and development of the YARA N-Sensor. In: NORSK JERNBANEFORBUND SEMINAR 390, PRECISION TECHNOLOGY IN CROP PRODUCTION IMPLEMENTATION AND BENEFITS, 2006. Lillehammer. **Proceedings...** Lillehammer: Nordic Association of Agricultural Scientists, 2006. p. 37-41.

LINSLEY, C. M.; BAUER, F. C. **Test your soil for acidity**. Illinois: College of Agriculture and Agricultural Experiment Station, 1929. 16 p. (Circular, 346).

LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região Centro-oeste. In: OLIVEIRA, A. J.; LIURENÇO, S.; GOEDERT, W. J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa-DID, 1982. 209 p. (Documentos, 21).

LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. São Paulo: POTAFÓS, 1989. 155 p.

MACBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing function for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, p. 617-639, 1986.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 1980. 215 p.

MARQUES JÚNIOR, J. et al. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, João Pessoa, v. 8, n. 1, p. 143-152, 2008.

MCINTYRE, G. A. Soil sampling for soil testing. **Journal Australian Institute Agriculture Science**, Melbourne, v. 18, p. 309-318. 1967.

MENEGATTI, L. A. A. et al. Benefícios econômicos e agronômicos da adoção de agricultura de precisão em usinas de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, São Pedro, 2006. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2006. 1 CD-ROM.

MILLER, R. O.; KOTUBY-AMACHER, J. **Extractable nitrate, ortho-phosphate, and chloride of botanical materials**. Western States Agricultural Laboratory, 1994. p. 47-48. Não publicado.

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

MINOLTA CAMERA. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka: Minolta, Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22 p.

- MIURA, T. et al. Vegetation detection through smoke-filled AVIRIS images: an assessment using MODIS band passes. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 103, n. D24, p. 32001-32011, 1998.
- MOGES, S. M. et al. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 1431- 1441, 2004.
- MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte I: O que é estado-da-arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 97-107, maio/ago. 1997.
- MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: O Autor, 2001. 83 p.
- MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 83-92, 2002.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 320 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.
- NICHOLS, J. D. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern Great Plains. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1382-1384. 1984.
- NOVO, E. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1992. 388 p.
- NTECH INDUSTRIES. Model 500 Series GreenSeeker® Sensor. NTech Industries, Inc., Ukiah, CA. Disponível em: <<http://www.ntechindustries.com>>. Acesso em: 12 jun. 2010.
- OLIVEIRA, L. F. **Reflectance sensors to predict mid-season nitrogen need of cotton**. 2008. 87 f. Thesis (Master)-University of Missouri, Columbia, 2008.
- ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana de açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (Orgs.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ/USP, 1993. p. 133-146.
- ORLANDO FILHO, J. O. et al. Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 13-17, 1996.
- ORTEGA, R. A. **Spatial variability of soil properties and dryland crop yields over "typical" landforms of Eastern Colorado**. 1997. 170 f. Thesis (PhD in Agronomy)-Colorado State University, Fort Collins, 1997.

- PELTONEN, J.; VIRTANEN A.; HAGGREN, E. Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively-managed small-grain cereals. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Malden, v. 174, p. 309-318, 1995.
- PENNINGTON, D.; TUCKER, T. C. **The cotton petiole: a nitrogen fertilization guide**. Tucson: University of Arizona, 1984. (Bulletin, 8373).
- POVH, F. P. **Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- RAIJ, B. V. et al. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170 p.
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.
- RAMBO, L. et al. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1279-1287, 2004.
- RAMIREZ, M. B. **Monitoring nitrogen levels in the cotton canopy using real-time active-illumination spectral sensing**. 2010. 126 f. Thesis (Master)-University of Tennessee, Knoxville, 2010.
- RAUN, W. R. et al. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 131-138, 2001.
- RAUN, W. R. et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 815-820, 2002.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 29-48, jul./dez. 2003.
- REUSCH, S.; LINK, A.; LAMMEL, J. Tractor-mounted multispectral scanner for remote field investigation. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER PRECISION RESOURCES MANAGEMENT, 6., 2002, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA, 2002. p. 1385-1393.
- RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de variáveis do solo**. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Plantio da cana-de-açúcar. Agência de Informação Embrapa - Cana-de-açúcar “*Saccharum officinarum* L.” Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar.html>>. Acesso em: 15 jan. 2010.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

SAWYER, J. E. Concepts of variable-rate technology considerations for fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 7, p. 195-201, 1994.

SCHÄCHTL J. et al. Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies. **Precision Agriculture**, Dodrecht, v. 6, p. 143-156, 2005.

SCHEPERS, J. S.; SHANAHAN, J. F. Variable-rate N management. **Fluid Journal**, Bethlehem, v. 13, n. 3, p. 20-23, 2005.

SCHLEMMER, M. R. et al. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p.106-112, 2005.

SCHRÖDER, J. J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, p. 151-164, 2000.

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of spatially-variable crop control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 33, p. 1-34, 1992.

SCHUERGER, A. C. et al. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 84, p. 572-588, 2003.

SCHWAB, G. J.; MULLINS, G. L; BURMESTER, C. H. Growth and uptake by cotton roots under field conditions. **Communications in Soil Science And Plant Analysis**, Philadelphia, v. 31, n. 1/2, p. 149-164, 2000.

SEARCY, S.W. Engineering systems for site-specific management: opportunities and limitations. In: **Site specific management for agricultural systems**. Madison: ASA, 1995. p. 603-612

SHANAHAN, J. F. et al. Procedures for using active sensors to direct in-season n application on corn. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 9., 2008, Denver. **Proceedings...** Norcross: International Plant Nutrition Institute, 2008, p. 344.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE FRETES. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://sifreca.esalq.usp.br/sifreca/pt/fretes/rodoviaros/index.php>>. Acesso em: 15 dez. 2009.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SLOSSER, J. et al. Suggestions for management of cotton aphid in West Texas. Agricultural Communications. Texas University System. 1999. Disponível em : <[www.tamu.edu/extension/bulletins/aphweb99.html](http://www.tamu.edu/extension/bulletins/aphweb99.html)>. Acesso em : 8 abr. 2010.

SOLARI, F. et al. An active sensor algorithm for corn N applications based on a chlorophyll meter sufficiency index framework. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, p. 1090-1098, 2008.

SOLIE, J. B. et al. Real-time sensing and N fertilization with a field scale GreenSeeker applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2002, Minneapolis. Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: USDA, 2002. Disponível em: <[http://nue.okstate.edu/Papers/Minnesota\\_2002\\_Solie.htm](http://nue.okstate.edu/Papers/Minnesota_2002_Solie.htm)>. Acesso em: 10 nov. 2009.

SOUSA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 367-372, 1997.

STATSOFT Inc. **Statistica for Windows** (computer program manual). Tulsa: Statsoft Inc. 2001.

STAUT, L. A.; KURIHARA, C. H. Calagem e adubação. In: EMBRAPA. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. 19 p.

STEFFEN, C. A. et al. Sensoriamento remoto: princípios físicos; sensores e produtos e sistema Landsat. São José dos Campos: INPE, 1981. 72 p.

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

STONE, M. L. et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 39, n. 5, p. 1623-1631, 1996.

STRAUSS, C. et al. The ISSO 11783 standard and its use in precision agriculture equipment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 4., Minnesota, 1998. **Proceedings...** Minnesota: ASA, 1998. v. 2, p. 1253-1261.

SUBHASH, N.; MOHAHAN, C. N. Laser-induced red chlorophyll fluorescence signatures as nutrient stress indicators in rice plants. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 47, p. 45-50, 1994.

SUGUITANI, C. **Fenologia da cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) sob o efeito do fósforo**. 2001. 79 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SUI, R. et al. Multi-spectral sensor for detection of nitrogen status in cotton. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v. 21, n. 2, p. 167-172, 2005.

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

TAYLOR, S. L. et al. Use of spectral radiance for correcting nitrogen deficiencies and estimating soil test variability in an established Bermuda grass pasture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 11, p. 2287-2302, 1998.

THAI, C. N. et al. **Visible & NIR imaging of bush beans grown under different nitrogen treatments**. Saint Joseph: ASAE, 1998. 10 p. (Paper, 98- 3074).

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.

TUCKER, C. J. et al. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 11, p. 171-189, 1981.

TUMBO, S. D.; WAGNER, D. G.; HEINEMANN, P. H. Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 45, n. 3, p. 815-823, 2002.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Economic Research Service. Prices of fertilizers and products. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov>>. Acesso em: 13 dez. 2010.

VIANA, J. H. M. **Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de latossolos visando o mapeamento de áreas produtivas**. 2005. 194 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

VIEIRA, I. M. S. **Efeito do potássio sobre a atividade de invertases, teores de açúcares e compostos nitrogenados em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. Var. NA56-79) cultivada em solução nutritiva**. 1983. 97 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

VIEIRA, S. R. **Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1995. 61 p.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 56, p. 181-190, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BOREM, A. et al. **Agricultura de Precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 93-108.

WAHEED, T. et al. Measuring performance in precision agriculture: CART – a decision tree approach. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, n. 1-2, p. 173-185, 2006.

WANG, B. H.; JIN, L.; WANG, B. Improvement of soil nutrient management via information technology. **Better Crops**, Norcross, v. 90, n. 3, p. 30-32, 2006.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.

WOOD, C. W.; REEVES, D. W.; HIMELRICK, D. G. Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status and crop yield: a review. **Proceedings Agronomy Society**, New Zealand, v. 23, p. 1-9, 1993.

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

YOUNAN, N. H.; KING, R. L. Classification of hyperspectral data: a comparative study. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p. 41-53, 1999.

ZEBARTH, B. J. et al. Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the “N sensor.” **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 627, p. 267-273, 2003.

ZHANG, Y. P.; TREMBLAY, N. Evaluation of the Multiplex® fluorescence sensor for the assessment of corn nitrogen status. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. **Proceedings...** Denver: Colorado State University, 2010.

ZHAO, D. et al. Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field-grown cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 89-98, 2005.

ZILLMAN, E. et al. Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 682-690, 2006.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.