

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

**Diagnósticos para o gerenciamento localizado da cultura do algodoeiro**

**Anamari Viegas de Araujo Motomiya**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Agronomia. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba**

**2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Anamari Viegas de Araujo Motomiya**  
**Engenheira Agrônoma**

**Diagnósticos para o gerenciamento localizado da cultura do algodoeiro**

**Orientador:**

**Prof. Dr. JOSÉ PAULO MOLIN**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Agronomia. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba**

**2007**

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

Motomiya, Anamari Viegas de Araújo  
Diagnósticos para o gerenciamento localizado da cultura do algodoeiro /  
Anamari Viegas de Araújo Motomiya. - - Piracicaba, 2007.  
76 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.  
Bibliografia.

1. Adubação 2. Agricultura de precisão 3. Algodão 4. Geoestatística  
5. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 633.51

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

*Ao Wagner e à Ana Luísa,*

***DEDICO***

*“Senhor, concede-nos a paz, porque todas as nossas obras Tu as fazes por nós”*

*Isaías 26:12*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul e À Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade de capacitação que me foi dispensada.

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. José Paulo Molin, pela paciência, orientação, sugestões e crédito neste trabalho.

Aos professores da USP/ESALQ que muito contribuíram para a minha formação, em especial, Prof. Dr. Ederaldo José Chiavegato, Prof. Dr. Carlos Alberto Vetorazzi, Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias.

À Luciane Aparecida Lopes, por estar sempre pronta e disposta a auxiliar com eficiência e competência.

Aos colegas de pós-graduação, em especial, Flávia Frasson, Vanessa Pucci Lima, Carlos Eduardo Ballaminut, Fabrício Povh, José Vítor Salvi, Gustavo Faulin, Eloíse Viana, Priscylla Ferraz, Vitória Cebim, Geraldo Cebim, e aos estagiários do Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão (GMAP) e do Grupo de Estudos em Algodão (GEALG).

Aos acadêmicos da UEMS Alexander Lira e José Rodolfo Oliveira, pela dedicação nos trabalhos de campo.

Ao Sr. Vinícius Terin, pela colaboração para realização do primeiro experimento.

À Equipe da E.E.I. “A Cigarrinha”, em especial: Inês Faleiros, Tatiane Franco, Adriana Sanches, Viviane Claudino, Priscila Capeli e Jamile Alves, pelo amor e dedicação à minha filha.

Ao meu esposo, Wagner Motomiya, pelo apoio em todas as fases deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Agricultura de Precisão.....	10
2.2 Estudo da Variabilidade Espacial.....	12
2.3 Sensoriamento Remoto.....	17
2.4 A Cultura do Algodoeiro.....	24
Referências .....	27
3 VARIABILIDADE ESPACIAL E RELAÇÕES ENTRE ESTADO NUTRICIONAL, ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO.....	35
Resumo.....	35
Abstract.....	35
3.1 Introdução.....	36
3.2 Desenvolvimento.....	37
3.2.1 Material e Métodos.....	37
3.2.2 Resultados e Discussão.....	40
3.3 Conclusões.....	49
Referências.....	49
4 UTILIZAÇÃO DE SENSOR ÓPTICO ATIVO PARA DETECTAR DEFICIÊNCIA FOLIAR DE NITROGÊNIO EM ALGODOEIRO.....	53
Resumo.....	53
Abstract.....	53
4.1 Introdução.....	54
4.2 Desenvolvimento.....	55
4.2.1 Material e Métodos.....	55
4.2.2 Resultados.....	57
4.2.3 Discussão.....	66
4.3 Conclusões.....	69
Referências.....	69
ANEXOS.....	72

## RESUMO

### Diagnósticos para o gerenciamento localizado da cultura do algodoeiro

Conhecer a resposta da cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L var. latifolium Hutch) à variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo e seu comportamento espectral mediante doses variadas de fertilizantes pode ajudar a estabelecer estratégias de manejo do solo e da cultura, com melhor uso de corretivos e fertilizantes. Dentro deste contexto, este trabalho foi desenvolvido para: a) estudar a variabilidade espacial da fertilidade do solo, estado nutricional, população de plantas, número de estruturas reprodutivas e produtividade do algodoeiro em uma lavoura comercial; b) verificar as relações de causa e efeitos entre as variáveis estudadas; c) avaliar o efeito da variação de doses de nitrogênio na detecção do teor de nitrogênio foliar do algodoeiro utilizando propriedades de reflectância através de um sensor óptico ativo. Para isso, foram conduzidos dois experimentos diferenciados. O primeiro foi realizado numa lavoura comercial, localizada em Chapadão do Céu, GO. Os dados foram coletados numa área de 90 hectares, dividida numa malha com espaçamento regular de 100 m entre pontos, formando um retângulo com 10 colunas e 11 linhas. Para detectar a variação na pequena escala, foram feitas amostragens mais intensas com espaçamento de 33 m, formando 5 “ilhas”, constituindo um total de 170 amostras. Os dados foram submetidos às análises estatísticas descritivas, geoestatística, interpolação através de krigagem ordinária e regressão pelo método “stepwise”. A variabilidade expressa pelo coeficiente de variação foi baixa a moderada para todas as variáveis analisadas, com exceção de maçãs retidas e P no solo. Os resultados da análise geoestatística indicaram que os fatores de produção da cultura do algodoeiro apresentam, em sua maioria, dependência espacial e esta deve ser considerada quando da definição de esquemas de amostragem e práticas de manejo do solo e da cultura. A produtividade do algodoeiro foi significativamente afetada por N, P, Ca e Mg no tecido foliar e fração areia e argila do solo. O segundo experimento foi realizado na área experimental da USP/ESALQ, em Piracicaba, SP. O delineamento experimental foi o aleatorizado em blocos, com cinco tratamentos (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N) e quatro repetições. Os dados do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e da razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP) foram coletados no período de 23 a 92 dias após a emergência (DAE) totalizando nove datas de coleta. Foram coletados também dados referentes ao índice de clorofila, índice de área foliar (IAF) e altura de plantas. Os valores do NDVI apresentaram uma tendência crescente ao longo do período das leituras, enquanto a relação V/IVP teve comportamento inverso, e a partir de 45 DAE, foram afetados significativamente pelas doses de N aplicadas. Relações significativas foram observadas entre os valores do NDVI e índice de clorofila e IAF. Aos 92 DAE o NDVI apresentou relação linear positiva e altamente significativa com o teor foliar de N. Os resultados obtidos indicam que as técnicas de geoestatística e sensoriamento remoto podem auxiliar na tomada de decisões sobre as práticas de calagem e adubação em taxa variada na cultura do algodoeiro.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Geoestatística; Adubação; Sensoriamento remoto; NDVI

## ABSTRACT

### Diagnosis for site specific management of cotton

Know the cotton answer (*Gossypium hirsutum* L. var. *latifolium* Hutch) to the spatial variability of soil physical and chemical attributes and its spectral behavior by means of varied rates of nutrients can help to establish soil and crop management strategies, with better use of lime and fertilizers. This work was developed to: a) study the spatial variability of soil fertility, nutritional state, plants population, reproductive structures number and cotton yield in a commercial field; b) to study the relationships among those variables; c) to evaluate the effect of the variation of nitrogen levels on the detection of its content on cotton leaves using reflectance properties by an active optical sensor. Two differentiated experiments were conducted; the first one was located in a commercial field in Chapadão do Céu, GO. Data were collected in a area of 90 hectares, divided in a regular grid of 100 m with 10 columns and 11 lines. In order to detect the variation in the small scale, more intense samplings with spacing of 33 m were conducted forming 5 islands, constituting a total of 170 samples. The data were submitted to the descriptive statistical analysis, geostatistic, interpolation through ordinary kriging, and stepwise regression analysis. The variability expressed by variation coefficient were low to moderated for all analyzed variables, except for healthy bolls and soil P. Geostatistics analysis indicated that the crop cotton factors of production present, in its majority, spatial dependence and this should be considered when of the definition of sampling schemes and soil and crop management practices. Cotton yield was affected significantly by N, P, Ca and Mg in the leaves, as well as sand and clay fraction of the soil. The second experiment was accomplished in an experimental area at USP/ESALQ, in Piracicaba, SP. The experiment was conducted as a randomized block design and treatments consisted on five levels of nitrogen fertilization (0, 50, 100, 150 and 200 kg of N ha<sup>-1</sup>) with four replications. The readings of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI and the ratio Red/Near infrared (RED/NIR) were collected between 23 to 92 days after the emergency (DAE), with the total of 9 visits. Data referred to the chlorophyll index, leaf area index (LAI) and plants height were also collected. The values of NDVI presented a growing tendency along the period, while RED/NIR had an inverse behavior, being significantly affected by the rates of applied N, starting from 45 DAE. At 92 DAE, NDVI presented a positive linear relationship with leaves N content. Significant relationships were observed between the values of NDVI and chlorophyll index and LAI. The results obtained indicate that geostatistic techniques and remote sensing can help on management decisions for variable rate application of lime and fertilizers in cotton.

Keywords: Precision agriculture; Geostatistic; Fertilizing; Remote sensing; NDVI

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar de tradicionalmente os produtores fazerem aplicação de insumos de maneira uniforme, as lavouras normalmente apresentam áreas com diferentes potenciais de produtividade. A agricultura de precisão é uma estratégia de manejo do solo e das culturas que busca fazer o melhor uso de insumos, tais como fertilizantes e defensivos, considerando a heterogeneidade das lavouras. Engloba a coleta e análise de dados de diferentes locais dentro de uma lavoura, a fim de permitir o manejo variável nos diversos locais, de forma a se aplicar os insumos em doses e local adequados. As tecnologias utilizadas incluem, dentre outros, sistema de posicionamento global por satélite, utilizado para localizar a posição dentro da lavoura; sistemas de informação geográfica que incluem equipamentos e programas computacionais para compilar, armazenar, analisar e exibir dados espacializados e são projetados para auxiliar no planejamento e tomada de decisões; tecnologia de aplicação em taxa variada; sensoriamento remoto que envolve a detecção da energia refletida ou emitida por um objeto através de um sensor que não entra em contato direto com o objeto e sensoriamento direto, especialmente para o monitoramento de características de solo. Em suma, a agricultura de precisão combina diferentes tecnologias para proporcionar a informação necessária para o manejo regionalizado do solo e da cultura.

Atrelado à economia ou uso mais eficiente de insumos, a agricultura de precisão apresenta também importância para a preservação ambiental. A utilização racional de insumos vai além do propósito de obter lucro ou evitar prejuízos, haja vista que possibilita um controle da quantidade de insumos que estão sendo lançados ao meio ambiente. A aplicação de doses mais precisas de fertilizantes, por exemplo, permite que a planta tenha à sua disposição a quantidade que ela realmente necessita, sem excessos ou faltas, e que esta possa, então, expressar ao máximo seu potencial produtivo.

Dentre as espécies cultivadas no cerrado brasileiro, o algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. var *latifolium* Hutch) merece destaque tanto pelo volume e valor da produção quanto pela elevada utilização de insumos como corretivos e fertilizantes, herbicidas, inseticidas, fungicidas e reguladores de crescimento. O sistema de produção adotado no cerrado é considerado de alta tecnologia e a mecanização se faz presente da semeadura à colheita. Segundo Carvalho e Chiavegato (1999), as mudanças no sistema de produção do algodoeiro devem ser

acompanhadas pelo constante monitoramento, adoção e adequação de tecnologias apropriadas, melhorando a qualidade das operações e propiciando maior rentabilidade.

O mapeamento da fertilidade do solo e produtividade do algodoeiro podem auxiliar na definição de unidades de gerenciamento do solo e da cultura permitindo a tomada de decisões como a prática de calagem e aplicação de adubos potássicos e fosfatados em taxa variada. Para o manejo do nitrogênio, entretanto, as técnicas de sensoriamento remoto têm apresentado resultados mais promissores do que a coleta de amostras pontuais de indicadores do solo, por apresentarem menor custo, bem como menor tempo entre amostragens e resultados.

Este trabalho teve por objetivos: a) estudar a variabilidade espacial da fertilidade do solo, estado nutricional, população de plantas, número de estruturas reprodutivas e produtividade do algodoeiro em uma lavoura comercial; b) verificar as relações de causa e efeito entre as variáveis estudadas; c) avaliar o efeito da variação de doses de nitrogênio na detecção do teor de nitrogênio foliar do algodoeiro utilizando propriedades de reflectância através de um sensor óptico ativo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Agricultura de precisão**

Para Stewart, Boydell e Mcbratney (2005) a mecanização da agricultura tem levado os produtores de algodão a implementar práticas de manejo extensivas a toda a lavoura, abandonando a idéia de administrar áreas menores, com o objetivo de aproveitar ao máximo as vantagens dos modernos equipamentos e maquinários e realizar as atividades com a maior velocidade possível. Tratando áreas maiores, menos tempo é gasto no campo e é possível cultivar maiores áreas com menos recursos. Em essência, o aumento da produção tem maior importância do que qualquer benefício de administração intensiva de áreas menores. Molin (2005) acrescentou que a agricultura hoje praticada tem decisões, recomendações e intervenções simplificadas, válidas para grandes extensões de áreas a partir de diagnósticos médios. Conforme as propriedades cresceram de tamanho, o detalhamento foi sendo relegado em favor da mecanização e utilização intensiva da terra. Tem-se então que a agricultura hoje praticada é embasada em valores médios, com excessiva simplificação, especialmente na escala em que os diagnósticos, recomendações e intervenções são conduzidos.

A aplicação uniforme de insumos, tais como fertilizantes e agroquímicos, sobre toda a lavoura cultivada pode resultar em excesso de aplicação sobre algumas áreas da lavoura e falta em outras, devido a variações nas características que afetam a eficácia e necessidades de insumos (BHATTI; MULLA; FRAZIER, 1991; CHEN et al., 2004). Isto provoca diminuição da eficiência da fertilização bem como pode causar problemas de poluição de lençóis freáticos devido à lixiviação do fertilizante não utilizado pela cultura.

Avanços tecnológicos mostram que é possível alocar os insumos com base nas necessidades de cada célula do campo. Esta técnica tem sido denominada de agricultura de precisão, variabilidade espacial, aplicação localizada de insumos, manejo de culturas ponto a ponto, entre outras denominações (BALASTREIRE, 1994; SCHUELLER, 1992 apud MOLIN, 1997). A agricultura de precisão está alicerçada em um conjunto de recursos que permitem que se faça em áreas extensas o tratamento dos detalhes considerando as diferenças existentes dentro de uma lavoura. A idéia fundamental é de que o agricultor possa identificar as regiões de altas e de baixas produtividades dos talhões e possa administrar essas diferenças com os mesmos critérios

agronômicos já dominados, porém com grau de detalhamento maior, portanto em escala compatível (MOLIN, 2005).

A agricultura de precisão está baseada no conhecimento da variabilidade espacial e temporal de uma lavoura como base para administrar as operações de manejo (GOEL et al., 2003) de forma que os insumos sejam ajustados localmente, em nível adequado. A agricultura de precisão ou o manejo em locais específicos, freqüentemente resulta em redução de custos e alta produtividade das culturas, enquanto a lixiviação de agroquímicos é reduzida (BOOLTINK; VERHAGEN, 1997; GOEL et al., 2003).

Sem variabilidade, o conceito de agricultura de precisão tem pequeno significado e nunca teria sido desenvolvido (MULLA; SCHEPERS, 1997). Segundo Molin (1997), a pesquisa agronômica vem explorando a resposta das culturas como função da variabilidade espacial das características físicas e químicas do solo. Pierce e Nowak (1999) esclareceram que não há cientificamente um rol de quais propriedades ou processos que necessitam ser mensurados para se formar um banco de dados. Por essa razão, estes autores salientaram a necessidade de se descrever claramente as propriedades e processos que afetam significativamente o desenvolvimento vegetal de acordo com o seu ambiente biofísico e o sistema de produção.

A coleta de dados georreferenciados para a análise da variabilidade espacial foi facilitada com o surgimento de sistemas de posicionamento global por satélite, os quais permitem associar a informação de latitude e longitude aos dados obtidos de um local específico do campo (MOLIN, 2001). Também são usados para guiar a navegação pelo campo, provendo ao produtor a possibilidade de visitar um determinado local dentro da lavoura. Inicialmente desenvolvida para fins militares, a tecnologia de navegação por satélite tornou-se interessante para aplicações na agricultura após a liberação para uso civil, tornando viável a aplicação dos conceitos de agricultura de precisão. Atualmente existem dois sistemas de navegação: o NAVSTAR GPS (Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System) desenvolvido e mantido pelos Estados Unidos, e o GLONASS (Globaluaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), sistema de navegação russo (LECHNER; BAUMANN, 2000). O GPS é o sistema de navegação mais moderno e de maior precisão e confiabilidade utilizado no mundo. Foi originalmente projetado para uso militar, mas em 1993 foi liberado para uso civil. (MOLIN, 2001).

Um terceiro sistema está sendo implantado para fins unicamente civis, o sistema GALILEO, o qual deverá estar em operação a partir de 2012, aberto à cooperação internacional e explorado em regime comercial. O GALILEO será composto por uma constelação de 30 satélites em órbita a uma altitude de cerca de 24000 quilômetros. Além disso, graças à compatibilidade e à interoperabilidade dos dois sistemas, GALILEO e GPS, os usuários de todo o mundo terão acesso mais facilmente aos sinais emitidos pelos satélites de navegação com maior qualidade. O GALILEO oferecerá, além disso, uma precisão superior à do GPS (COMUNIDADES EUROPÉIAS, 2003).

## **2.2 Estudo da variabilidade espacial**

O manejo regionalizado do solo e das culturas é viável se ocorrem manchas na lavoura (MOLIN, 2001), ou seja, se há suficiente variabilidade que permita a alocação variável de insumos e práticas agrícolas. Para McLaughlin e Lapen (2007) e Pierce e Nowak (1999), o sucesso da agricultura de precisão requer o delineamento de zonas de manejo apropriadas, definidas sobre diferentes propriedades do solo medidas espacialmente, tais como topografia, textura, condutividade e teor de nitrogênio no solo.

O solo é produto da interação de diversos fatores de formação e, conforme salientaram Burgess e Webster (1980), a medida de uma propriedade do solo em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, mesmo em uma área considerada homogênea. Estas propriedades variam continuamente na superfície e, como tal, constituem uma população infinita em uma determinada área. Para se conhecer o comportamento das características desta população e descrevê-la, torna-se necessário uma abordagem estatística, onde se procura inferir, a partir de valores amostrais, sobre os parâmetros que caracterizam a sua distribuição de frequência.

Tradicionalmente, a descrição da variabilidade das propriedades do solo tem sido descrita pelos métodos da estatística clássica (BECKETT; WEBSTER, 1971), a qual assume que a variação das propriedades do solo dentro de unidades amostrais é não-correlacionada e que a média amostral é o melhor estimador de uma propriedade em qualquer local dentro da unidade amostral.

O coeficiente de variação (CV) é o parâmetro mais utilizado pela estatística clássica para descrever a variabilidade de um conjunto de dados. Em geral, propriedades do solo com altos

valores de CV requerem amostragens mais intensivas em uma dada área do que as propriedades com baixo CV (WILDING, 1985). Wilding e Drees (1983) propuseram uma classificação do CV das diversas propriedades do solo. Segundo esta classificação, as propriedades mais estáveis, como pH e densidade apresentam CV baixo ( $CV < 15\%$ ); as propriedades moderadamente variáveis, como argila e areia apresentam CV moderado ( $15\% < CV < 35\%$ ); propriedades muito variáveis, como Ca, Mg e K apresentam CV alto ( $CV > 35\%$ ).

A produção de culturas normalmente exhibe moderada variação espacial, com valores de CV variando de 8 a 29% (PIERCE; WARNCKE; EVERETT, 1995; PING; GREEN, 2000). Johnson et al. (2002) e Ward e Cox (2000), entretanto, observaram valores elevados para a produtividade de fibras de algodão.  $NO_3-N$ , matéria orgânica (MULLA, 1993) e K disponível às plantas (CORÁ et al., 2004; SALVIANO; VIEIRA; SPAROVEK, 1998) têm exibido altos valores de CV. Os valores de CV para P disponível normalmente são altos, na faixa de 40 a 80% (JOHNSON et al., 2002; SILVA et al., 2007; WARD; COX, 2000; WOLLENHAUPT; WOLKOWSKI; CLAYTON, 1994), mas podem ocorrer valores extremamente altos de CV, principalmente onde resíduos animais foram aplicados localizadamente em uma parte do campo (WOLLENHAUPT; WOLKOWSKI; CLAYTON, 1994). Corá e Beraldo (2006) observaram, em três talhões de cana-de-açúcar, um aumento na amplitude dos teores de P no solo após a aplicação de fosfato em doses variadas, devido ao aumento dos valores de máximo. Apesar disto, o CV apresentou diminuição em dois dos três talhões estudados.

Hamlett, Horton e Cressie (1986) e Ribeiro Júnior (1995) esclareceram que antes de qualquer procedimento de análise estatística espacial, deve ser realizada a análise exploratória dos dados. O maior entendimento sobre o conjunto de dados em estudo, através da observação de sua distribuição de frequência, padrões espaciais e contaminações, auxiliam na decisão das hipóteses que podem ser assumidas e ajudam na escolha da análise a ser desenvolvida. A análise exploratória pode também auxiliar na decisão do tipo de estacionaridade que pode ser assumida para a realização da análise geoestatística.

A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas (LANDIM, 1998). A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Matheron, apud

Webster (1985) e Trangmar, Yost e Uehara (1985), trabalhando com mineração, reuniu resultados isolados de estatísticas espaciais em um coerente corpo de teorias, a Teoria das Variáveis Regionalizadas (TVR).

A TVR leva em conta tanto características estruturais quanto aleatórias das variáveis distribuídas espacialmente. Uma variável aleatória assume valores individuais, para os quais se espera que sigam uma lei de distribuição de probabilidade, a qual pode ser caracterizada por parâmetros, como a média e a variância da distribuição normal. Uma variável regionalizada  $z(x)$  é uma variável aleatória que tem diferentes valores de  $Z$  de acordo com sua localização dentro de uma região (JOURNAL; HUIJBREGTS, apud TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

A aplicação da TVR assume que a semivariância entre quaisquer dois locais na região de estudo depende somente da distância e direção de separação das duas locações e não sobre sua localização geográfica. Baseado nesta pressuposição, o semivariograma médio para cada vetor  $h$  (distância de separação entre amostras) pode ser estimado para um dado volume no espaço tridimensional. A semivariância em um dado vetor  $h$  é estimada como a média da diferença ao quadrado em todas as observações separadas pelo vetor  $h$ , conforme eq. (1):

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

onde  $z(x_i)$  e  $z(x_i+h)$  são os pares de valores medidos em locais afastados entre si do vetor  $h$  e  $N(h)$  são os números de pares de observações, para cada vetor  $h$ .

Os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostram o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, a variação nas diferentes direções do terreno e a continuidade da característica estudada no terreno (LANDIM, 1998). O semivariograma experimental pode tomar muitas formas, dependendo dos dados e do intervalo amostral (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Idealmente, o semivariância aumenta com a distância entre os locais amostrados, até alcançar um valor relativamente constante. O máximo é conhecido como patamar e seu valor é, a priori, a variância da variável para dados estacionários (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; VIEIRA, 2000;

WEBSTER, 1985). A distância na qual o patamar é atingido é chamada de alcance e tem considerável importância, pois marca o limite da dependência espacial. Propriedades do solo localizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição espacial aleatória e por isto são independentes entre si (VIEIRA, 2000). O alcance define também o raio máximo para o qual amostras vizinhas são usadas para interpolação por krigagem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Por definição, a semivariância na distância  $h=0$  seria também zero. Entretanto, a linha de aproximação das semivariâncias amostrais não passa pela origem. Pelo contrário, apresenta um intercepto positivo e finito na abcissa zero ( $h=0$ ). Este intercepto é conhecido como efeito pepita ( $c_0$ ) e representa a variância não explicada ou ao acaso, freqüentemente causada por erros de medições ou microvariabilidade das propriedades que não podem ser detectadas na escala de amostragem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; VIEIRA, 2000).

A relação expressa em porcentagem entre a variabilidade não explicada, denominada efeito pepita, e o patamar do semivariograma, indica o grau de dependência espacial (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Cambardella et al. (1994) classificaram o grau de dependência espacial pela relação entre efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0+C$ ). Entretanto, numa abordagem mais recente, Zimback (2001) propôs a inversão dos fatores, ou seja, que a dependência espacial seja verificada pela relação entre a variância estrutural ( $C$ ) e o patamar ( $C_0+C$ ). Neste caso, classifica-se a dependência espacial como fraca para valores  $\leq 25\%$ ; entre 25% e 75%, moderada, e  $\geq 75\%$  forte dependência.

Vieira (2000) salientou que sempre existe certo grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas ou sobre os parâmetros ajustados nos modelos do semivariograma. A análise do erro da estimativa pode ser realizada através de procedimentos de autovalidação, como o “jack-knifing”, que promove a estimativa de cada ponto observado como se ele não existisse. Este procedimento indica se os parâmetros ajustados ao modelo são realmente representativos do comportamento do conjunto de dados.

Havendo dependência espacial, os parâmetros do semivariograma são utilizados para estimar os valores em locais não amostrados (GOOVAERTS, 1997). As técnicas de interpolação comumente usadas são a ponderação do inverso da distância e a krigagem. Ambos os métodos

estimam valores em locais não amostrados baseados na medição de valores de locais vizinhos com pesos determinados para cada medição.

A krigagem usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000). Para Isaaks e Srivastava (1989) a krigagem é considerada o melhor estimador linear não tendencioso. O que torna a krigagem um ótimo interpolador é a maneira como os pesos são distribuídos, com o objetivo de estimar o melhor possível o que seria o valor medido para um determinado local dentro da área estudada.

A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem porque estabelece um limite menor para o tamanho da variância de estimação e, portanto, para a precisão da interpolação (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Quanto menor o efeito pepita do semivariograma, menor será a variância da estimação, ou, mais precisamente, quanto maior for a diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno e maior a confiança que se pode ter na estimativa (VIEIRA, 2000).

Métodos geoestatísticos e krigagem são comumente usados para gerar mapas a partir de dados pontuais. Tabor et al. (1984) e Tabor et al. (1985) usaram semivariogramas e krigagem para analisar e correlacionar a variabilidade espacial de nitrato em pecíolos de algodoeiro e solo. Johnson et al. (2002) obtiveram diferentes modelos de correlação espacial em propriedades do solo e produtividade de fibra de algodão. Eles observaram que o pH, P disponível e matéria orgânica do solo foram correlacionados com a produtividade de fibra e algumas propriedades de qualidade de fibra, tais como micronaire e porcentagem de fibras imaturas.

Iqbal et al. (2005) observaram que propriedades físicas de um solo aluvial cultivado com algodoeiro, como textura e condutividade hidráulica, apresentaram variabilidade espacial diferenciada entre horizontes e que a variância estrutural foi maior do que o efeito pepita, o que tem implicações para o manejo regionalizado, como irrigação, aplicação de adubo nitrogenado e semeadura em taxa variada. Utilizando um modelo de simulação, os autores encontraram um aumento de 322 kg ha<sup>-1</sup> de fibra se fosse aplicado um aumento global de 2,6 cm ha<sup>-1</sup> de água e uma diminuição de 35 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante nitrogenado.

Corwin et al. (2003), trabalhando em um solo alcalino, observaram que a salinidade, o teor de água disponível no solo, fração de lixiviados e o pH foram as propriedades que mais

influenciaram a produtividade do algodoeiro. Os autores ressaltaram a importância da irrigação de precisão, considerando a variabilidade espacial das propriedades do solo, como forma de controlar a lixiviação de  $\text{NO}_3^- \text{N}$ , acúmulos de sais na zona radicular e proporcionar água disponível às plantas.

Bronson et al. (2007) observaram, em duas lavouras de algodoeiro irrigadas, que a resposta da cultura para adubação com fósforo não foi consistente num estudo que comparou aplicação em taxa variável, fixa e não aplicação de fósforo. Apesar disso, o estudo revelou que em dois de três experimentos, foi aplicado menos fósforo em taxa variável do que com a recomendação em taxa fixa e que tanto a posição na paisagem quanto o tipo de solo (solo calcário e não-calcário) apresentaram um efeito na resposta à adubação fosfatada.

### **2.3 Sensoriamento remoto**

Conforme salientaram Coquil e Poilve (2001), o uso de mapas de solo e de produtividade apresenta alguns fatores limitantes, tais como investimento inicial, tempo e custos. Por esta razão, um sistema de sensoriamento remoto pode ser visto como uma importante técnica complementar ou substituta por oferecer um grande conjunto de informações da variabilidade espacial da lavoura e em tempo “quase real” durante a estação de crescimento da cultura.

O sensoriamento consiste em medir com a devida precisão as quantidades que definem a variabilidade e que normalmente dizem respeito à cultura e ao solo (MOLIN, 1997). 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 e processos de fertilização e o manejo de plantas daninhas (YOUNAN; KING, 1999). Sensores acoplados em tratores que se deslocam pela lavoura podem fazer aquisição de dados e são menos dependentes das condições climáticas do que dados orbitais ou sub-orbitais (STEVEN, 2004).

Todo o fundamento do sensoriamento remoto está na interação da energia eletromagnética com a matéria que constitui os objetos (D'ARCO et al., 2003). De acordo com Moreira (2001), a fonte principal de quase toda a energia disponível na Terra tem sua origem no Sol, de onde se propaga para o espaço como radiação eletromagnética (REM). A radiação eletromagnética é o elemento fundamental para a utilização das técnicas de sensoriamento remoto. A partir dela há

propagação de energia, partindo diretamente de uma fonte emissora ou indiretamente pela sua reflexão quando incidente em superfícies distintas. Freire e Bastos (1998) afirmaram que, para o sensoriamento remoto, a reflexão é um fenômeno importante, uma vez que normalmente é a radiação refletida pelos alvos na superfície terrestre a base das informações.

As principais faixas espectrais para o sensoriamento remoto são a do visível (Radiação Eletromagnética – REM de comprimentos de onda entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ ), a do infravermelho – IV (0,7 a 15,0  $\mu\text{m}$ ) e as microondas (maiores que 1 mm a 1 m) (STEFFEN et al., 1996).

A ciência do sensoriamento remoto envolve o uso de sensores terrestres, aéreos ou instalados em satélites para monitorar a reflexão da radiação eletromagnética de um alvo (THORP; TIAN, 2004). Segundo Moreira (2001) sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação quer seja na forma de imagem, na forma gráfica ou de tabelas.

A função dos sensores é muito similar àquela do olho humano, os quais detectam uma parte da radiação eletromagnética chamada de luz visível. Embora o olho humano possa ver um amplo número de cores (espectro visível) as quais alcançam de 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda, isto representa somente uma pequena porcentagem do espectro eletromagnético completo. De fato, o alcance da informação espectral usada no sensoriamento remoto para a agricultura é muito maior que o espectro visível. Particularmente o infravermelho próximo (IVP), o qual alcança de 0,7 a 0,85  $\mu\text{m}$ , é um bom indicador de sanidade de uma área agrícola. Geralmente, uma área com vegetação vigorosa, refletirá muito mais no IVP do que uma área de vegetação menos densa (QI et al., 1994). Com a ajuda de sensores remotos ópticos, a reflectância da radiação eletromagnética da vegetação, incluindo a região do IVP, pode ser detectada e quantificada. Então, com o processamento adicional, esta informação pode ser usada para formular uma estratégia de manejo cultural em locais específicos.

A Figura 1 apresenta a assinatura espectral de uma folha verde. Pela análise da curva espectral média da vegetação, pode-se decompô-la em três regiões: a) até 0,7  $\mu\text{m}$ , a reflectância é baixa ( $< 0,2$ ), dominando a absorção da radiação pelos pigmentos da planta (carotenóides e clorofila). É a reflectância responsável pela percepção da cor verde da vegetação; b) de 0,7  $\mu\text{m}$  a 1,3  $\mu\text{m}$ , alta reflectância da vegetação, devido à interferência da estrutura celular; c) entre 1,3  $\mu\text{m}$

e 2,5 $\mu$ m, a reflectância da vegetação é dominada pelo conteúdo de água das folhas (MOREIRA, 2001).

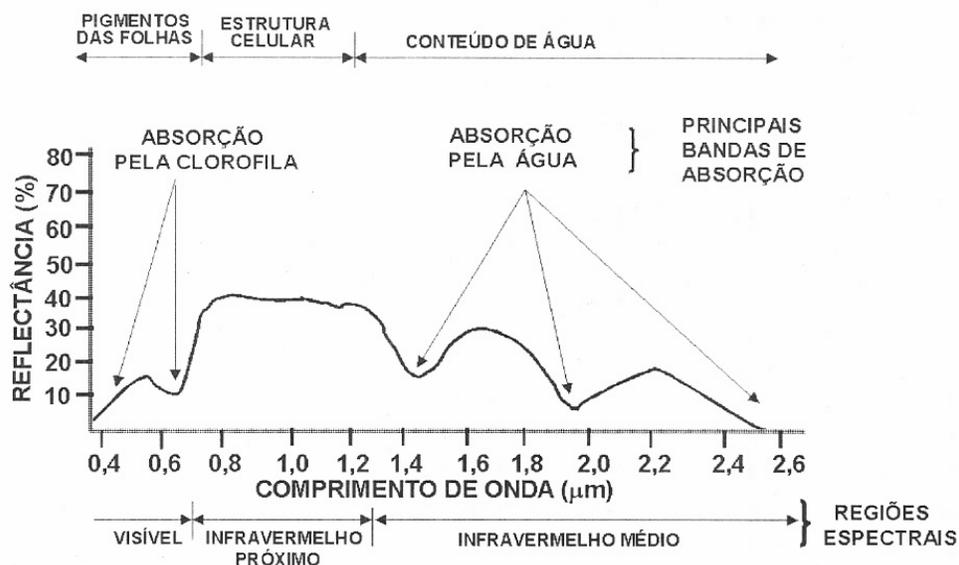


Figura 1 - Assinatura espectral de uma folha típica verde (Fonte: MOREIRA, 2001)

A reflectância espectral do dossel da vegetação é diferente da reflectância de folhas individuais devido às variações na orientação e área foliar, ângulo de iluminação, sombras, superfície subjacente, tal como solo, e a presença de múltiplas camadas de folhas (COWELL, 1974). Lillesaeter (1982) desenvolveu um modelo matemático para estimar a resposta espectral de múltiplas camadas de folhas baseado em medidas de reflectância em laboratório, de uma única folha. Wanjura e Hatfield (1986) observaram que a reflectância e transmitância de luz visível pelo dossel de plantas diminuiu com o aumento do índice de área foliar (IAF), significando que uma maior porção da luz visível foi absorvida pelo dossel. Para radiação no IVP, aumentos no IAF aumentam a reflectância do dossel da vegetação, mas relativas mudanças na absorptância e transmitância foram inconsistentes entre espécies cultivadas. Convém observar que IAF é a razão da área foliar existente em relação à superfície do solo ocupada pela planta. Mudanças nas condições atmosféricas, tais como ângulo solar e cobertura por nuvens podem introduzir significativa variabilidade na reflectância espectral do dossel da cultura.

Steven e Miller (1997) mostraram que índices espectrais derivados de dados do satélite SPOT foram úteis para calcular cerca de metade da variância na produtividade de diversas culturas. Entretanto, os autores afirmaram que, apesar dos dados de satélite proporcionarem informação estratégica para detectar a variabilidade da lavoura visando o planejamento futuro, a aquisição de dados não é eficiente para a proposição de táticas de monitoramento, onde as informações são usadas para orientar as operações de manejo de uma dada cultura.

Segundo Bach, Mauser e Schneider (2003), dados provenientes de sensores ópticos são muito utilizados para o mapeamento de parâmetros de vegetação, uma vez que sensores multiespectrais (SPOT, Landsat-TM, IKONOS) são freqüentemente usados em diversas pesquisas, mas dados hiperespectrais possibilitam maior potencial de uso. A resolução das informações é determinada pelas especificações do tipo de sensor e altura de aquisição (avião, satélite) e varia entre 2 e 30 m. Desta forma, mapas de parâmetros da vegetação (como biomassa e teor de clorofila) podem servir como uma fonte valiosa de informação para utilização em agricultura de precisão. Uma vez que a variabilidade seja mapeada, os procedimentos agrícolas podem ser planejados de acordo com esta informação.

Klotz et al. (2003) afirmaram que o crescimento da agricultura de precisão e monitoramento ambiental requer novos sistema e técnicas de aquisição de dados para obter informação detalhada do status da vegetação. Estes autores defenderam o desenvolvimento de sensores hiperespectrais de alta precisão para analisar a superfície da lavoura, uma vez que sistemas de sensoriamento remoto multiespectrais, tais como Landsat ETM, SPOT ou IKONOS, obtêm as informações de apenas poucas bandas.

Coquil e Poilve (2001) salientaram que o uso de sensoriamento remoto em agricultura de precisão requer primeiro uma melhoria nas capacidades existentes nos satélites, especialmente na sua freqüência de revisitas, para permitir uma atualização mais rápida das informações (semanalmente) durante a safra; segundo, requer também novos tipos de produtos de interesse para os usuários finais. Assim, o sensoriamento remoto poderá proporcionar uma informação em tempo quase real sobre a lavoura.

Segundo Bach, Mauser e Schneider (2003), apesar do alto potencial, a aplicação do sensoriamento remoto em agricultura de precisão ainda está numa fase inicial. Frequentemente, imagens provenientes de avião ou satélite são usadas para simples interpretação da variabilidade

dentro da lavoura. Esta interpretação depende muito do conhecimento do analista e, assim, os resultados obtidos são subjetivos.

Stewart e Mcbratney (2001) usaram dados do Landsat 7 para definir zonas potenciais de manejo baseado no tipo de solo de uma fazenda no Vale de Gwydir, na Austrália, cultivado com algodoeiro. Um levantamento detalhado identificou a existência de duas classes de solo. Os autores examinaram se havia diferenças na produtividade de algodão nos dois tipos de solo, com o propósito de usar esta informação para ajudar na aplicação de insumos a taxa variada e concluíram que podem ser delineadas unidades de gerenciamento diferenciado com base em dados multiespectrais provenientes de satélites.

Boydell e Mcbratney (2002) usaram estimativas de produtividade de algodão obtidas de sensoriamento remoto (imagens do Landsat TM), durante onze anos, para estabelecer zonas de manejo, e observaram que as lavouras apresentavam um alto grau de estabilidade temporal.

Vellidis, Tucker e Perry (2004) utilizaram fotografias aéreas para prever a produtividade de lavouras de algodoeiro e afirmaram que estas proporcionavam informações que podiam ser usadas para alocar insumos, bem como manejar a lavoura de acordo com o desenvolvimento da cultura, reduzindo custos operacionais.

Lough e Varco (2000) observaram que o NDVI, proveniente de imagens aéreas multiespectrais, foi fortemente correlacionado com a altura de plantas do algodoeiro, sugerindo que este índice de vegetação é uma valiosa ferramenta para estimação de biomassa vegetal, a qual é dependente do suprimento de nitrogênio.

Leon et al. (2003) utilizaram um esquema de amostragem em grade para correlacionar parâmetros do solo e produtividade do algodoeiro com a reflectância espectral obtida de imagens aéreas multiespectrais. Eles observaram que o melhor período para explicar a variabilidade de desenvolvimento da cultura ocorreu entre o surgimento da primeira flor até a abertura do primeiro capulho, com coeficientes de correlação variando de 0,28 a 0,70. Porém nenhuma das bandas simples, razões ou índices estudados apresentou resultados consistentes para correlacionar os dados de solo com o desenvolvimento da cultura ao longo das diferentes datas de coleta.

Por outro lado, Yang, Everitt e Bradford (2004) observaram que imagens aéreas hiperespectrais podem ser uma fonte de dados útil para o mapeamento da variabilidade da produtividade do algodoeiro e que o método de regressão “stepwise” pode ser usado para

identificar as bandas ótimas e combinações de bandas que melhor descrevem a variabilidade. Os autores sugeriram que imagens provenientes de bandas hiperespectrais mais estreitas são melhores do que as amplas bandas das imagens multiespectrais para estimação da produtividade, sendo, entretanto, necessários mais estudos que comprovem efetivamente esta assertiva.

Zarco-Tejada, Ustin e Whiting (2005) afirmaram que o NDVI proveniente de amplas bandas do espectro não é o melhor índice para estimar condições da lavoura, tais como o índice de área foliar (IAF), uma vez que este apresenta uma saturação com valores elevados de IAF e é afetado pelas condições de solo subjacente. Utilizando dados de sensor hiperespectral aerotransportado, operando na faixa do visível e infravermelho próximo, os autores obtiveram vários índices de crescimento de uma lavoura de algodoeiro, com resolução espacial de 1 metro. Os autores concluíram que novos índices hiperespectrais relacionados com a estrutura da vegetação e concentração de clorofila proporcionam informação adicional aos índices tradicionais sobre a variabilidade da produtividade.

Yang et al. (2003) avaliaram com sucesso a eficácia de diferentes tratamentos desfolhantes de algodoeiro usando imagens aéreas multiespectrais, enquanto Yang; Greenberg e Everitt (2005) analisaram o uso de reflectância espectral e índices de vegetação na detecção de eficiência de controle de rebrota do algodoeiro por diferentes tratamentos com herbicidas. Embora a separação visual tenha sido difícil devido à quantia limitada de rebrotas de plantas de algodoeiro, a imagem forneceu separações quantitativas entre os tratamentos, e tanto as razões entre reflectâncias (IVP/Vermelho e IVP/Verde) e os índices de vegetação analisados (NDVI e GNDVI) foram efetivos para separar os tratamentos. Apesar de serem necessárias observações ao nível do solo para validar os resultados, os autores concluíram que técnicas de sensoriamento remoto podem ser úteis para avaliar a efetividade dos métodos de controle de rebrota do algodoeiro.

Zhao et al. (2005), avaliando o efeito de adubação nitrogenada e aplicação de regulador de crescimento (PIX) no algodoeiro, observaram que o baixo suprimento de nitrogênio resultou em baixos níveis de clorofila na folha, e este estresse foi determinado precocemente nas plantas com o aumento da refletância na faixa do visível, nos comprimentos de onda de 550 a 700 nm. Mudanças nos níveis de nitrogênio entre os tratamentos foram determinadas de uma razão simples de refletância nas folhas (517/413 nm). Entre as medidas de refletância examinadas, as

maiores correlações com produtividade de fibra foram obtidas com o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). Os resultados indicam que as mudanças na produtividade de fibras do algodoeiro foram fortemente relacionadas com valores de NDVI no início da floração, e não relacionadas em outros períodos do ciclo. Os autores sugeriram que essas medidas podem ser usadas no sensoriamento remoto do estado de nitrogênio no algodoeiro, as quais podem ajudar na tomada de decisões de manejo.

Tarpley et al. (2000) estabeleceram um conjunto de curvas de calibração com relação de bandas de refletância de 1,5 nm para o algodoeiro e níveis de concentração de nitrogênio nas folhas, em casa de vegetação. Somente as relações que combinaram vermelho extremo (700 ou 716 nm) com uma banda de alta refletância na região do infravermelho muito próximo (755-920 a 1000 nm) proporcionaram boa precisão (correlação) e acurácia. Outros índices que incluíram uma refletância baseada na feição da clorofila também tiveram boa precisão mas menor acurácia que aqueles obtidos das relações de refletância vermelho extremo/infravermelho muito próximo.

Read et al. (2002) constataram que a reflectância no azul (415 nm) foi mais estável sob condições de deficiência de nitrogênio em algodoeiro cultivado em solução nutritiva, quando comparado com a banda do vermelho, principalmente na região do “red edge” (690-730 nm). Eles consideraram que o sensoriamento remoto para verificar o estado de nitrogênio em algodoeiro foi mais viável usando razões que envolviam bandas estreitas na região do violeta ou azul (400 a 500 nm) e a caracterização do vermelho extremo. Sui e Thomasson (2004), entretanto, observaram que, apesar do teor foliar de nitrogênio no algodoeiro ser significativamente correlacionado com um modelo formado pelas reflectâncias no azul, verde, infravermelho e altura de plantas, as maiores correlações foram obtidas nas bandas do vermelho e infravermelho e as menores no verde e azul. Apesar do azul isolado não ter apresentado significância, sua inclusão no modelo permitiu melhorar a habilidade das outras bandas em explicar a variação de nitrogênio.

Wanjura et al. (2003), utilizando radiômetro multiespectral e câmera de vídeo, observaram que a banda do vermelho foi a banda individual mais sensível para detectar a emergência de plântulas de milho e algodoeiro durante o estabelecimento do estande. O NDVI foi mais discriminante do que bandas simples de reflectância, mas sua sensibilidade foi mais

fortemente influenciada pelo vermelho uma vez que o IVP raramente detectou a presença de plântulas de algodoeiro, o que usualmente ocorreu somente em altos níveis de emergência.

Sui et al. (1998) desenvolveram um sensor óptico para diagnose de sanidade de plantas de algodoeiro. O sensor mede a reflectância do dossel nas bandas do visível e do IVP. Os resultados mostraram que a reflectância do dossel de algodoeiro foi fortemente correlacionada com a produtividade e estresse de nitrogênio.

Lough e Varco (2000) e Fridgen e Varco (2004) observaram correlações elevadas entre teores foliares de nitrogênio e reflectância na banda 550 nm, concluindo que a reflectância foliar pode ser usada para avaliar o estado de nitrogênio em algodoeiro, desde que outros nutrientes estejam adequados. Fridgen e Varco (2004) consideraram que a aplicação de diferentes doses de nitrogênio induziu a uma ampla variação na concentração de nitrogênio foliar bem como um aumento efetivo na concentração de clorofila, de forma que a distinção de plantas deficientes em nitrogênio pode ser detectada pela reflectância foliar na faixa do visível ao infravermelho próximo, desde que nenhum outro nutriente esteja em falta na cultura.

Li et al. (2000) observaram que a reflectância aumentou significativamente no IVP e diminuiu no vermelho com o aumento da irrigação, biomassa, e absorção de N pelo algodoeiro. Eles sugeriram que a reflectância espectral seja usada com o mapeamento do NDVI para identificar modelos espaciais de distribuição de água do solo e N através de uma lavoura heterogênea. A caracterização da distribuição espacial do espectro de plantas e propriedades do solo pode ser a base para o desenvolvimento de tecnologias de irrigação e aplicação em taxa variada de N.

Schröder et al. (2000) alertaram para o fato da necessidade de parcelas ricas em N bem como ferramentas de diagnose para corrigir efeitos de coloração na cultura que não sejam causadas por N, tais como doenças, pragas, densidade de plantas e senescência, como um pré-requisito para utilizar medidas de reflectância na avaliação do estado nutricional referente ao N.

## **2.4 A Cultura do algodoeiro**

Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2007), a produção de algodão herbáceo em caroço para o ano de 2007 atingirá 3,7 milhões de toneladas,

significativamente maior (27%) que a obtida em 2006 (2,9 milhões de toneladas). Essa variação positiva deve-se, segundo o Instituto, à recuperação dos preços tanto no mercado interno como no externo, à menor produção mundial e também à necessidade de rotação de culturas, com o objetivo de controlar pragas e doenças. A área plantada apresentou um aumento de 18,7% em relação à safra anterior, atingindo 1.066.469 ha na safra 2007. Também a produtividade deve ter um aumento de 7%, atingindo 3.433 kg ha<sup>-1</sup>.

Segundo Carvalho e Chiavegato (1999), o sucesso da lavoura algodoeira está ligado a um conjunto de operações e processos, e o cotonicultor deve ter uma visão holística que envolva a cultura e a cadeia do agronegócio algodão. Para isto, deve ser realizado um planejamento de toda a atividade produtiva, com vistas a atender às necessidades do consumidor final.

A cultura exige a utilização de insumos e técnicas que reduzam os riscos pertinentes à atividade. Os sistemas de produção de algodão na Região Centro-Oeste podem ser considerados de alta tecnologia, ou, pelo menos, de elevado grau de mecanização e uso de insumos. Segundo Carvalho e Ferreira (2006), a correção da acidez do solo e a adubação mineral têm custo elevado no cultivo do algodoeiro no Cerrado, atingindo valores da ordem de 20 a 30% do custo total de manejo da cultura. Neste contexto, o manejo eficiente da adubação é essencial para alta produtividade, redução de custo e viabilização dos sistemas de produção existentes no Cerrado. O uso racional de corretivos e fertilizantes depende da disponibilidade de nutrientes no solo, da exigência nutricional da cultura, dos fatores que afetam a sua eficiência, das relações econômicas entre os preços da pluma e dos insumos, além do impacto sobre o meio ambiente.

Vários experimentos de longa duração demonstraram que a calagem promove aumentos expressivos na produtividade do algodoeiro e as melhores respostas ocorreram quando a saturação por bases foi elevada a 60 %, mesmo em solos com baixos teores iniciais de Al trocável (SILVA, 1999). Dentre os nutrientes, observa-se que a cultura é mais exigente em nitrogênio e potássio, seguindo-se cálcio, magnésio, fósforo e enxofre (CARVALHO; FERREIRA, 2006; STAUT; KURIHARA, 2001).

O N geralmente é considerado um fator limitante para a produtividade do algodoeiro, tanto em áreas irrigadas ou cultivo de sequeiro, entretanto, aplicações excessivas podem reduzir a qualidade (HUTMACHER et al., 2004). Segundo Staut e Kurihara (2001), o N é fundamental no desenvolvimento da planta, principalmente dos órgãos vegetativos. Quando em doses adequadas,

estimula o crescimento e o florescimento, regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento e a resistência da fibra.

Em doses elevadas de N, ocorre um aumento no desenvolvimento vegetativo da planta em detrimento da produção e formação tardia dos frutos do algodoeiro (SILVERTOOTH; EDMISTEN; McCARTY, 1999). O excesso de N pode afetar indiretamente a produtividade de fibras pelo aumento da infestação de pulgões (*Aphis gossypii* Glover), os quais prejudicam a desfolha e podem causar problemas de pegajosidade no algodão devido às secreções açucaradas liberadas por estes insetos (CISNEROS; GODFREY, 2001; SLOSSER et al., 1999).

Geralmente, a aparência da folhagem fornece boa indicação sobre o estado nutricional da planta no que se refere ao N. Os sintomas de carência são: clorose uniforme, acentuando gradativamente nas folhas mais velhas, que secam e caem prematuramente; menor número de folhas, com limbo e pecíolo reduzidos; plantas de menor porte com internódios curtos; número reduzido ou ausência completa de ramos laterais; ramos produtivos curtos ou escassos; queda anormal de botões florais, de flores e de frutos novos; pequeno número de flores, maçãs esparsas, posicionadas nos primeiros ramos frutíferos inferiores; maturação precipitada dos frutos e diminuição do número de sementes por capulho. A anomalia pode atingir grandes áreas e é mais freqüente em solos intensamente cultivados ou em solos arenosos (STAUT; KURIHARA, 2001).

Um aspecto importante na nutrição com N refere-se ao seu efeito sobre a qualidade da fibra. Fritschi et al. (2003), em um estudo de três anos, observaram um relacionamento linear positivo entre comprimento de fibra e nível de adubação nitrogenada. Da mesma forma, Bauer e Roof (2004) observaram que tratamentos que não receberam adubação nitrogenada apresentaram menor qualidade de fibra, considerando comprimento, uniformidade e resistência de fibra.

Staut (1996) observou que, para uma produção de 2.500 kg ha<sup>-1</sup>, o algodoeiro extrai 212 kg ha<sup>-1</sup> de N, dos quais apenas 60 kg ha<sup>-1</sup> retornam ao solo e o restante é exportado com a colheita. Na adubação básica, o N deve participar em dose mínima (15 a 20 kg ha<sup>-1</sup> de N) (STAUT; KURIHARA, 2001). Atualmente, não existem parâmetros suficientemente dominados para a recomendação de N através de análises de solo e/ou foliar. Silva (1999) definiu que uma pequena dose de N deve ser aplicada no sulco de semeadura e o restante em cobertura, única ou parcelada, dependendo da textura do solo, do histórico da área, intensidade do uso da terra e a prática de rotação de culturas.

A resposta do algodoeiro à aplicação nitrogenada apresenta uma escala ampla de variação. Souza et al. (1999) verificaram, para cultura do algodoeiro herbáceo, em função do efeito de níveis de água disponível no solo (75, 50 e 25%) e doses de N (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha<sup>-1</sup>), aumentos nos valores de rendimento, área foliar e evapotranspiração com o aumento da dose do fertilizante nitrogenado. Os maiores rendimentos foram encontrados para a dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> de N.

## Referências

- BACH, H.; MAUSER, W.; SCHNEIDER, K. The use of radiative transfer models for remote sensing data assimilation in crop growth models. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 2003, Berlin. **Proceedings ...** Wageningen: Wageningen Academic Publ., 2003. p. 35-40. 1 CD-ROM.
- BAUER, P.J.; ROOF, M.E. Nitrogen, Aldicarb, and cover crop effects on cotton yield and fiber properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 369-376, 2004.
- BECKETT, P.H.T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soils and Fertilizers**, Harpenden, v. 34, p. 1-15, 1971.
- BHATTI, A.U.; MULLA, D.J.; FRAZIER, B.E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 37, p. 181-191, 1991.
- BOOLTINK, H.W.G.; VERHAGEN, J. Integration of remote sensing, modeling and field measurements towards an operational decision support system for precision agriculture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick. **Proceedings ...** London: BIOS Scientific Publ, 1997. v. 2, p. 921-929. 1 CD-ROM.
- BOYDELL, B.; McBRATNEY, A.B. Identifying potential within-field management zones from cotton estimates. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 3, p. 9-23, 2002.
- BRONSON, K.; KEELING, W.; LASCANO, R.; BOMAN, R. **Variable rate phosphorus fertilization in cotton on the Texas high plains**. Disponível em: <<http://precag.tamu.edu/brochures/pfert.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2007.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 31, p. 315-331, 1980.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOWAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO, L.H.; CHIAVEGATO, E.J. Fatores que afetam a produtividade do algodoeiro. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 1-8.

CARVALHO, M.C.S. FERREIRA, G.B. **Calagem e adubação do algodoeiro no cerrado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006.16 p. (Circular Técnica, 92).

CHEN, F.; KISSEL, D.V.; WEST, L.T.; ADKINS, W. Field scale mapping of surface soil clay concentration. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p. 7-26, 2004.

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.

COMUNIDADES EUROPÉIAS. **GALILEO, uma iniciativa européia**. Comissão Européia - Energia e Transportes. Bruxelas, 2003. Disponível em: [http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/galileo/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm). Acesso em: 30 mar. 2007.

COQUIL, B.; POILVE, H. Value added remote sensing information products for precision farming. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings ...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. p. 181-186. 1 CD-ROM.

CORA, J.E.; BERALDO, J.M.G.. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 374-387, 2006.

CORA, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M.; SHOUSE, P.J.; SOPPE, R.; AYARS, J.E. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 352-364, 2003.

COWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 3, p. 175-183, 1974.

D'ARCO, E.; ALVARENGA, B.S.; MOURA, P.; TEIXEIRA, C.G. Estudos de reflectância de amostras de 5 tipos de solos brasileiros, em condições de laboratório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais ...** Belo Horizonte:INPE, 2003. p. 2327 - 2334.

FREIRE, M.L.F.; BASTOS, E.J.B. Simulação da reflectância espectral planetária de alvos. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 16, p. 181-190, 1998. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X1998000200006&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1998000200006&lng=pt&nrm=iso)>. ISSN 0102-261X> Acesso em: 28 jun. 2006.

FRIDGEN, J.L.; VARCO, J.J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 63-69, 2004.

FRITSCHI, F.B.; ROBERTS, B.A.; TRAVIS, R.L.; RAINS, D.W.; HUTMACHER, R.B. Response of irrigated Acala and Pima cotton to nitrogen fertilization: growth, dry matter partitioning, and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 133-146, 2003.

GOEL, P.K.; PRASHER, S.O.; LANDRY, J.A.; PATEL, R.M.; BONNELL R.B.; VIAU A.A.; MILLER J.R. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 38, p. 99-124, 2003.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483p.

HAMLETT, J.M.; HORTON, R.; CRESSIE, N.A.C. Resistance and exploratory techniques for use in semivariogram analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 868-875, 1986.

HUTMACHER, R.B.; TRAVIS, R.L.; RAINS, D.W.; VARGAS, R.N.; ROBERTS, B.A.; WEIR, B.L.; WRIGHT, S.D.; MUNK, D.S.; MARSH, B.H.; KEELEY, M.P.; FRITSCHI, F.B.; MUNIER, D.J.; NICHOLS, R.L.; DELGADO, R. 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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em:

<<http://www1.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/defaulttab.shtm>>. Acesso em: 6 maio 2007.

IQBAL, J.; THOMASSON, J.A.; JENKINS, J.N.; OWENS, P.R.; WHISLER, F.D. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 9, p. 338-1350, 2005.

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

JOHNSON, R.M.; DOWNER, R.G.; BRADOW, J.M.; BAUER, P.J.; SADLER, E.J. Variability in cotton fiber yield, fiber quality and soil properties in a Southeastern Coastal Plain. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 1305-1316, 2002.

KLOTZ, P.; BACH, H.; MAUSER, W. GVIS – Ground-operated visible/near infrared imaging spectrometer. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2003, Berlin. **Proceedings ...** Wageningen: Wageningen Academic Publ., 2003. p. 315-321. 1 CD-ROM.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998. 226 p.

LECHNER, W.; BAUMANN, S. Global navigation satellite system. **Computer and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 25, p. 67-85, 2000.

LEON, C.T.; SHAW, D.R.; COX, M.S.; ABSHIRE, M.J.; WARD, B.; WARDLAW III, M.C. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 4, p. 359-284, 2003.

LI, H.; LASCANO, R.J.; BOOKER, J. BRONSON, K.F. Spectral reflectance characteristics of cotton related to soil water and topography variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA. 2000. 1 CD-ROM.

LILLESÆTER, O. Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 12, p. 247-254, 1982.

LOUGH, J.L.; VARCO, J.J. Effects of varying N and K nutrition on the spectral reflectance properties of cotton. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA. 2000. 1 CD-ROM.

McLAUGHLIN, N.B.; LAPEN, D.R. Anisotropy in spatial measurements of mouldboard plough draught. In: EUROPEAN CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 6., Skiathos, 2007. **Proceedings ...** Wageningen: Wageningen Academic Publ., 2007. p. 103-108. 1 CD-ROM.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão. Parte 1: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, p. 97-107, 1997.

\_\_\_\_\_. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: MOLIN, J.P. (Ed). 2001. 83 p.

\_\_\_\_\_. Informática e agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO NO AGRONEGÓCIO COOPERATIVO, 2007, Londrina. **Anais...** Londrina: SBI-AGRO, 2007. 1 CD-ROM.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. São Jose dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

MULLA, D.J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: SOIL SPECIFIC CROP MANAGEMENT, 1992, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1993. p. 15-26. 1 CD-ROM.

MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: Pierce, F.J., Sadler, E.J. (Ed.). **The site-specific management for agricultural systems**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1997. p. 1-18.

- PIERCE, F.J.; P. NOWAK. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 67, p. 1-85, 1999.
- PIERCE, F. J.; WARNCKE, D. D.; EVERETT, M. W. Yield and nutrient variability in glacial soils of Michigan. In: ROBERT, P.C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. (Ed.). **The site-specific management for agricultural systems**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1995. p. 133-151.
- PING, J.; GREEN, C.J. Spatial variability of yield and soil parameters in two irrigated cotton fields in Texas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA. 2000. 1CD-ROM.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A.R.; KERR, Y.H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing Environmental**, New York, v. 48, p. 119-126, 1994.
- READ, J.J.; TARPLEY, L.; McKINION, J.M.; REDDY, K.R. Narrow-waveband reflectance for remote estimation of nitrogen status in cotton. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, p. 1442-1452, 2002.
- RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agrônômica) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 115-122, 1998.
- SCHRÖDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O.; STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Madison, v. 66, p. 151-164, 2000.
- SILVA, F.M.; SOUZA, Z.M; FIGUEIREDO, C.A.P.; MARQUES JÚNIOR, J.; MACHADO, R.V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 401-407, 2007.
- SILVA, N.M. Nutrição mineral e adubação do algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 57-89.
- SILVERTOOTH, J.C.; EDMISTEN, K.L.; McCARTY, W.H. Production practices. In: SMITH, C.W.; COTHREN, J.T. **Cotton: origin, history, technology, and production**. New York: John Wiley, 1999. Chap. 3.2, p. 451-488.
- SLOSSER, J.; LESER, J.; RUMMEL, D.; FUCHS, T.; BORING, E.; MUEGGE, M.; SANSONE C. **Suggestions for management of cotton aphid in West Texas**. College Station: The Texas A&M University, 1999. (Agricultural Communications) Disponível em: <[www.tamu.edu/extension/bulletins/aphweb99.html](http://www.tamu.edu/extension/bulletins/aphweb99.html)>. Acesso em: 8 abr. 2006.

SOUZA, C.C.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P. Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada na cultura do algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, p. 125-130, 1999.

STAUT, L.A. **Fertilização fosfatada e potássica nas características agrônômicas e tecnológicas do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) na região de Dourados, MS.** 1996.124 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1996.

STAUT, L.A.; KURIHARA, C.H. Calagem e adubação. In: EMBRAPA. **Algodão: tecnologia de produção.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. p. 103-122.

STEFFEN, C.A.; OLIVEIRA, J.L.; GAMA, F.F. **Programa Spectron: manual de referência.** São José dos Campos: INPE; LARAD, 1996. 11 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.

STEVEN, M.D.; MILLAR, C. Satellite monitoring for precision farm support. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Oxford. **Proceedings ...** Oxford: Bios Scientific Publ., 1997. p. 697-704.

STEWART, C.; BOYDELL, B.; MCBRATNEY, A. Precision decisions for quality cotton: a guide to site-specific cotton crop management, The University of Sydney and Cotton Research and Development Corporation, 2005.

STEWART, C.M.; MCBRATNEY, A.B. Using bare soil imagery to determine management zones for the variable-rate application of inputs for cotton. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings ...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. p. 319-324. 1 CD-ROM.

SUI, R.; THOMASSON, J.A. **Plant health sensing system for in situ determination of cotton nitrogen status.** St. Joseph: ASAE, 2004.15 p. (ASAE/CSAE. Meeting Paper, 041081).

SUI, R.; WILKERSON, J.B.; HART, W.E.; HOWARD, D.D. **Integration of neural network with spectral reflectance sensor to detect nitrogen deficiency in cotton.** St. Joseph: ASAE, 1998.6 p. (ASAE Paper, 983104).

TABOR, J.A.; WARRICK, A.W.; MYERS, D.E.; PENNINGTON, D.A. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: II. Soil nitrate and correlated variables. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 390-394, 1985.

TABOR, J.A.; WARRICK, A.W.; PENNINGTON, D.A.; MYERS, D.E. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 602-607, 1984.

- TARPLEY, L.; REDDY, K.R.; SASSENATH COLE, G.F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 1814-1819, 2000.
- THORP, K.R.; TIAN. A review of remote sensing of weeds in agriculture. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p. 477-508, 2004.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 45-93, 1985.
- VELLIDIS, G.; TUCKER, M.A.; PERRY, C.D. Predicting cotton lint yield maps from aerial photographs. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p. 547-564, 2004.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVARES, V.H.; SCHAEFFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.
- WANJURA, D.F.; HATFIELD, J.L. PAR and IR reflectance, transmittance, and absorptance of four crop canopies. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 29, p. 143-150, 1986.
- WANJURA, D.F.; UPCHURCH, D.R.; MAAS, S.J.; WINSLOW, J.C. Spectral detection of emergence in corn and cotton. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 4, p. 385-399, 2003.
- WARD, B.D.; COX, M.S. Influences of soil chemical and physical properties on site-specific cotton production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA. 2000. 1CD-ROM.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. In: STEWART, B.A. (Ed.). **Advance in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1985. v. 3, p. 1-70.
- WILDING, L.P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: NIELSEN, D.R.; BOUMA, J. (Ed.) **Soil spatial variability**. Wageningen: PUDOC, 1985. p. 166-194.
- WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; HALL, G.F. **Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions**. New York, Elsevier, 1983. p. 83-116.
- WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R.P.; CLAYTON, M.K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, Beltsville, v. 7, p. 441-448, 1994.
- YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p. 445-461, 2004.
- YANG, C.; GREENBERG, S.M.; EVERITT, J.H. Evaluation of herbicide-based cotton regrowth control using remote sensing. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, p. 1987-1994, 2005.

YANG, C.; GREENBERG, S.M.; EVERITT, J.H.; SAPPINGTON, T.W.; NORMAN JR., J.W.; Evaluation of cotton defoliation strategies using airborne multispectral imagery. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 46, p. 869–876, 2003.

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

ZARCO-TEJADA, P.S; USTIN, S.L.; WHITING, M.L. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 641-653, 2005.

ZHAO, D.; REDDY, R.K.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; KOTI, S. 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.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 p. Tese (Livre-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2001.

### **3 VARIABILIDADE ESPACIAL E RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO**

#### **Resumo**

Conhecer a resposta das culturas à variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo pode ajudar a estabelecer estratégias de manejo do solo e da cultura, para melhor uso de insumos, tais como corretivos e fertilizantes. Os objetivos deste trabalho foram estudar a magnitude da variabilidade espacial e as relações de causa e efeito entre os fatores de produção da cultura do algodoeiro. Dados de planta e de solo foram coletados numa área de 90 hectares, dividida numa malha com espaçamento regular de 100 m entre pontos. Para detectar a variação na pequena escala, foram feitas amostragens mais intensas com espaçamento de 33 m, formando estatísticas descritivas, geoestatística, interpolação através de krigagem ordinária e regressão pelo método “stepwise”. A variabilidade expressa pelo coeficiente de variação foi baixa a moderada para todas variáveis analisadas, com exceção de maçãs retidas e P no solo. Os resultados da análise geoestatística indicaram que os fatores de produção da cultura do algodoeiro apresentam, em sua maioria, dependência espacial e esta deve ser considerada quando da definição de esquemas de amostragem e práticas de manejo do solo e da cultura. A produtividade do algodoeiro foi significativamente afetada por N, P, Ca e Mg no tecido foliar e fração areia e argila do solo.

Palavras-chave: Dependência espacial; Manejo regionalizado; Geoestatística

### **SPATIAL VARIABILITY AND RELATIONSHIPS AMONG NUTRITIONAL STATE, SOIL ATTRIBUTES AND COTTON YIELD**

#### **Abstract**

The understanding of the crops answer regarding the spatial variability of physical and chemical soil attributes can help to establish strategies of soil and crops management in order to use efficiently the input, such as fertilizers and defensive. The objective of this work was to study the spatial variability and the relationship among factors that affect cotton yield. Plant and soil data were collected in an area of 90 hectares, with points divided in a regular grid of 100 m. In order to detect the variation in the small scale, more intense samplings with spacing of 33 m were made, forming 5 islands, totalizing 170 samples. Data were submitted to the descriptive statistical analysis, geostatistic, interpolation through ordinary kriging, and stepwise regression analysis. Variability expressed by the coefficient of variation was low to moderate for all analyzed variables, except for healthy bolls and soil P. Geostatistical analysis indicated that the majority of cotton yield factors present spatial dependence and this should be considered when defining sampling schemes for soil and crop management practices. Cotton yield was affected significantly by N, P, Ca and Mg in the leaves, as well as sand and clay fraction of the soil.

Keywords: Spatial dependence; Site specific management; Geostatistic.

### 3. 1 Introdução

A cotonicultura praticada nas áreas do cerrado da região Centro-Oeste tem aspecto empresarial de grande escala e emprega um sistema intensivo de produção, totalmente mecanizado e com elevadas produtividades. Apesar dos custos elevados associados ao manejo da adubação da cultura, esta ainda é realizada de maneira uniforme sobre todo um talhão, sem considerar sua variabilidade natural. Este aspecto ocorre também em outros países, tal como observado por Stewart, Boydell e Mcbratney (2005), os quais constataram que a intensa mecanização levou os cotonicultores dos Estados Unidos a implementar práticas de manejo extensivas a toda a lavoura.

Avanços tecnológicos na agropecuária, entretanto, têm mostrado a importância de se medir a variabilidade espacial e temporal de propriedades que afetam o rendimento das culturas (CARVALHO et al., 2002), como base para administrar as operações de manejo (GOEL et al., 2003; MULLA; SCHEPERS, 1997). Isto permite que a aplicação de insumos seja ajustada localmente, em nível adequado (BOOLTINK; VERHAGEN, 1997; GOEL et al., 2003).

A variabilidade espacial de atributos do solo e planta pode ser analisada utilizando-se métodos geoestatísticos e krigagem. Tabor et al. (1984) e Tabor et al. (1985) usaram semivariogramas e krigagem para analisar e correlacionar a variabilidade espacial de nitrato em pecíolos de algodoeiro e solo. Valco et al. (1998) referiram-se ao uso do mapeamento de atributos do solo para realizar operações regionalizadas de manejo da cultura do algodão. Da mesma forma, Johnson et al. (2002) obtiveram diferentes modelos de correlação espacial em propriedades do solo e produtividade de fibra de algodão e observaram que o grau de variabilidade existente na lavoura permite a adoção de estratégias de manejo, como fertilização em taxa variada e colheita seletiva, a fim de maximizar a produtividade e qualidade de fibras. Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram estudar a variabilidade espacial e modelar a correlação espacial dos fatores que afetam a produtividade na cultura do algodoeiro e estudar as relações de causa e efeito entre tais fatores em lavoura comercial no Centro-Oeste brasileiro.

## 3.2 Desenvolvimento

### 3.2.1 Material e métodos

A área deste estudo está localizada na Fazenda Planalto, Município de Chapadão do Céu/GO (52°41' W; 18°28' S). Nesta região, encontram-se os chapadões, caracterizados por uma situação geográfica favorável à agricultura, devido às grandes extensões de terra com relevo plano e elevada altitude.

A lavoura em que o experimento foi conduzido vem sendo cultivada com culturas anuais (soja, milho e algodão) em rotação, no sistema que na região é considerado como semi-direto. Neste sistema o solo é revolvido após a colheita do algodão para incorporação dos restos culturais, visando o controle de pragas e manejo do solo. Em geral, o milheto é utilizado como fornecedor de palhada para cobertura do solo.

O solo da área de estudo pertence à classe LATOSSOLO VERMELHO distrófico, textura média (EMBRAPA, 2006). A região apresenta altitude média de 814m, com relevo predominantemente suave, com declividades médias variando de 1 a 2%.

A lavoura foi visitada periodicamente, para acompanhamento visando o controle de pragas e doenças que possam atacar a cultura. O manejo de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado de acordo com a ocorrência destas e segundo as recomendações técnicas conforme EMBRAPA (2001).

A semeadura foi realizada no dia 25/11/03 utilizando-se a cultivar Deltapine Acala 90, no espaçamento de 0,90 m. A adubação foi realizada pela prática usual, de maneira uniforme, com base na análise de solo e na expectativa de produtividade de 4500 kg ha<sup>-1</sup> de algodão em caroço, sendo aplicados 130 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 148 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

Os dados foram coletados numa área de 90 hectares, com dimensões de 1.000 m x 900 m, a qual foi dividida numa malha com espaçamento regular de 100 m entre pontos, ao longo de 11 transeções paralelas com 900 m de comprimento e equidistantes de 100 m, formando um retângulo com 10 colunas e 11 linhas, constituindo 110 pontos de amostragem (Figura 3.1). Cada ponto amostral foi composto por duas linhas de 2,00 m, constituindo uma célula amostral de 3,60 m<sup>2</sup>. Com o objetivo de detectar a variação na pequena escala, formando 5 “ilhas”, foram feitas amostragens mais intensas com espaçamento de 33 m, constituindo um total de 170 amostras.

A amostragem de tecido foliar foi realizada na época de floração, entre 80 a 90 dias após a emergência, coletando-se a quinta folha a partir do ápice das plantas, num total de 20 folhas por ponto. As amostras foram secas e moídas em moinho de facas tipo cróton e enviadas ao laboratório para determinação analítica dos teores de nutrientes.

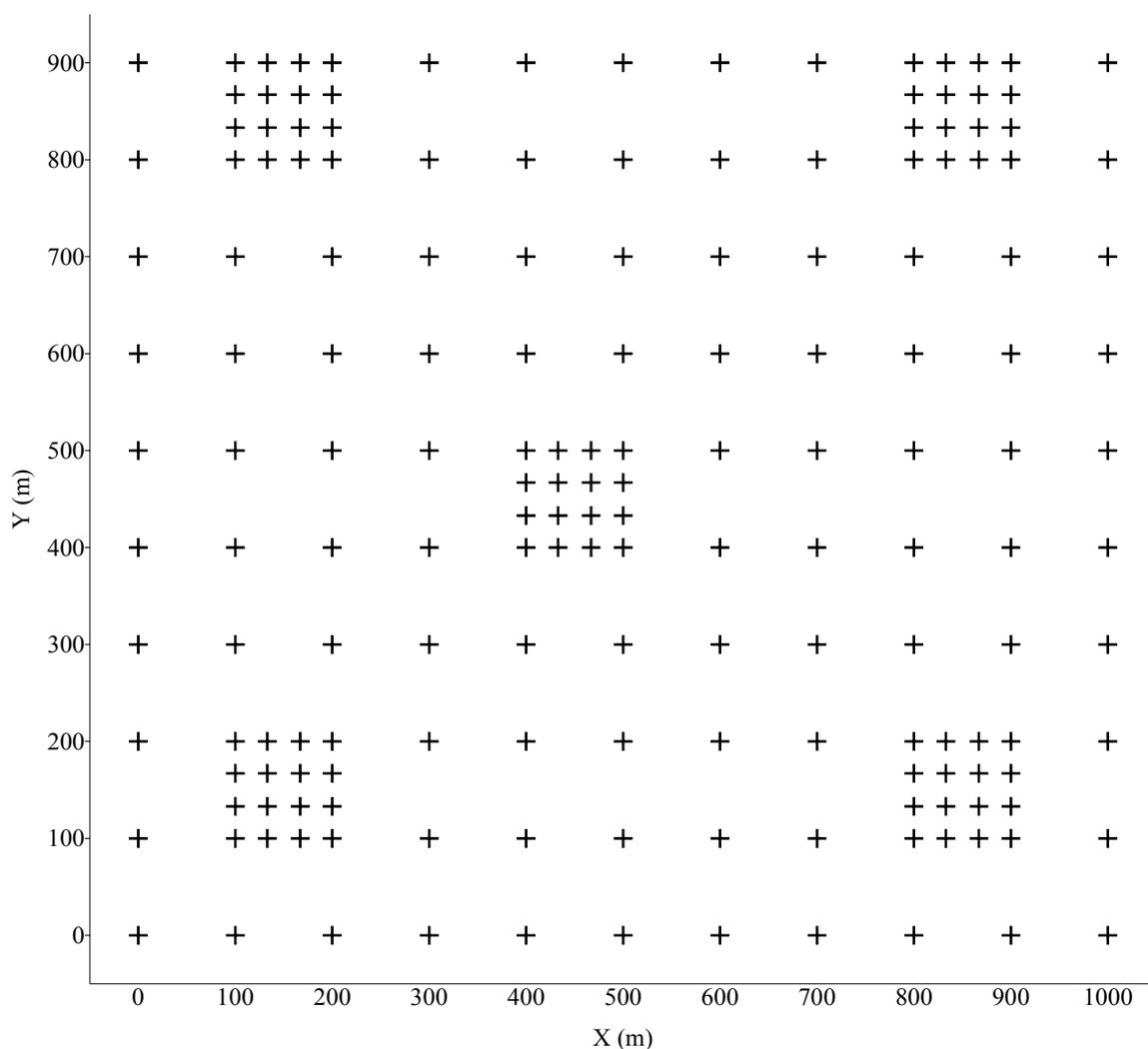


Figura 3.1 – Esquema amostral em grade regular acrescida de cinco “ilhas” com espaçamento adensado

A coleta de dados de produtividade foi realizada por meio da colheita manual do algodão em caroço em cada ponto amostral. Os dados referentes ao número de plantas, altura final e

número de capulhos e maçãs foram coletados no momento da colheita. A amostragem de solo foi realizada após a colheita.

Os dados foram submetidos à análise estatística, sendo determinadas as medidas estatísticas média, valores máximos e mínimos, coeficientes de assimetria e curtose, coeficiente de variação (CV) e distribuição de frequência dos dados. A análise de dependência espacial foi realizada através do ajuste de modelos ao semivariograma experimental, de acordo com a teoria das variáveis regionalizadas (TVR), utilizando-se o programa GEOSTAT (VIEIRA et al, 2002). Segundo Trangmar, Yost e Uehara (1985), a aplicação da TVR assume que a semivariância entre dois locais quaisquer na região de estudo depende somente da distância e direção de separação das duas locações e não de sua localização geográfica. A semivariância em um dado vetor  $h$  é estimada como a média da diferença ao quadrado em todas as observações separadas pelo vetor, sendo que o semivariograma é a representação gráfica da semivariância em função da distância  $h$  (WEBSTER, 1985).

Vieira (2000) recomendou o procedimento de autovalidação “jack-knifing” para verificar o erro da estimativa dos parâmetros ajustados nos modelos. Nessa técnica, em que cada um dos valores medidos é interpolado pelo método da krigagem, elimina-se sucessivamente, durante o cálculo, o valor a ser estimado. Em seguida procede-se ao estudo dos erros. Assim, é possível fazer estimativas com diferentes modelos ajustados aos semivariogramas, e nesse caso, essa técnica pode ser comparada a uma análise de sensibilidade dos parâmetros ajustados ao semivariograma.

Uma vez verificada a dependência espacial, foi realizada a krigagem para estimar valores em locais não amostrados, sem tendência e com variância mínima. A partir da krigagem, foram gerados mapas de distribuição espacial das variáveis estudadas.

A análise de regressão pelo método “stepwise” foi realizada pelo procedimento PROC REG do programa SAS (1998) para verificar as associações e interdependências entre os grupos de variáveis estudadas. O grau de significância para o F foi de 15% de probabilidade para a inclusão das variáveis no modelo.

### 3.2.2 Resultados e discussão

#### Estatística descritiva

A Tabela 3.1 apresenta os resultados da análise estatística descritiva para produtividade e outras características fitotécnicas das plantas de algodoeiro na área estudada. Foram observadas produtividades variando de 2.843 a 5.704 kg ha<sup>-1</sup> de algodão em caroço, sendo que a média obtida situa-se acima da média da região, em torno de 4.500 kg ha<sup>-1</sup>.

Verifica-se que a média da população foi de 122.663 plantas ha<sup>-1</sup>, variando de 77.777 a 155.555 plantas ha<sup>-1</sup>. Apesar desta amplitude, o CV foi baixo, da ordem de 12,26%. Lamas e Staut (2001) afirmaram que para as condições de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, considerando-se as cultivares atualmente recomendadas, a população de plantas deve estar entre 80.000 a 120.000 plantas ha<sup>-1</sup>.

Em média, ficaram retidas 0,22 maçãs sadias por planta, no momento da colheita e 1,23 maçãs podres planta<sup>-1</sup>. Segundo Paiva, Asmus e Araujo (2001) mais de 100 espécies de microorganismos têm sido isoladas a partir de maçãs apodrecidas. A maioria destes patógenos tem ação secundária e atuam sob condições de estresse do fruto. Alguns patógenos constituem agentes primários e infectam diretamente as maçãs e capulhos do algodoeiro, causando podridões. As principais podridões causadas por agentes primários são podridão de *Diplodia*, Antracnose, podridão de *Fusarium* e *Xanthomonas*..

O CV para a variável produtividade foi de 11,6%. Mulla (1993) e Pierce, Warncke e Everett (1995) afirmaram que a produção das culturas exhibe moderada variação espacial, com valores de CV variando de 0 a 29%. A variável maçãs retidas apresentou CV bastante elevado, e as demais variáveis apresentaram CV baixo a moderado, segundo critérios estabelecidos por Wilding e Drees (1983).

Os resultados da análise estatística descritiva para os teores de macronutrientes obtidos no tecido foliar do algodoeiro, coletado no período de florescimento (Tabela 3.1) mostraram que a média (muito próxima à mediana) de todos os nutrientes, à exceção do N, apresentaram-se com os teores adequados, conforme estabelecido por Silva (1999). A média dos teores de N apresentou-se ligeiramente acima dos teores estabelecidos. Apesar de haver uma grande amplitude entre valores máximos e mínimos para os diferentes nutrientes, todos apresentaram um baixo CV (< 15,0%).

Tabela 3.1 – Resultados da estatística descritiva para as características fitotécnicas e estado nutricional do algodoeiro e atributos do solo

Variável	n	média	mediana	variância	desvio padrão	CV(%)	mínimo	máximo	assimetria	curtose	W.normal <sup>1</sup>
Características fitotécnicas											
Altura (m)	170	1,2	1,2	0,0082	0,091	7,5	0,9	1,5	-0,16	1,11	0,98 <sup>ns</sup>
População (pl ha <sup>-1</sup> )	170	122.663	123.611	0,23E+09	0,15E+05	12,3	77.780	155.600	-0,36	0,15	0,97 <sup>ns</sup>
Maças podres	170	1,2	1,2	0,16	0,41	32,9	0,5	2,7	0,87	1,11	0,95***
Maças retidas	170	0,2	0,2	0,046	0,21	97,4	0,0	1,1	1,24	1,47	0,87***
Capulhos	170	7,2	7,2	1,46	1,21	16,8	4,5	12,1	0,84	2,16	0,96***
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	170	4.637	4.654	290.197	538,7	11,6	2.843	5.704	-0,64	0,71	0,96***
Estado nutricional											
N (g kg <sup>-1</sup> )	170	46,9	46,8	12,58	3,575	7,6	34,0	61,0	0,91	4,40	0,92***
P (g kg <sup>-1</sup> )	170	2,7	2,7	0,10	0,31	11,7	1,8	3,9	-0,061	0,97	0,98 <sup>ns</sup>
K (g kg <sup>-1</sup> )	170	19,3	19,0	4,92	2,22	11,5	14,5	28,0	0,65	1,30	0,96***
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	170	26,4	26,1	9,60	3,10	11,7	19,3	36,8	0,44	0,26	0,97 <sup>ns</sup>
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	170	3,9	4,0	0,34	0,58	14,8	2,5	5,7	-0,073	0,47	0,97 <sup>ns</sup>
S (g kg <sup>-1</sup> )	170	6,4	6,3	0,79	0,89	13,8	4,6	9,6	1,16	2,21	0,92***
Atributos do solo											
pH (H <sub>2</sub> O)	169	5,6	5,6	0,03	0,17	3,1	5,3	7,0	3,53	24,63	0,77***
pH (CaCl <sub>2</sub> )	169	4,9	4,9	0,04	0,21	4,2	4,5	6,5	3,05	21,62	0,82***
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	3,4	3,4	0,29	0,53	15,7	2,4	7,5	2,75	19,63	0,86***
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	1,0	1,0	0,05	0,23	22,3	0,6	1,8	0,42	0,23	0,96***
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	6,5	6,5	1,33	1,15	17,7	1,8	9,4	-0,29	1,70	0,96***
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	0,33	0,32	0,004	0,07	20,3	0,19	0,58	0,78	1,15	0,96***
P (mg dm <sup>-3</sup> )	169	21,7	19,6	70,17	8,38	38,6	11,3	69,3	2,93	11,57	0,74***
Bases (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	4,8	4,7	0,57	0,75	15,8	3,2	9,4	1,51	7,86	0,94***
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	11,3	11,2	0,67	0,82	7,3	8,2	13,5	0,10	0,69	0,98 <sup>ns</sup>
CTCef (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	169	4,8	4,7	0,54	0,73	15,3	3,3	9,4	1,60	8,38	0,93***
V (%)	169	42,3	42,0	58,09	7,62	18,0	27,0	84,0	1,19	4,81	0,95***
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	169	540	542	511,0	22,6	4,2	446	577	-1,08	2,06	0,93***
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	169	79	78	100,5	10,0	12,7	59	130	2,03	7,92	0,85***
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	169	381	380	511,3	22,6	5,9	324	453	0,74	1,30	0,95***

n= número de observações; CV= coeficiente de variação. <sup>1</sup> Teste de normalidade: ns = não significativo (dados apresentam distribuição normal); \*\* e \*\*\*, significativos a 0,01 e 0,001 respectivamente (dados não apresentam distribuição normal).

Dentre os atributos do solo, somente a variável CTC apresentou distribuição normal. As demais apresentaram acentuados valores dos coeficientes de assimetria e curtose, indicativo da não normalidade dos dados. À exceção de H+Al e argila, todas as variáveis exibiram uma assimetria positiva. Os menores valores de CV foram observados para o pH, argila, silte e CTC ( $CV < 8,0\%$ ) e os maiores para P, Mg, K e V% ( $CV > 18,0\%$ ).

### **Geoestatística**

Os resultados da análise geoestatística encontram-se na Tabela 3.2. Os semivariogramas foram ajustados aos dados usando o modelo melhor ajustado com menor raiz quadrada do erro médio (RMS). As variáveis maçãs podres e número de capulhos apresentaram efeito pepita puro (ausência de dependência espacial no espaçamento amostral utilizado). Os dados das demais características fitotécnicas ajustaram-se ao modelo esférico.

O efeito pepita ( $C_0$ ) representa a variância não explicada ou ao acaso, freqüentemente causada por erros de medições ou variações das propriedades que não podem ser detectadas na escala de amostragem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; VIEIRA, 2000). Zimback (2001) propôs que o grau de dependência espacial seja verificado pela relação entre a variância estrutural (C) e o patamar ( $C_0+C$ ), sendo classificada como fraca para valores  $\leq 25\%$ ; moderada, entre 25% e 75%, e forte  $\geq 75\%$ . Segundo este critério, as variáveis fitotécnicas apresentaram moderado GDE.

O alcance define o raio máximo para o qual amostras vizinhas são usadas para interpolação por krigagem, uma vez que são relacionadas espacialmente (TRANGMAR; YOST; UEHARA (1985); VIEIRA (2000). As amostras mais próximas têm o maior peso na interpolação, e o semivariograma deve ter maior exatidão principalmente nos primeiros pontos. O alcance é importante também para o planejamento e avaliação experimental, podendo auxiliar na definição de procedimentos amostrais (WEBSTER, 1985). Os valores do alcance de dependência espacial das características fitotécnicas variaram entre 174 m para maçãs sadias e 234 m para produtividade de algodão em caroço.

As variáveis P, K e Mg no tecido foliar apresentaram efeito pepita puro, N ajustou-se ao modelo gaussiano e apresentou fraco GDE, Ca e S ajustaram-se ao modelo esférico com moderado GDE. Em relação aos atributos do solo, P, Mg, argila e silte não apresentaram

dependência espacial. As variáveis Ca e areia apresentaram forte GDE, e as demais variáveis apresentaram moderado GDE.

Tabela 3.2 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados às características fitotécnicas e estado nutricional do algodoeiro e atributos do solo

variável	modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	a	R <sup>2</sup>	RMS	GDE
Características agronômicas							
altura	esférico	0,005	0,002	200,0	0,64	0,0009	0,32
população	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
maças podres	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
maças sadias	esférico	0,019	0,025	174,9	0,58	0,010	0,57
capulhos							
produtividade	esférico	182479,89	77843,35	234,6	0,50	49231,90	0,30
Estado nutricional							
N	gaussiano	9,908	2,807	269,5	0,43	3,268	0,22
P	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
K	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
Ca	esférico	4,576	2,615	194,3	0,45	2,117	0,36
Mg	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
S	esférico	0,635	0,233	319,6	0,35	0,231	0,27
Atributos do solo							
pHagua	esférico	0,014	0,012	127,7	0,20	0,004	0,46
pHCaCl <sub>2</sub>	esférico	0,015	0,023	127,7	0,33	0,005	0,60
Ca	esférico	0,017	0,243	124,5	0,44	0,038	0,94
Mg	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
H+Al	esférico	0,023	0,031	50,0	0,07	0,004	0,58
K	esférico	0,003	0,001	200,0	0,10	0,001	0,37
P	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
SB	esférico	0,191	0,342	118,5	0,48	0,052	0,64
CTC	esférico	0,278	0,440	199,5	0,66	0,083	0,61
CTC ef	esférico	0,198	0,305	119,7	0,44	0,051	0,61
V%	esférico	21,634	33,487	74,3	0,35	4,251	0,61
Argila	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
Silte	ef. pepita	-	-	-	-	-	-
Areia	gaussiano	0	85,000	136,6	0,47	18,591	1,00

C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>1</sub>: variância estrutural; a: alcance; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMS: raiz quadrada do erro médio; GDE: grau de dependência espacial.

Segundo Cambardella et al. (1994), as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, como textura e mineralogia, enquanto as que apresentam fraca dependência são influenciadas por propriedades extrínsecas tais como aplicações de fertilizante e cultivo. A falta de ajuste, ou de dependência espacial dos dados das variáveis argila e silte pode ser devida ao método de determinação textural, pois,

conforme afirmaram Donagemma et al. (2003), o resultado mais acurado da análise textural depende da completa dispersão da amostra de solo e da manutenção da estabilidade da fase dispersa. Alguns Latossolos podem apresentar problemas de dispersão, devido à presença de microagregados de alta estabilidade. Esses grupamentos muito argilosos são parcialmente desagregados pela dispersão química e mecânica, contribuindo, devido seu tamanho, para superestimar a proporção de silte do solo analisado.

Empresas especializadas em agricultura de precisão no Brasil, segundo Montezano; Corazza e Muraoka (2006), indicam que uma amostra pode representar desde um até 20 hectares. Conforme salientaram Corá e Beraldo (2006), muitos dos consultores agrônômicos, durante o processo de elaboração dos mapas, não levam em consideração a dependência espacial dos atributos analisados para estimar valores em locais não-amostrados, uma vez que utilizam métodos baseados em interpolação linear ou polinômios, deixando dúvida em relação à acurácia dos mapas. Entretanto, Han et al. (1994) já haviam salientado que o espaçamento amostral adequado depende da variabilidade espacial e que o esquema amostral pode variar entre diferentes campos. Considerando os valores do alcance das variáveis do solo, observa-se que, para o manejo regionalizado da calagem, nas condições estudadas por exemplo, as amostras devem ser coletadas em células com 74 x 74 m, ou seja, é necessário coletar uma amostra a cada 0,5 ha.

Silva et al. (2007), ao analisarem a variabilidade de atributos do solo numa área cultivada com café, afirmaram que a variabilidade extrínseca, relativa às prática de manejo do solo, contribuiu para a redução do alcance. Desta forma, a aplicação de insumos em taxa fixa tende a aumentar a variabilidade, intensificada pelas deficiências da própria mecanização da operação. Corá et al. (2004), entretanto, observaram uma maior continuidade espacial nos atributos do solo da camada superficial de uma área cultivada com cana-de-açúcar em relação à camada subsuperficial, atribuindo este fenômeno às operações de manejo que contribuíram para maior homogeneização da camada superficial e, em conseqüência, para existência de maiores alcances de dependência espacial.

A aplicação de insumos em taxa variada visa justamente diminuir a variabilidade, resultando em maiores valores do alcance. De fato, Corá e Beraldo (2006) observaram aumento da continuidade espacial dos atributos depois de realizada a calagem e a fosfatagem em doses

variadas. Em dois dos talhões, o teor de P no solo apresentou maior valor do alcance depois de realizada a fosfatagem em doses variadas, indicando maior continuidade espacial dos teores de P no solo após a aplicação do insumo.

Johnson et al. (2002), estudando a variabilidade da qualidade e produtividade de fibras de algodão e propriedades do solo por dois anos consecutivos, observaram que a produtividade de fibras apresentou dependência em um ano e em outro não. Os autores comentaram que as propriedades relacionadas ao comprimento e resistência de fibra são devidas principalmente ao componente genético e respondem pouco às variações ambientais. Entretanto, as propriedades relacionadas à maturidade são mais fortemente influenciadas pelo ambiente e apresentam maior correlação espacial. Bronson et al. (2007) observaram, em duas lavouras de algodoeiro irrigadas, que a resposta da cultura para adubação com fósforo não foi consistente num estudo que comparou aplicação em taxa variável, fixa e não aplicação de fósforo. Apesar disso o estudo revelou que em dois de três experimentos foi aplicado menos fósforo em taxa variável do que com a recomendação em taxa fixa e que tanto a posição na paisagem quanto o tipo de solo (solo calcário e não-calcário) apresentaram um efeito na resposta à adubação fosfatada.

### **Mapas de distribuição espacial**

Os parâmetros dos semivariogramas ajustados foram usados para a elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis. Apesar de haver pequena amplitude entre os valores interpolados, as Figuras 3.2(d) a 3.2(f) mostram que existem semelhanças entre os mapas de N, Ca e S no tecido foliar. Há uma faixa atravessando todo o talhão na direção Y, que vai de 0 a 600 m em X, onde são observados os maiores valores destas variáveis. As características fitotécnicas apresentaram uma distribuição semelhante às variáveis do estado nutricional.

Dentre os atributos do solo (Figura 3.3 e Figura 3.4), observa-se que pH (CaCl<sub>2</sub>), Ca, SB, CTC<sub>ef</sub> e V%, apresentaram distribuição espacial semelhante, resultado da interdependência entre estas variáveis. Observa-se uma pequena mancha, na região entre as coordenadas 700 m-900 m X e 0 m-100 m Y, onde estão concentrados os valores mais elevados destas variáveis. Ao analisar-se a variabilidade observada para V%, com valores predominantemente na faixa de 36 a 52 %, a prática de calagem em taxa variada poderia reduzir custos e melhorar a disponibilidade de outros nutrientes às plantas.

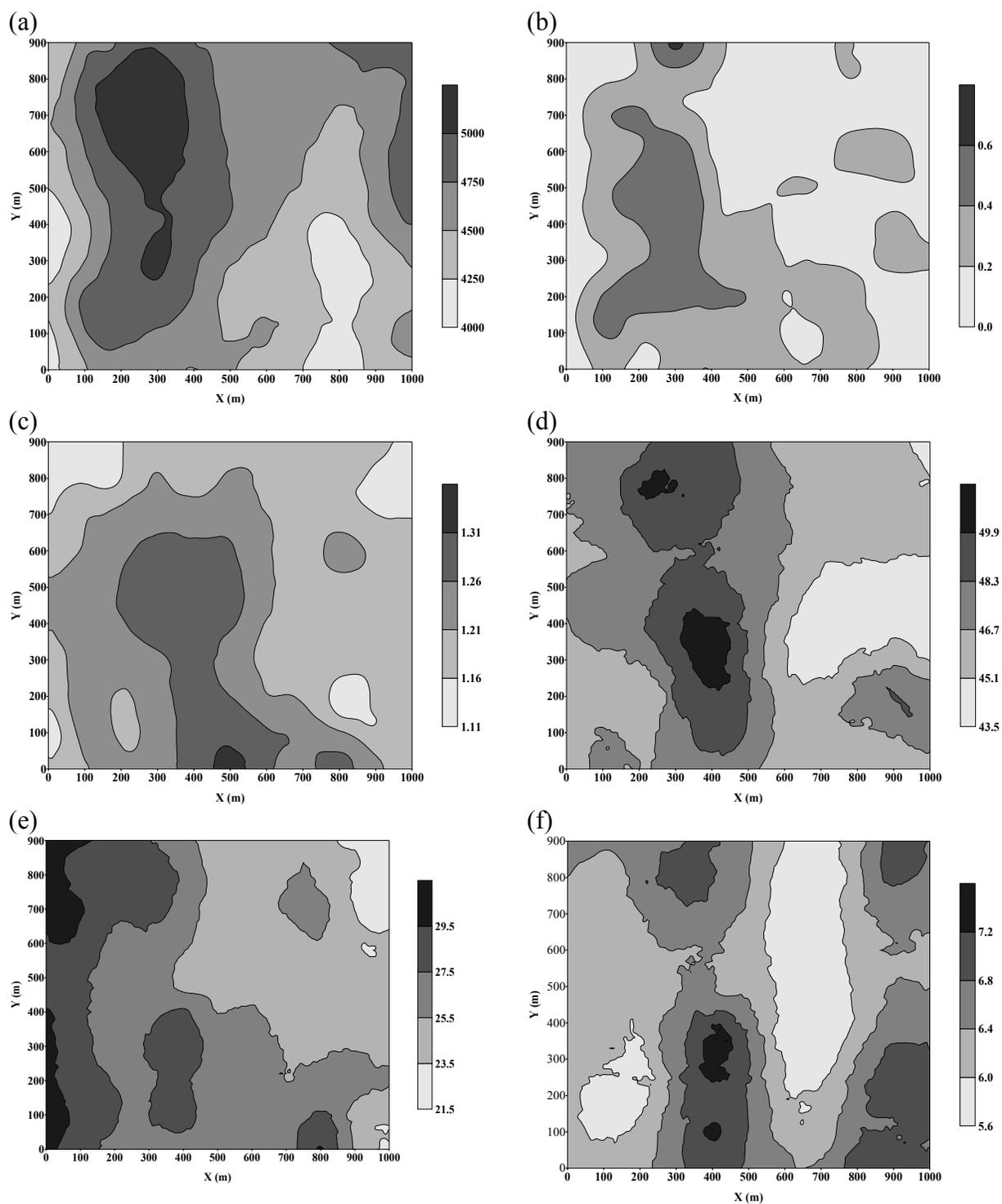


Figura 3.2 – Mapas de distribuição espacial das variáveis relacionadas às características fitotécnicas: (a) produtividade; (b) número de maçãs sadias/planta; (c) altura; e estado nutricional: (d) teor foliar de N; (e) teor foliar de Ca; (f) teor foliar de S

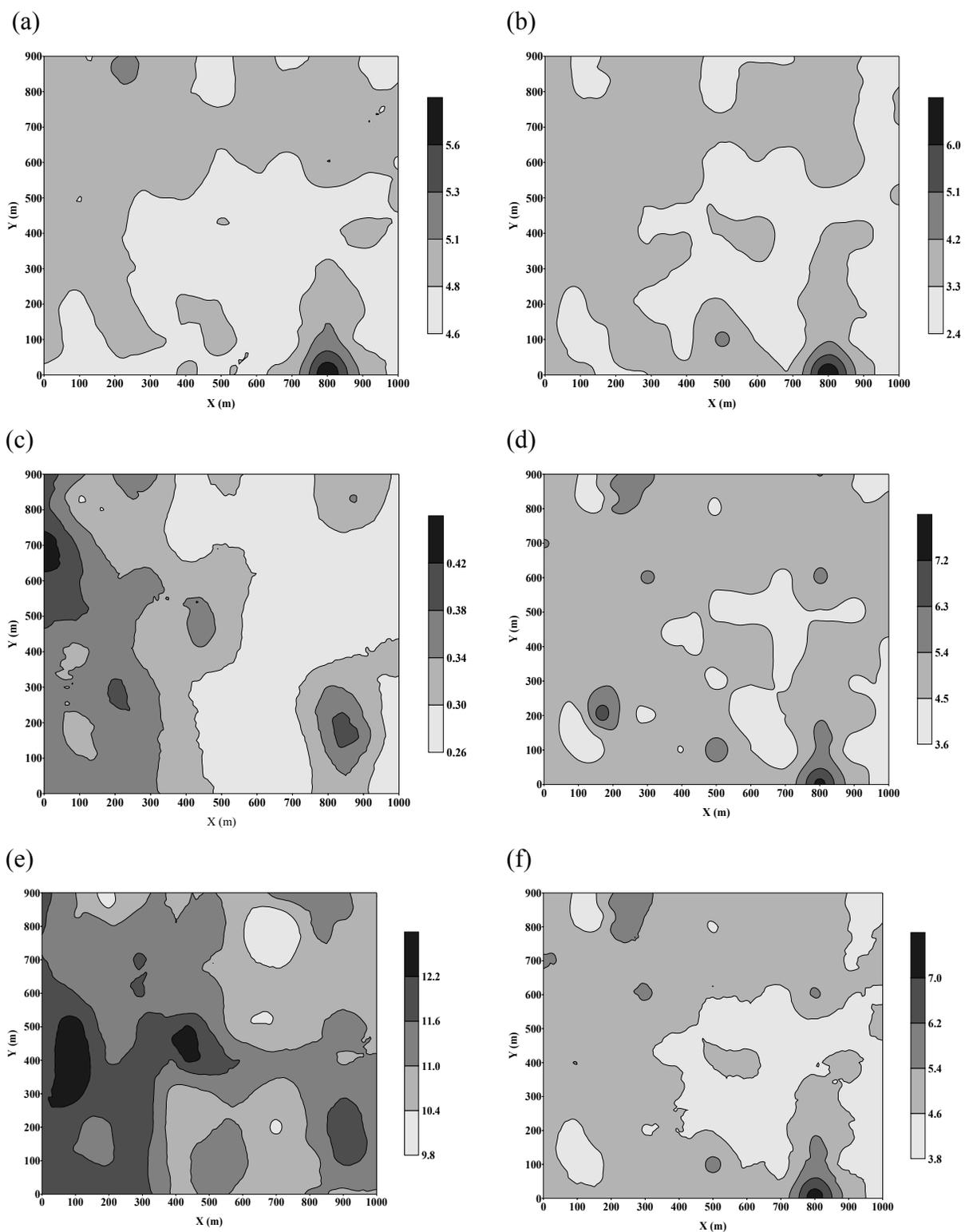


Figura 3.3 – Mapas de distribuição espacial dos atributos do solo: (a) pH  $\text{CaCl}_2$ ; (b) Ca; (c) K; (d) soma de bases; (e) CTC; (f) CTC efetiva

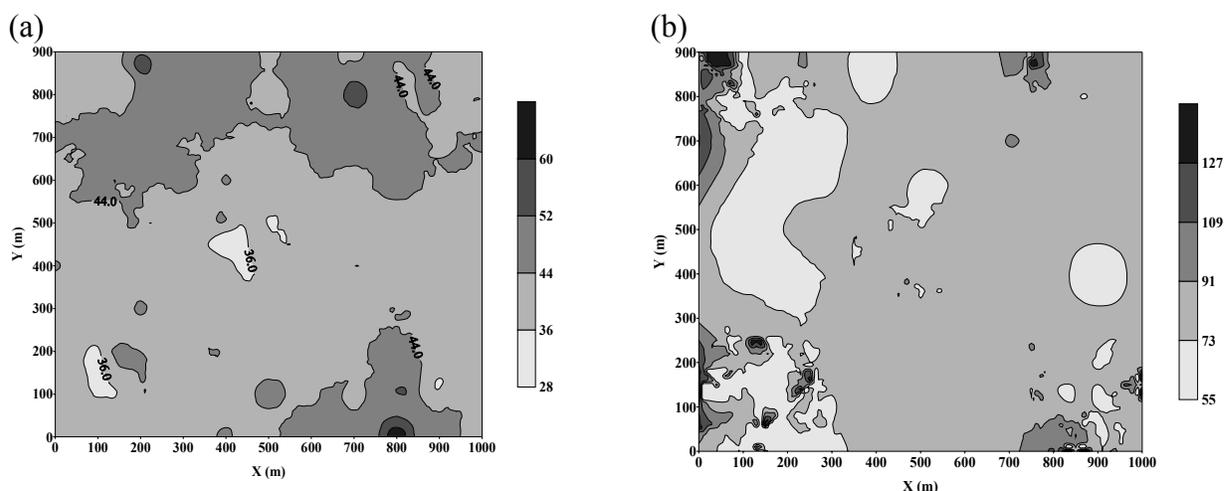


Figura 3.4 – Mapas de distribuição espacial dos atributos do solo: (a) V%; (b) areia

Apesar da variável K no solo ter apresentado níveis médios na área (Figura 3.3c), conforme critérios de Costa e Oliveira (1998), apud Staut e Kurihara (2001), seu arranjo de distribuição espacial permite visualizar que o manejo regionalizado da adubação pode ser viável, principalmente para aumentar os níveis de produtividade. Conforme salientou Raji (1991), o grande problema das tabelas de adubação é, com exceções, a indicação de recomendações médias e sem experimentação suficiente para dar o suporte necessário à indicação de adubação das culturas. Quando se trata de manejo detalhado associado à agricultura de precisão, faz-se necessário uma adequação das recomendações que levem em conta também aspectos como variedades modernas, produtividade esperada e as particularidades que envolvem a variabilidade dos solos.

### Análise de Regressão “Stepwise”

A análise de regressão pelo método “stepwise”, que avaliou a influência dos atributos do solo e estado nutricional sobre a produtividade do algodoeiro, mostrou que foram significativas no modelo as propriedades do solo areia e argila, e os teores foliares de P, Ca, Mg e N. A presença das variáveis relacionadas à textura do solo provavelmente deve-se à influência na disponibilidade hídrica às plantas. Apesar do modelo ajustado ser altamente significativo, o valor de  $R^2$  foi relativamente baixo (0,26), como também observado por Ward e Cox (2000), o que indica que somente uma pequena parte da variabilidade da produtividade pode ser explicada pelas variáveis analisadas neste estudo. Johnson et al. (2002) fizeram uma tentativa de estabelecer

regressões múltiplas entre atributos do solo e produtividade e qualidade de fibras, mas não obtiveram sucesso neste procedimento.

### 3.3 Conclusões

A variabilidade expressa pelo coeficiente de variação foi baixa a moderada para todas as variáveis analisadas, com exceção de maçãs retidas e P no solo. Entretanto, os resultados da análise geostatística indicaram que os fatores de produção da cultura do algodoeiro apresentam, em sua maioria, dependência espacial e esta deve ser considerada quando da definição de esquemas de amostragem e práticas de manejo do solo e da cultura. Para o manejo regionalizado da calagem, nas condições estudadas, as amostras devem ser coletadas em distâncias não maiores que 74 m, o que poderia reduzir custos e melhorar a disponibilidade de outros nutrientes às plantas. A variável K, com alcance de 200 m, apresentou arranjo de distribuição espacial que permite o manejo regionalizado da adubação principalmente para aumentar os níveis de produtividade. O comportamento aleatório apresentado pelos teores de P no solo indica que as práticas de manejo associadas ao fertilizante fosfatado podem ser realizadas homoganeamente sobre o talhão. Os mapas das características fitotécnicas e de N, Ca e S no tecido foliar revelaram que estas seguem o mesmo arranjo de distribuição espacial na lavoura. As variáveis com influência significativa sobre a produtividade do algodoeiro foram fração areia e argila do solo e teores foliares de P, Ca, Mg e N.

### Referências

BOOLTINK, H.W.G.; VERHAGEN, J. Integration of remote sensing, modeling and field measurements towards an operational decision support system for precision agriculture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick. **Proceedings ...** Oxford: Bioss Scientific. 1997. v. 2, p. 921-929. 1 CD-ROM.

BRONSON, K.; KEELING, W.; LASCANO, R.; BOMAN, R. **Variable rate phosphorus fertilization in cotton on the Texas high plains.** Disponível em: <<http://precag.tamu.edu/brochures/pfert.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOWAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, L.H.; CHIAVEGATO, E.J. Fatores que afetam a produtividade do algodoeiro. In: In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 1-8.

CARVALHO, M.C.S.; FERREIRA, G.B. **Calagem e adubação do algodoeiro no cerrado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006.16 p. (Circular Técnica, 92).

CORA, J.E., ARAUJO, A.V., PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

CORA, J.E.; BERALDO, J.M.G.. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 374-387, 2006.

DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A.; FONTES, M.P.F.; KER, J.C.; SCHAFFER, C.E.G.R. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1151-1159, 2003.

EMBRAPA. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. 296 p.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

GOEL, P.K.; PRASHER, S.O.; LANDRY, J.A.; PATEL, R.M.; BONNELL R.B.; VIAU A.A.; MILLER J.R. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 38, p. 99-124, 2003.

HAN, S.; HUMMEL, J.W.; GOERING, C.E.; CAHN, M.D. Cell size selection for site-specific crop management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, p. 19-26. 1994.

JOHNSON, R.M.; DOWNER, R.G.; BRADOW, J.M.; BAUER, P.J.; SADLER, E.J. Variability in cotton fiber yield, fiber quality and soil properties in a Southeastern Coastal Plain. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 1305-1316, 2002.

LAMAS F. M.; STAUT, L. A. Espaçamento e densidade. In: Embrapa. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. p. 135 – 139.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: MOLIN, J.P. (ed), 2001. 83 p.

MONTEZANO, Z.F.; CORAZZA, E.J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 839-847, 2006.

MULLA, D.J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: SOIL SPECIFIC CROP MANAGEMENT, 1992, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1993. p. 15-26. 1 CD-ROM.

MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: Pierce, F.J., Sadler, E.J. (Ed.). **The site-specific management for agricultural systems**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1997. p. 1-18.

PAIVA, F. A.; ASMUS, G. L.; ARAUJO, A. E. Doenças. In: Embrapa. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. p. 245 – 268.

PIERCE, F. J.; WARNCKE, D. D.; EVERETT, M. W. Yield and nutrient variability in glacial soils of Michigan. In: ROBERT, P.C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. (Ed.). **The site-specific management for agricultural systems**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1995. p. 133-151.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/SAT user's guide: version 6**. Cary, 1998.1848 p.

SILVA, F.M.; SOUZA, Z.M; FIGUEIREDO, C.A.P.; MARQUES JÚNIOR, J.; MACHADO, R.V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 401-407, 2007.

SILVA, N.M. Nutrição mineral e adubação do algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p.57-89.

STAUT, L.A.; KURIHARA, C.H. Calagem e adubação. In: EMBRAPA. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. p. 103-122.

STEWART, C.; BOYDELL, B.; MCBRATNEY, A. **Precision decisions for quality cotton: a guide to site-specific cotton crop management**. Sidney: The University of Sydney and Cotton Research and Development Corporation, 2005. 107 p.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 45-93, 1985.

VALCO, T.D.; NICHOLS; R.L.; LALOR, W.F. Adopting precision farming technology for cotton nutrition. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1998, San Diego. **Proceedings ...** Memphis: National Cotton Council and the Cotton Foundation, 1998 p. 627–629.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVARES, V.H.; SCHAEFFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

WARD, B.D.; COX, M.S. Influences of soil chemical and physical properties on site-specific cotton production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA; CSSA; SSSA. 2000. 1 CD-ROM.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. In: STEWART, B.A. (Ed.). **Advance in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1985. v. 3, p. 1-70.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; HALL, G.F. **Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions**. New York, Elsevier, 1983. p. 83-116.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 p. Tese (Livre-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2001.

## 4 UTILIZAÇÃO DE SENSOR ÓPTICO ATIVO PARA DETECTAR DEFICIÊNCIA FOLIAR DE NITROGÊNIO EM ALGODOEIRO

### Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar, em condições de campo, o efeito da variação de doses de nitrogênio na detecção do teor de nitrogênio foliar do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. var. *latifolium* Hutch), utilizando propriedades de reflectância obtidas por um sensor óptico ativo. O delineamento experimental foi o aleatorizado em blocos, com cinco tratamentos (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N) e quatro repetições. Os dados do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e da razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP) foram coletados no período de 23 a 92 dias após a emergência (DAE) totalizando nove datas de coleta. Foram coletados também dados referentes ao índice de clorofila, índice de área foliar (IAF) e altura de plantas. Os valores do NDVI apresentaram uma tendência crescente ao longo do período das leituras, enquanto a relação V/IVP teve comportamento inverso, e a partir de 45 DAE, foram afetados significativamente pelas doses de nitrogênio aplicadas. Relações significativas foram observadas entre os valores do NDVI e índice de clorofila e IAF. Aos 92 DAE o NDVI apresentou relação linear positiva e altamente significativa com o teor foliar de nitrogênio. Estes dados indicam que o sensor utilizado pode ser uma ferramenta efetiva para estimar a deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; NDVI, Estado nutricional

## USE OF ACTIVE OPTICAL SENSOR TO DETECT NITROGEN DEFICIENCY IN COTTON

### Abstract

This work aimed to evaluate, at field conditions, the effect of variation of nitrogen levels on the detection of its content on cotton (*Gossypium hirsutum* L. var. *latifolium* Hutch) leaves using reflectance properties by an optical active sensor. The experimental was conducted as a randomized block design and treatments consisted on five levels of nitrogen fertilization (0, 50, 100, 150 and 200 kg of N ha<sup>-1</sup>) with four replications. The readings of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the ratio Red/Near infrared (RED/NIR) were collected between 23 to 92 days after the emergency (DAE), with the total of 9 visits. Data referred to the chlorophyll index, leaf area index (LAI) and plants height were also collected. The values of NDVI presented a growing tendency along the period, while RED/NIR had an inverse behavior, being significantly affected by the rates of applied N, starting from 45 DAE. At 92 DAE, NDVI presented a positive linear relationship with leaves nitrogen content. Significant relationships were observed between the values of NDVI and chlorophyll index and LAI. The sensor shown to be a potential tool for nitrogen deficiency detection in cotton.

Keywords: Precision agriculture; NDVI; Nutritional state

#### 4.1 Introdução

Dentre as espécies de algodoeiro cultivadas no Brasil, o algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* var. *latifolium* Hutch) merece destaque tanto pelo volume e valor da produção quanto pela elevada utilização de insumos como corretivos e fertilizantes, herbicidas, inseticidas, fungicidas e reguladores de crescimento. 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.

A utilização de grandes quantidades de insumos, por um lado, tem aumentado a produtividade das culturas, por outro, pode ter efeitos danosos ao meio ambiente. Diante deste dilema, a aplicação regionalizada de insumos, de acordo com as necessidades específicas dentro de uma lavoura permite a otimização na utilização de insumos, sem prejuízos à produtividade e respeitando o equilíbrio ambiental. A adoção de técnicas racionais de uso de insumos vai além do propósito de obter lucro ou evitar prejuízos, haja vista que possibilita um controle da quantidade de insumos que estão sendo lançados no meio ambiente. Aplicação de doses mais precisas de fertilizantes, por exemplo, permite que a planta tenha à sua disposição a quantidade que ela realmente necessita, sem excessos ou faltas, e que esta, então, possa expressar ao máximo seu potencial produtivo.

O nitrogênio é um dos insumos que tem freqüentemente causado problemas de mau uso, devido à variabilidade dos processos de mineralização, lixiviação, desnitrificação e absorção pela cultura (BOOIJ et al., 2001). Este nutriente geralmente é considerado um 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). Segundo Staut e Kurihara (2001), o nitrogênio é fundamental no desenvolvimento da planta, principalmente dos órgãos vegetativos. Quando em doses adequadas, estimula o crescimento e o florescimento, regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento e a resistência da fibra. Em doses elevadas, verifica-se um aumento no desenvolvimento vegetativo da planta em detrimento da produção e formação tardia dos frutos do algodoeiro.

A deficiência de nitrogênio causa mudanças previsíveis no desenvolvimento e composição das folhas das plantas, e indiretamente causa mudanças na distribuição espectral de

radiação refletida pelas folhas de plantas deficientes (TARPLEY et al., 2000). O monitoramento do status de nitrogênio numa cultura é um pré-requisito para a aplicação de fertilizante com precisão temporal e, segundo Read et al. (2003), as mudanças no estado nutricional do algodoeiro podem ser determinadas diretamente em um laboratório por análise química de amostras de tecido ou indiretamente no campo medindo a reflectância foliar em estreitos comprimentos de onda. Em parte, isto ocorre por que a reflectância na região visível do espectro eletromagnético (300-700 nm) varia como uma função da concentração de clorofila na folha, a qual está relacionada com o nitrogênio foliar.

Clorofilômetros manuais também determinam com rapidez o conteúdo de clorofila nas folhas e permitem estimar o estado nutricional de uma cultura para aplicações eficientes de fertilizantes nitrogenados. Vários estudos ilustram altas correlações entre leituras de clorofilômetros manuais e concentrações de nitrogênio foliar em algodoeiro (MALAVOLTA et al., 2004; NEVES et al., 2005).

O objetivo deste trabalho foi avaliar, em condições de campo, o efeito da variação de doses de nitrogênio na detecção do teor de nitrogênio foliar utilizando um medidor portátil de clorofila e propriedades de reflectância através de um sensor óptico ativo.

## **4.2 Desenvolvimento**

### **4.2.1 Material e métodos**

O estudo foi conduzido na área experimental do Departamento de Produção Vegetal da USP/ESALQ, em Piracicaba, SP, com coordenadas geográficas 22<sup>o</sup>42'30" S e 47<sup>o</sup>38'00" W, altitude média de 546 m e relevo suave ondulado. O solo da área de estudo pertence à classe Nitossolo Eutrófico, textura argilosa.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos aleatorizados, com cinco tratamentos e quatro repetições, totalizando 20 parcelas. Cada parcela, com quatro linhas de plantas, teve as dimensões de 3,6 m x 5,0 m, (área total de 18 m<sup>2</sup>). Os dados foram coletados em duas linhas centrais de 4,0 m de comprimento, descartando-se uma linha de bordadura de cada lado da parcela e 0,5 m nas outras duas extremidades.

A semeadura do algodoeiro, cultivar DeltaOpal, foi realizada manualmente, em espaçamento de 0,90 m, no dia 14/03/2006. A adubação de semeadura foi realizada de acordo com a análise do solo, sendo aplicado o correspondente a 250 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 8-28-16. Os tratamentos fitossanitários e demais tratos culturais foram realizados para garantir o bom desenvolvimento das plantas, de maneira uniforme em todos os tratamentos. A emergência das plantas ocorreu no dia 20/03/06.

Os tratamentos consistiram das doses 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicadas em cobertura e parceladas em três aplicações, utilizando como fonte o fertilizante uréia. As adubações em cobertura com uréia foram realizadas nos dias 11/04, 26/04 e 10/05 de 2006, respectivamente aos 22, 37 e 45 dias após a emergência das plantas (DAE) e sempre seguidas de incorporação do adubo e irrigação. Aos 23 DAE foi realizado o ajuste do estande, a fim de se obter 10 pl m<sup>-1</sup> linear.

As leituras do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP) foram realizadas no período de 23 a 92 dias após a emergência (DAE), totalizando 9 datas de coleta de dados, utilizando-se um sensor óptico ativo comercial (GreenSeeker Hand Held<sup>TM</sup>, NTech Industries, Inc., Ukiah, CA), que emite luz no comprimento de onda do vermelho (660 nm) e do infravermelho próximo (770 nm), mede a luz refletida pelas plantas e calcula automaticamente o NDVI. O sensor foi desenvolvido para coletar dados a uma altura variável entre 0,80 e 1,20 m de distância do alvo, com largura constante de 61 cm. De acordo com o fabricante, neste intervalo, o sensor é insensível à variação na altura, não alterando o valor do NDVI.

As leituras com o clorofilômetro foram realizadas na quinta folha completamente expandida a partir do ápice das plantas em 10 plantas por parcela, aos 45, 53, 60 e 85 DAE. O medidor de clorofila mede o tom de verde da folha, o qual é afetado por vários fatores, sendo o principal o teor de N na planta. O equipamento utilizado foi o SPAD-502, Minolta, que calcula o índice de clorofila pela razão entre dois comprimentos de onda transmitidos a 650 nm (vermelho) e 940 nm (IVP).

As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas por meio de um método não destrutivo, utilizando-se o equipamento “Plant Canopy Analyzer”, modelo LAI-2000 (LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, EUA). Para estimar o IAF as medidas de radiação difusa, acima e abaixo

do dossel do algodoeiro, foram tomadas nas mesmas posições dentro das parcelas, em três pontos pré-estabelecidos.

A amostragem de tecido foliar foi realizada aos 92 DAE, com a cultura iniciando o estágio de florescimento, através de uma amostra composta de 20 folhas por parcela, para determinação dos teores de nitrogênio conforme métodos descritos por Malavolta et al. (1997). Deve-se ressaltar que o início do florescimento ocorreu aos 92 DAE devido à semeadura tardia da cultura.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SAS (1998). O efeito dos tratamentos e da relação entre as variáveis foi avaliado por meio de análise de variância, verificando-se a significância pelo teste F de Snedecor, análise de regressão e correlação linear de Pearson.

#### **4.2.2 Resultados**

##### **Relação entre teor foliar de N e doses aplicadas**

Devido às baixas temperaturas durante o período de condução do experimento, as plantas apresentaram desenvolvimento lento, não atingindo o florescimento pleno até os 92 DAE. Edmisten (2003) constatou que o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do algodoeiro é fortemente relacionado à temperatura quando há umidade adequada no solo. Segundo Albers (2005), o crescimento da plantas do algodoeiro depende da combinação de três fatores: radiação solar, utilizada por folhas saudáveis para a produção de carboidratos; temperatura, para um rápido desenvolvimento da planta, e do sistema radicular saudável para absorção de nutrientes necessários para a estrutura básica das plantas e para o desenvolvimento de novas estruturas.

Na Figura 4.1, é possível observar o comportamento quadrático do teor de N no tecido foliar aos 92 DAE em relação às doses de N aplicadas. Os teores foliares médios de N foram baixos nas doses de 0 e 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, enquanto que nas demais mantiveram-se dentro da faixa de teores adequados (35 – 43 g kg<sup>-1</sup>), segundo critérios estabelecidos por Silva (1999). Fazendo-se a derivada da equação de regressão, obtém-se o ponto de máximo teor foliar de N (34,66 g kg<sup>-1</sup>) exatamente quando aplicada a dose de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura.

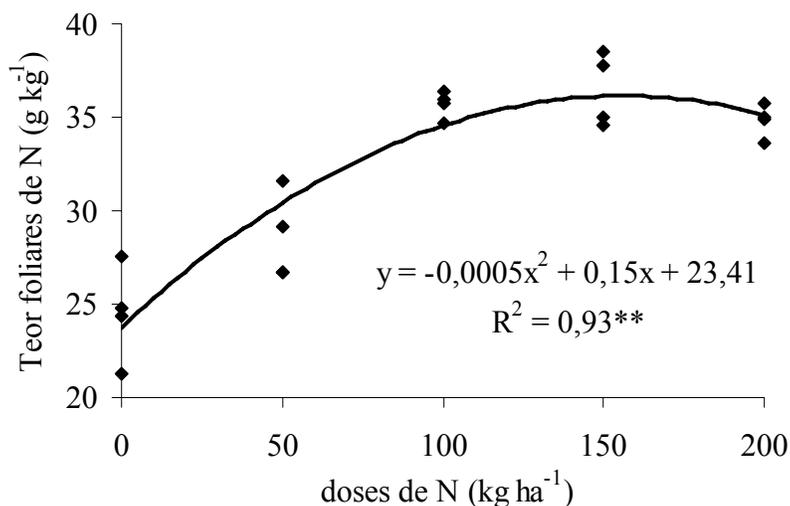


Figura 4.1 – Relação entre doses de N aplicadas e teores foliares de N aos 92 DAE

#### Relações entre NDVI, V/IVP, índice de clorofila e IAF com doses de N aplicadas

As relações entre as doses de N aplicadas e a resposta da cultura através do NDVI, V/IVP, índice de clorofila e IAF são apresentadas na Tabela 4.1. Os valores do coeficiente de variação (CV) para o NDVI foram baixos e tiveram uma tendência de diminuição com o decorrer do experimento, com valor máximo de 9,8 aos 23 DAE e mínimo de 1,4 aos 85 DAE. A razão simples V/IVP apresentou valores de CV crescentes ao longo do período e, geralmente, maiores do que os do NDVI, exceto na primeira leitura (CV de 7,24%), embora os valores tenham sempre ficado abaixo de 20% (exceto na 4ª leitura, quando o CV chegou a 20,4%).

Uma aplicação de fungicida à base de estrobirulina, aos 45 DAE causou fitotoxicidade às plantas, que se manifestou como avermelhamento das folhas. Este fato foi detectado aos 60 DAE pelo sensor óptico em todas as doses, mas com maior expressão na dose de 0 kg ha<sup>-1</sup>, e também pelo clorofilômetro, nas doses de 0 e 50 kg ha<sup>-1</sup>, resultando em uma diminuição nos valores obtidos do NDVI e índice de clorofila.

Os valores de NDVI (Figura 4.2a) e do índice de clorofila apresentaram uma tendência crescente ao longo do período das leituras, enquanto a razão simples V/IVP teve um comportamento inverso (Figura 2b).

Tabela 4.1 – Média geral, coeficiente de variação (CV) e relação entre doses de N aplicadas e leitura de NDVI, razão simples (V/IVP), índice de clorofila e IAF

DAE	média	CV(%)	equação	R <sup>2</sup>
NDVI				
23	0,339	9,8	$y = -5E-05x + 0,3436$	0,05 <sup>ns</sup>
29	0,498	8,0	$y = 9E-05x + 0,4916$	0,03 <sup>ns</sup>
45	0,584	8,4	$y = 0,0005x + 0,5389$	0,49**
51	0,725	5,1	$y = 0,0004x + 0,6853$	0,41**
60	0,758	4,5	$y = -3E-06x^2 + 0,0011x + 0,6928$	0,56**
65	0,832	2,6	$y = 0,0002x + 0,8075$	0,36*
74	0,830	3,1	$y = -3E-06x^2 + 0,0009x + 0,7813$	0,51**
85	0,849	1,4	$y = -2E-06x^2 + 0,0008x + 0,8092$	0,71**
92	0,833	2,2	$y = -4E-06x^2 + 0,0013x + 0,7663$	0,72**
V/IVP				
23	0,495	7,2	$y = 0,00005x + 0,5091$	0,07 <sup>ns</sup>
29	0,339	10,0	$y = -0,00009x + 0,3634$	0,06 <sup>ns</sup>
45	0,264	15,7	$y = -0,00038x + 3595$	0,47**
51	0,159	20,4	$y = -0,00031x + 2049$	0,29**
60	0,138	17,6	$y = 0,000003x^2 - 0,0010x + 0,1945$	0,57**
65	0,090	16,0	$y = -0,00015x + 1116$	0,33**
74	0,090	16,1	$y = 0,000002x^2 - 0,00064x + 12,25$	0,57**
85	0,079	9,3	$y = 0,000001x^2 - 0,0005x + 0,1049$	0,71**
92	0,089	12,9	$y = 0,000003x^2 - 0,0008x + 0,1318$	0,71**
Índice de clorofila				
45	44,15	4,55	$y = 0,04x + 37,26$	0,73**
53	46,56	4,84	$y = -0,0003x^2 + 0,11x + 37,77$	0,72**
60	47,48	3,88	$y = -0,0005x^2 + 0,16x + 36,47$	0,89**
85	49,53	3,74	$y = -0,0008x^2 + 0,21x + 40,42$	0,92**
IAF				
58	0,45	30,44	$y = 0,001x + 0,2525$	0,31*
66	0,71	21,97	$y = 0,0015x + 0,401$	0,44**
73	0,88	20,18	$y = 0,0022x + 0,4308$	0,56**
80	1,63	13,75	$y = -0,00003x^2 + 0,0093 + 0,7874$	0,73***
95	1,92	14,08	$y = -0,00001x^2 - 0,0068x + 1,172$	0,64***

DAE: dias após a emergência; CV: coeficiente de variação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do modelo; ns: não significativo; \*, \*\* e \*\*\*: significativo ao nível de 0,05; 0,01 e 0,001 de probabilidade.

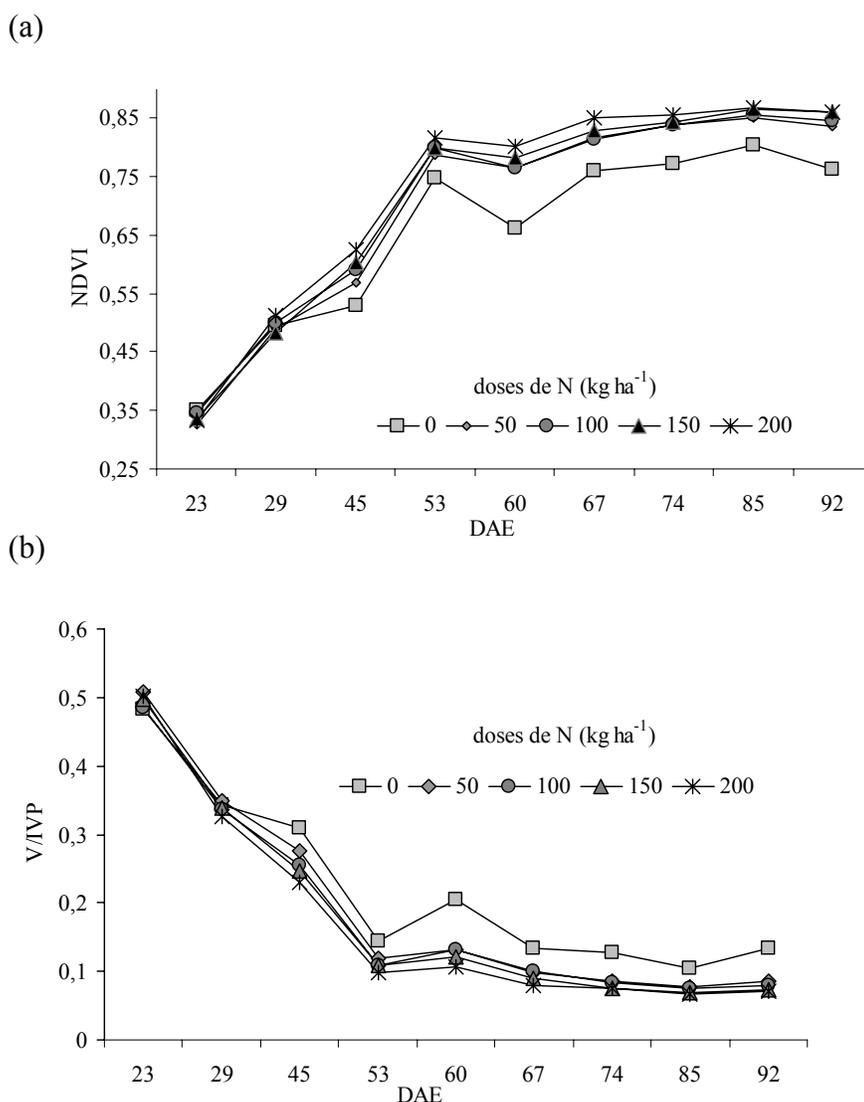


Figura 4.2 – Gráfico de perfis para: (a) NDVI; (b) razão simples V/IVP

Na Figura 4.3 está apresentada a resposta do NDVI e índice de clorofila à aplicação de N em quatro datas de coleta de dados. A primeira leitura com o sensor óptico ativo foi realizada logo após a aplicação da primeira adubação de cobertura nitrogenada, assim era previsível que não haveria diferenças entre os tratamentos, pois o N aplicado não havia sido completamente absorvido e tampouco metabolizado. A partir da terceira leitura (45 DAE), os valores de NDVI e V/IVP foram afetados significativamente pelas doses de N aplicadas, indicando a utilização de N pelas plantas, que é maior durante os estágios de maior crescimento vegetativo.

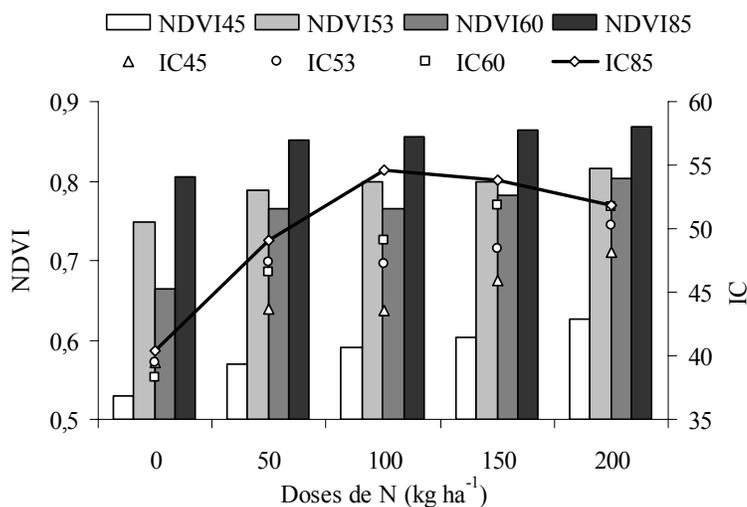


Figura 4.3 – Valores do NDVI (à esquerda) e índice de clorofila – IC (à direita) em relação às doses de N aplicadas aos 45, 53, 60 e 85 dias após a emergência das plantas

Com a deficiência de N, ocorre a diminuição da concentração de clorofila e do conteúdo de proteína solúvel, bem como da taxa de expansão foliar e desenvolvimento da planta (READ et al., 2002). Como a reflectância na região do visível do espectro eletromagnético varia em função da concentração de clorofila no tecido foliar, quanto menor o suprimento de N na planta, menor será o nível de clorofila e conseqüentemente menor será a absorção da radiação na região do visível, o que causa a redução do NDVI. As diferenças foram mais acentuadas entre a ausência de adubação nitrogenada (dose de 0 kg ha<sup>-1</sup>) e as demais doses, não havendo grande distinção entre elas ao longo do período de coleta de dados.

Utilizando o clorofilômetro aos 45 DAE (Figura 4.4), as leituras apresentaram relação linear com as doses aplicadas. A partir da segunda leitura, aos 53 DAE, o comportamento tornou-se quadrático, aumentando a significância com o decorrer do experimento.

Até os 73 DAE, as relações entre doses de N aplicadas e o IAF foram lineares. A partir dos 80 DAE, as relações foram quadráticas e altamente significativas (Figura 4.5).

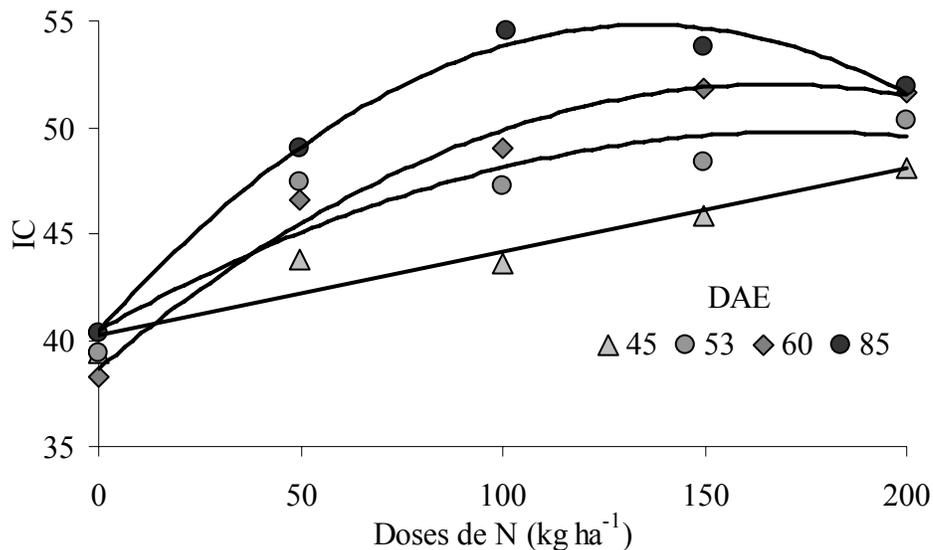


Figura 4.4 – Curvas de regressão ajustadas para o índice de clorofila em função das doses de N aplicadas aos 45, 53, 60 e 85 dias após a emergência das plantas

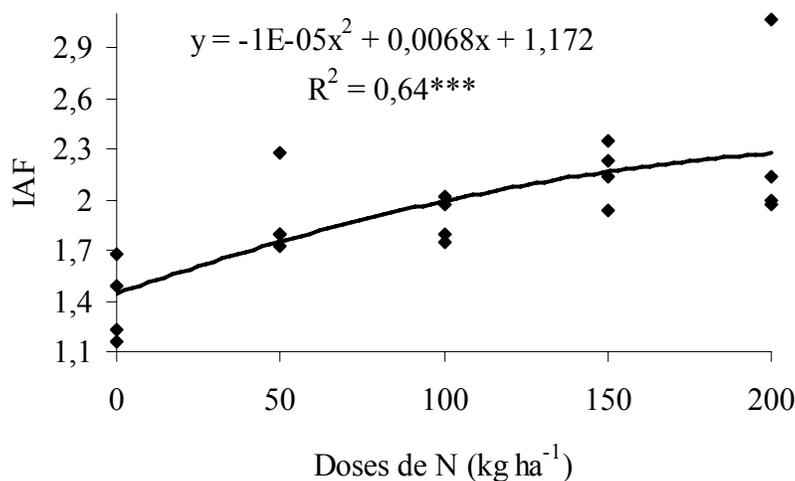


Figura 4.5 – Curva de regressão ajustada para o IAF em função das doses de N aplicadas aos 95 dias após a emergência das plantas

#### Relações entre NDVI, V/IVP, índice de clorofila e IAF com teores foliares de N

Aos 92 DAE, o NDVI apresentou relação linear positiva com o teor foliar de N (Figura 4.6 a), o que pode indicar que não houve saturação ou “consumo de luxo” de N pelas plantas, mesmo nos tratamentos com doses mais elevadas, uma vez que o N não incorporado às moléculas de clorofila não alteram as propriedades de reflectância da cultura (BLACKMER; SCHEPERS,

1994). A razão simples V/IVP (Figura 4.6 b) apresentou comportamento inverso ao NDVI. Folhas com baixos teores de N, em consequência, menores teores de clorofila, têm maior reflectância e transmitância no visível (400-700 nm) e baixas reflectância e transmitância no infravermelho próximo (NOH et al., 2005), causando alterações nos valores de NDVI e V/IVP.

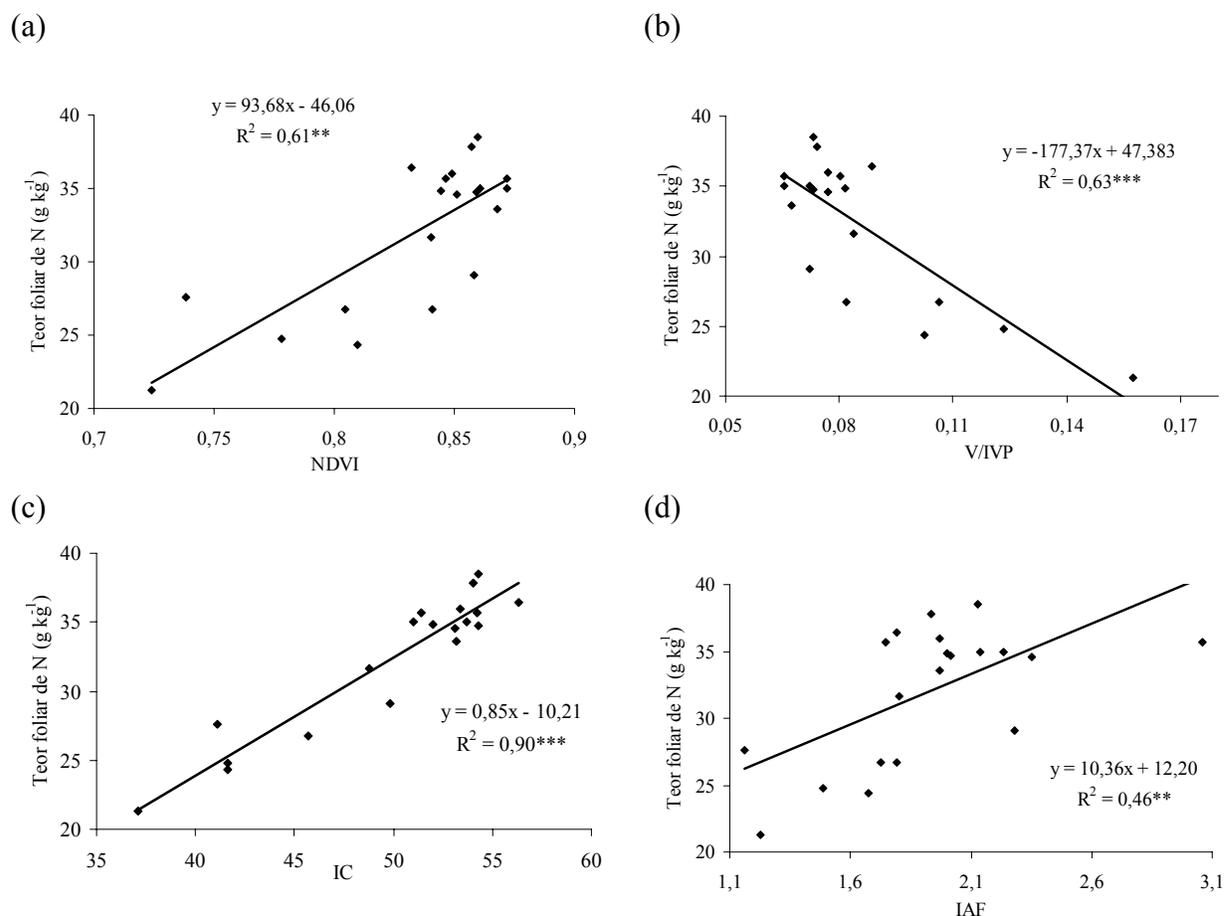


Figura 4.6 – Regressão linear simples entre o teor foliar de N e: (a) NDVI, (b) V/IVP aos 92 DAE; (c) IC (índice de clorofila) aos 85 DAE e (d) IAF, aos 95 DAE

As leituras do índice de clorofila aos 85 DAE também apresentaram relação linear altamente significativa com os teores foliares de N no algodoeiro (Figura 4.6 c), confirmando resultados obtidos por Malavolta et al. (2004), Neves et al. (2005) e Reis et al. (2006). Observa-se que as leituras com o clorofilômetro apresentaram menor dispersão de pontos ao longo da reta de regressão, comparado com o sensor óptico ativo, conseqüentemente apresentaram um maior  $R^2$ . Esta maior acurácia do clorofilômetro em estimar os teores foliares de N deve-se à menor interferência de variáveis que podem afetar a reflectância do dossel da cultura.

O comportamento do NDVI, em resposta à variação do IAF foi quadrático em todos os períodos mensurados, conforme pode ser observado na Figura 4.7 e Tabela 4.2. Segundo Moreira (2001), o NDVI aumenta linearmente com o aumento do índice de área foliar e então assume uma forma assintótica, a partir de onde o NDVI aumenta pouco, relativamente ao aumento do IAF. A diminuição da sensibilidade de NDVI em altos valores de IAF ocorre devido à reflectância ser atenuada quando a superfície do solo está completamente encoberta pelas folhas. Esta saturação ocorre devido à quantidade de luz vermelha que pode ser absorvida pelas folhas, rapidamente alcançando um pico. Em contraste, a radiação no infravermelho próximo difundida pelas folhas continua a aumentar quando o IAF excede a 3,0. Como resultado, quando o dossel atinge 100%, a reflectância no IVP continua a aumentar, mas a reflectância no vermelho apresentará pequena diminuição, resultando em suaves mudanças na razão. Embora essa característica do NDVI seja uma deficiência para algumas aplicações, tais como inferência da biomassa total, pode também ser uma vantagem para identificar os valores de NDVI nos quais as superfícies estão completamente cobertas por vegetação. Neste trabalho, como a cultura do algodoeiro apresentou um desenvolvimento lento, devido às baixas temperaturas, e não cobriu completamente as entrelinhas, o IAF não ultrapassou o valor de 3,0 e por isso não se observou comportamento assintótico, como outros autores obtiveram.

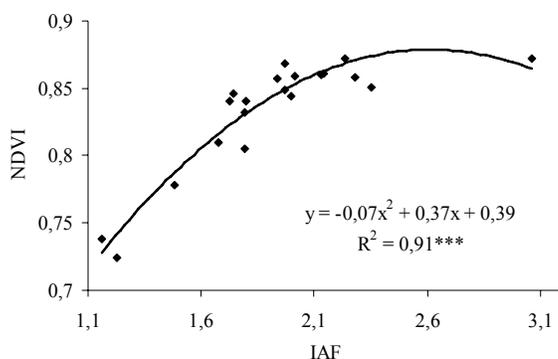


Figura 4.7 – Relação entre NDVI e IAF aos 95 DAE

Tabela 4.2 - Relações entre os valores de NDVI (y) em função dos valores de IAF (x)

DAE	equação	R <sup>2</sup>
58	$y = -0,8624x^2 + 1,1602x + 0,4491$	0,79***
66	$y = -0,3791x^2 + 0,7054x + 0,5376$	0,70***
73	$y = -0,1926x^2 + 0,473x + 0,6028$	0,89***
80	$y = -0,0409x^2 + 0,1876x + 0,6704$	0,79***
95	$y = -0,0679x^2 + 0,3625x + 0,4084$	0,91***

DAE: dias após a emergência; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do modelo; \*\*\*: significativo ao nível de 0,001 de probabilidade.

### Relações ente altura de plantas e variáveis medidas pelos sensores

Neste trabalho, as doses de N aplicadas ao solo apresentaram relação quadrática e significativa com a altura das plantas (Figura 4.8 a). As demais variáveis analisadas apresentaram relações lineares e positivas com a altura das plantas (Figuras 4.8 b a 4.8 e).

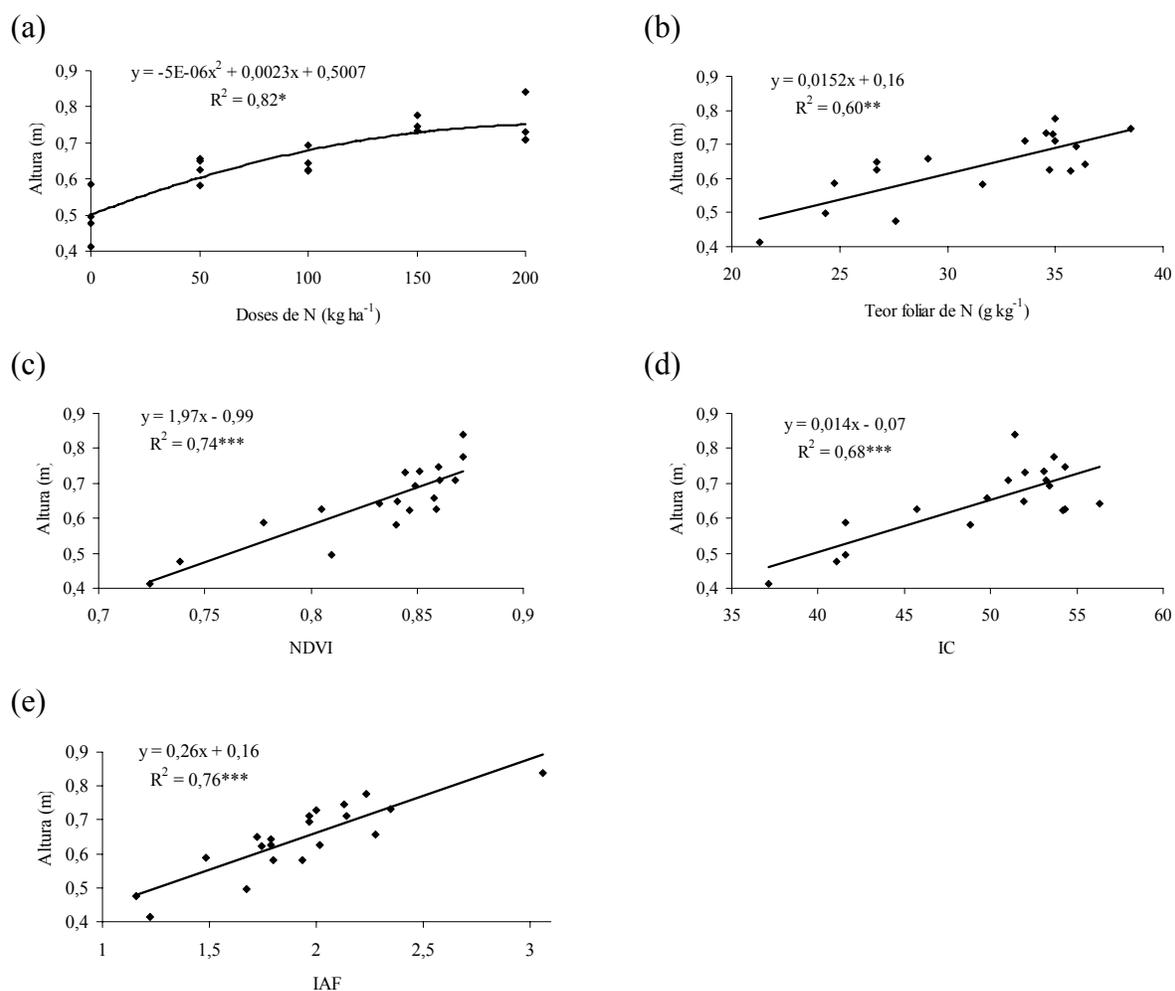


Figura 4.8 – Regressões entre altura de plantas aos 85 DAE e doses aplicadas, teores foliares de N, NDVI, IC e IAF

Como o N é constituinte de muitos componentes da célula vegetal, como aminoácidos e ácidos nucleicos, a deficiência rapidamente inibe o crescimento vegetal e caso a deficiência persista, pode ocorrer clorose e queda de folhas. Se a deficiência desenvolve-se lentamente, os caules tornam-se pronunciadamente delgados e comumente lenhosos devido ao acúmulo de carboidratos em excesso, que não podem ser utilizados na síntese de aminoácidos e outros compostos nitrogenados (TAIZ; ZEIGER, 2004).

### 4.2.3 Discussão

Apesar de apresentar melhor acurácia, a dificuldade operacional de coleta de dados com o clorofilômetro manual impede seu uso em grande escala. Esta é a grande vantagem da utilização do sensor óptico para estimar condições de deficiência de N numa lavoura. O uso de medidas de reflectância como indicador do estado nutricional das culturas referente ao N ainda está em fase inicial, em relação a outros métodos de diagnose nutricional. Os aspectos positivos desta tecnologia em relação a outros métodos de diagnose referem-se 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. Isto é essencial para a correção de deficiência de N (SCHRÖDER et al., 2000).

Conforme salientaram Graeff Claupein (2003), o uso de técnicas de sensoriamento remoto pode eliminar a necessidade de extensivas amostragens na lavoura, desde que a capacidade de detecção de deficiências seja alta. Para Schröder et al. (2000), parcelas ricas em N são um pré-requisito para serem utilizadas como referência para realizar a diagnose como ferramentas para corrigir efeitos de coloração na cultura que não são causadas por N, como pragas, doenças, densidade populacional, senescência, aparecimento de caules coloridos relativamente iluminados. Davis et al. (1996) e Kachanoski et al. (1996), entretanto, alertaram que parcelas não fertilizadas, como referência, proporcionam uma base mais realística para a produção de mapas de produtividade do que as parcelas bem fertilizadas.

Os valores do NDVI e do índice de clorofila diminuem em culturas sob estresse hídrico. Adicionalmente, culturas, datas de semeadura e efeitos espaciais e sazonais têm impacto sobre as leituras. Além disso, no caso do índice de clorofila, cores diferentes podem existir ao longo da

lâmina foliar. Estas fontes de variação sugerem a necessidade de um rígido protocolo de amostragem, para corrigir erros e normalizar as medidas obtidas.

O sensor utilizado mostrou-se eficiente na detecção da concentração de clorofila e dos teores de N no tecido foliar do algodoeiro. Esta informação pode ser útil para, combinada com um algoritmo de fertilização, indicar as doses de N a serem aplicadas à cultura, em tempo hábil, dentro do ciclo da cultura.

Schröder et al. (2000) ressaltaram que as leituras do clorofilômetro não são boas preditoras do excesso de N porque quando a disponibilidade de N é alta nem todo o N é convertido em clorofila. Entretanto, na ocorrência de deficiência, esta é imediatamente refletida como baixa concentração de clorofila, a qual é medida acuradamente com o sensor. Rotineiramente, leituras com o clorofilômetro são utilizadas como uma forma de calibrar os resultados obtidos com os sensores ópticos.

Além das medidas de reflectância e transmitância, atualmente outras variáveis estão sendo estudadas para detectar N em culturas. Limbrunner e Maidl (2007) observaram boas correlações entre N absorvido e medidas de fluorescência da clorofila em trigo, através de regressões exponenciais, o que indica que esta ferramenta é eficiente para detectar tanto baixas quanto altas concentrações de N foliar, sem que ocorra saturação nas curvas como acontece com as medidas de reflectância. Além disso, mesmo nos estádios iniciais, as correlações são elevadas, uma vez que somente o material vivo emite fluorescência, então o solo descoberto não exerce influência sobre as medidas.

Klotz, Bach e Mauser (2003) afirmaram que o crescimento da agricultura de precisão e monitoramento ambiental requer novos sistemas e técnicas de aquisição de dados para obter informação detalhada do status da vegetação. Estes autores defenderam o desenvolvimento de sensores hiper-espectrais de alta precisão para analisar a superfície da lavoura, uma vez que sistemas de sensoriamento remoto multi-espectrais, tais como Landstat ETM, SPOT ou IKONOS, obtêm as informações de poucas bandas apenas.

Tarpley et al (2000) estabeleceram um conjunto de curvas de calibração com relação de bandas de reflectância de 1,5 nm para o algodoeiro e níveis de concentração de N nas folhas, em casa de vegetação. Somente as relações que combinaram vermelho extremo (700 ou 716 nm) com uma banda de alta reflectância na região do infravermelho muito próximo (755-920 a 1000 nm)

proporcionaram boa precisão (correlação) e acurácia. Outros índices que incluíram uma refletância baseada na feição da clorofila também tiveram boa precisão, mas menor acurácia que aqueles obtidos das relações de reflectância vermelho extremo/infravermelho muito próximo.

Read et al. (2002) constataram em algodoeiro cultivado em solução nutritiva que a reflectância no azul (415 nm) foi mais estável sob condições de deficiência de N, quando comparado com a banda do vermelho, principalmente na região do “red edge” (690-730 nm). Para estes autores, o sensoriamento remoto para verificar o estado de N em algodoeiro é mais viável usando razões que envolvem bandas estreitas na região do violeta ou azul (400 a 500 nm) e a caracterização do vermelho extremo. Sui et al. (2004), entretanto, observaram que, apesar do conteúdo foliar de N no algodoeiro ser significativamente correlacionado com um modelo formado pelas reflectâncias no azul, verde, infravermelho e altura de plantas, as maiores correlações foram obtidas nas bandas do vermelho e infravermelho e as menores no verde e azul. Apesar do azul isolado não ter apresentado significância, sua inclusão no modelo permitiu melhorar a habilidade dos outros canais em explicar a variação de N.

Zhao et al. (2005), avaliando o efeito de adubação nitrogenada e aplicação de regulador de crescimento (PIX) no algodoeiro, observaram que o baixo suprimento de N resultou em baixos níveis de clorofila na folha, e este estresse foi determinado precocemente nas plantas com o aumento da refletância na faixa do visível, nos comprimentos de onda de 550 a 700 nm. Mudanças nos níveis de N entre os tratamentos foram determinadas de uma simples razão de refletância nas folhas (517/413). Entre as medidas de refletância examinadas, as maiores correlações com produtividade de fibras foram obtidas com o NDVI. Os resultados indicam que as mudanças na produtividade de fibras do algodoeiro foram fortemente relacionadas com valores de NDVI no estágio do início da floração, e não relacionadas em outros períodos do ciclo. Os autores sugerem que essas medidas podem ser usadas no sensoriamento remoto do “status” de N no algodoeiro. Com o processamento desta informação, pode-se formular estratégias de manejo cultural em locais específicos. Desta forma, mapas de parâmetros da vegetação (como biomassa e teor de clorofila) podem servir como uma fonte valiosa de informação para utilização em agricultura de precisão. Uma vez que a variabilidade seja mapeada, os procedimentos agrícolas podem ser planejados de acordo com esta informação.

Trabalhos devem ser realizados para avaliação de diferentes índices de reflectância em nível de dossel, tanto em laboratório como em condições de campo, usando espectrorradiômetros, na busca de índices mais eficientes para cada cultura. Sugere-se também a inclusão de outras variáveis, tais como horário de coleta para verificar o comportamento dos sensores diante de diferentes intensidades luminosas que alteram o comportamento fisiológico das plantas.

### 4.3 Conclusões

Os valores de NDVI, e índice de clorofila apresentaram tendência crescente ao longo do período das leituras e foram afetados significativamente pelas doses de N aplicadas, a partir de 45 DAE, indicando a maior utilização de N pelas plantas durante os estádios de maior crescimento vegetativo. Até os 73 DAE, as relações entre doses de N aplicadas e o IAF foram lineares. A partir dos 80 DAE, as relações foram quadráticas e altamente significativas. O comportamento do NDVI, em resposta à variação do IAF foi quadrático em todos os períodos observados. O sensor utilizado mostrou-se uma ferramenta potencial para a detecção da deficiência de nitrogênio na cultura do algodoeiro nas condições apresentadas.

### Referências

- ALBERS, D.W. **Cotton plant development and plant mapping**. Columbia: University of Missouri, 2005. Disponível em: <http://muextension.missouri.edu/explore/agguides/crops/g04268.ht>. Acesso em: 10 nov. 2006.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, p.1791-1800, 1994.
- BOOIJ, R.; UENK, D.; LOKHORST, C; SONNEVELD, C. Monitoring crop nitrogen status in potatoes, using crop light reflection. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings ...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. p. 893-897. 1 CD-ROM.
- DAVIS, J.G.; MALZER, G.L.; COPELND, P.J.; LAMB, J.A.; ROBERT, P.C.; BRUUSELMA, T.W. Using yield variability to characterize spatial crop response to applied N. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings ...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996. p. 513-519.

EDMISTEN, K.L. The cotton plant. In: \_\_\_\_\_. **Cotton production guide**. North Carolina: North Carolina State University, 2006. Disponível em: <[http://ipm.ncsu.edu/Production\\_Guides/Cotton](http://ipm.ncsu.edu/Production_Guides/Cotton)>. Acesso em: 10 nov. 2006.

GRAEFF, S.; CLAUPEIN, W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 19, p. 611-618, 2003.

HUTMACHER, R.B.; TRAVIS, R.L.; RAINS, D.W.; VARGAS, R.N.; ROBERTS, B.A.; WEIR, B.L.; WRIGHT, S.D.; MUNK, D.S.; MARSH, B.H.; KEELEY, M.P.; FRITSCHI, F.B.; MUNIER, D.J.; NICHOLS, R.L.; DELGADO, R. 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.

KACHANOSKI, R.G.; FAIRCHILD, G.L.; BEAUCHAMP, E.G. Yield indices for corn response to applied fertilizer: application in site-specific crop management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 3., Minneapolis, 1996. **Proceedings ...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996. p. 425-432.

KLOTZ, P.; BACH, H.; MAUSER, W. GVIS – Ground-operated visible/near infrared imaging spectrometer. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings ...** Berlin: STAFFORD, J.; WERNER, A. (Ed.), 2003. p. 35-39. 1 CD-ROM.

LIMBRUNNER, B.; MAIDL, F.X. Non-contact measurement of the actual nitrogen status of winter wheat canopies by laser-induced chlorophyll fluorescence. In: EUROPEAN CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 6., Skiathos, 2007. **Proceedings ...** Skiathos:STAFFORD, J.V. (Ed.), 2007. p. 173-179. 1 CD-ROM.

MALAVOLTA, E.; NOGUEIRA, N.G.L.; HEINRICHS, R.; HIGASHI, E.N.; RODRIGUEZ, V.; GUERRA, E.; OLIVEIRA, S.C.; CABRAL, C.P. Evaluation of nutritional status of the cotton plant with respect to nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 1007-1019, 2004.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 201 p.

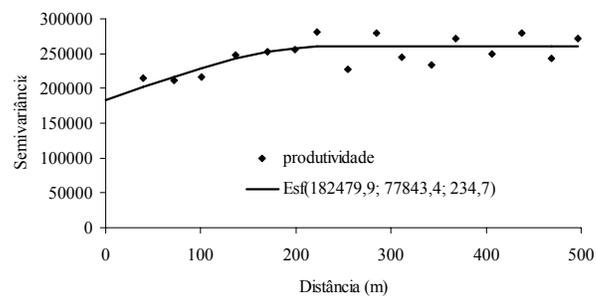
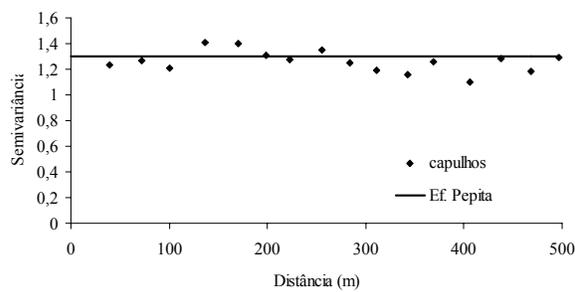
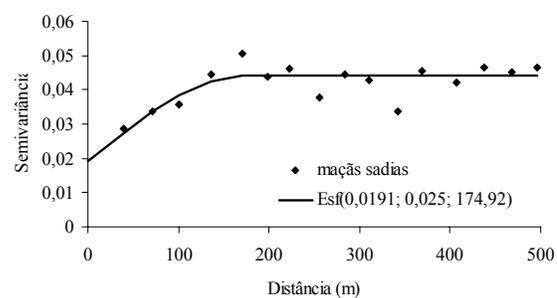
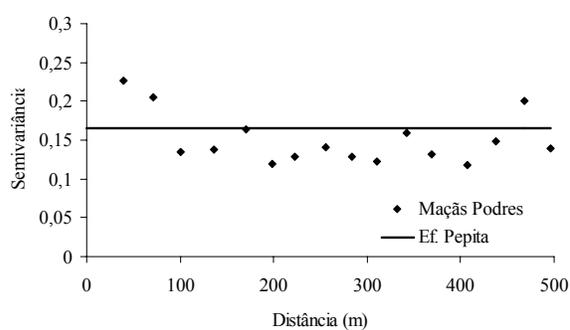
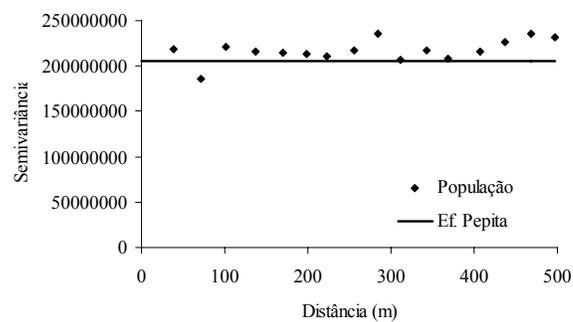
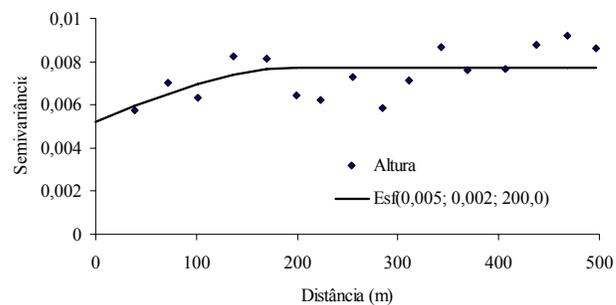
MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. São Jose dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

NEVES O.S.C.; CARVALHO, J.G.; MARTINS, F.A.D.; PÁDUA, T.R.P.; PINHO, P.J. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2005000500014&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2005000500014&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 19 abr. 2007.

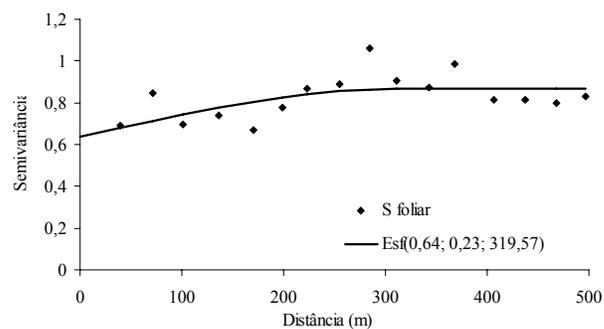
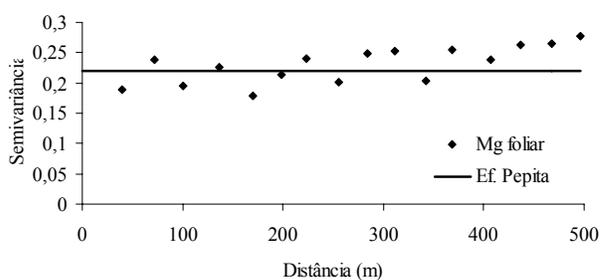
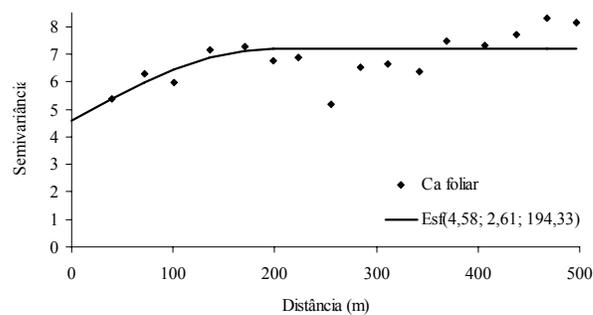
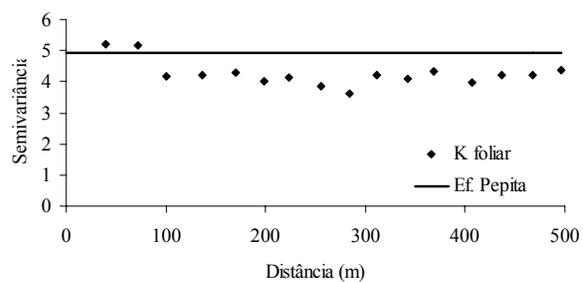
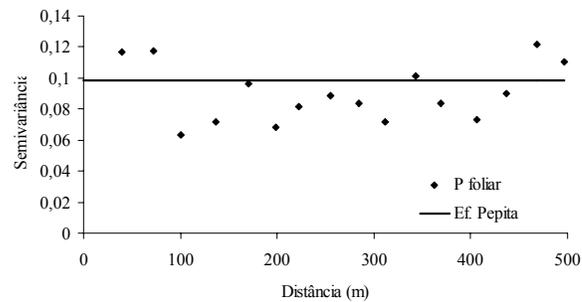
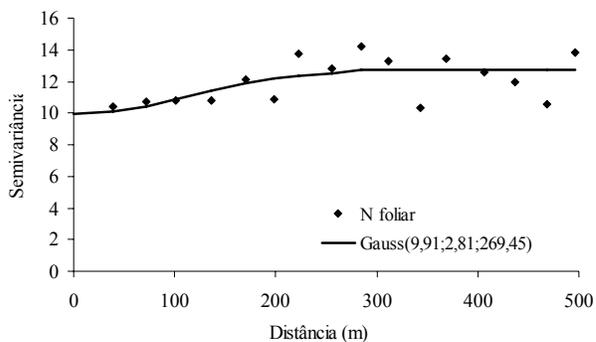
- NOH, H.; ZHANG, Q.; HAN, S.; SHIN, B.; REUM, D. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, p. 393-401, 2005.
- READ, J.J.; TARPLEY, L.; MCKINION, J.M.; REDDY, K.R. Narrow-waveband reflectance for remote estimation of nitrogen status in cotton. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, p.1442-1452, 2002.
- READ, J.J.; WHALEY, E.L.; TARPLEY, L.; REDDY, R. Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton. **American Society of Agronomy Special Publication**, Madison, n. 66, p. 177-195, 2003.
- REIS, A.R.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. **Bragantia**, Campinas, v. 65, p.163-171, 2006.
- SAS INSTITUTE. **SAS/SAT: user's guide: version 6**. Cary, 1998. 1848 p.
- SCHRÖDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O.; STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, p. 151-164, 2000.[
- SILVA, N.M. Nutrição mineral e adubação do algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 57-92.
- STAUT, L.A.; KURIHARA, C.H. Calagem e adubação. In: EMBRAPA. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. p. 103-122.
- SUI, R.; THOMASSON, J.A. **Plant health sensing system for in situ determination of cotton nitrogen status**. St. Joseph: ASAE, 2004.15 p. (ASAE/CSAE. Meeting Paper, 041081).
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. E.R. Satarém et al. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 720 p.
- TARPLEY, L.; REDDY, K.R.; SASSENATH-COLE, G.F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, Madison, v.40, p. 1814-1819,2000.
- ZHAO, D.; REDDY, R.K.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; KOTI, S. 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.

## **ANEXOS**

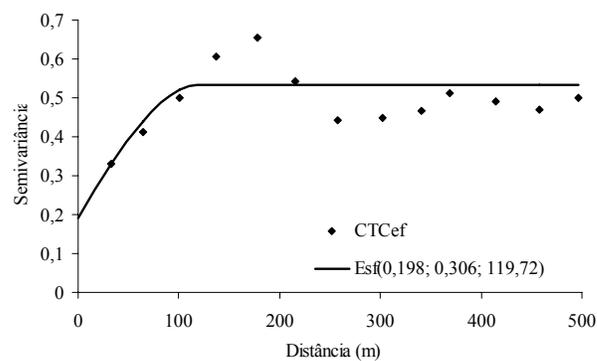
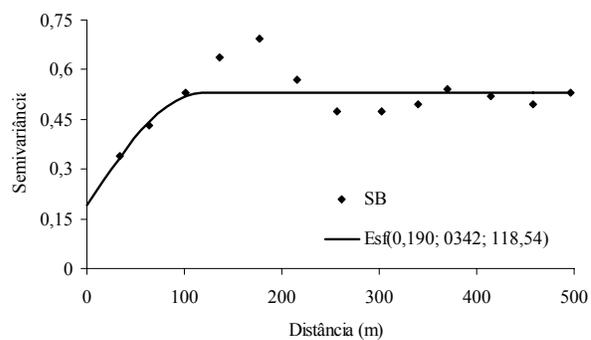
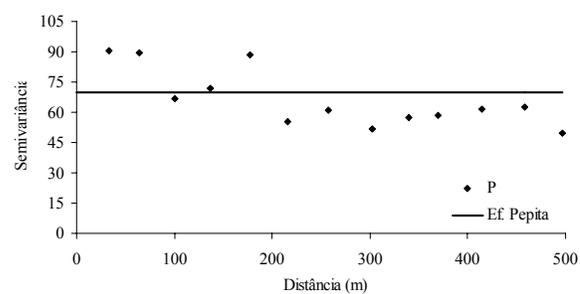
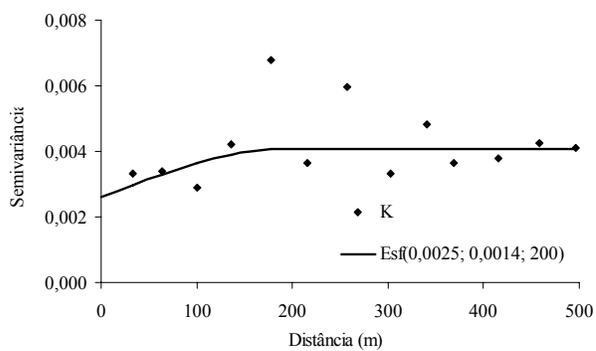
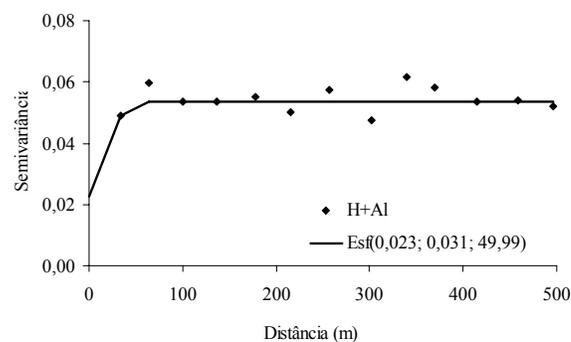
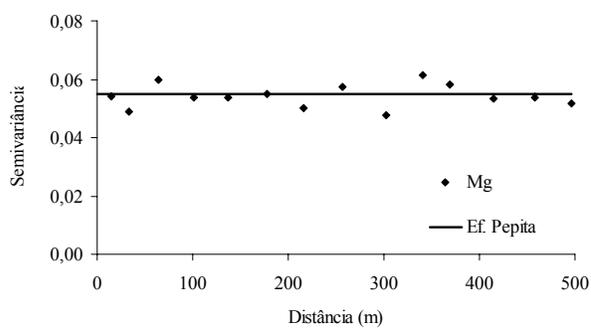
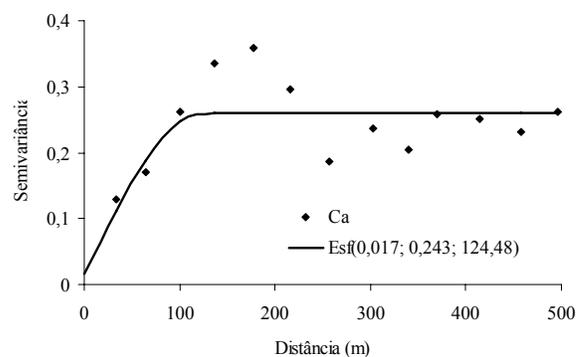
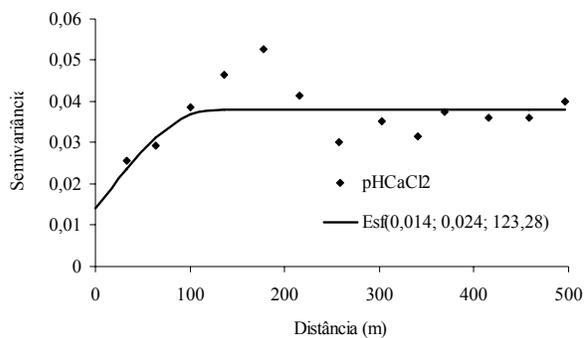
ANEXO A – Semivariogramas ajustados às características fitotécnicas do algodoeiro; valores entre parênteses são efeito pepita, variância estrutural e alcance



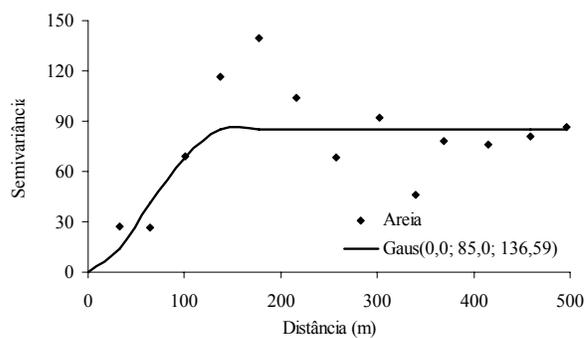
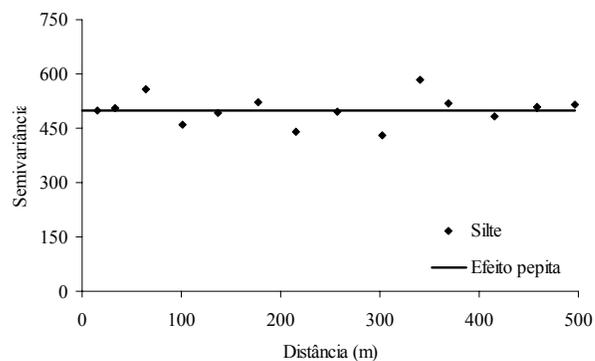
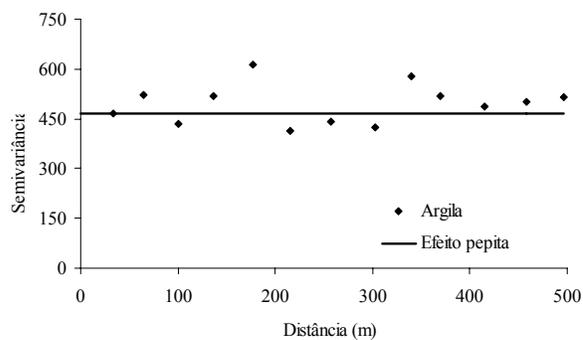
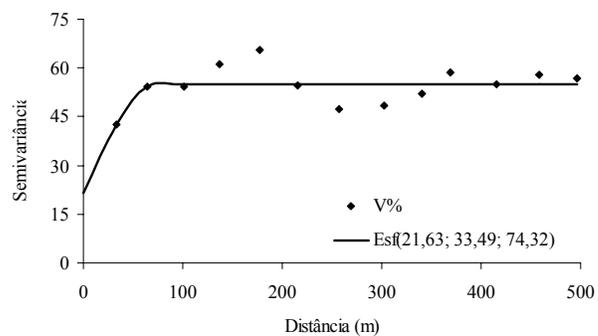
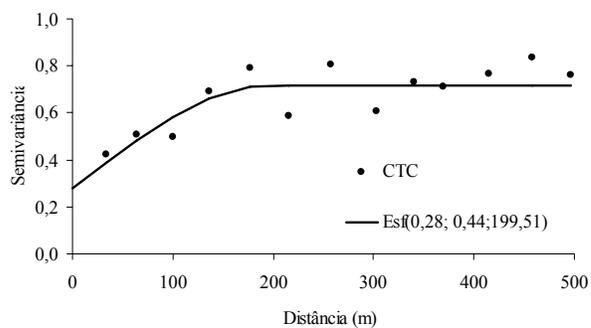
ANEXO B – Semivariogramas ajustados às variáveis do estado nutricional do algodoeiro; valores entre parênteses são efeito pepita, variância estrutural e alcance



ANEXO C – Semivariogramas ajustados aos atributos do solo; valores entre parênteses são efeito pepita, variância estrutural e alcance



ANEXO D – Semivariogramas ajustados aos atributos do solo; valores entre parênteses são efeito pepita, variância estrutural e alcance



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)