

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DE PLANTA E
PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

RONEI SANDRI SANA

(Dissertação)

FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DE PLANTA E
PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

RONEI SANDRI SANA
Engenheiro-Agrônomo (UFSM)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Setembro de 2013

CIP - Catalogação na Publicação

SANA, RONEI SANDRI
VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DE
PLANTA E PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO UTILIZANDO
FERRAMENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO / RONEI
SANDRI SANA. -- 2013.
176 f.

Orientador: IBANOR ANGHINONI.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-
RS, 2013.

1. ALGODOEIRO. 2. AGRICULTURA DE PRECISÃO. 3.
SENSORES DE PRODUTIVIDADE. 4. VARIABILIDADE. 5.
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE. I. ANGHINONI,
IBANOR, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

RONEI SANDRI SANA
Engenheiro Agrônomo - UFSM
Especialista em Solos e Meio Ambiente - UFPA

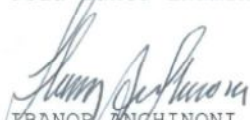
DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

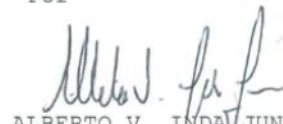
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 25.07.2013
Pela Banca Examinadora


YBANOR ANGHINONI
Orientador


Homologado em: 11.09.2013
Por


ALBERTO V. INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo


ANTÔNIO LUIS SANTI
UFSM


CHRISTIAN BREDEMEIER
Departamento de Plantas de Lavoura/UFRGS


JOSE DA CUNHA MEDEIROS
Embrapa Algodão


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

Dedico:

Aos meus pais, Juraci Inês Sana e Valdemiro Sana,
pelo amor, compreensão e exemplos de vida.
A minha irmã Vania Sana, pelo apoio constante.

A minha esposa Juliana Campezzatto Carlos pelo amor,
incentivo e paciência e a nossa filha Paola,
que está encantando papai e mamãe.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Ibanor Anghinoni, pela excelente contribuição durante o curso e aconselhamento na dissertação, possibilitando a ampliação e organização de ideias em um tema tão novo.

À SLC Agrícola S.A que permitiu viabilizar este trabalho pela disponibilidade de tempo necessário para assistir as aulas e de recursos empregados para a execução dos trabalhos de campo.

À pesquisadora da Embrapa Algodão, Ziany Neiva Brandão, pelas preciosas sugestões e grandiosas colaborações na execução dos trabalhos de campo, assim como nesta dissertação. Estendo o agradecimento ao pesquisador José da Cunha Medeiros e a Embrapa Algodão, bem como a Rede de Agricultura de Precisão na qual está inserido este trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a Faculdade de Agronomia, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, que possibilitaram a realização do Curso de Mestrado.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Solos pelos ensinamentos e auxílio nas atividades realizadas.

Aos colegas de Pós Graduação, Rogério Schimit e Victor Hugo pelo companheirismo e trabalhos realizados em conjunto.

À Fazenda Pamplona e seus colaboradores, e em particular ao Gerente Evandro Carlos Dal Bem e ao Coordenador de Pesquisa Carlos Alberto Deves pelo comprometimento e auxílio nas atividades práticas.

Aos colegas do setor de Planejamento Agrícola da SLC Agrícola, aos quais inspiram confiança e comprometimento com o trabalho, Srs. Aurélio Pavinato, Márcio Silveira, Gerson Trenhago, Marquel Holzchuh e Adriano Lobato. Aos demais colaboradores da empresa que contribuem para o constante desafio de sermos cada vez melhores.

A todos que de alguma forma contribuíram para essa dissertação, tanto por abdicarem de tempo de convívio, como por dividirem doses diárias de alegria.

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DE PLANTA E PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO

Autor: Ronei Sandri Sana

Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni

RESUMO

A identificação dos atributos de solo e de planta que ocasionam variabilidade e sua relação com a produtividade do algodoeiro permitem delimitar zonas homogêneas e, utilizando as ferramentas de agricultura de precisão (AP), inferir sobre o manejo do solo e da cultura. O objetivo deste trabalho foi estabelecer relações entre atributos de solo e de planta que possuem variabilidade espacial e a sua interferência na produtividade do algodoeiro. O experimento foi realizado em área no bioma Cerrado, em Latossolo Vermelho, em lavoura comercial, na Fazenda Pamplona, em Cristalina-GO. Para o trabalho, foram utilizados os dados de rendimento de algodão, nas safras 2010/11 e 2011/12. Foram realizadas amostragens georreferenciadas, avaliando os atributos de solo relacionados à acidez e à disponibilidade de nutrientes. Foram feitas leituras contínuas de condutividade elétrica aparente (CEa) em toda a área do experimento, previamente à semeadura. Na planta, foram avaliados os teores de nutrientes no tecido foliar, leitura do índice SPAD em clorofilômetro, altura de plantas e imagens de satélite para o Índice de Área Foliar (IAF). Antes da semeadura da safra 2011/12, foram adicionadas diferentes doses de P_2O_5 em faixas na área experimental. Os dados foram submetidos à análise estatística clássica e geoestatística. A produtividade apresentou forte dependência espacial e possui correlação com o índice de clorofila que, em conjunto com o IAF, possibilitaram avaliar o estado nutricional das plantas de algodão. A CEa mostrou-se uma boa ferramenta para identificação da variabilidade de acidez de nutrientes no solo. Houve pequeno incremento na produtividade com a adição de doses de P_2O_5 , mesmo na faixa de suficiência. É possível delimitar zonas homogêneas integrando os atributos de solo e de planta e manejá-las de forma diferenciada utilizando as ferramentas de AP.

1 / Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (175 p.) Setembro, 2013.

**SPATIAL VARIABILITY OF SOIL AND PLANT ATTRIBUTES IN COTTON
YIELD USING PRECISION AGRICULTURE TOOLS 1/**

Author: Ronei Sandri Sana

Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni

ABSTRACT

The identification of soil and plant attributes that indicate the cause of variability and its relation to cotton yield, lets to define homogeneous zones, and by using of precision agriculture tools, to make inferences about soil and plant management. The objective of this study was to establish relationships between soil and plant attributes that have spatial variability and its interference in cotton yield. The experiment was carried out in Oxisol at a savanna commercial area at Pamplona farm, in Cristalina-GO. Cotton was yield in 2010/11 and 2011/12 crop growing seasons, where georeferenced sampling for evaluating soil chemical attributes, and soil apparent eletrical conductivity (ECw), previously to seeding, where done. Plant attributes were evaluated for nutrient content in leaf tissue, and non-destructive analysis by reading chlorophyll content (SPAD Index), plant height and satellite images for leaf area index (LAI). Before seeding the 2011/12 crop season, different rates of P₂O₅ were applied along the experimental area. Data were analyzed by both classical and geostatistical procedures. Cotton yield showed strong spatial dependence and high correlation with chlorophyll content, that, with LAI made possible to assess the nutritional status of cotton plants. The ECw proved to be a tool for identifying the variability of soil acidity and nutrient. There was an increase in yield with the addition of P₂O₅ rates, even at sufficiency level. It is possible to define homogeneous zones by integrating soil and plant attributes for managing different field areas by using precision agriculture tools.

1 / M.Sc. Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (175 p.) September, 2013.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. ESTADO DA ARTE	22
2.1 História recente e produção de algodão no Brasil.....	23
2.2 Monitoramento da variabilidade da produtividade.....	27
2.3 Variabilidade dos atributos de solo e sua avaliação.....	30
2.4 Variabilidade dos atributos de planta.....	35
3. MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 Localização, caracterização e histórico da área experimental.....	41
3.2 Implantação e manejo da cultura do algodão.....	48
3.3 Amostragens e determinações de solo.....	50
3.3.1 Coleta do solo e determinações químicas.....	50
3.3.2 Condutividade elétrica aparente.....	50
3.4 Amostragens e determinações de planta.....	52
3.4.1 Coleta e determinação no tecido foliar.....	52
3.4.2 Índice de clorofila.....	53
3.4.3 Índice de vegetação.....	53
3.5 Produtividade do algodoeiro.....	55
3.6 Processamento e análise dos dados.....	56
3.6.1 Análise geoestatística.....	56
3.6.2 Análise estatística.....	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Estatística descritiva dos atributos de solo.....	59
4.2 Estatística descritiva dos atributos de planta.....	64
4.3 Estatística descritiva da produtividade.....	69
4.4 Variabilidade espacial dos atributos de solo.....	70
4.5 Variabilidade espacial dos atributos de planta.....	84
4.6 Variabilidade espacial da produtividade.....	108
4.7 Correlações entre atributos de solo e de planta.....	114
4.7.1 Correlações entre atributos do solo.....	114

4.7.2 Correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 70 DAE, na safra 2010/11.....	119
4.7.3 Correlações entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 110 DAE, safra 2010/11	124
4.7.4 Correlações entre atributos de planta aos 108 DAE, safra 2011/12	129
4.8 Correlações entre produtividade e atributos de solo e de planta	133
4.9 Produtividade do algodoeiro em relação a doses de fósforo	135
5. CONCLUSÕES.....	139
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	141
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
8. APÊNDICES:.....	159

RELAÇÃO DE TABELAS

TABELA 1.	Área plantada e produtividade das safras 2010/11, 2011/12 e 2012/13, nos principais países produtores de algodão.....	24
TABELA 2.	Evolução histórica da área cultivada de algodão, milho, soja, trigo e total das culturas do Brasil(1)	25
TABELA 3.	Evolução histórica da produtividade de algodão, milho, soja, trigo e média das culturas no Brasil(1)	25
TABELA 4.	Histórico de rotação de culturas, manejo de solo, adubações e correção de solo na “Lavoura E”, Fazenda Pamplona, Cristalina-GO.....	47
TABELA 5.	Resultados de análise do solo nas safras 2009/10 e 2010/11.....	47
TABELA 6.	Atividades realizadas na área experimental na safra 2010/11.....	48
TABELA 7.	Atividades realizadas na área experimental na safra 2011/12.....	49
TABELA 8.	Estatística descritiva de análises foliares aos 70 e 110 DAE na safra 2010/11 e aos 108 DAE na safra 2011/12, Cristalina-GO	65
TABELA 9.	Faixas de Suficiência para análises foliares em diferentes culturas	67
TABELA 10.	Estatística descritiva de análises não destrutivas de planta.....	69
TABELA 11.	Estatística descritiva da produtividade em diferentes safras de algodão no cerrado	70
TABELA 12.	Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) de atributos de solo, em Cristalina-GO.....	71
TABELA 13.	Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) dos macro e micronutrientes nas folhas em diferentes períodos e safras de algodão no cerrado, Cristalina-GO	90
TABELA 14.	Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) de atributos de planta obtidos por métodos não destrutivos.....	91
TABELA 15.	Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) para produtividade nas safras 2010/11 e 2011/12.....	108

TABELA 16.	Coeficientes de correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e produtividade do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	116
TABELA 17.	Coeficientes de correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 70 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	121
TABELA 18.	Coeficiente de correlação entre os atributos de planta entre si e com a produtividade, aos 70 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	122
TABELA 19.	Coeficientes de correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 110 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	125
TABELA 20.	Coeficiente de correlação entre os atributos de planta entre si e com a produtividade aos 110 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	128
TABELA 21.	Coeficiente de correlação entre os atributos de planta entre si e com a produtividade aos 108 DAE, safra 2011/12, Cristalina-GO.....	132

RELAÇÃO DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Principais estádios de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo.....	26
FIGURA 2 -	Processo para geração mapas de produtividade na cultura do algodão.....	29
FIGURA 3 -	Demonstrativo dos comprimentos de onda absorvidos pelo sensor de clorofila.....	36
FIGURA 4 -	Representação do comportamento da refletância para diferentes alvos	37
FIGURA 5 -	Exemplo de semivariograma experimental e teórico.....	40
FIGURA 6 -	Localização da “lavoura E” da Fazenda Pamplona, Cristalina-GO, e da área experimental, no ano 2000.....	42
FIGURA 7 -	Mapas de localização: a) grade amostral 80x80 m nas safras 2010/11 e 2011/12 e b) demonstrativo das faixas com diferentes doses de P2O5 na safra 2011/12.....	43
FIGURA 8 -	Precipitação mensal da fazenda Pamplona, Cristalina-GO. Média de 11 anos (2001 – 2012).	44
FIGURA 9 -	Precipitação mensal nas safras 2010/11 (a) e 2011/12 (b), Fazenda Pamplona, Cristalina-GO.....	45
FIGURA 10 -	Determinação de condutividade elétrica aparente a campo: a) equipamento coletando os dados na lavoura. b) demonstrativo da corrente elétrica criada pelo equipamento (Veris 3100).....	52
FIGURA 11 -	Mapas de isolinhas de atributos de solo e de altitude: a) pH CaCl ₂ , b) pH H ₂ O, c) pH SMP e d) altitude. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	75
FIGURA 12 -	Mapas de isolinhas de atributos de solo: a) cálcio trocável, b) magnésio trocável, c) potássio trocável e d) soma de bases. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	76
FIGURA 13 -	Mapas de isolinhas de nutrientes no solo: a) saturação bases, b) CTC pH 7,0, c) acidez potencial (H+Al) e d) enxofre. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.....	78
FIGURA 14 -	Mapas de isolinhas de nutrientes no solo: a) P extraído por Mehlich-1, b) P resina, c) boro e d)	

	ferro. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	79
FIGURA 15 -	Mapas de isolinhas de micronutrientes no solo: a) manganês extraível, b) cobre extraível e c) zinco extraível. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	80
FIGURA 16 -	Mapas de isolinhas: a) matéria orgânica, b) argila, c) areia e d) silte. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	82
FIGURA 17 -	Mapas de isolinhas da condutividade elétrica do solo: a) CEa rasa (0-0,3 m) e b) CEa profunda (0-0,9 m, safra 2010/11, Cristalina-GO.	83
FIGURA 18 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) nitrogênio, b) fósforo, c) cálcio e d) magnésio, aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	86
FIGURA 19 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) potássio, b) enxofre, c) manganês e d) ferro, aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	87
FIGURA 20 -	Mapas de superfície dos teores de nutrientes foliares: a) boro, b) cobre e c) zinco, aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	89
FIGURA 21 -	Mapas de isolinhas de atributos de planta em amostras não destrutivas: a) índice de clorofila (SPAD), b) índice de área foliar (IAF) e c) altura de plantas, obtidos aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	93
FIGURA 22 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) nitrogênio, b) fósforo, c) cálcio e d) magnésio, aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	95
FIGURA 23 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) potássio e b) enxofre, c) manganês e d) ferro, aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	96
FIGURA 24 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) boro, b) cobre e c) zinco, aos 110 DAE, aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	99
FIGURA 25 -	Mapas de isolinhas de atributos de planta em amostras não destrutivas: a) índice de clorofila (SPAD), b) índice de área foliar (IAF) e c) altura de plantas, obtidos aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	100

FIGURA 26 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) nitrogênio, b) fósforo, c) cálcio e d) magnésio, aos 108 DAE do algodão no cerrado, safra 2011/12, Cristalina-GO.....	102
FIGURA 27 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) potássio, b) enxofre, c) manganês, e d) ferro, aos 108 DAE do algodão no cerrado, safra 2011/12, Cristalina-GO.....	103
FIGURA 28 -	Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) boro, b) cobre e c) zinco, aos 108 DAE do algodão no cerrado, safra 2011/12, Cristalina-GO.	106
FIGURA 29 -	Mapas de isolinhas de atributos de planta em amostras não destrutivas: a) índice de clorofila (SPAD), b) altura de plantas e c) estande de plantas, obtidos aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	107
FIGURA 30 -	Mapa de superfície representativo da variação espacial da produtividade de algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.	109
FIGURA 31 -	Mapa de superfície representativo da variação espacial da produtividade de algodão no cerrado, obtido pelo sensor de fluxo instalado na máquina, safra 2011/12.....	110
FIGURA 32 -	Mapas de isolinhas representativos: a) doses de P ₂ O ₅ , b) variação espacial da produtividade de algodão obtida pelo sensor e c) produtividade normalizada, safra 2011/12, Cristalina-GO.....	113
FIGURA 33 -	Produtividade de algodão em caroço em função das doses de P adicionadas ao solo, safra 2011/12, Cristalina-GO.....	136

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) pH CaCl ₂ , b) pH H ₂ O, c) pH SMP e d) cálcio trocável.....	159
APÊNDICE 2 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio trocável, b) potássio trocável, c) soma de bases trocáveis e d) saturação por bases.....	160
APÊNDICE 3 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) H+Al trocável, b) CTC pH 7,0, c) P Mehlich 1 e d) P resina.....	161
APÊNDICE 4 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) enxofre disponível, b) sódio trocável, c) boro disponível e d) ferro disponível.....	162
APÊNDICE 5 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) manganês disponível, b) cobre disponível, c) zinco disponível e d) matéria orgânica.....	163
APÊNDICE 6 - Histogramas e semivariogramas teóricos para: a) argila, b) silte e c) areia.	164
APÊNDICE 7 - Histogramas e semivariograma teórico para CEa rasa 0 – 0,3m.....	165
APÊNDICE 8 - Histogramas e semivariograma teórico para CEa profunda 0 – 0,9m.....	165
APÊNDICE 9 - Histogramas e semivariogramas teóricos para: a) produtividade colheita mecânica safra 2010/11 e b) produtividade colheita mecânica, safra 2011/12	166
APÊNDICE 10 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) nitrogênio foliar, b) fósforo foliar, c) potássio foliar e d) cálcio foliar, aos 70 DAE, na safra 2010/11	167
APÊNDICE 11 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio foliar, b) enxofre foliar, c) manganês foliar e d) ferro foliar, aos 70 DAE, na safra 2010/11	168
APÊNDICE 12 - Histogramas e semivariogramas teóricos para: a) boro foliar, b) cobre foliar e c) zinco foliar, aos 70 DAE, na safra 2010/11.	169
APÊNDICE 13 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) nitrogênio foliar, b) fósforo foliar, c) potássio foliar e d) cálcio foliar, aos 110 DAE, na safra 2010/11.....	170
APÊNDICE 14 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio foliar, b) enxofre foliar, c) manganês foliar e d) ferro foliar, aos 110 DAE, na safra 2010/11	171
APÊNDICE 15 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) boro foliar, b) cobre foliar e c) zinco foliar, aos 110 DAE, na safra 2010/12.....	172

APÊNDICE 16 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) nitrogênio foliar, b) fósforo foliar, c) potássio foliar e d) cálcio foliar, aos 108 DAE, na safra 2011/12.....	173
APÊNDICE 17 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio foliar, b) enxofre foliar, c) manganês foliar e d) ferro foliar, aos 108 DAE, na safra 2011/12	174
APÊNDICE 18 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) boro foliar, b) cobre foliar, c) zinco foliar, aos 108 DAE, na safra 2011/12.....	175

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al – Alumínio.
AP – Agricultura de Precisão.
B – Boro.
Ca – Cálcio.
CEa – Condutividade Elétrica aparente.
CTC – Capacidade de troca de cátions.
CV - Coeficiente de variação.
Cu – Cobre.
DAE – Dias Após a Emergência.
DP – Desvio Padrão.
EPP – Efeito Pepita Puro.
Fe – Ferro.
GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global).
IAF – Índice de Área Foliar.
IDE – Índice de Dependência Espacial.
K – Potássio.
MAP – Fosfato Monoamônico.
Mg – Magnésio.
Mn – Manganês.
M.O. – Matéria Orgânica.
N – Nitrogênio.
NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.
PIB – Produto Interno Bruto.
P resina – Fósforo extraído por resina trocadora de ânions.
P Mehlich – Fósforo extraído por solução de Mehlich-1.
S – Enxofre.
SB – Soma de bases.
SFS – Super Fosfato Simples.
SPAD 502– Clorofilômetro portátil da Minolta® que estima o teor de clorofila nas folhas.
V - Saturação por bases.
Zn – Zinco.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, pela disponibilidade de terras agricultáveis, condições climáticas e tecnologia em produção tropical, passa a ter papel de liderança na agricultura mundial, entre elas, na cotonicultura. A cultura do algodão no Brasil historicamente atingiu a maior área de cultivo no ano agrícola de 1980/81 com 4.136.700 ha concentrados, principalmente, nos estados da região Nordeste, com emprego de baixa tecnologia (BELTRÃO et al., 2008). Entretanto, essa área foi sendo gradativamente reduzida nessa região e passou a ser maior nos estados de São Paulo e Paraná. Na década de 1990, houve avanço da fronteira agrícola na região do cerrado, principalmente nos estados de Mato Grosso, Bahia e Goiás, onde o cultivo do algodão se consolidou com o uso de tecnologias avançadas aliadas ao grande potencial produtivo da região (FREIRE, 2008).

O algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. *latifolium* Hutch) é uma planta muito exigente em qualidade de solo, desenvolvendo-se bem em solos com elevada fertilidade e com propriedades físicas adequadas, sendo bem drenados, estruturados e profundos. Como os teores de nutrientes nos solos do cerrado naturalmente são muito baixos, torna-se necessária a sua correção e constantes adubações para a manutenção de níveis de suficiência no solo (ROSOLEM & MELLIS, 2010). Como essa cultura possui um sistema radicular pouco desenvolvido e explora pequeno volume de solo, há necessidade de aplicação anual e adequada de fertilizantes pra obtenção de altas produtividades.

O algodão possui alto custo de produção, cerca de três vezes superior ao da cultura da soja, sendo que os fertilizantes e corretivos de acidez do solo correspondem a cerca de 20% do custo total de produção. Por isso, para uma produção economicamente viável de algodão, devem-se empregar técnicas que visem maximizar a utilização dos insumos adicionados ao solo. As ferramentas de agricultura de precisão (AP) possibilitam identificar zonas heterogêneas, podendo-se, com isso, manejar o solo, a cultura e os insumos

agrícolas, com diminuição do custo de produção e possíveis problemas ambientais.

A identificação dos atributos que causam variabilidade espacial do solo e das culturas permite diagnosticar o que está influenciando sua produtividade. Juntamente com os registros de variabilidade temporal em diferentes cultivos é possível verificar as relações entre os atributos mais importantes, de solo e de planta, com a produtividade da cultura. A amostragem de solo e de plantas de forma georreferenciada permite uma visão espacial da variação dos atributos avaliados com a geração de mapas interpretativos, que facilitam a tomada de decisão (BRANDÃO et al., 2008). O conjunto de informações que integra um banco de dados permite gerenciar a variabilidade e corrigir os atributos químicos e físicos do solo para maximizar o potencial produtivo em zonas da lavoura tornadas homogêneas pela aplicação de insumos em taxa variável.

Em relação aos fatores químicos de solo que mais afetam a produtividade das culturas no cerrado brasileiro, pode-se citar: acidez elevada, teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) disponíveis e matéria orgânica (MO) baixos e, entre os físicos, baixo teor de argila (solos arenosos) e compactação do solo (VENDRAME et al., 2010).

A variabilidade encontrada em outros aspectos no ambiente do cerrado brasileiro, como drenagem do solo, posição na paisagem e presença de cascalho, influencia a produtividade das culturas e tem limitada possibilidade de correção pela ação antrópica. A variabilidade induzida pelas atividades agrícolas, como a abertura da lavoura, histórico de manejo de solo e de rotação de culturas, doses de insumos e equipamentos utilizados nas aplicações de fertilizantes e corretivos, determinam o aumento na variabilidade nas lavouras. Assim, manchas de calcário e gesso, presença de terraços, áreas de corte e aterro e estradas de divisão de lavouras devem ser registradas para não gerarem interpretações errôneas sobre a variação da produtividade do algodoeiro. Existem ainda outros fatores que atuam diretamente no desenvolvimento e produtividade dessa cultura, como a presença de insetos-praga, de doenças e de plantas daninhas, que devem ser considerados ao longo de cada ciclo de produção.

A AP agrega informações de variabilidade e possibilita encontrar respostas para os fatores que estão influenciando a produtividade das culturas. Utilizando-se sistemas de informação geográfica, pode-se localizar as zonas da lavoura de maior e menor influência na produtividade. Assim, a partir das relações entre os atributos de solo e da planta de algodão com a sua produtividade, procura-se identificar a importância de cada fator e, a partir disso, estabelecer procedimentos diferenciados para cada área na lavoura.

Este trabalho tem por objetivo: a) identificar os atributos de solo e de planta que promovem a variabilidade da produtividade do algodoeiro; b) estabelecer a relação da condutividade elétrica do solo com atributos químicos do solo visando definir zonas de manejo para os tratamentos culturais dessa cultura; c) efetuar avaliações não destrutivas de amostras de folhas (índices de vegetação e de clorofila) para inferir sobre o estado nutricional e potencial produtivo da cultura; e d) estabelecer parâmetros de atributos de solo e de cultura que podem ser relacionados à produtividade do algodão, incorporando ferramentas de avaliação da variabilidade espacial e temporal em AP no cerrado brasileiro.

2. ESTADO DA ARTE

A heterogeneidade é uma característica intrínseca dos solos e o seu cultivo resulta em aumento na variabilidade nos seus atributos (SOUZA, 1992). A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo aumenta ainda mais com a adoção do sistema semeadura direta, quer no sentido horizontal, pela distribuição irregular dos insumos (em linha) (KLEPKER & ANGHINONI, 1995), quer por sua aplicação ou deposição dos resíduos na superfície do solo, gerando gradientes verticais (SCHLINDWEIN & ANGHINONI, 2002).

A variação espacial em culturas é resultado de um complexo de interações biológicas (microorganismos, pragas), edáficos (acidez, salinidade, matéria orgânica, nutrientes, textura), antrópicos (aplicação de insumos, compactação do solo), topografia (elevação, declives), e climáticos (precipitação, temperatura e umidade relativa) (LARSON e ROBERT, 1991). Ortolani et al. (1995) apontam que entre 60 e 70% da variabilidade da produção agrícola é decorrente das condições do clima. O monitoramento sítio-específico da cultura permite gerenciar o solo e a cultura em uma área cultivada.

A agricultura de precisão (AP) consiste no uso da tecnologia da informação para adequar o manejo do solo e das culturas à variabilidade das lavouras, visando o uso mais eficiente dos recursos naturais e dos insumos e elevada produtividade em toda a lavoura, com benefício econômico e redução do impacto ambiental (COELHO, 2008). Segundo Molin (2000), a AP é um conjunto de tecnologias e procedimentos utilizados para que os sistemas de produção agrícola sejam otimizados, tendo como objetivo principal o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados.

De acordo com Miranda (2005), no Sistema de Informações Geográficas (SIG), a realidade é representada (modelada) como uma série de elementos geográficos definidos de acordo com dois atributos de dados: o espacial e o não espacial. O elemento de dado geográfico (dado espacial) é usado para

providenciar uma referência para o elemento de dado (dado não espacial), no caso, atributo de solo ou de cultura. O ciclo da AP consiste na obtenção de informações de campo, na análise dessas informações, na sua interpretação, na geração de recomendações técnicas, na aplicação no campo das intervenções recomendadas e no monitoramento dos resultados (COELHO, 2008).

2.1 História recente e produção de algodão no Brasil

A região do cerrado brasileiro demonstra seu grande potencial produtivo para *commodities* agrícolas, como soja, milho e algodão, que são as principais culturas semeadas e responsáveis por grande parte de seu PIB agrícola. A existência de duas estações bem definidas e a incidência de veranicos na estação chuvosa, associadas à baixa fertilidade natural dos solos, são as principais dificuldades que devem ser enfrentadas para o aproveitamento agrícola intensivo da região (REDE FERTBRASIL, 2010).

A rotação de culturas predominante em áreas cotonícolas nesse ambiente, considerando dois anos de cultivo, varia entre soja + algodão 2º safra / soja; soja + milho 2º safra / algodão; cultura de cobertura (milheto, *Brachiária ruziziensis*) + algodão em regiões que permitem a realização de 2º safra e soja / algodão; algodão / soja. Esses modelos de cultivo do solo de cerrado podem provocar redução dos estoques de carbono, mas é possível recuperá-los aos níveis originais pela utilização do plantio direto e de um sistema de rotação de culturas com alta adição de carbono ao solo (PAVINATO, 2009; BLANCO-CANQUI & LAL, 2008).

Considerando os dados da safra 2010/11 (Tabela 1), os principais países em área de cultivo de algodão são Índia, China e Estados Unidos, representando 61,9% da área mundial e 64,5% da produção mundial. O Brasil deteve nessa safra uma participação de 4,2% da área plantada, representando 7,7% da produção, destacando-se assim pela sua competitividade devido à produtividade. Na safra 2011/12, tem-se para o Brasil uma previsão de participação na área plantada de 2,8% e produção de 8,0%.

TABELA 1. Área plantada e produtividade das safras 2010/11, 2011/12 e 2012/13, nos principais países produtores de algodão

País	Área				Produtividade			
	2010/11	Previsão 2011/12	Projeção 2012/13		2010/11	Previsão 2011/12	Projeção 2012/13	
	----- x 10 ⁶ ha -----				----- (kg ha ⁻¹) ⁽¹⁾ -----			
Índia	11.14	12.20	11.70	11.80	516	491	475	471
China	5.25	5.40	5.28	5.28	1.265	1.335	1.445	1.445
EUA	4.33	3.83	3.82	3.82	910	886	971	987
Paquistão	2.80	3.00	3.00	3.00	672	769	675	675
Brasil	1.40	1.40	0.98	0.89	1.400	1.353	1.407	1.427
Mundo	33.45	35.52	34.17	34.15	757	761	764	763

⁽¹⁾ Quilogramas por hectare de pluma. Fonte: Adaptado de USDA (2013).

O Brasil, com disponibilidade de terras agricultáveis, condições climáticas e tecnologia em produção tropical, passa a ocupar um lugar de destaque na agricultura mundial. Porém, alguns entraves devem ser superados, como a precária infraestrutura e logística e, em alguns casos, a baixa adoção de tecnologia. O aumento de produtividade é outro fator importante, pois o país tem condições de melhorar suas médias pelo uso de tecnologias apropriadas às diversas condições tropicais, sem necessidade de expansão de área. Os investimentos efetuados sistematicamente por instituições públicas e privadas, têm sido o grande impulsionador da cotonicultura, de modo a permitir o excepcional resultado que hoje se verifica (NOGUEIRA JUNIOR & BARBOSA, 2005).

A área de semeadura da cultura do algodão no Brasil diminuiu cerca de dois terços, de 3.826,6 mil hectares na safra 1981/82 para 1.393,4 mil hectares na estimativa da safra 2011/12 (Tabela 2). O incremento na produtividade foi na ordem de 682% quando comparadas as produtividades das safras 1981/82 e 2011/12 (Tabela 3). Estas alterações são devidas à migração da cultura do algodoeiro para as regiões de cerrado e, principalmente, devido à utilização de alta tecnologia no processo produtivo da cultura.

TABELA 2. Evolução histórica da área cultivada de algodão, milho, soja, trigo e total das culturas do Brasil⁽¹⁾

Produto	1981/82	1991/92	2001/02	2009/10	2010/11	2011/12 Previsão ⁽²⁾	2012/13 Estimativa ⁽³⁾
	----- x 10 ³ ha -----						
Algodão caroço	3.826,6	1.971,2	747,7	835,7	1.400,3	1.393,4	976,6
Milho	12.771,1	14.027,1	12.318,8	12.993,9	13.806,1	15.178,1	14.743,6
Soja	8.393,2	9.582,2	16.329,0	23.467,9	24.181,0	25.042,2	27.348,0
Trigo	2.878,6	1.997,9	2.051,6	2.428,0	2.149,8	2.166,2	1.895,4
Brasil	41.174,9	38.492,3	40.235,0	47.415,7	49.872,6	50.885,2	52.014,3

⁽¹⁾ Além das culturas da tabela, são consideradas: amendoim, arroz, aveia, centeio, cevada, feijão, girassol, mamona, sorgo e tritcale. Foram consideradas as segundas safras. ⁽²⁾ Dados preliminares: sujeitos a mudanças. ⁽³⁾ Dados estimados: sujeitos a mudanças. Fonte: Adaptado de CONAB (2013).

TABELA 3. Evolução histórica da produtividade de algodão, milho, soja, trigo e média das culturas no Brasil⁽¹⁾

Produto	1981/82	1991/92	2001/02	2009/10	2010/11	2011/12 Previsão ²	2012/13 Estimativa ³
	----- kg ha ⁻¹ -----						
Algodão caroço	515,1	967,0	2.690,0	3.634,0	3.705,0	3.513,0	3.796,0
Milho	1.692,0	2.194,0	2.868,0	4.311,0	4.158,0	4.808,0	4.930,0
Soja	1.535,9	2.027,0	2.567,0	2.927,0	3.115,0	2.651,0	3.018,0
Trigo	651,7	1.371,0	1.420,0	2.070,0	2.736,0	2.672,0	2.269,0
Brasil	1.235,2	1.777,0	2.407,0	3.148,0	3.264,0	3.266,0	3.492,0

⁽¹⁾ Além das culturas da tabela, são consideradas: Amendoim, arroz, aveia, centeio, cevada, feijão, girassol, mamona, sorgo e tritcale. Foi considerada a segunda safra. ⁽²⁾ Dados preliminares: sujeitos a mudança. ⁽³⁾ Dados estimados: sujeitos a mudança. Fonte: Adaptado de CONAB (2013).

A produção brasileira migrou do sudoeste e nordeste para a área do cerrado brasileiro. Segundo IBGE (2004), o bioma do cerrado representa uma área de 2.036.448 km² ou cerca de 23,93% do território nacional. As principais áreas produtoras de grãos, fibras e biocombustíveis estão inseridas nesse bioma, não incluindo áreas da Amazônia legal.

Durante a maior parte do ciclo da planta de algodão, há diversos eventos ocorrendo ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, aparecimento de gemas reprodutivas, florescimento, crescimento e maturação de frutos (ROSOLEM, 2001). O algodão, por ser uma planta arbustiva, possui um ciclo de produção variável, porém determinado pelo cotonicultor. O período da emergência até a colheita varia no cerrado brasileiro de 160 a 220 dias (Figura 1), dependendo principalmente da precipitação e altitude esta, determinando a

temperatura noturna. Regiões agrícolas com altitude superior a 800 m são consideradas as melhores para o desenvolvimento dessa cultura e, conseqüentemente, resultam na média, em maiores produtividades.

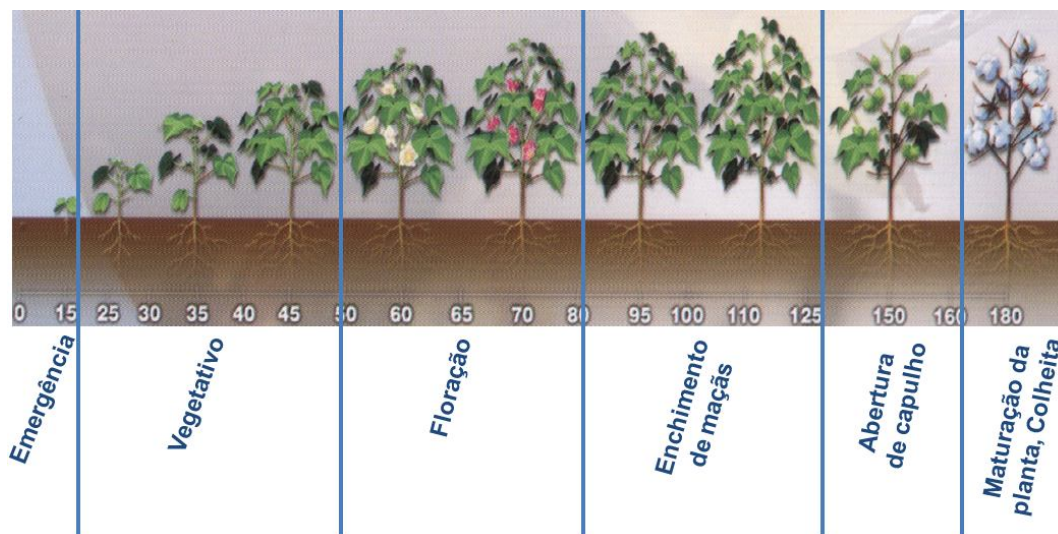


FIGURA 1 - Principais estádios de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo.
Fonte: Adaptado de Marur e Ruano (2001).

Para o sucesso na germinação do algodoeiro, devem prevalecer condições térmicas e hídricas que permitam à semente, em suas condições normais, emergir entre 5 e 10 dias. Esta malvácea necessita para emergência e estabelecimento temperaturas do solo superiores a 20°C e temperaturas do ar entre 25 e 30°C (MARUR, 1993). De acordo com Singh et al. (2007), a temperatura base para a germinação das sementes é de 12°C, enquanto que para o crescimento é de 15,5°C. A emissão da radícula também é bastante dependente da temperatura. Rosolem (2001) afirma que, independentemente da umidade do solo, o tempo para emissão da radícula diminui significativamente com o aumento da temperatura, com o tempo mínimo ocorrendo em temperaturas médias da ordem de 32°C e o crescimento do hipocótilo também é dependente da temperatura, mas sofre influência muito grande da umidade do solo.

O algodão possui um sistema radicular pouco volumoso, que explora pobremente certas regiões do solo (BROUNDER & CASSMAN, 1990). A raiz pivotante penetra o solo rapidamente, podendo atingir profundidade de 25 cm

ou mais por ocasião da abertura dos cotilédones. Durante esta fase, a raiz pode crescer de 1,2 a 5 cm por dia, se não houver impedimentos mecânicos (McMICHAEL, 1990).

Nas fases vegetativa e de floração, a planta cresce e define o número de nós, os quais dão origem aos ramos reprodutivos, ocorrendo intensa competição entre crescimento vegetativo e reprodutivo (OOSTERHUIS, 1999). Rosolem (2001) calculou que a vida média de uma folha é de 65 dias, mas o pico de fotossíntese ocorre aproximadamente 20 dias após a abertura da folha. Tendo em vista que o algodoeiro é uma planta tipo C_3 , com elevada taxa de fotorrespiração (cerca de 38% da fotossíntese) e alto ponto de compensação de CO_2 , essa planta é particularmente sensível à falta de luminosidade. Da abertura de capulho até a colheita, o metabolismo da planta diminui, sendo definida a qualidade das plumas.

2.2 Monitoramento da variabilidade da produtividade

O mapeamento da produtividade proporcionado pelas ferramentas da AP destaca-se como alternativa moderna para gerenciar a variabilidade espacial e temporal de lavouras comerciais, orientando práticas de manejo (MOLIN, 1997; MILANI et al., 2006). Tal aplicação, no entanto, requer, além da análise de mapas de produtividade, o histórico de várias safras de diferentes culturas para que a variabilidade temporal e espacial seja contemplada (BLACKMORE et al., 2003). Os mapas de produtividade de diversas culturas ilustram essa variabilidade, indicando locais com possíveis problemas agrônômicos que são considerados como ponto de entrada na AP (DAMPNEY & MOORE, 1999). A variabilidade encontrada no campo tem sido surpreendente e, na maioria dos casos, os índices de produtividade medidos nas áreas mais produtivas são mais de duas vezes superiores aos obtidos nas áreas menos produtivas (RODRIGUES, 2002). As produtividades das culturas de milho, de soja e de trigo estão correlacionadas entre si, com continuidade espacial da produtividade e têm sido altamente significativas na maioria das safras investigadas (AMADO et al., 2007).

A utilização de mapas de produtividade permite identificar as causas da variabilidade da produtividade das culturas, sendo um recurso eficaz nas decisões sobre o manejo do solo. Os mapas de produtividade de vários anos possibilitam, então, identificar a variabilidade temporal e permitem criar um mapa com a média dos dados, indicando zonas com semelhança (GODWIN & MILLER, 2003). Na análise de Lark et al. (1999), a sequencia de mapas de produtividade é uma forma de definir unidades de manejo em um talhão, associando-as aos atributos de solo. O mapa de produtividade apresenta relação com tipo de solo na área plantada, com a sua acidez em locais específicos, com a deficiência de nutrientes e com locais com falta ou excesso de água (CAPELLI, 2004).

O processo de colheita de algodão não se encontra dentro dos padrões de qualidade, devendo as condições de sua colheita serem revistas (SILVA et al., 2007), principalmente em relação as perdas de colheita e a variação da umidade ao longo do dia. Para a geração dos mapas de produtividade, é necessário que a colhedora seja equipada com sensor de rendimento, sistema de posicionamento global (GPS) e um dispositivo para o armazenamento das informações (produtividade, latitude e longitude) (SANTI, 2007).

A produtividade do algodoeiro é medida por sensores de fluxo de massa que ficam instalados nos anexos aos dutos de entrada de pluma e caroço de algodão na máquina e medem a quantidade que passa através dos mesmos (JOHN DEERE, 2006). Os dados de produtividade devem ser submetidos à limpeza de erros e a aplicação do processo de filtragem dos dados brutos permite obter resultados mais coerentes, elevando a qualidade final das informações (MENEGATTI & MOLIN, 2004). O processo de obtenção de dados e de processamento das informações pode ser visualizado na Figura 2.

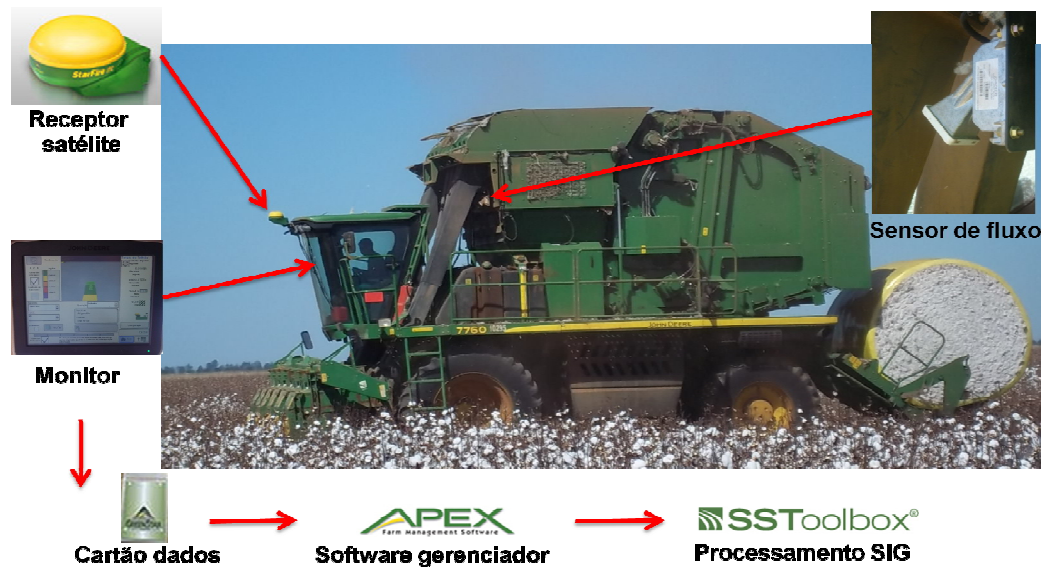


FIGURA 2 - Processo para geração mapas de produtividade na cultura do algodão. Fonte: SLC Agrícola (2011).

A produtividade da cultura do algodão é influenciada por diversos atributos de solo que podem ser explicados pela análise da variabilidade. A relação espacial entre a produtividade das culturas e os atributos físicos e químicos do solo indica que as lavouras podem ser divididas em zonas de manejo (FILHO, 2009). Tem-se encontrado variação da produtividade das culturas de soja, milho e trigo (AMADO, 2007) e sua correlação com atributos de solo, como pH água, Ca e Mg trocáveis, CTC e teor de argila (REICHERT et al., 2008). Para o algodão, entretanto, não existem relatos de monitoramento georreferenciado da produtividade no país.

A interpretação de um mapa de produtividade com a finalidade de gerenciamento da lavoura de algodão deve considerar principalmente as causas consistentes de variabilidade (CAMARGO et al., 2004). Essas causas podem ser compreendidas pelo acompanhamento e análise dos possíveis fatores que influenciam a variabilidade durante safras seguidas de algodão. A avaliação espacial e temporal de dados de colheita pode fornecer parâmetros para determinação de unidades de manejo diferenciado dessa cultura (MOLIN, 2002).

Necessitou-se de um tempo maior para os sensores de colhedoras de algodão fossem desenvolvidos, mas atualmente estão atingindo nível aceitável

de desvio, similares aos já alcançados pelos sensores de produtividade aplicados às culturas de grãos, que atualmente atingem níveis ao redor de 2,0% de erro (ANTUNIASSI et al., 2007).

2.3 Variabilidade dos atributos de solo e sua avaliação

Os atributos relacionados à fertilidade do solo são mapeados a partir da amostras de solo coletadas em grades (grids) de amostragem. O tamanho da malha amostral é influenciado pela magnitude da variabilidade dos atributos de solo, sendo que o espaçamento para a respectiva amostragem pode variar em função da resolução desejada, associada aos custos (COELHO, 2003; NANNI et al., 2011). A dependência espacial encontrada entre duas amostras de solo, para os atributos medidos com quadriculas foi de até 2,25 ha, no trabalho de Resende et al. (2006), excetuando-se o fósforo disponível (P), que só apresentou dependência espacial quando a amostragem foi feita mais densa, com 0,25 ha. Entre os atributos químicos, a variabilidade é maior para P e potássio (K) disponível (PONTELLI, 2006), enquanto o pH do solo apresenta menor variabilidade (FRANÇA et al., 2000). Segundo Cherubim (2013), em Latossolos Vermelhos no Rio Grande do Sul, as malhas amostrais utilizadas (amostras distantes com mais de 100 m) não são eficientes para demonstrar a variabilidade de acidez, bases trocáveis, P e K no solo.

A eficiência de utilização de P por dada espécie reflete o seu potencial em converter o P disponível no solo em biomassa (ANGHINONI, 2003). A deficiência de fósforo no algodoeiro pode resultar em desenvolvimento lento, com atrofia em todos os estádios de desenvolvimento, avermelhamento do caule e redução da área foliar (BRANDÃO, 2009a; BRANDÃO et al., 2009). Segundo Rosolem & Bastos (1997), com pequena deficiência desse nutriente as plantas já apresentam necrose de botões florais nas partes mais novas das plantas, além de amarelecimento das folhas mais velhas. Afora isso, a deficiência de P proporciona redução na taxa de assimilação de carbono e senescência prematura das folhas, limitando, assim, a futura produção de sementes e/ou fibra (MARSCHENER, 2012).

Os teores de P na solução dos solos da região do cerrado são geralmente muito baixos. Essa característica, associada à alta capacidade que esses solos têm para reter o P na fase sólida, é a principal limitação para o desenvolvimento da atividade agrícola rentável sem a aplicação de adubos fosfatados (SOUSA & LOBATO, 2004). No pH que comumente ocorre nos solos cultivados, o P é absorvido predominantemente na forma iônica de H_2PO_4^- . No solo, esse nutriente tem baixa mobilidade e é suprido às raízes, em sua grande maioria, pelo movimento difuso (difusão), de uma região de maior concentração para uma de menor concentração (BARBER, 1962).

Entretanto, o fósforo, juntamente com o nitrogênio (N), apresenta grande mobilidade dentro da planta (transporte a longa distância), chegando rapidamente às folhas ou às regiões de crescimento e, ainda, ser prontamente redistribuído (FERNANDES & SOUZA, 2004). O principal ponto de entrada do fosfato na via de assimilação (membrana plasmática) ocorre pela energia liberada pelo ATP (adenosina trifosfato), a fonte de energia da célula (LINCOLN & ZEIGER, 2004).

O boro (B), o cobre (Cu), o manganês (Mn) e o zinco (Zn) são os nutrientes em mais baixa disponibilidade nos solos de cerrado, sendo que sua deficiência afeta as espécies neles cultivadas (SFREDO et al., 1997). O algodoeiro tem respondido a adubação com B, em solos com acidez corrigida, níveis adequados de N, P e K, em solos arenosos e com pouca matéria orgânica (ROSOLEM, 2005). A aplicação via solo é a mais adequada para o fornecimento de B (RESENDE, 2004).

Conforme Rosolem (2005), aplicações de Zn em solos do cerrado, em fase de adubação corretiva, proporcionaram o aumento da produção do algodão em 28%. A maioria dos fertilizantes formulados possui baixa concentração de Zn (RESENDE, 2004). Aplicações de Cu não resultaram em resposta do algodoeiro (ROSOLEM, 2005). São recomendadas aplicações a lanço de pequenas quantidades de micronutrientes que podem suprir as necessidades da cultura por, pelo menos, quatro cultivos. Recomenda-se a aplicação de 2 kg ha^{-1} de Cu, 6 kg ha^{-1} de Mn, $0,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de molibdênio (Mo) e $6,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn, que podem ser aplicados em três anos consecutivos no sulco de plantio (CARVALHO & FERREIRA, 2006).

O algodoeiro exige grandes quantidades de fertilizantes para apresentar seu pleno potencial produtivo. Segundo Ferreira & Carvalho (2005), o algodoeiro extrai cerca de 247 kg ha⁻¹ de N, 91 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 260 kg ha⁻¹ de K₂O para obtenção de uma produtividade média de 3.560 kg ha⁻¹ de algodão em caroço no cerrado da Bahia. Para cada 1.000 kg de algodão em caroço produzidos, são exportados 50,9, 18,5, 33,0, 6,0, 21,0 e 5,1 kg de N, P₂O₅, K₂O, CaO, MgO e S, respectivamente (FERREIRA & CARVALHO, 2005), ou seja, a maior parte dos nutrientes extraídos permanece no campo como constituinte de ramos, folhas e cascas de frutos, exceto para o N, cuja maior parte é exportada pelas sementes do algodão, que são ricas em proteína (BRANDÃO, 2009a).

A exigência do algodoeiro em K é, em média, de aproximadamente 60 kg de K para cada tonelada de algodão em sementes, e a época de máxima taxa de absorção coincide com o florescimento (RAIJ et al., 2001). Desse total, aproximadamente 18 kg são exportados (CARVALHO et al., 2008). Durante o desenvolvimento dos frutos, a absorção de K do solo é muito pequena, mas a translocação dos demais tecidos da planta aos frutos é intensa, de modo que há muito K nas cápsulas (ROSOLEM et al., 2012).

Para a identificação da variabilidade existente em uma área, faz-se necessário a amostragem do solo espacialmente (grid). Esse processo, realizado na AP, utiliza malhas definidas em programas computacionais ou com amostragens dirigidas, baseadas em características conhecidas, como a variabilidade da produtividade (SANTI, 2007). Após a geração de mapas temáticos e realizadas as interpretações, é possível realizar a aplicação de fertilizantes ou corretivos em taxa variável plena ou em zonas de manejo, sendo essa diferenciada pela aplicação de doses fixas para cada zona diferenciada. O monitoramento dos níveis de nutrientes no solo, bem como a avaliação nutricional da planta (análise de tecido e diagnose visual), possibilita acompanhar a evolução dos atributos de solo.

Uma alternativa para reduzir o número de amostras de solos a serem coletadas é a separação de áreas contrastantes com o uso de sensores de condutividade elétrica aparente (CEa). A CE é definida como o inverso da

resistividade elétrica oriunda da aplicação de uma corrente elétrica em dois eletrodos, sendo uma medida da tensão formada entre as duas hastes.

Algumas pesquisas relatam que as leituras da CEa estão relacionadas a características e propriedades do solo como salinidade, umidade, textura e CTC (MOLIN & RABELLO, 2011), sendo possível obter boas correlações entre elas a partir de leituras da CEa tomadas em campo com o sensor VERIS 3100 (VERIS TECHNOLOGIES, 2011; SUDDUTH et al., 2005), embora haja ainda necessidade de calibração do sensor (COELHO, 2003). Os mapas de condutividade elétrica do solo com resolução na ordem de um metro, apesar de não excluïrem a análise de amostras em laboratório, fornece uma orientação para realizar amostragens estratégicas pela identificação de zonas homogêneas (INAMASSU et al., 2007). A medida da condutividade elétrica aparente do solo é uma alternativa prática, por ser rápida e de custo baixo, e se correlaciona com diversos atributos químicos e físicos, como MO, textura, CTC, N, P e K disponíveis e pH, entre outros (LUCHIARI et al., 2001; BRANDÃO et al., 2011).

O monitoramento de nutrientes no solo constitui-se em uma das principais ferramentas no manejo e é comumente realizado com base em resultados da análise de amostras de solo. Entretanto, a amostragem de solo é trabalhosa e sua execução é limitada pelo número de pontos de coleta na área. Uma alternativa às análises convencionais pode ser utilizada na cultura do algodão pela medida da CEa. O pH é sensível à força iônica do solo que é alterada por variações dos teores dos íons presentes na solução do solo. Maiores forças iônicas, que são provocadas por teores mais alto de nutrientes no solo, tendem a reduzir o pH (LINDSAY, 1979).

Em amostras de dimensões e formas não definidas, o sistema de quatro pontos é utilizado. O método utiliza quatro eletrodos de metal alinhados, ou sensores de contato (SMTIS, 1958). Na Equação 1 está descrito o cálculo da resistividade:

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \quad (1)$$

Onde:

ρ - resistividade elétrica (ohms x m);
S - distância entre eletrodos (m);
V - tensão entre dois eletrodos (volts);
I - corrente elétrica (ampére).

Sendo a condutividade o inverso da resistividade, temos na Equação 2:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Onde:

σ - Condutividade elétrica aparente do solo (mS m^{-1}) (Siemens/metro).

Estudos apontam que as leituras de CEa podem ser relacionadas a propriedades do solo, como atividade de íons, umidade, textura, CTC e MO orgânica, possibilitando estabelecer correlações com a CEa (JOHNSON et al., 2005; SUDDUTH et al., 2005).

Para o estabelecimento de uma corrente elétrica no solo, é necessária a ocorrência de três fatores isolados ou associados: (i) íons devem estar dissolvidos na solução do solo, ocupando os microporos; (ii) existência de cátions trocáveis na interfase sólido-líquida do solo; (iii) as partículas devem estar em contato contínuo e direto umas com as outras na fase sólida (CORWIN e LESH, 2005).

A utilização de conceitos de geoestatística pelo método da krigagem (KRIGE, 1951) procura encontrar o sentido nas variâncias calculadas levando em conta a distância entre as amostras. A utilização de semivariogramas possibilita estimar a continuidade espacial, variando de um lugar para outro (MATHERON, 1971). Métodos geoestatísticos e krigagem são comumente utilizados para a geração de mapas de dados pontuais, como os de análise de solo. Estudos de Johnson et al. (2002) demonstraram modelos de correlação espacial em propriedades de solo e a produtividade de fibra de algodão.

O estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo tem a sua principal importância atribuída à aplicação de fertilizantes e corretivos em taxas variáveis. Os produtos gerados pelo mapeamento do solo proporcionam a aplicação, em taxa variável, de corretivos e de fertilizantes para correção do solo ou fertilização da cultura. Com base nas informações contidas nesses

mapas, são tomadas as decisões que envolvem o manejo localizado dessas áreas (SILVA et al., 2003).

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo torna-se importante para otimizar as aplicações localizadas de corretivos e fertilizantes e reduzir a degradação ambiental provocada por seu uso excessivo no cultivo do algodoeiro. O uso de técnicas de AP permite recomendar o uso de corretivos e fertilizantes em taxas variáveis, proporciona a redução de custos da lavoura e o aumento de sua produtividade (VIANA, 2005). Os dados analíticos podem ser processados por métodos geoestatísticos pelo estudo de semivariogramas (VIEIRA, 2000). O uso da geoestatística permite que a estrutura de dependência espacial seja modelada e visualizada espacialmente e, assim, indicar alternativas adequadas de manejo, considerando a variabilidade das características físico-hídricas e químicas do solo sobre o desenvolvimento das plantas (MENDES et al., 2008).

2.4 Variabilidade dos atributos de planta

Análises foliares de nutrientes permitem a identificação de possíveis deficiências nutricionais nas plantas de algodão e, com isso, a realização de realizar aplicações de fertilizantes foliares ou planejamento, de forma mais eficiente, a adubação da próxima safra. O estudo feito por Silva et al. (2009), utilizando o método do Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS), destacou limitação de S, Mg, Ca, B e P em lavouras comerciais de algodão. A utilização de amostras de folhas para determinação de nutrientes na planta pode ser relacionada com os atributos de solo.

As análises foliares podem ser submetidas à avaliação geoestatística para representação da variabilidade espacial. Segundo Bernardi et al. (2002), foi possível ajustar modelos de semivariogramas quando estudaram os teores foliares de nutrientes em soja, onde os modelos esférico e exponencial foram adequados para explicar o comportamento espacial dessas variáveis.

A metodologia convencional de análise foliar possui como inconvenientes o alto tempo para obtenção dos resultados, o que impossibilita a identificação e a tomada de decisão, quando há necessidade de realizar alguma adubação

complementar durante o ciclo da cultura do algodão, além de exigir um alto investimento para amostragem e análise de uma grande quantidade de amostras. Como alternativa, surgem avaliações não destrutivas de plantas, com a utilização de aparelhos que medem o índice de clorofila, indicando ser um meio eficaz de avaliar o estado nutricional da cultura, por meio de correlações entre os teores de nutrientes nas folhas e o índice obtido com o uso do aparelho (BRANDÃO et al., 2009). Estudos mostram a necessidade de estabelecer critérios de comparação entre as leituras do índice de clorofila (SPAD) e a nutrição do algodoeiro (NEVES et al., 2009).

A utilização de medidores de clorofila possibilita uma rápida e eficaz estimativa do conteúdo foliar, o que permite a avaliação do estado nutricional de N na planta (ZOTARELLI et al., 2002). A utilização do clorofilômetro é uma prática que pode auxiliar na nutrição do algodoeiro. Entretanto, variações devido ao uso de regulador de crescimento, cultivar e locais de cultivos devem ser considerados na interpretação das curvas elaboradas com esse índice (NEVES et al., 2009). Na Figura 3, podem ser observados os picos de absorbância da clorofila, aos 465 e 665 nm, e as emissões do clorofilômetro aos 650 e 940 nm.

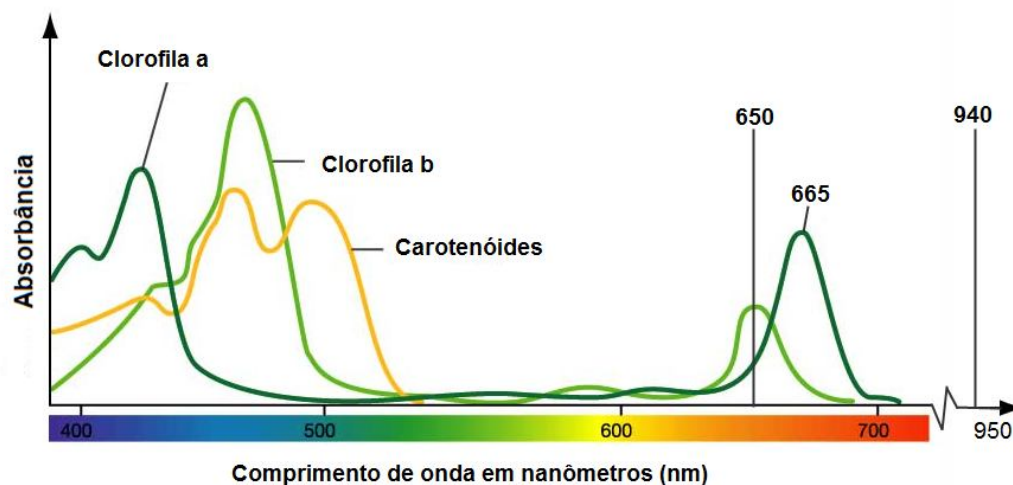


FIGURA 3 - Demonstrativo dos comprimentos de onda absorvidos pelo sensor de clorofila. Fonte: Rosnow (2013); Darnell et al. (1990).

O conhecimento da reflectância de uma cobertura vegetal permite relacionar a presença de pigmentos, espaços ocupados por água e ar e

estruturas vegetais com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente (GATES et al., 1965; BRANDÃO, 2009a). A região do visível (400 a 700 nm) e do infravermelho (700 nm a 1 mm) possibilitam verificar a refletância das folhas (ALVES, 2011) (Figura 4). As faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo (IVP) são muito úteis no monitoramento da vegetação, pois possuem alta correlação com variáveis da planta como altura, densidade e percentual de cobertura (BRANDÃO, 2008). A razão entre o IVP e o canal vermelho fornece uma alta correlação com o desenvolvimento das plantas e com seus estádios de crescimento, sendo esse um dos primeiros índices de vegetação (IV) estudados (MOREIRA, 2011).

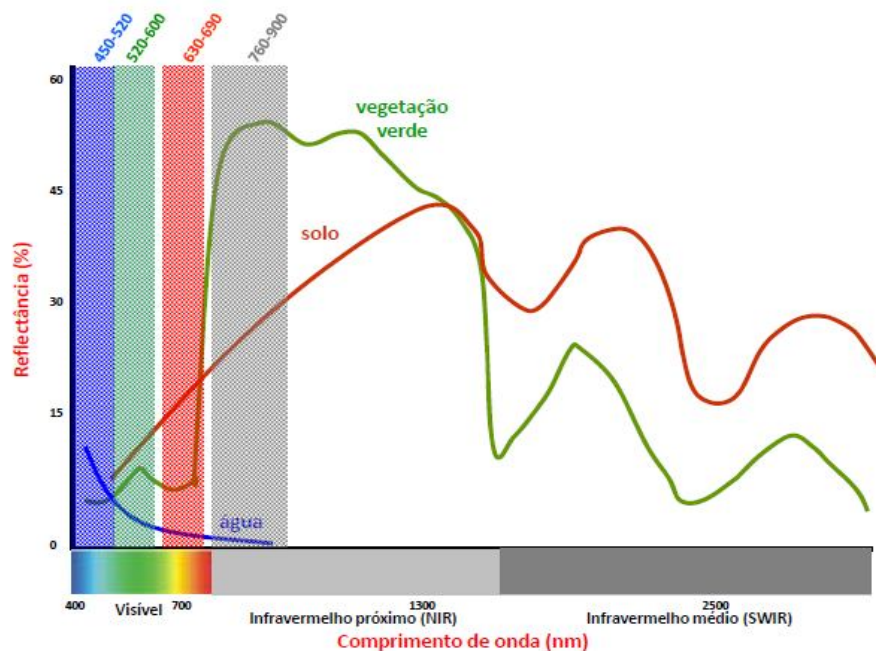


FIGURA 4 - Representação do comportamento da refletância para diferentes alvos. Fonte: Adaptado de Gibson & Power, 2000.

Os índices de vegetação baseiam-se em combinações das refletâncias de diferentes faixas espectrais escolhidas de acordo com as características da vegetação que se quer acentuar, de forma que seja possível identificar características biofísicas ou bioquímicas da cultura em estudo (BRANDÃO et al., 2005).

De acordo com Brandão (2009a), na faixa do visível do espectro eletromagnético (400-700 nm) são os pigmentos (clorofilas e carotenoides) que

dominam a resposta espectral da vegetação (Figuras 3 e 4). No comprimento de onda próximo a 460 nm (faixa do azul no espectro eletromagnético) e em torno de 660 nm (vermelho), ocorre baixa reflectância devido a duas bandas de absorção da clorofila, que absorve a maior parte da energia nesses comprimentos de onda. Na faixa do visível, boa parte da energia que atinge a folha é absorvida, sendo pouca energia transmitida ou refletida através das folhas. A relativa baixa absorção em torno de 550 nm (verde) permite um pico de reflexão (BRITO et al., 2011). Assim, quando a planta está sob estresse e a produção de clorofila é reduzida, as folhas absorvem menos nas bandas de absorção da clorofila e apresentam-se mais avermelhadas ou amareladas (BRANDÃO, 2009a).

A estrutura do mesófilo é responsável pela reflectância no infravermelho próximo (700 nm – 1.300 nm), pois a reflexão das folhas nessa faixa não é controlada pelos pigmentos. A reflectância aumenta porque as folhas absorvem pouca energia nesta região. Já no infravermelho médio, a resposta espectral é fortemente dominada pelas bandas de absorção da água (ZARCO-TEJADA et al., 2005). Entretanto, essas características espectrais da vegetação não são fixas, pois podem mudar de acordo com a cultura estudada, com os estresses ocasionados por doenças, ataque de insetos, variações no teor de umidade, déficits nutricionais ou o efeito da temperatura (WIEGAND et al., 1991; HABOUDANE, et al., 2002). As mudanças ocorrem quase simultaneamente tanto na faixa do visível quanto no infravermelho próximo, revelando alterações no vigor, índice de área foliar (IAF) ou biomassa da cultura (BRANDÃO, 2009a)

Um dos índices mais utilizados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que permite mapear a vegetação, usando características espectrais que podem estimar a quantidade de cobertura vegetada e a condição nutricional da vegetação em uma determinada área. Consequentemente, o NDVI vem sendo utilizado no estudo do ciclo de crescimento da vegetação e na análise de eventuais perturbações em seu ciclo sazonal (INPE, 2011).

Os dados de reflectância podem ser obtidos por sensores orbitais (satélites), semi orbitais (radares), imagens aéreas ou por equipamentos espectralradiométricos próximos à cultura em estudo. Tanto medições

radiométricas como imageamentos são realizados durante o ciclo da cultura e com os resultados, pode se obter mapas de variabilidade. Após tratamento dos dados, esses fornecem índices de vegetação que podem ser relacionados com atributos de fertilidade e de compactação do solo e produtividade da cultura, além de outros parâmetros associados ao solo, como presença de água e textura (CONAB, 2005), ou a características bioquímicas da cultura (HABOUDANE et al., 2002; BRANDÃO 2009a; BRITO et al., 2011).

A estimativa de rendimento do algodoeiro usando NDVI de imagens de satélite deve considerar a variabilidade no crescimento e rendimento da cultura. A variação espacial do NDVI pode ser utilizada como base para a aplicação variável de maturador e desfolhante de folhas e plantas e auxiliar na colheita, isso é possível, pois os menores valores de NDVI indicam desfolha acentuada das plantas e conseqüentemente menor necessidade desses produtos (GUO, 2005).

Até o momento, poucos foram os estudos no Brasil que relacionaram a variabilidade da produtividade do algodoeiro aos atributos de solo e de planta. É provável que essa limitação seja, ao menos em parte, devido a baixa adoção de sensores de produtividade nas máquinas de colheita dessa cultura.

2.5 Princípios da Agricultura de Precisão

A adoção do processo de AP só foi possível devido à disponibilidade de tecnologias como o Sistema de Posicionamento Global (GPS), a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), juntamente com a análise geoestatística. No Brasil, a AP foi introduzida nos anos de 1995 e 1996, porém restrita a poucas ferramentas e utilizada por poucos agricultores.

Alguns técnicos e agricultores têm confundido os conceitos de precisão na agricultura com AP (COELHO, 2008). A primeira está relacionada com a capacidade de planejamento e gerenciamento do produtor, enquanto que a segunda engloba o gerenciamento dos sistemas de produção agrícolas

utilizando os princípios de variabilidade espacial e temporal em determinada área, constatada por verificações realizadas no solo ou nas plantas.

Entre os vários princípios aplicados na AP, a combinação de variáveis regionalizadas com conceitos estatísticos permite estimar valores para locais onde não existem amostras ou dados e, assim, discorrer a ocorrência de variáveis relacionadas ao solo e às plantas. A utilização da geoestatística deve ser tratada como rotina em análises de dados, para possibilitar maior exatidão científica nas recomendações (VIEIRA, 2000). Na Figura 5, podem ser visualizados os componentes de um semivariograma experimental, utilizado para estabelecer o comportamento dos atributos estudados.

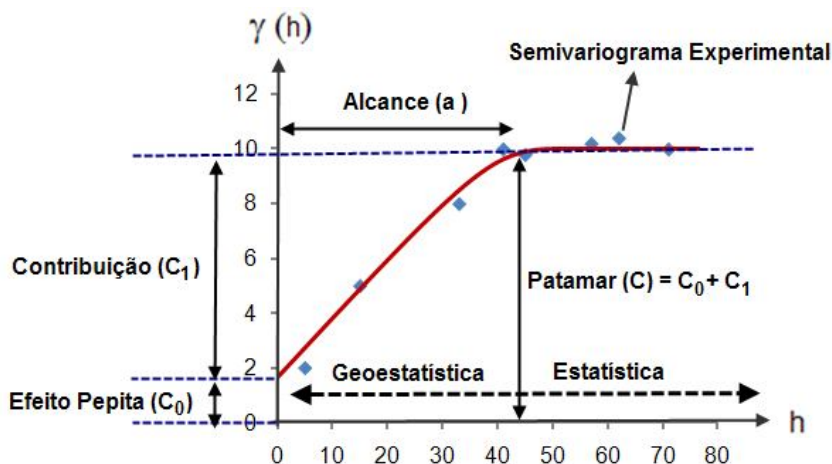


FIGURA 5 - Exemplo de semivariograma experimental e teórico. Fonte: Adaptado de Camargo (1997).

Entre os componentes do semivariograma, o alcance é um dos parâmetros que auxiliam na definição da dependência espacial, representando a distância máxima que um atributo está correlacionado espacialmente. Deve-se ter o cuidado de não extrapolar o alcance encontrado para outras regiões (Cherubim, 2013).

À medida que a distância h aumenta, $\gamma(h)$ também aumenta, até um valor máximo que é estabilizado, este valor é o patamar (“sill”). A distância na qual $\gamma(h)$ atinge o patamar é chamada de alcance (“range”), sendo a distância limite de dependência espacial. Amostras separadas por distâncias maiores que o alcance são consideradas aleatórias e, assim, são independentes entre si e para

estes dados à estatística clássica pode ser utilizada. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores são correlacionadas umas às outras, permitindo realizar as interpolações (VIEIRA, 2000).

À medida que h tende para zero, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita (“nugget effect”), símbolo C_0 (que revela descontinuidade do semivariograma, erros de medição). Quando o semivariograma, ao invés de ser crescente e dependente de h , for constante e igual ao patamar para qualquer valor de h , então tem-se efeito pepita puro, ou ausência total de dependência espacial, e a variação é ao acaso no espaço. (VIEIRA, 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização, caracterização e histórico da área experimental

A pesquisa foi conduzida em uma área comercial localizada na Fazenda Pamplona, no município de Cristalina-GO, cujas coordenadas de referência são $16^{\circ} 13' 40,15''$ S e $47^{\circ} 37' 40,77''$ O, e altitude média de 1010 m (Figura 6). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 1999), com profundidade efetiva superior a 5 m, e teores de argila variando de 518 a 742 g kg^{-1} . O solo, inserido em posição plana da paisagem, foi formado em material geológico proveniente de sedimentos arenosos e argilo-carbonáticos desde muito pouco até forte grau metamórfico (IBGE, 2013). A região do Planalto Central compõe o bioma do Cerrado, onde a vegetação característica é de savana (IBGE, 2004).

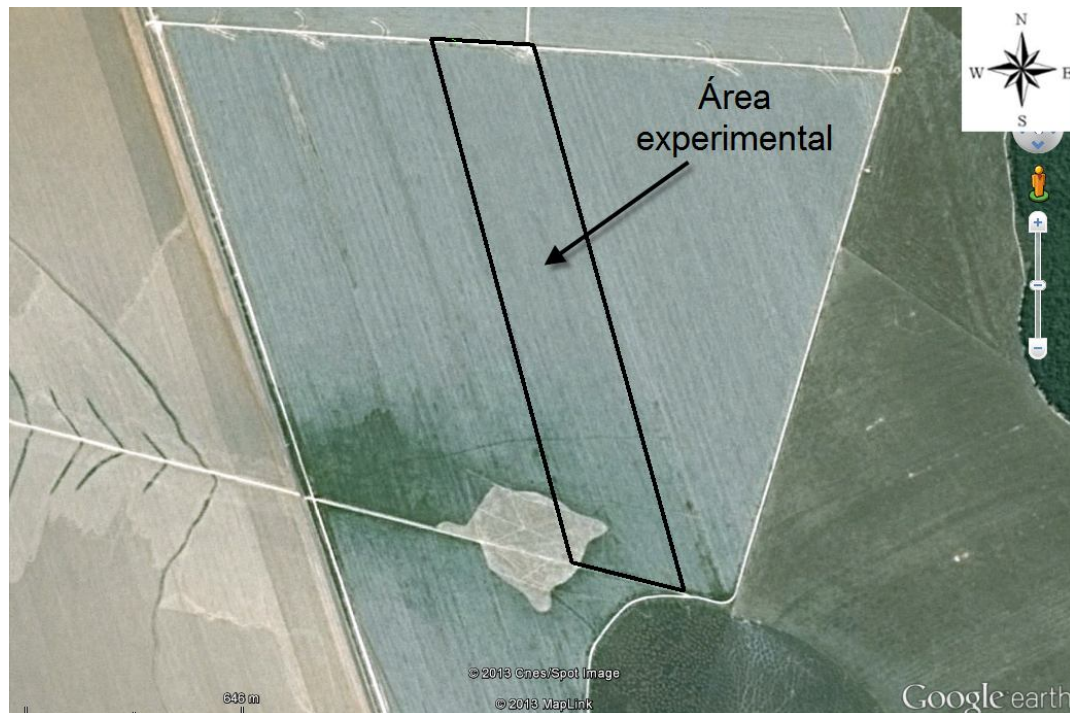


FIGURA 6 - Localização da “lavoura E” da Fazenda Pamplona, Cristalina-GO, e da área experimental, no ano 2000. Fonte: Google Earth (2012).

A área experimental de 56,1 hectares foi delimitada na faixa central da lavoura (Figura 6), sendo selecionada por possuir histórico de variabilidade produtiva e de desenvolvimento de plantas (altura da planta, número de maçãs e o desenvolvimento do algodão) em seu histórico de cultivos. A avaliação de potencial produtivo constatado ao longo dos anos na área experimental é visual e foi apontada pela equipe técnica da fazenda. A lavoura possui ao norte solo bem drenado e ao sul região mal drenada (lençol freático raso), devido à proximidade de área de banhado e que possui períodos mais longos de encharcamento do solo.

Dentro da área experimental, foram demarcados e georreferenciados 90 pontos, espaçados em grade amostral de 80x80 m (Figura 7a). Utilizou-se, para isso, aparelho de GPS modelo 76CSx da Garmin®. Esses pontos foram utilizados como referência para todas as amostragens, medições e leituras realizadas nas safras 2010/11 e 2011/12.

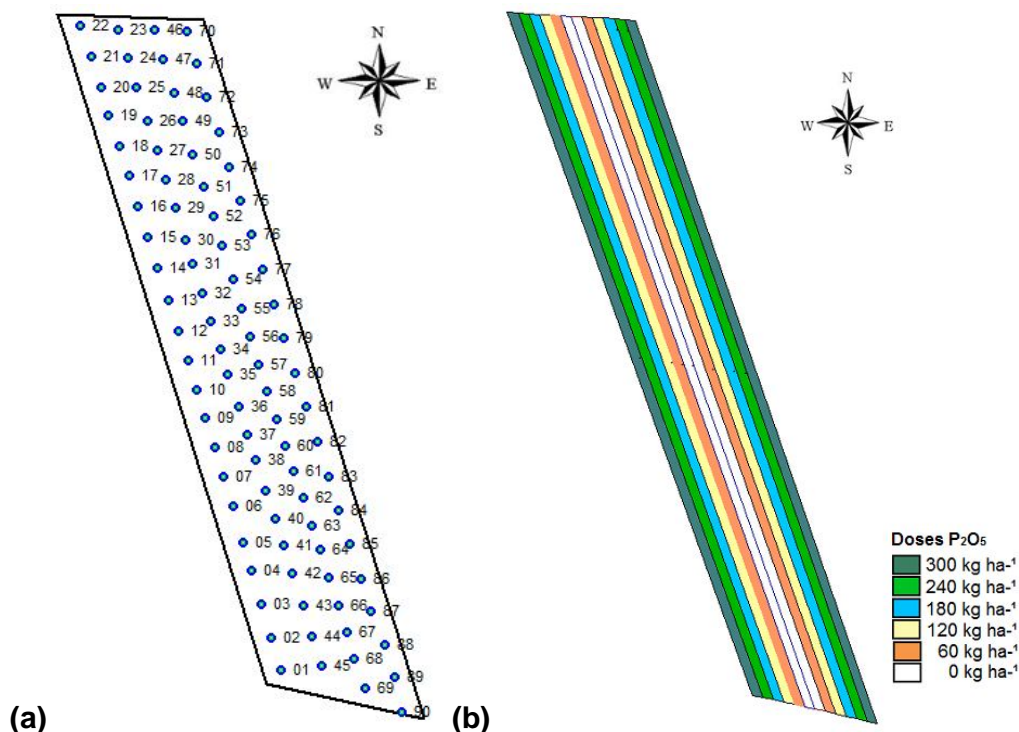


FIGURA 7 - Mapas de localização: a) grade amostral 80x80 m nas safras 2010/11 e 2011/12 e b) demonstrativo das faixas com diferentes doses de P₂O₅ na safra 2011/12.

No ano agrícola 2011/12, foram implantadas na área experimental faixas com diferentes doses de P₂O₅ para verificar a resposta do algodoeiro à adubação fosfatada (Figura 7b). Foram estabelecidas as doses de 0, 60, 120, 180, 240 e 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅, onde a dose 0 kg ha⁻¹ identifica a testemunha, 60 kg ha⁻¹ referente à meia dose da adubação padrão utilizada na lavoura, 120 kg ha⁻¹ representa a dose padrão, 180 kg ha⁻¹ uma dose e meia padrão, 240 kg ha⁻¹ duas doses padrão e 300 kg ha⁻¹ duas doses e meia padrão. A aplicação ocorreu antes do plantio, como fertilizante formulado 05-32-00+micros. Não foram corrigidas as doses de N entre as diferentes doses de formulado adicionado ao solo. Foram definidas duas repetições para cada tratamento, sendo que a escolha da posição das faixas com diferentes doses foi induzida para que as maiores doses, acima da dose padrão, estivessem localizadas em zonas com baixos níveis de P no solo, a leste da área experimental e altos níveis a oeste da área e, assim verificar o efeito de doses superiores a padrão em regiões com níveis baixos de P no solo.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical, com estação seca definida. A precipitação anual é de 1516,1 mm (SLC Agrícola, 2012), distribuídos principalmente na estação chuvosa que compreende o final do mês de outubro até o início do mês de abril (Figura 8).

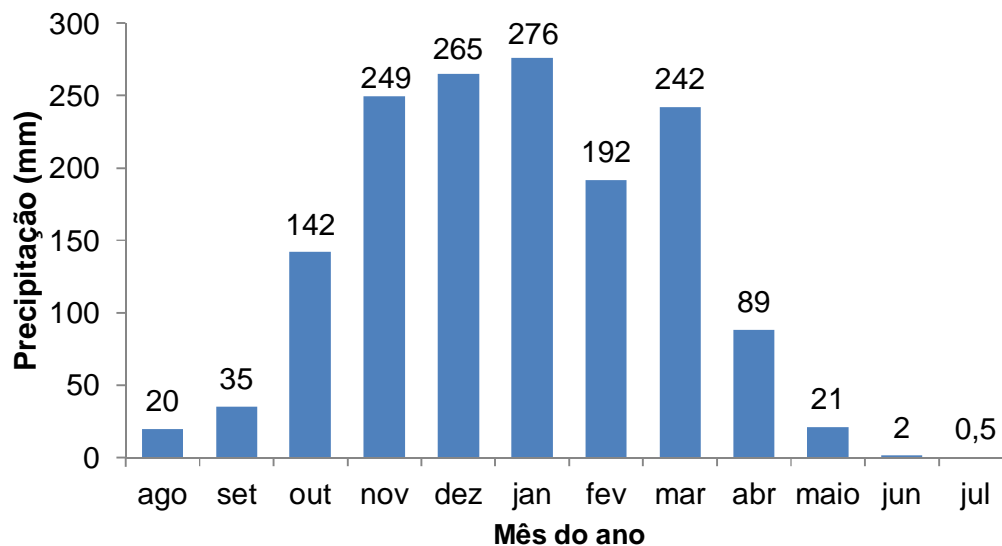


FIGURA 8 - Precipitação mensal da fazenda Pamplona, Cristalina-GO. Média de 11 anos (2001 – 2012). Fonte: SLC Agrícola (2012).

A precipitação registrada na safra 2010/11 (Figura 9a), no período de outubro a maio, foi de 1.308,3 mm, 13,7% inferior à média dos últimos 11 anos. Já na safra 2011/12 (Figura 9b), a precipitação atingiu 1973 mm, 30,17% superior em relação à média dos últimos 11 anos.

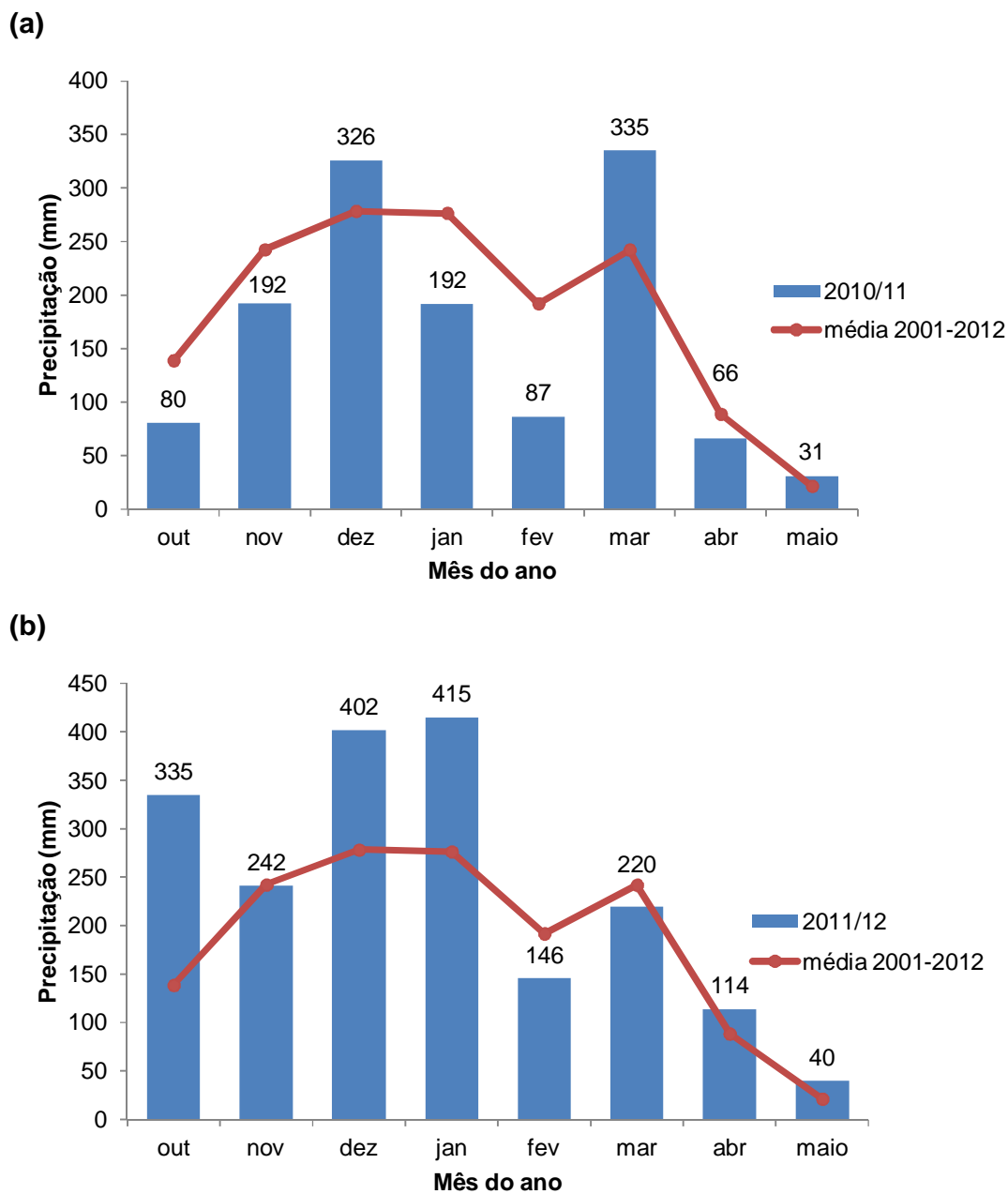


FIGURA 9 - Precipitação mensal nas safras 2010/11 (a) e 2011/12 (b), Fazenda Pamplona, Cristalina-GO. Fonte: SLC Agrícola (2012).

A área em estudo, é denominada “Lavoura E”, vem sendo cultivada ao longo dos anos e foi, predominantemente, a rotação anual com soja (*Glycine max*) e algodão (*Gossypium hirsutum L.*), com exceção da safra 2007/08, com cultivo de milho (*Zea mays*). Em relação ao manejo de solo, todos os revolvimentos foram realizados visando o cultivo do algodoeiro (Tabela 4).

A última correção de solo com calcário foi realizada no ano agrícola 2010/11, em aplicação superficial, na dose de $2,2 \text{ t ha}^{-1}$, visando elevar a saturação por bases (V desejada) para 60%, precedendo a operação de escarificação. As aplicações de gesso agrícola realizadas nas safras 2004/05 e 2009/10 visaram promover a construção de um perfil de solo adequado ao desenvolvimento radicular do algodão e superar períodos de veranicos da região pela descida de cátions junto com o ânion SO_4^{2-} , além de ser fonte de enxofre (S) para as culturas. A correção do solo com P durante os seguintes cultivos foi realizada para atingir a suficiência no solo de 6,0 a $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$ (P-extraído por Mehlich 1), quando o teor de argila é superior a 60%.

As adubações de manutenção foram estabelecidas conforme recomendação específica de cada cultura, visando principalmente, no caso do algodão, repor a exportação de nutrientes por caroço e fibras e considerando a eficiência de recuperação dos nutrientes do solo. De maneira geral, a adubação anual de manutenção do algodão utiliza as seguintes doses e fontes: 150 kg ha^{-1} de N, nas formas de uréia e sulfato de amônio, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de fertilizante formulado (05-32-00 + micronutrientes) e 120 kg ha^{-1} de K_2O , com a aplicação de cloreto de potássio. Na safra 2011/12, devido à alta concentração de chuvas logo após a aplicação de N, foi necessário aplicar uma dose extra de 50 kg ha^{-1} deste nutriente.

TABELA 4. Histórico de rotação de culturas, manejo de solo, adubações e correção de solo na “Lavoura E”, Fazenda Pamplona, Cristalina-GO.

Ano agrícola	Rotação culturas	Manejo do solo ⁽¹⁾	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Calagem ⁽²⁾	Gessagem ⁽³⁾
----- kg ha ⁻¹ -----							
2000/01	Algodão	PC	107	108	117	2.500	
2001/02	Soja	CM	8	56	56		
2002/03	Algodão	SD	110	128	110		
2003/04	Soja	SD	9	63	60		
2004/05	Algodão	SD	154	144	100		1.000
2005/06	Soja	SD	6	56	57		
2006/07	Algodão	SD	120	99	99	2.000	
2007/08	Milho	CM	151	104	90		
2008/09	Algodão	SD	155	128	111		
2009/10	Soja	SD	9	80	48		2.000
2010/11	Algodão	CM	152	192	120	2.200	
2011/12	Algodão	SD	201	160	120		

⁽¹⁾ Manejo de solo: PC = plantio convencional (aração + grade); CM = cultivo mínimo (escarificação); SD = semeadura direta; ⁽²⁾ Calcário dolomítico – garantias aproximadas: 20% CaO + 12,7% MgO; ⁽³⁾ Gesso agrícola – garantias aproximadas: 15% S + 20% Ca.

Na Tabela 5, pode-se verificar os resultados de análise de solo da “Lavoura E” antes da delimitação da área experimental (safra 2009/10) e a média dos 90 pontos amostrados em grade (grid), antes da semeadura do algodão na safra 2010/11.

TABELA 5. Resultados de análise do solo nas safras 2009/10 e 2010/11

Safra	Área (ha)	pH CaCl ₂	pH água	Índice SMP	H+Al	Al	Ca	Mg	K	SB	CTC pH 7,0	V	
----- cmol _c dm ⁻³ -----												%	
09/10 ⁽¹⁾	820	5,3	6,0	6,4	2,8	0,0	4,2	1,0	0,36	5,6	8,4	66	
10/11 ⁽²⁾	56,1	5,4	5,7	6,5	2,6	0,0	3,1	1,1	0,25	4,4	7,0	63	
----- mg dm ⁻³ -----													--- g kg ⁻¹ ---
		P Mehlich	P Resina	S	Na	B	Fe	Mn	Cu	Zn	MO	Argila	
09/10 ⁽¹⁾	820	5,0	11,0	65,0	2,3	0,2	118,5	4,5	1,5	14,5	40	640	
10/11 ⁽²⁾	56,1	3,5	38,0	54,0	5,5	1,3	38,1	2,3	1,7	3,9	29	595	

⁽¹⁾ Resultados de análise de solo da safra 2009/10, representando a área total da lavoura E.

⁽²⁾ Resultados de análise de solo da safra 2010/11, representando a média dos 90 pontos amostrados em grade na área experimental.

3.2 Implantação e manejo da cultura do algodão

Na safra 2010/11, a semeadura foi realizada no dia 23/11/2010, utilizando-se a variedade FMT 701 (FUNDAÇÃO MT, 2011), com espaçamento entre linhas de 0,76 m e população desejada de 100.000 plantas ha⁻¹. Já na safra 2011/12, a semeadura do algodão resultou em baixa população e foi necessário realizar ressemeadura da lavoura em 09/12/11, utilizando a variedade Fiber Max 993 (BAYER CROPSCIENCE, 2013). O resumo das operações realizadas pode ser visualizado na tabela 6.

TABELA 6. Atividades realizadas na área experimental na safra 2010/11

Atividade	DAE ⁽¹⁾	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
----- 2010 -----													
Calagem	-73									x			
Condutividade elétrica	-18											x	
Amostragem de solo	-16											x	
Adubação lanço KCl ⁽²⁾	-10											x	
Semeadura	0											x	
Adubação sem. 05-32-00 ⁽³⁾	0											x	
Adubação cobertura SAM ⁽⁴⁾	15												x
Adubação foliar cloreto Mn ⁽⁵⁾	33												x
Adubação foliar MAP purif ⁽⁶⁾	33												x
----- 2011 -----													
Adubação cobertura - uréia	44	x											
1° fotografia aérea	49	x											
1° amostragem de folhas	70		x										
1° avaliação SPAD ⁽⁷⁾	70		x										
Adubação foliar MAP purif.	78		x										
Adubação foliar KNO ₃ ⁽⁸⁾	78		x										
Adubação foliar B ⁽⁹⁾	78		x										
Adubação foliar KNO ₃	87		x										
Adubação foliar B	87		x										
Adubação foliar KNO ₃	101			x									
2° amostragem de folhas	110			x									
2° avaliação com SPAD	110			x									
2° fotografia aérea	170					x							
Colheita mecanizada	282									x			

⁽¹⁾ DAE = dias após a emergência; ⁽²⁾ KCl = cloreto de potássio; ⁽³⁾ 05-32-00 = formulado (5%N+32%P₂O₅+10%Ca+6%S+0,5%Mn+0,5%B); ⁽⁴⁾ SAM = sulfato de amônio granulado (18%N+21,6%S); ⁽⁵⁾ Cloreto Mn = Cloreto de manganês (14%Mn); ⁽⁶⁾ MAP purif. = monofosfato amônio purificado (12%N+61%P₂O₅); ⁽⁷⁾ Clorofilômetro, Índice SPAD; ⁽⁸⁾ B = octaborato de sódio (20,5%B); ⁽⁹⁾ Nitrato de potássio = 12%N+43%K₂O.

O manejo com herbicidas, fungicidas, inseticidas e reguladores de crescimento seguiram os padrões utilizados pela Fazenda, que constam no Manual de Qualidade do Algodão (SLC Agrícola 2012) e das recomendações de instituições de pesquisa para a cultura do algodão. (EMBRAPA, 2003).

Antes da semeadura da safra 2011/12, foi realizada a operação de incorporação das diferentes doses de P_2O_5 na área experimental (Tabela 7). Cada faixa foi composta de duas passagens de semeadora/adubadora, com distância entre linhas de 0,5 m e 12 m por passagem resultando na largura TOTAL de 24 m. O comprimento de cada faixa foi igual à maior distância da área experimental.

TABELA 7. Atividades realizadas na área experimental na safra 2011/12

Atividade	DAE ⁽¹⁾	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jul	Jun	Ago	Set	Nov	Dez
----- 2011 -----												
Adubação de cobertura KCl ⁽²⁾	-55											
Doses de P (05-32-00+micros) ⁽⁹⁾	-26											
Avaliação de compactação solo	-26											
Semeadura	0											x
----- 2012 -----												
Adubação foliar cloreto Mn ⁽³⁾	35	x										
Adubação foliar MAP purif. ⁽⁴⁾	35	x										
Adubação de cobertura SAM ⁽⁵⁾	41	x										
Adubação foliar MAP purif.	57		x									
Adubação de cobertura uréia	63		x									
Adubação foliar MAP purif.	76		x									
Adubação foliar uréia	76		x									
Adubação foliar KNO ₃ ⁽⁶⁾	100			x								
Adubação foliar B ⁽⁷⁾	100			x								
Adubação de cobertura uréia	100			x								
Amostragem de folhas	108				x							
Avaliação com SPAD ⁽⁸⁾	108				x							
Adubação foliar KNO ₃	145					x						
Colheita mecanizada	271											x

⁽¹⁾ DAE = dias após a emergência; ⁽²⁾ KCl = cloreto de potássio; ⁽³⁾ Cloreto Mn = cloreto de manganês (14%Mn); ⁽⁴⁾ MAP purif. = monofosfato amônio purificado (12%N+61%P₂O₅); ⁽⁵⁾ SAM = sulfato de amônio granulado (18%N+21,6%S); ⁽⁶⁾ Nitrato de potássio = 12%N+43%K₂O; ⁽⁷⁾ B = octaborato de sódio (20,5%B); ⁽⁸⁾ Índice SPAD; ⁽⁹⁾ 05-32-00 = formulado (5%N+32%P₂O₅+10%Ca+6%S+0,5%Mn+0,5%B).

3.3 Amostragens e determinações de solo

3.3.1 Coleta do solo e determinações químicas

A malha (grid) de coleta de amostra de solo foi pré-estabelecida e registrada pelas coordenadas geográficas (latitude e longitude) com um ponto de coleta a cada 80 m, representando 0,64 hectare por amostra. Foram amostrados 90 pontos, antes do primeiro cultivo, utilizando uma grade reticulada em toda a área, sendo que, em cada ponto, foi realizada a coleta de sete sub-amostras para compor uma amostra composta, em um raio de amostragem de cinco metros, totalizando aproximadamente 500 gramas de solo. A amostragem de solo foi realizada utilizando trado de rosca, com diâmetro de 2" (5,1 cm), com acionamento hidráulico na tomada de força do trator, nas entrelinhas do cultivo anterior para evitar o efeito da adubação em linha. A camada efetiva de amostragem foi de 0-0,2 m. As amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas, identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Solos do Instituto Brasileiro de Análise (IBRA), Sumaré – SP.

As amostras de solo foram analisadas seguindo metodologia padrão da EMBRAPA (1997), para extração de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} trocáveis. A MO foi obtida pelo método da oxidação e o enxofre (S) pelo método do fosfato de cálcio. O P foi extraído pelos dois principais métodos: Mehlich 1 (TEDESCO et al., 1995) e resina trocadora de anions (RTA) (RAIJ et al., 2001). Foram determinados também pH em água, pH em CaCl_2 e índice SMP. A extração dos micronutrientes foi realizada pelos métodos de DTPA para ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) e água quente para boro (B).

A determinação da granulometria foi realizada pelo método de dispersão total, separando as frações areia, silte e argila, conforme metodologia de determinação da EMBRAPA (1997).

3.3.2 Condutividade elétrica aparente

A condutividade elétrica aparente (CEa) foi determinada cerca de 20 dias antes da semeadura da safra 2010/11. Utilizou-se o equipamento modelo Veris 3000 de fabricação da Veris Technologies (VERIS, 2008) adaptado a uma

grade niveladora (INAMASSU, 2007). O equipamento percorreu toda a área do experimento em condição úmida (capacidade de campo) coletando os dados, em intervalos de um segundo, em cada ponto foram registradas as profundidades de 0 – 0,3 m (rasa) e 0 – 0,9 m (profunda), as quais são originadas dependendo da distância entre os eletrodos. Os dados foram armazenados em cartão serial do aparelho Veris e as coordenadas registradas por GPS Trimble® e, em seguida, transferidas para computador.

O aparelho mede a resistividade elétrica, que consiste em aplicar uma determinada intensidade de corrente elétrica na superfície do solo, utilizando dois eletrodos. Com a passagem da corrente elétrica no solo, há numa diferença de potencial, que é medida por outros dois eletrodos próximos dos eletrodos de corrente.

A série de pontos próximos a cada um dos 90 sítios com coordenadas definidas foi compilada para formar os pontos amostrais. A grande quantidade de pontos amostrais foi submetida a uma interpolação pelo método do inverso da distância, gerando 16 subamostras para cada ponto amostral.

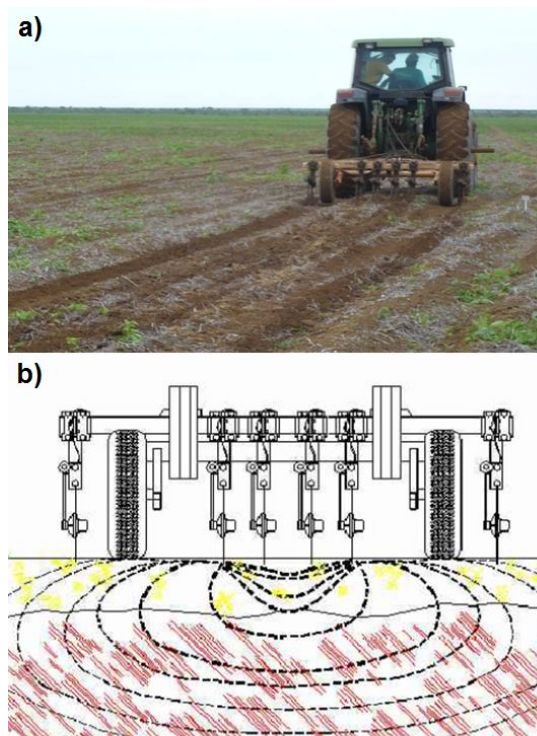


FIGURA 10 - Determinação de condutividade elétrica aparente a campo: a) equipamento coletando os dados na lavoura. b) demonstrativo da corrente elétrica criada pelo equipamento (Veris 3100).

3.4 Amostragens e determinações de planta

3.4.1 Coleta e determinação no tecido foliar

A coleta de amostras foliares seguiu a mesma malha (grade) de amostragem do solo (mesmos pontos, com mesmas coordenadas geográficas). Foram coletadas 50 folhas para representar cada ponto amostral, sendo coletada sempre a quinta folha totalmente aberta a partir do ápice da haste principal. As folhas, depois de secas à sombra, resultaram em uma massa de aproximadamente 100 gramas de tecido vegetal.

A amostragem foliar foi realizada em dois períodos na safra 2010/11, aos 70 DAE (dias após a emergência) e aos 110 DAE, onde ocorrem, respectivamente, as fases de floração e fixação e enchimento de maçãs do algodão. Na safra 2011/12, foi realizada uma amostragem aos 108 DAE. As amostras, após coletadas, foram acondicionadas em sacos de papel com

identificação dos pontos e submetidas à secagem em local seco e à sombra e em seguida encaminhadas para o Laboratório de Análises de Solos e Plantas (IBRA).

Para a determinação de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Al e Na utilizou-se a extração por digestão nitro-perclórica; para o N a digestão sulfúrica, já o B, a extração foi por incineração. A metodologia de análise seguiu o padrão estabelecido por Malavolta et al. (1989), fornecendo assim, os resultados de teor dos nutrientes nas folhas.

3.4.2 Índice de clorofila

A determinação do índice de clorofila na cultura do algodão, que caracteriza a utilização de amostras não destrutivas, foi pelo equipamento SPAD-502 (Minolta) nos mesmos pontos (coordenadas) pré-determinados para as coletas de amostras foliares. As medições foram realizadas na quinta folha a partir do ápice, com cinco leituras por planta e em 20 plantas em cada ponto. As leituras na safra 2010/11, ocorreram aos 70 e 110 DAE da cultura do algodão. Na safra 2011/12, foi realizada uma leitura aos 108 DAE. Os dados foram registrados em planilha de papel logo após, digitados em planilha eletrônica.

A altura e estande de plantas foram determinados nas mesmas plantas e pontos das leituras com o equipamento SPAD.

3.4.3 Índice de vegetação

O processamento das imagens foi realizado pela Embrapa Algodão utilizando o software ERDAS Imagine 8.5, utilizando os modelos da ferramenta de parametrização SEBAL (ALLEN et al., 2002). Foram utilizadas imagens de satélite do sensor AWiFS (Advanced Wide Field Sensor) do satélite ResourceSAT-1 para estimar o IAF. Na safra 2010/11, foram utilizadas duas imagens (aos 70 e 110 DAE), nos dias 08/02/2011 com órbita 331 e ponto 089 e no dia 01/04/2011, com órbita 327 e ponto 087, respectivamente. As bandas espectrais utilizadas pertencem aos canais 3 ($\lambda=620-680$ nm) e 4 ($\lambda=770-860$

nm). O sensor AWiFS possui resolução espacial de 56 m, quatro bandas espectrais, tempo de revisita de 5 dias e largura de faixa imageada de 740 km.

Em primeiro lugar, foi calculada a radiância espectral (R), representando a energia solar refletida por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medidas pelo satélite, sendo a radiância determinada por:

$$R = a_i + [(b_i - a_i)/255]ND \quad (3)$$

Onde:

a = radiância mínima;

b = radiância máxima;

ND = intensidade do pixel; e

i = banda espectral do sensor.

Posteriormente, a reflectância monocromática dos canais de interesse, conforme Allen et al. (2002):

$$\rho_i = \frac{\pi \cdot R_i}{k_i \cdot \cos Z \cdot d_i} \quad (4)$$

Onde:

R é a radiância espectral de cada banda;

k é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera;

Z é o ângulo zenital solar;

d_i é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, fornecido em unidade astronômica (UA).

Após calculadas as reflectâncias, substituiu-se as reflectâncias na equação de NDVI, conforme:

$$NDVI = (\rho_4 - \rho_3)/(\rho_4 + \rho_3) \quad (5)$$

Onde: ρ_4 e ρ_3 são as reflectâncias nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente. Os resultados obtidos variam de -1 a +1, onde os valores negativos representam os corpos d'água e os positivos as superfícies vegetadas (BRANDRÃO et al., 2007).

Utilizou-se o índice de vegetação ajustado para os efeitos de solo:

$$NDVI = (1 + L) \cdot (\rho_4 - \rho_3) / (L + \rho_4 - \rho_3) \quad (6)$$

Onde: $L = 0,5$, fator de referência de uma função da densidade da vegetação. O valor desse fator é crítico na minimização dos efeitos das propriedades ópticas do solo na refletância da vegetação.

Finalmente, o IAF, que é definido como a razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área onde a vegetação se encontra, foi estimado conforme Allen et al. (2004):

$$IAF = - \frac{(\ln(0,69 - IVAS)/0,59)}{0,91} \quad (7)$$

3.5 Produtividade do algodoeiro

A produtividade do algodão foi determinada, na safra 2010/11, pela colheita mecanizada utilizando a colhedora de algodão modelo John Deere 9996 (JOHN DEERE, 2011), equipada com o sistema GreenStar® Harvest Doc®, composto de sensor de rendimento do tipo fluxo ultrassônico, monitor de dados (Monitor GreenStar™ 2), cartão de armazenamento de dados (Keycard), e antena receptora de Sistema de Posicionamento Global (GPS) com sinal diferencial, receptor StarFire™.

Os sensores emitem sinais através da tubulação de plástico, não possuindo contato com o algodão em caroço, captando dados a cada 3 s. Os sensores estão instalados atrás de cada duto de descarga do cesto de algodão na máquina, totalizando seis sensores. A calibração dos sensores foi realizada pela pesagem do equipamento transbordo que recebe o volume colhido pela colhedora em balança rodoviária, aferida para determinação de pesos de 10 em 10 kg (modelo Saturno). O valor obtido na balança foi configurado no monitor de dados que se encontra instalado no interior da máquina, sendo este o fator de calibração. Durante o processo de colheita, o valor não foi modificado para seguir o mesmo padrão do início ao fim da área experimental.

Os dados brutos armazenados no cartão foram descarregados no programa Apex (JOHN DEERE, 2011), onde foram convertidos no formato Shapefile (shp) e Excel (.xls), ainda sem tratamento e processamento das informações.

Na safra 2011/12, a colheita mecânica seguiu a mesma metodologia utilizada no ano anterior, diferindo somente o modelo da máquina para John Deere 7760 (JOHN DEERE, 2011). A colheita de algodão realizada na safra 2010/11, utilizando sensores de produtividade, foi a primeira realizada no Brasil, fato esse devido a existência de poucos sensores de rendimento e ao elevado custo para equipar as colhedoras.

3.6 Processamento e análise dos dados

3.6.1 Análise geoestatística

Através de análises geoestatísticas, foi estimada a variabilidade espacial das variáveis em estudo.

O semivariograma é definido por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_{i+h})]^2 \quad (8)$$

Onde:

$\gamma(h)$ - Semivariância experimental;

N - Número de pares de dados de valores medidos na distância (h);

$Z X_i$ - Valor da variável medida na posição x_i ;

$Z(x_{i+h})$ - Valor da variável medida na posição $x_{(i+h)}$;

i - Posição da amostra;

h - Distância entre duas amostras.

Foram testados quatro modelos matemáticos para ajustes do semivariograma experimental. Para a seleção do melhor modelo foi utilizado o resultado da soma de quadrado dos resíduos (SQR). As funções foram aplicadas ao software SGeMS (SGeMS-ar2tech-beta-win32). Os semivariogramas experimentais foram considerados como isotrópicos, onde a dependência espacial é igual em qualquer direção.

$$\begin{aligned} \text{Modelo linear: } \gamma(h) &= (C_0 + C_1/a)h ; 0 < h < a & (9) \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 ; h \geq a \end{aligned}$$

Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] ; 0 < h < a \quad (10)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 ; 0 < h < a$$

Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right] ; 0 < h < d \quad (11)$$

Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right)^2 \right] ; 0 < h < d \quad (12)$$

É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ em relação a h .

Os dados brutos de produtividade da cultura do algodão foram submetidos à limpeza de dados não utilizáveis (bordaduras, manobras, paradas da máquina, falta de sinal de satélite) que não possuem comportamento esperado para determinar a produtividade, utilizando o software SSToolBox® (SST SOFTWARE, 2009).

Quando identificada a dependência espacial utilizando os semivariogramas das variáveis amostradas, os dados foram interpolados utilizando a krigagem como técnica de estimação. A krigagem onde os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma é definida por:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (13)$$

Onde:

Z – estimativa de valores;

X0 – locais a serem estimados;

N – Número de valores medidos;

Z(Xi) – Valores envolvidos na estimativa;

λ – Pesos associados a cada valor medido.

Os resultados de análise de solo foram processados e importados no software SSToolBox® (SST SOFTWARE, 2009) e submetidos a interpolação de dados por krigagem pelo programa Surfer®, (GOLDEN SOFTWARE, 1999). Os mapas de fertilidade do solo foram gerados para todos os nutrientes, permitindo avaliar a sua distribuição espacial na área experimental.

Os dados de condutividade elétrica, leituras de níveis de clorofila e análises foliares também foram importados no software SSToolBox® para espacialização na área do experimento e correlação das variáveis com os parâmetros de análise de solo e produtividade do algodão. Esses dados foram coletados nas duas safras (2010/11 e 2011/12).

No tratamento dos dados de produtividade, utilizou-se como método de interpolação, o inverso do quadrado da distância, que é comumente utilizado em estudos de variação da produtividade (MONTEZANO, 2006; AMADO, 2007). Esse método calcula um valor estimado a partir de combinações lineares dos dados vizinhos, com o peso dado pela distância que separa as amostras (VIEIRA, 2000). O raio de busca dos pontos vizinhos foi aferido para 10 m, devido a grande quantidade de pontos registrados pela máquina, a largura útil das unidades de colheita que é de 4,56 m, e a velocidade de trabalho que variou de 5 a 10 km h⁻¹, conforme a variação da produtividade e a presença de ervas daninhas.

Para caracterizar a dependência espacial dos atributos de solo foram testadas o Índice de Dependência Espacial (IDE), proposto por Cambardella et al. (1994), classificando como forte o IDE < 25%, moderado o IDE entre 25 e 75% e fraco o IDE > 75%. A equação é definida por:

$$\text{IDE} = 100 \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \quad (14)$$

3.6.2 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, considerando a metodologia utilizada por Cambardella et al. (1994), em três estágios: 1) distribuição das frequências e testes de normalidade; 2) distribuições descritas por métodos estatísticos tradicionais (média, desvio padrão e Coeficiente de Variação-CV); 3) definição dos semivariogramas com efeito pepita e alcance das variáveis.

Foi realizada análise de correlação entre os atributos de solo, entre os atributos de planta e a produtividade, utilizando o coeficiente de correlação simples, a correlação de Pearson, a 1% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatística descritiva dos atributos de solo

Conforme a interpretação de valores e limites críticos estabelecidos na Tabela 8, resultante da compilação de vários autores, foram considerados como classe Alto, K trocável (VILELA et al., 2004), P resina (SOUSA et al., 2004), saturação por bases e S, B, Fe, Cu e Zn disponíveis (EMBRAPA, 2011). Os níveis foram considerados Suficiente, para pH-H₂O (RAIJ, 1991) e Ca, Mg e soma de bases trocáveis (RAIJ et al., 1997). Os níveis foram classificados na classe Médio, para pH CaCl₂ (RAIJ, 1991), CTC_{pH 7,0} (SLC Agrícola, 2012), P Mehlich-1 (SOUSA et al., 2004), Mn disponível (EMBRAPA, 2011), e matéria orgânica (SLC Agrícola, 2012). Para o Al trocável, o valor foi considerado Muito baixo (Tabela 8).

TABELA 8. Interpretação de análise de solo para os atributos químicos

Atributos químicos	Muito baixo	Baixo	Médio	Suficiente	Alto
pH CaCl ₂ ⁽¹⁾	-	< 5,0	5,1 - 5,5	5,6 - 6,0	> 6,0
pH-H ₂ O ⁽¹⁾	-	< 5,0	5,1 - 5,5	5,6 - 6,0	> 6,0
Ca trocável (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	< 1,0	1,1 - 1,7	1,8 - 2,5	2,6 - 3,5	> 3,5
Mg trocável (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	< 0,4	0,5 - 0,7	0,8 - 1,0	1,1 - 1,3	> 1,3
K trocável (cmol _c dm ⁻³) ⁽³⁾	-	< 0,06	0,06 - 0,13	0,13 - 0,20	> 0,20
Soma bases trocáveis (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	< 1,4	1,6 - 2,4	2,5 - 3,5	3,6 - 4,5	> 4,5
Saturação por bases (%) ⁽⁴⁾	< 25	26 - 35	36 - 45	46 - 60	> 60
Al trocável (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁴⁾	< 0,1	0,1 - 0,4	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	> 1,5
CTC _{pH 7,0} (cmol _c dm ⁻³)	< 4,0	4,0 - 6,0	6,1 - 8,0	8,1 - 10,0	> 10,0
P Mehlich-1 (mg dm ⁻³) ⁽⁵⁾	< 2,0	2,1 - 3,0	3,1 - 4,0	4,1 - 6,0	> 6,0
P Resina (mg dm ⁻³) ⁽¹⁾	< 5,0	6,0 - 8,0	9,0 - 14,0	15,0 - 20,0	> 20,0
S disponível (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	< 3,0	4,0 - 7,0	7,0 - 10,0	11,0 - 14,0	> 14,0
B disponível (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	-	< 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 0,8	> 0,8
Fe disponível (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	-	< 4,0	5,0 - 12,0	12,0 - 20,0	> 20,0
Mn disponível (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	-	< 1,9	2,0 - 5,0	5,0 - 8,0	> 8,0
Cu disponível (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	-	< 0,4	0,5 - 0,8	0,9 - 1,2	> 1,2
Zn disponível (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	-	< 1,0	1,1 - 1,6	1,7 - 3,0	> 3,0
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	< 10	11 - 20	21 - 30	30 - 40	> 40

Fontes: ⁽¹⁾ Raij (1991); ⁽²⁾ Raij (1997); ⁽³⁾ Vilela et al. (2004); ⁽⁴⁾ Embrapa (2011); ⁽⁵⁾ Sousa et al. (2004).

Todos os valores de Al trocável, inclusive a média, foram inferiores a 0,01 cmol_c dm⁻³ (Tabela 9), indicando a não ocorrência de sua toxidez para as plantas. A solubilidade desse elemento é mínima em valores de pH-H₂O superior a 5,5 (KAMINSKI, 1974). O pH-H₂O variou de 5,1 a 6,7, indicando que o Al trocável, mesmo com pH inferior a 5,5, pode ficar complexado a matéria orgânica (SALET, 1998).

TABELA 9. Estatística descritiva dos atributos de solo da área experimental, Cristalina-GO

	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV%	Assim.	Curt.
Atributos químicos								
pH CaCl ₂	4,60	7,30	5,35	5,40	0,40	7	1,23	5,33
pH-H ₂ O	5,10	6,70	5,67	5,60	0,31	5	0,42	0,17
pH _{SMP}	6,16	7,55	6,49	6,46	0,21	3	1,75	6,11
Ca trocável (cmol _c dm ⁻³)	1,80	7,60	3,11	2,90	0,80	26	2,12	9,83
Mg trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,60	1,80	1,08	1,10	0,26	24	0,27	-0,58
K trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,18	0,51	0,25	0,24	0,05	20	1,94	6,25
Soma bases trocáveis (cmol _c dm ⁻³)	2,81	8,81	4,45	4,35	1,01	23	1,05	2,68
Saturação por bases (%)	45,00	92,00	63,00	63,00	8,63	14	0,29	0,43
Al trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0	-1,02	-2,05
H + Al trocáveis (cmol _c dm ⁻³)	0,80	3,60	2,58	2,60	0,50	19	-0,58	0,88
CTC _{pH 7,0} (cmol _c dm ⁻³)	5,63	9,61	7,03	6,93	0,77	11	0,89	1,14
P Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	0,60	15,60	3,52	2,90	2,60	74	2,37	6,87
P resina (mg dm ⁻³)	12,00	114,00	38,03	33,50	18,95	50	1,76	4,35
S disponível (mg dm ⁻³)	16,00	171,00	53,97	48,00	29,73	55	1,71	3,09
B disponível (mg dm ⁻³)	0,19	2,49	1,26	1,23	0,44	35	0,18	0,78
Fe disponível (mg dm ⁻³)	23,00	74,00	38,13	38,00	6,66	17	1,93	9,18
Mn disponível (mg dm ⁻³)	1,00	15,60	2,27	2,00	1,52	67	7,71	67,58
Cu disponível (mg dm ⁻³)	0,70	6,70	1,71	1,50	0,98	57	3,09	12,33
Zn disponível (mg dm ⁻³)	2,70	5,40	3,88	3,85	0,59	15	0,20	-0,33
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	23,00	41,00	29,27	29,00	3,08	11	0,82	2,04
Atributos físicos								
Argila (g kg ⁻¹)	568	630	595,80	593,50	17,56	3	0,27	-0,81
Silte (g kg ⁻¹)	177	296	243,04	246,00	22,34	9	-0,87	3,16
Areia (g kg ⁻¹)	122	201	161,27	163,00	20,60	13	0,12	-0,66
CEa 0,3 m (mS m ⁻¹)	7,61	15,85	10,43	10,14	1,63	16	1,55	2,40
CEa 0,9 m (mS m ⁻¹)	4,81	11,11	5,89	5,58	1,16	20	2,23	5,71

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de variação (%); Assim. = Assimetria; Curt. = Curtose; pH H₂O (1:1); pH CaCl₂ (1:1); pH_{SMP} (10:10:5) (EMBRAPA, 1997); Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ trocáveis – Extração com Resina Trocadora de Cátions-RTC (EMBRAPA, 1997); Al³⁺ trocável - Extraído por KCl (EMBRAPA, 1997); P Mehlich-1 – Extraído por solução Mehlich-1 (TEDESCO et al., 1995); P Resina - Resina Trocadora de Ânions-RTA (RAIJ et al., 2001); Matéria orgânica foi obtida pelo método da oxidação (EMBRAPA, 1997). Enxofre (S) – Extraído pelo método do fosfato de cálcio (EMBRAPA, 1997). Ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) – Extraídos por DTPA (EMBRAPA, 1997). Boro (B) – Extraído por água quente (EMBRAPA, 1997).

As medidas de assimetria e curtose complementam as medidas de posição e de dispersão, pois essas distribuições não diferem apenas quanto ao valor médio e à variabilidade, mas também quanto a sua forma (LOPES, 1999).

A classificação para o coeficiente de assimetria é:

Simétrica = |coeficiente| < 0,2

Assimetria fraca = 0,2 < |coeficiente| < 1,0

Assimetria forte = |coeficiente| > 1,0

Diante disto, o pH CaCl₂ e índice SMP apresentaram assimetria forte, pois quanto menor o índice SMP, maior será a necessidade de calcário (CQFS RS/SC, 2004). O coeficiente de variação para o índice SMP foi mais baixo em relação ao pH H₂O e pH CaCl₂ (Tabela 9).

O Ca trocável apresentou uma assimetria forte, demonstrando que o grau de deformação da distribuição foi grande, sendo que o coeficiente positivo indica uma distribuição assimétrica à direita. No entanto, o Mg trocável, apresentou uma assimetria fraca, indicando que os dados tendem à normalidade (Tabela 9).

Conforme Vanni (1998), o coeficiente de variação (CV) maior do que 35% revela que a série é heterogênea e a média tem pouco significado. Se o CV for maior do que 65%, a série é muito heterogênea e a média não tem significado algum. Se for menor que 35%, a série é homogênea e a média tem significado, podendo ser utilizada como representativa da série onde foi obtida. O CV muito alto encontrado para P Mehlich-1 e Mn disponível, foi de 74 e 67% respectivamente, provavelmente devido ao histórico de manejo, correção e adubação do solo (Tabelas 6 e 7). O coeficiente de assimetria indica que, para o P Mehlich-1, os valores possuem assimetria forte. No entanto, a assimetria possui influência em valores extremos quando comparada aos valores da média, CV e desvio padrão (DP), onde um único valor pode influenciar a média.

A variação de P Mehlich-1 no solo encontrada na área de estudo foi de 0,6 a 15,6 mg dm⁻³, o que não pode ser justificado pela variação nos níveis de argila no solo, que apresentaram variação relativamente pequena, de 568 a 630 g kg⁻¹ (Tabela 9).

Para os atributos H + Al e CTC_{-pH 7,0}, os valores médios obtidos foram de 2,58 e 7,03 cmol_c dm⁻³, respectivamente. Há similaridade entre os dois atributos, devido ao fato de H + Al fazer parte da equação da CTC. Os valores de CV para ambos os atributos são classificados como baixos, indicando que a série de dados é homogênea e os valores da média são representativos para a área em estudo devido a pouca variação na série de dados. O CV obtido indica

que a intensidade de amostragem foi adequada para avaliar a variabilidade existente na área (Tabela 9).

O maior valor de curtose na série de dados (Tabela 9) foi encontrado para o Mn disponível, e indica que os valores extremos estão influenciando, em grande parte, o valor médio. A Curtose é o grau de achatamento de uma curva em relação à curva normal, tomada como padrão (LOPES, 1999). Esse comportamento do Mn está associado à aplicação de calcário e a sua incorporação no solo, o qual, segundo Sousa (2004), pode provocar a deficiência de Mn nas plantas, principalmente quando a saturação por bases for superior a 50% ou o pH H₂O for superior a 6,2 (DANTAS, 1991).

Com exceção dos valores de Mn disponível, os demais atributos apresentaram valores de média e mediana aproximadas, demonstrando que os dados não são assimétricos.

O Cu disponível apresentou CV de 57%, assim classificado como comportamento heterogêneo. Os demais micronutrientes B, Fe e Zn apresentam CV e assimetria classificados como baixos. Esse comportamento é justificado devido às sucessivas adubações com micronutrientes, principalmente visando a cultura do algodão.

A disponibilidade dos micronutrientes está associada ao pH do solo, cujos valores adequados encontram-se na faixa de pH 5,5-6,5 (DANTAS, 1991). A calagem visa corrigir a acidez do solo e elevar o pH aumentando, assim, a disponibilidade de nutrientes. Na área experimental, a variação do pH-H₂O foi baixa, que pode ser confirmado pelo menor coeficiente de curtose entre os atributos de solo, ou seja, os valores de pH-H₂O foram similares entre os diferentes pontos amostrais, caracterizando que nesta área não houve indisponibilidade de micronutrientes para o algodão.

O B, apesar de possuir grande mobilidade no solo, apresentou na média 1,26 mg dm⁻³, acima do nível de suficiência de 0,5 mg dm⁻³, cujo valor é mais alto do que o encontrado por Couto e Klamt (1999), ao estudar a distribuição de micronutrientes em um Latossolo Vermelho escuro na região do cerrado, cuja média foi de 0,37 mg dm⁻³. Esta diferença é explicada pelo sistema de rotação

de culturas, com a inexistência de algodão, cultura que recebe o aporte desse nutriente pela adubação de semeadura e de adubações foliares.

Os atributos físicos da fração granulométrica, argila, silte e areia, revelaram baixos valores de assimetria, indicando que o grau de deformação da distribuição das frequências de dados é pequeno, tendendo à normalidade. Devido à área possuir uma declividade baixa (< 0,5%), a variação nos níveis dos componentes granulométricos é, também, baixa.

A condutividade elétrica (CEa) rasa, medida na camada de 0 a 0,3 m e CEa profunda, medida na camada de 0 a 0,9 m, apresentaram valores nos coeficientes de assimetria classificados como assimétricos, porém com CV considerado homogêneo para os conjuntos de dados. A CEa rasa variou de 7,61 a 15,85 mS m⁻¹, com média de 10,43 mS m⁻¹, semelhante ao obtido por Castro (2004). Os maiores valores foram obtidos na camada de 0 a 0,3 m, principalmente devido ao histórico de aplicação de nutrientes e ao revolvimento do solo realizado nessa camada. Para a CEa profunda, os dados variaram de 4,81 a 11,11 mS m⁻¹ e média de 5,89 mS m⁻¹. No estudo de Alcântara (2010), em Latossolo Vermelho-Escuro, a média de CEa foi de 4,32 mS m⁻¹ na camada de 0 a 0,4 m.

4.2 Estatística descritiva dos atributos de planta

A estatística descritiva dos nutrientes foliares de algodão está apresentada na Tabela 10. Os macronutrientes apresentaram baixa variação aos 70 e 110 DAE, na safra 2010/11. Comportamento similar foi encontrado para os micronutrientes Mn, Fe, B, Cu e Zn nas folhas, que apresentaram CV abaixo de 35% nas diferentes épocas amostradas. Como essa medida é adimensional, ou seja, não considera a ordem de grandeza das variáveis, as análises são consideradas homogêneas. Os atributos de planta tiveram coeficientes de assimetria e curtose que se aproximam de uma distribuição normal, concordando com Motomiya et al. (2005), em trabalho com algodão e Salviano et al. (1998), em cultivo de *Crotalaria juncea* L.

TABELA 8. Estatística descritiva de análises foliares aos 70 e 110 DAE na safra 2010/11 e aos 108 DAE na safra 2011/12, Cristalina-GO

	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Assim.	Curt.
Safra 2010/11 - 70 DAE								
N	33,30	44,20	38,21	38,20	2,56	7	0,16	-0,34
P	1,70	2,50	2,16	2,20	0,18	8	-0,05	-0,43
K	17,00	29,90	21,49	21,15	2,49	12	0,92	1,53
Ca	22,40	34,10	27,86	27,90	2,02	7	0,08	0,53
Mg	4,10	6,20	5,27	5,30	0,40	8	-0,17	-0,30
S	3,10	10,40	4,36	4,20	0,89	20	3,78	23,39
Mn	26,00	118,00	80,71	80,50	19,54	24	-0,19	-0,19
Fe	100,00	295,00	138,33	132,00	28,07	20	2,65	10,98
B	57,30	133,40	102,35	104,70	14,68	14	-0,76	0,64
Cu	2,60	4,50	3,43	3,50	0,39	11	0,33	-0,28
Zn	17,30	40,90	22,72	22,30	3,01	13	2,52	13,94
Safra 2010/11 - 110 DAE								
N	41,00	51,70	45,40	45,30	2,21	5	0,30	0,51
P	2,80	4,50	3,34	3,30	0,30	9	1,11	1,78
K	17,70	30,90	23,14	22,60	2,50	11	0,51	0,31
Ca	27,70	38,60	31,29	31,00	1,82	6	0,80	1,63
Mg	3,00	5,30	4,04	4,00	0,52	13	0,17	-0,68
S	3,60	10,60	4,85	4,70	1,03	21	2,75	11,00
Mn	12,00	76,00	40,14	42,00	14,11	35	-0,26	-0,43
Fe	79,00	130,00	96,78	95,00	11,20	12	0,70	0,10
B	43,70	70,60	55,62	55,45	5,93	11	0,23	-0,43
Cu	3,50	4,90	4,27	4,30	0,36	8	0,10	-0,98
Zn	19,50	29,90	23,66	23,55	2,10	9	0,71	0,52
Safra 2011/12 - 108 DAE								
N	26,39	44,39	36,07	35,79	2,69	7	0,16	1,70
P	1,68	3,38	2,18	2,12	0,38	17	1,39	1,66
K	10,00	29,50	17,64	17,50	3,30	19	0,44	0,54
Ca	13,50	26,50	20,09	20,13	3,09	15	-0,01	-0,91
Mg	2,35	4,85	3,71	3,68	0,45	12	0,16	0,08
S	2,51	5,24	3,57	3,45	0,58	16	0,81	0,54
Mn	5,00	75,00	23,44	25,00	9,01	38	1,82	11,05
Fe	50,00	140,00	83,44	80,00	13,32	16	0,81	2,52
B	17,85	68,77	39,83	38,20	7,76	19	1,41	4,10
Cu	2,00	6,50	3,92	4,00	0,83	21	0,45	0,77
Zn	14,50	51,00	22,91	22,75	5,59	24	1,79	6,40

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de variação (%); Assim. = Assimetria; Curt. = Curtose.

As análises no tecido vegetal realizadas aos 108 DAE na safra 2011/12 (Tabela 10) apresentaram baixo CV para macro e micronutrientes nas folhas,

com exceção do Mn, com CV de 38%, caracterizando que a série de dados é heterogênea. O coeficiente de variação expressa a proporção do desvio padrão sobre a média de uma série de dados. Assim, dados de diferentes médias podem ser comparados em termos de variabilidade.

Aos 70 DAE, os nutrientes N, P, Cu e Zn não atingiram o nível classificado como Suficiente (Tabela 11) pelos resultados de análises foliares (Tabela 10). O N aplicado nas formas de sulfato de amônio e uréia, aos 15 e 44 DAE, respectivamente, não garantiram que, na média das análises, a nutrição das plantas com esse nutriente fosse adequada. Esse comportamento está associado à maior necessidade do N pelas plantas de algodão no início da emissão de botões florais até a abertura dos capulhos, com absorção média de 2,5 a 3,6 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (ROSOLEM, 2001).

Até aos 70 DAE, é possível suplementar o N pela adubação de cobertura (a lanço), porém com menor efetividade entre 71 e 90 DAE (BRANDÃO et al. 2009). As adubações realizadas, no entanto, não garantiram que, em alguns pontos, os teores de N nas folhas fossem inferiores a 40 g kg⁻¹, valor do limite mínimo de Suficiência (Tabela 11). Assim é provável que tenha havido, nesses locais, comprometimento na produtividade do algodoeiro.

O teor médio de P na folha foi abaixo da faixa de Suficiência em todas as análises, na média 0,84 g kg⁻¹ inferior (Tabela 10), indicando que, na fase de florescimento da cultura do algodão, ainda há alta demanda por P. Resultados semelhantes foram obtidos por Motomiya et al. (2005) que, na média das análises, foi abaixo do nível de Suficiência para a cultura.

Os nutrientes foliares K, Ca, Mg e S (Tabela 10), foram considerados dentro de suas faixas de Suficiência (Tabela 11), concordando com os resultados obtidos por Motomiya et al. (2005), aos 50 DAE. Os teores de micronutrientes nas folhas de Mn, Fe e B, também estão classificados na faixa de Suficiência. O Mn adicionado via foliar, na forma de cloreto de manganês, aos 33 DAE, juntamente com sua adição no fertilizante de semeadura, garantiram que os níveis foliares fossem adequados.

Aos 110 DAE da safra 2010/11, os valores de Suficiência foliares foram restabelecidas para N e P. No caso do N foliar após o período de máxima

absorção da planta e pelas aplicações foliares de nitrato de potássio aos 78, 87 e 101 DAE, os teores foram classificados como Suficiente em todos os pontos amostrados (Tabela 10). A aplicação de MAP purificado aos 78 DAE, juntamente com a evolução do ciclo da cultura possibilitou que o teor de P foliar atingisse a faixa de suficiência, um incremento de 35,3 % em relação à amostragem realizada aos 70 DAE.

TABELA 9. Faixas de Suficiência para análises foliares em diferentes culturas

Nutriente	Soja ⁽¹⁾	Algodão ⁽²⁾	Milho ⁽³⁾
----- g kg ⁻¹ -----			
N	45 - 55	40 - 45	27,5 - 32,5
P	2,5 - 5	3 - 4	2,2 - 3,5
K	17 - 25	20 - 25	17,5 - 27
Ca	3,5 - 20	25 - 35	2,5 - 4
Mg	2,5 - 10	4 - 8	2,5 - 4
S	2 - 4	4 - 6	1,5 - 2
----- mg kg ⁻¹ -----			
Mn	20 - 100	35 - 80	42 - 150
Fe	50 - 350	80 - 250	50 - 250
B	20 - 55	40 - 80	15 - 20
Cu	6 - 14	10 - 15	6 - 20
Zn	20 - 50	30 - 40	15 - 50

Fontes: ⁽¹⁾ EMBRAPA (2001) e EMBRAPA (2010); ⁽²⁾ Ornelas et al. (2001); ⁽³⁾ Büll & Cantarella (1993).

Os nutrientes K, Ca, Mg, S, Mn e Fe mantiveram-se Suficientes na folha aos 110 DAE. Situação semelhante ocorreu para o B, presente na adubação de semeadura e aplicado via foliar aos 78 e 87 DAE, mantendo-se na faixa de Suficiência. Todavia os micronutrientes Cu e Zn permaneceram abaixo dessa faixa, mesmo com os teores no solo classificados como Suficiente (Tabela 8).

Na safra 2011/12, para as análises foliares realizadas aos 108 DAE (Tabela 10), somente o Fe foi classificado como Suficiente, mesmo assim próximo ao limite inferior da classe (80 mg kg⁻¹). Os nutrientes, N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, B, Cu e Zn apresentaram teores médios abaixo da faixa de Suficiência. Este comportamento pode ser explicado pela alta precipitação ocorrida, sobretudo na época de semeadura, o que ocasionou deslocamento de solo superficialmente ao longo da lavoura, ocasionando o menor desenvolvimento das plantas. As aplicações foliares de cloreto de manganês aos 35 DAE, MAP

purificado aos 35, 57 e 76 DAE, e nitrato de potássio e boro, aos 100 DAE, não foram suficientes para garantir o nível foliar Suficiente de Mn, N, P, K e B (Tabela 10). Outra hipótese para os baixos níveis foliares foram as doses crescentes de P aplicadas na área experimental, podendo ter ocorrido desequilíbrio nutricional principalmente com as doses elevadas, como 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em contraste com a testemunha, sem adição de P.

A altura de plantas (Tabela 12) apresentou variabilidade considerada homogênea aos 70 e 110 DAE na safra 2010/11. Da mesma forma, a altura de plantas apresentou baixa variação aos 108 DAE na safra seguinte (2011/12), porém inferior ao mesmo período da safra anterior. Visualmente, a altura de plantas em lavouras de produção de algodão apresenta variações, devido, principalmente, à população final de plantas, mesmo em condições ambientais e de desenvolvimento semelhantes.

A utilização do clorofilômetro SPAD na obtenção do índice de clorofila demonstrou uma série de dados classificada como homogênea, nas três medições realizadas. Os índices de clorofila variaram de 37,3 a 57,4 e de 40,1 a 55,3, aos 70 e 110 DAE, respectivamente, na safra 2010/11, semelhante aos dados obtidos por Brandão et al. (2009), variando de 36,79 a 51,71, aos 60 DAE. Para a safra 2011/12, a média do índice foi semelhante ao obtida no ano agrícola anterior (Tabela 12).

O IAF apresentou CV inferior a 35%, indicando um conjunto de dados homogêneo nas duas medições realizadas, aos 70 e 110 DAE, na safra 2010/11 (Tabela 12). A média encontrada na primeira medição foi de 0,5, indicando que as plantas não haviam atingido o seu máximo crescimento vegetativo. O valor mínimo encontrado foi de 0,16, nas regiões onde a população final de plantas era menor. Na segunda avaliação, a média do IAF foi de 1,11, representando que o dossel da cultura estava ocupando praticamente todo o espaço entre as linhas de semeadura.

TABELA 10. Estatística descritiva de análises não destrutivas de planta

	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV	Assim.	Curt.
----- Safra 2010/11 - 70 DAE -----								
Altura plantas (cm)	46,30	84,25	62,26	61,68	7,16	11,51	0,94	1,35
Índice clorofila	37,70	57,40	48,30	48,60	3,61	7,40	-0,39	0,67
IAF	0,16	1,09	0,50	0,49	0,15	29,84	1,17	3,57
----- Safra 2010/11 - 110 DAE -----								
Altura plantas (cm)	98,80	158,20	116,37	113,85	12,15	10,44	1,30	1,93
Índice clorofila	40,10	55,30	48,25	48,15	3,21	6,65	-0,04	-0,34
IAF	0,96	1,30	1,11	1,10	0,07	6,64	0,37	-0,29
----- Safra 2011/12 - 108 DAE -----								
Altura plantas (cm)	88,00	130,00	104,33	103,00	7,91	7,58	0,80	1,16
Índice clorofila	32,90	54,20	47,40	48,80	3,96	8,35	-1,48	2,59
Estande	12,00	24,00	18,52	18,67	2,15	11,59	-0,42	0,53

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de variação (%); Assim. = Assimetria; Curt. = Curtose.

A população de plantas representada pelo estande, na safra 2011/12, variou de 12 a 24 plantas em três metros lineares. As regiões com menor quantidade de plantas foram afetadas principalmente devido ao menor estabelecimento de plantas. O conjunto de dados mostrou-se homogêneo, com CV de 12%.

4.3 Estatística descritiva da produtividade

Os dados de produtividade da safra 2010/11 e 2011/12 apresentaram baixo CV, de 7 e 10% (Tabela 13), Os dados estão em acordo com resultado obtidos em outras culturas no Brasil, como soja, milho e trigo AMADO et al. (2007), e milho (MONTEZANO, et al., 2006) com variação diferenciada entre culturas, sendo os dados classificados como heterogêneos (GUEDES FILHO, 2009). Pelos valores de assimetria e do coeficiente de curtose, observa-se que os mesmos possuem uma distribuição normal, com valores positivos de curtose indicando um pico de distribuição. Por outro lado, em estudo realizado com essa cultura em oito lavouras, no estado do Texas, EUA, o CV variou de 8 a 32 % (GUO, 2005), identificando, assim, um conjunto de dados com menor homogeneidade que do presente trabalho.

A produtividade obtida pela colhedora na safra 2010/11 variou de 3.147 a 5.187 kg ha⁻¹, sendo a diferença entre eles de 2.040 kg ha⁻¹. Esta foi a primeira colheita no Brasil, utilizando sensores de produtividade na cultura do algodoeiro e já possibilitou avaliar a variação da produtividade ao longo da área experimental.

Na safra 2011/12, a produtividade variou de 2.601 a 5.147 kg ha⁻¹, e diferença entre máximo e mínimo de 2.546 kg ha⁻¹. A diferença de produtividade e de amplitude entre os anos pode ser devido à distribuição irregular das plantas na última safra, a produtividade mínima foi inferior quando comparada ao ano anterior. O coeficiente de assimetria determinou uma série de dados com assimetria fraca e negativa para a produtividade da safra 2010/11 e assimetria forte e negativa para a produtividade da safra 2011/12 (Tabela 13).

TABELA 11. Estatística descritiva da produtividade em diferentes safras de algodão no cerrado

	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV	Assim.	Curt.
Prod. 2010/11 (kg ha ⁻¹)	3.147	5.187	4.124	4.121	284	7	-0,50	4,17
Prod. 2011/12 (kg ha ⁻¹)	2.601	5.147	4.530	4.634	437	10	-1,79	4,47

Prod. = produtividade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de variação (%); Assim. = Assimetria; Curt. = Curtose.

4.4 Variabilidade espacial dos atributos de solo

A variabilidade do solo ocorre continuamente, espacial e temporalmente, em níveis de dependência (PARKIN, 1993). Parâmetros estatísticos clássicos não são adequados para análises de variáveis espaciais, porque assumem que as leituras são independentes, apesar da distribuição no espaço (HAMLETT et al., 1986). Para determinar o grau de dependência espacial, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1984), estabelecendo o Índice de Dependência Espacial (IDE).

Os semivariogramas obtidos para os atributos de solo (Tabela 14; Apêndices 1 a 8) ajustaram-se ao modelo esférico, com exceção ao Al trocável, P resina e silte, que apresentaram efeito pepita puro (EPP), o qual reflete a

variabilidade existente em distâncias menores que a menor distância entre amostras e também incorpora erros analíticos. Diversos autores, ao estudar os semivariogramas de atributos de solo, constaram melhor ajuste ao modelo esférico (CAMBARDELLA et al., 1994; CARVALHO et al., 2003; SALVIANO, 1998), com exceção da areia, e também encontraram, além dos modelos esféricos, os exponenciais como modelos teóricos mais comuns para atributos de solo (CAMBARDELLA et al., 1994).

TABELA 12. Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) de atributos de solo, em Cristalina-GO

Atributos químicos	Modelo	Semivariância			Alcance (A)	IDE $100 \cdot (C_0 / (C_0 + C_1))$	Classe
		C_0	C_1	$C_0 + C_1$			
pH CaCl ₂	Esférico	0,05	0,11	0,16	255	31	M
pH H ₂ O	Esférico	0,02	0,08	0,1	301	20	F
pH SMP	Esférico	0,015	0,03	0,045	300	33	M
Ca trocável	Esférico	0,2	0,45	0,65	206	31	M
Mg trocável	Esférico	0,02	0,04	0,06	206	33	M
K trocável	Esférico	0,01	0,02	0,03	283	33	M
SB trocáveis	Esférico	0,4	0,45	0,85	211	47	M
Saturação bases	Esférico	25	40	65	210	38	M
Al trocável	EPP	-	-	-	-	-	-
H+Al trocáveis	Esférico	0,09	0,14	0,23	260	39	M
CTC _{pH 7,0}	Esférico	0,25	0,35	0,6	203	42	M
P Mehlich 1	Esférico	4	5	9	102	44	M
P resina	EPP	-	-	-	-	-	-
S disponível	Esférico	400	500	900	196	44	M
B disponível	Esférico	0,05	0,18	0,23	238	22	F
Fe disponível	Esférico	20	30	50	220	40	M
Mn disponível	Esférico	1	2	3	231	33	M
Cu disponível	Esférico	0,3	0,7	1	164	30	M
Zn disponível	Esférico	0,2	0,2	0,4	234	50	M
Matéria orgânica	Esférico	5	6,5	11,5	171	43	M
Atributos físicos							
Argila	Esférico	100	300	400	313	25	F
Silte	EPP	-	-	-	-	-	-
Areia	Esférico	100	250	350	291	29	M
CEa (0-0,3m)	Esférico	0,3	2	2,3	325	13	F
CEa (0-0,9m)	Esférico	0,15	0,95	1,1	308	14	F

C_0 : Efeito pepita; C_1 : Contribuição; $C_0 + C_1$: Patamar; Alcance (metros); IDE (%); Classe: F=Forte, M=Moderada.

Para os atributos que apresentaram EPP, os resultados obtidos indicam que a variabilidade espacial não pode ser modelada e pode ser originado por

erros de medições ou variações não sensíveis à malha amostral utilizada de 0,56 amostras ha⁻¹ nesse estudo. Neste caso, devido à inexistência de dependência espacial não foi possível realizar a interpolação pela krigagem ordinária, que pressupõe o conhecimento da média e estacionaridade da média no campo amostral.

Os atributos pH H₂O, B disponível, CEa rasa, CEa profunda e argila foram classificados com IDE forte, indicando que há alta relação espacial entre as amostras (Tabela 14). Para os demais atributos químicos, obteve-se IDE moderado, representando que é possível estimar o comportamento desses atributos com a grade amostral, concordando com os dados obtidos por Cavalcante (2007) e Alcântara (2010). A dependência espacial moderada pode ser justificada pela homogeneização do solo pelas sucessivas adubações e calagens, diferentes sistemas de rotação de culturas e manejo do solo ao longo dos anos.

Dentre todos macro e micronutrientes avaliados, o P apresentou a menor representação espacial. Isso é justificado pelo EPP encontrado no P resina e pelo menor alcance entre os atributos medidos, 102 m para P Mehlich-1. Este comportamento é explicado pelo modo de aplicação do nutriente, com aplicações na linha de semeadura, pela sua baixa mobilidade no solo e pelo maior efeito residual da adubação (SALVIANO, 1998).

A determinação do alcance do semivariograma permite inferir sobre até que distância máxima se pode representar em relação ao ponto central da amostra. Através do alcance, encontra-se a malha amostral adequada para representar a área que está sendo estudada, sendo que a distância entre as amostras deve ser menor que seu valor. Os diferentes índices de pH do solo, apesar de serem expressados em escala logarítmica, não são indicados para estudos de dependência espacial (VIEIRA, 2000), mas sim utilizados como forma de indicar o comportamento espacial do solo. O pH CaCl₂ apresentou o alcance de 255 m, inferior ao pH H₂O e SMP, que apresentaram comportamento semelhante, 301 e 300 m, respectivamente.

Os alcances encontrados para CTC_{-pH 7,0}, Ca e Mg trocáveis e saturação por bases foram muito semelhantes, 203, 206, 206 e 210 m, respectivamente,

o que é explicado devido aos elementos Ca e Mg trocáveis serem componentes do cálculo dos demais atributos. Devido ao Al estar completamente complexado e não contribuir para a acidez potencial, Ca e Mg trocáveis participam majoritariamente para a $CTC_{-pH\ 7,0}$.

Naturalmente, os níveis de micronutrientes no solo do cerrado são considerados baixos, devido ao mesmo ser originado de rochas sedimentares e possuírem pequenas quantidades desses nutrientes em sua composição. O menor alcance foi encontrado para o Cu disponível, com 164 m, semelhante ao relatado por Couto e Klampt (1999), que encontraram, em solo de cerrado, EPP na camada de 0 a 0,2 m e 132 m na camada de 0,2 a 0,4 m. Entre os micronutrientes, o maior alcance foi encontrado para o B disponível, com 238 m. A existência de dependência espacial para os micronutrientes neste estudo permite inferir que as adubações realizadas ao longo dos anos foram adequadas para atingir os níveis de Suficiência dos elementos. Este comportamento pode ser confirmado através da análise visual dos mapas oriundos da krigagem ordinária (Figura 14), que, com exceção do Mn disponível, houve o predomínio das classes de Suficiência de micronutrientes no solo. Assim, em 45,3% da área, o Mn da camada de 0 – 0,2 m, foi considerado Baixo, principalmente onde o pH H_2O apresentou valores inferiores a 5,5.

Na fração granulométrica, a argila apresentou forte IDE e alcance de 313 m, indicando a boa representatividade das amostragens realizadas, neste caso devido a baixa variação da argila na área estudada. Para o silte, não foi possível quantificar estrutura espacial, tratando-se, então, de variabilidade não estruturada.

A condutividade elétrica aparente apresentou forte dependência espacial, e alcances de 325 e 308 m para CEa rasa e profunda, respectivamente. A grande quantidade de pontos amostrais para compor cada um dos 90 pontos centrais possibilitou que grande parte da área fosse representada. O modelo de melhor ajuste para o semivariograma experimental foi o esférico, semelhantemente ao obtido por Alcântara (2010), para a camada de 0 – 0,2 m.

A utilização do método de interpolação por krigagem, juntamente com os parâmetros obtidos pelos modelos de semivariogramas, deu origem aos mapas de contorno ou isolinhas. As legendas dos mapas obedeceram às classes indicadas na Tabela 8. Para efeito de reconhecimento da área de estudo, foi elaborado um mapa de isolinhas para a altitude, demonstrando as regiões de acúmulo de água e o caminho preferencial da água da chuva (Figura 11d). A variação de 1007 a 1015 m na altitude, apesar de apresentar declividade inferior a 1,0%, define a área central e ao sul como os principais pontos de acúmulo de água.

Os mapas de pH CaCl₂ e pH-H₂O apresentaram similaridade em algumas regiões, principalmente nos extremos sul e norte da área experimental (Figura 11a e 11b), com valores acima de 6,0. O pH em solução SMP foi superior a 6,0 em todos os pontos e, portanto, o mapa da Figura 11c apresenta somente essa faixa.

Nas Figuras 12a e 12b, pode-se visualizar o mapa de distribuição dos níveis de Ca e Mg trocáveis, respectivamente. O Mg trocável apresentou similaridade com o pH CaCl₂ na região leste superior do mapa, onde 25,5 ha, ou seja, 51,0 % da área estão classificadas nas classes Médio e Baixo. Para o Ca trocável, a área de 6,3 ha representa a classe Médio, ou 12,6%. Resultados similares foram obtidos por Alcântara (2010) e Guedes Filho (2009).

Os valores de K trocável no solo, em sua quase totalidade, foram iguais ou superiores a 0,20 cmol_c dm⁻³ (Figura 12c), representando baixa variabilidade horizontal na camada de 0 – 0,2 m. Como resultado da soma das bases (Ca, Mg e K) representada na Figura 12d, pode ser definida uma zona de 5,1 ha, que representa 10,2 % da área, e possui valores na classe Médio, devido à menor participação do Mg nessa região.

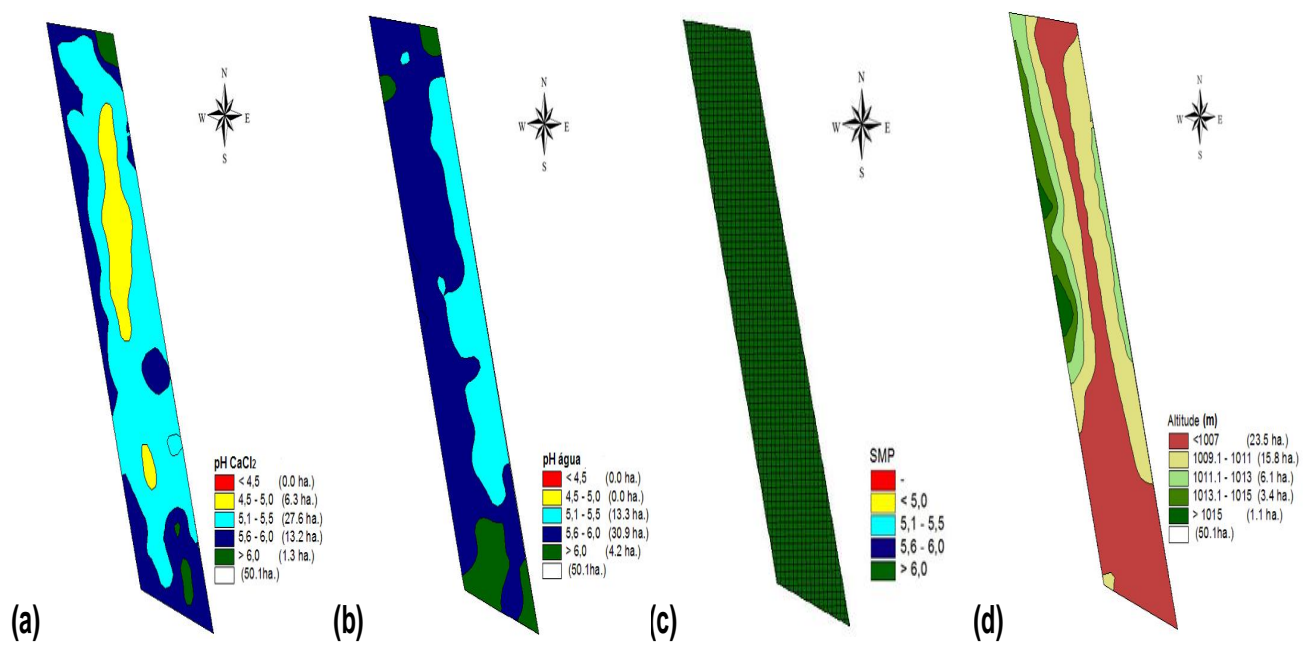


FIGURA 11 - Mapas de isolinhas de atributos de solo e de altitude: a) pH CaCl₂, b) pH H₂O, c) pH SMP e d) altitude. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

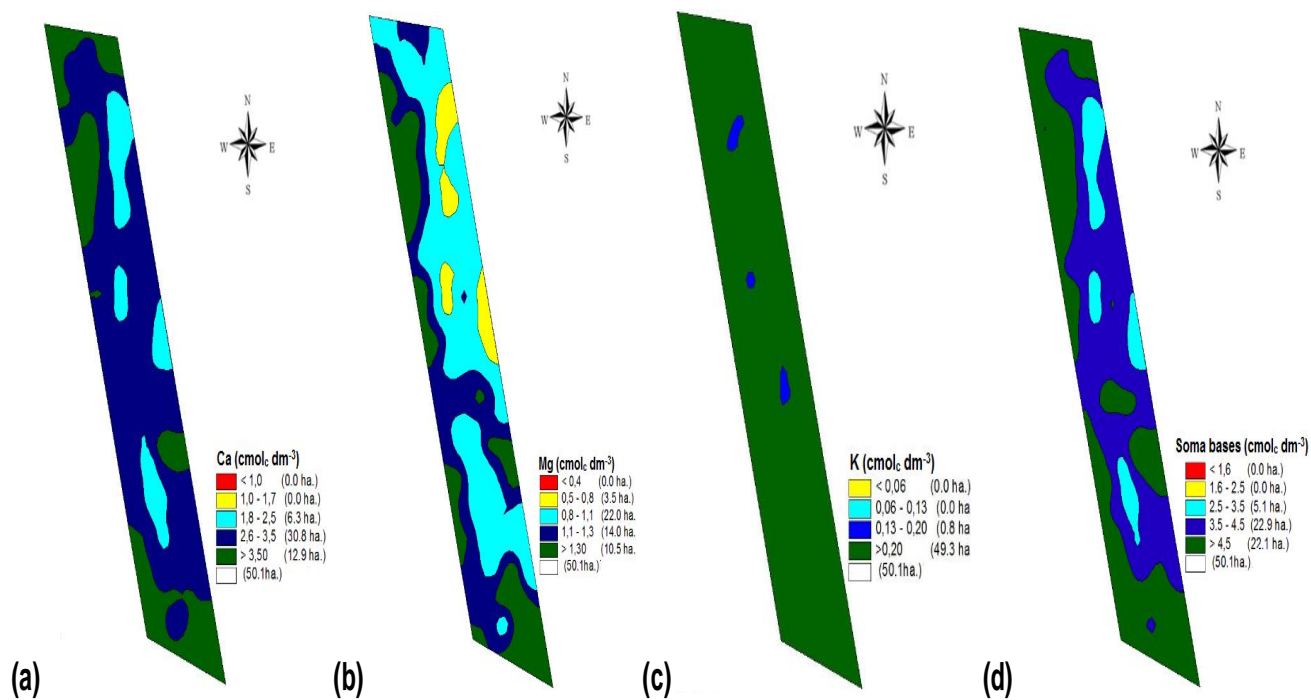


FIGURA 12 - Mapas de isolinhas de atributos de solo: a) cálcio trocável, b) magnésio trocável, c) potássio trocável e d) soma de bases. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

A Figura 13a e 13c representa a saturação por bases e acidez potencial, respectivamente, onde já se esperava o comportamento inverso, ou seja, quanto maior a saturação por bases, menor é a fração da CTC ocupada por H+Al. Esta situação ratifica as regiões do mapa onde se encontrou variação nos teores de Ca e Mg trocáveis. A CTC_{-pH 7,0} (Figura 13b) foi enquadrada na faixa entre 6,1 e 8,0 cmol_c dm⁻³, indicando predomínio de classe Médio no solo, devido à baixa variabilidade dos teores de argila e matéria orgânica, componentes da maioria de cargas negativas no solo.

A adubação realizada ao longo dos anos, principalmente com foco direcionado para a cultura do algodão, utilizando fontes S, gesso agrícola, superfosfato simples e sulfato de amônio, possibilitaram que os níveis de S no solo fossem considerados na classe Alto. O mapa de S (Figura 13d), demonstra que todos os 50,1 ha encontram-se nas faixas de Suficiente e Alto (teores acima de 11,0 mg dm⁻³).

Ao analisar o mapa de P Mehlich-1 na Figura 14a, é possível visualizar a influência dos pontos abaixo de 2,0 mg dm⁻³, mesmo com o histórico de adubação corretiva do solo com diversas fontes de P. A área classificada com níveis no solo Muito baixo e Baixo representa 35,9%, e quando considerado também o nível Médio, o percentual aumenta para 74,2% da área total. Porém, não foi possível detectar comportamento similar para o P extraído por resina trocadora de ânions, onde praticamente toda a área foi classificada como Alto, (acima de 20,0 mg dm⁻³). Ambas as metodologias podem ser utilizadas para avaliação da disponibilidade desse nutriente em solos do cerrado (SOUSA et al., 2006), porém o P Mehlich-1 representa melhor a variabilidade na área experimental.

Os mapas de micronutrientes representados nas Figuras 14c e 14d, 15a, 15b e 15c, demonstram que as adubações realizadas com B, Fe, Cu e Zn, principalmente por ocasião da semeadura do algodão, foram adequadas para elevar os seus teores até a classe Suficiente (Tabela 8). Exceção foi encontrada para o Mn, cuja disponibilidade está condicionada ao pH do solo, em que o mapa de superfície demonstra que 97,7 % da área está com os teores no solo na faixa Baixo e Médio e, portanto justificando-se a complementação da adubação via foliar realizada na cultura do algodão.

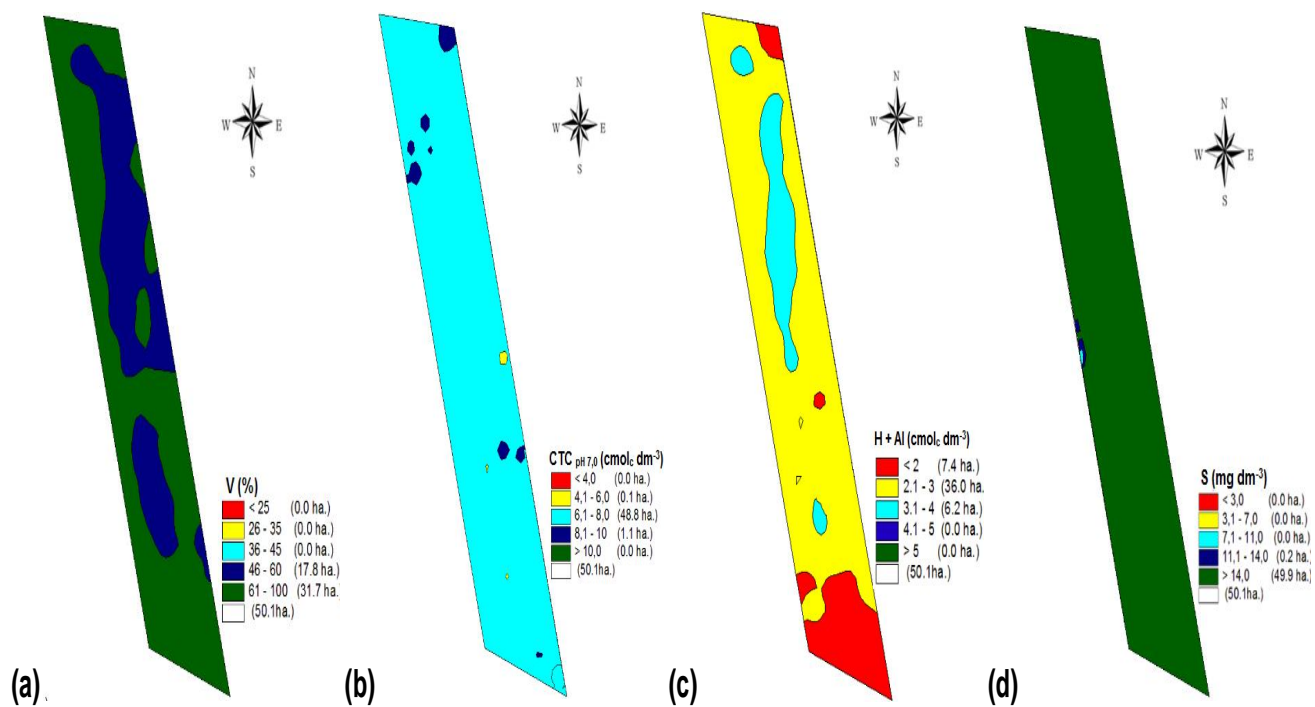


FIGURA 13 - Mapas de isolinhas de nutrientes no solo: a) saturação bases, b) CTC_{pH 7,0}, c) acidez potencial (H+Al) e d) enxofre. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

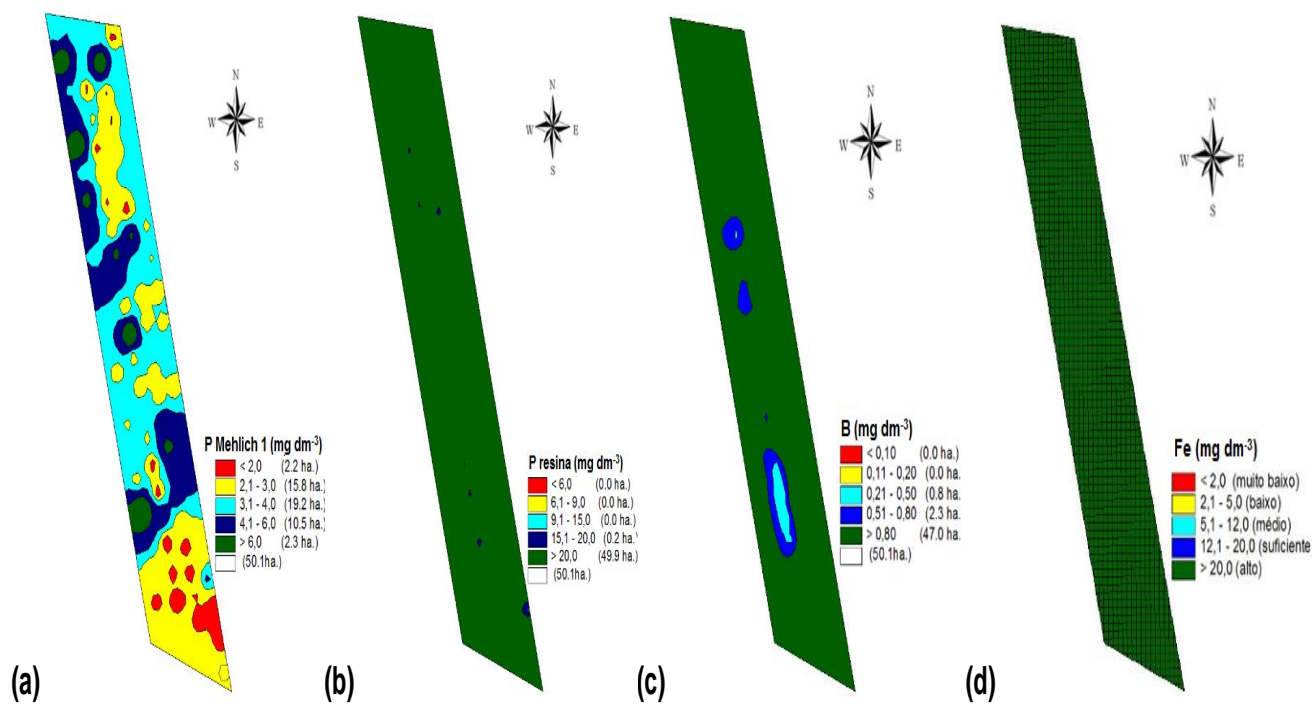


FIGURA 14 - Mapas de isolinhas de nutrientes no solo: a) P extraído por Mehlich-1, b) P resina, c) boro e d) ferro. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

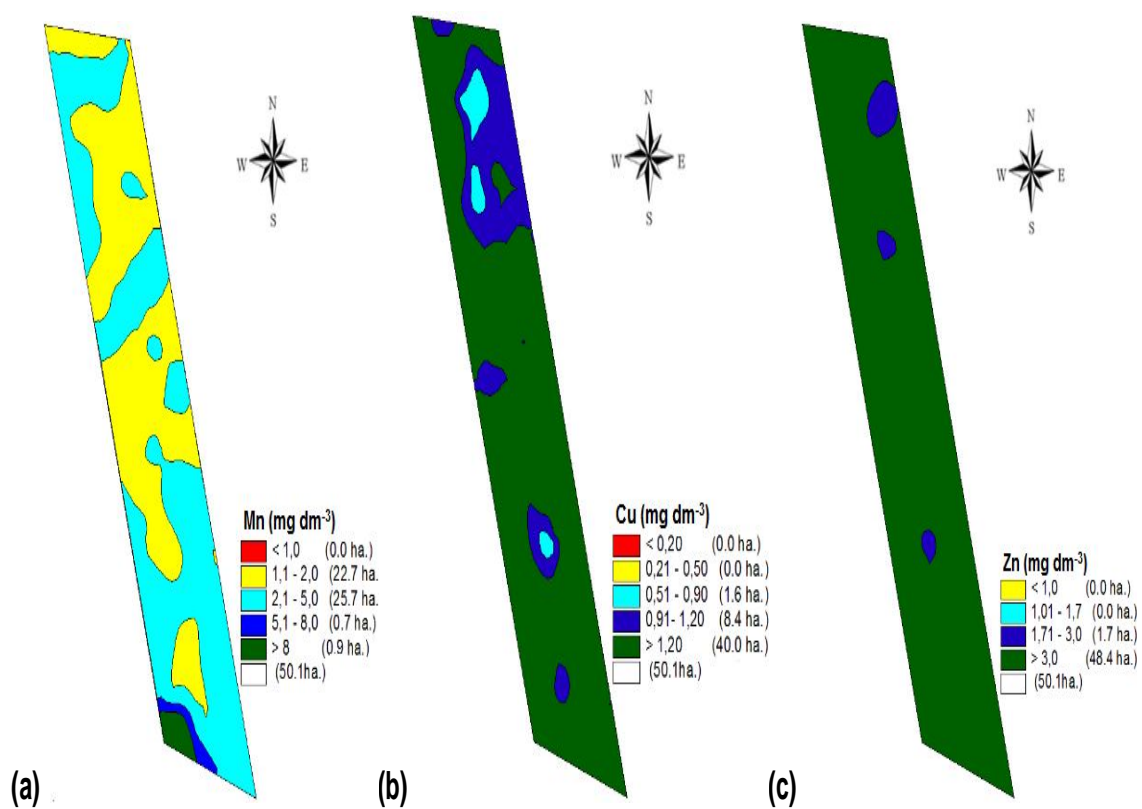


FIGURA 15 - Mapas de isolinhas de micronutrientes no solo: a) manganês extraível, b) cobre extraível e c) zinco extraível. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

A variação espacial da matéria orgânica (Figura 16a) foi representada por duas classes, uma Médio com 72,6% (36,4 há) e uma Alta, expressando 27,1% da área, entre 30,0 e 40,0 g kg⁻¹ que, para condições de cerrado, é considerado um valor a ser preservado. Segundo Pavinato (2009), em estudo realizado na mesma região (ambiente de cerrado), a utilização de plantas de cobertura e rotação de culturas pode garantir a manutenção dos níveis de matéria orgânica próximos aos originais da área.

A composição granulométrica representada pela argila, areia e silte está apresentada na Figura 16b, 16c e 16d, respectivamente. Nota-se que as variações encontradas são pequenas, sobretudo por se tratar de área pouco declivosa. A baixa amplitude entre os teores de argila, com o mínimo e máximo de 568 a 630 g kg⁻¹, respectivamente, a enquadra na faixa argilosa (SOUSA, 2004), tendo teor médio de 595 g kg⁻¹. Essa baixa variabilidade indica que a fração argila não é determinante para representar características associadas à dinâmica de nutrientes no solo, bem como de variações na produtividade da área experimental.

As frações areia e silte possuem uma variação na proporção de 1,5 vezes em favor do silte, considerando os valores médios da área (Figura 15c e 15d).

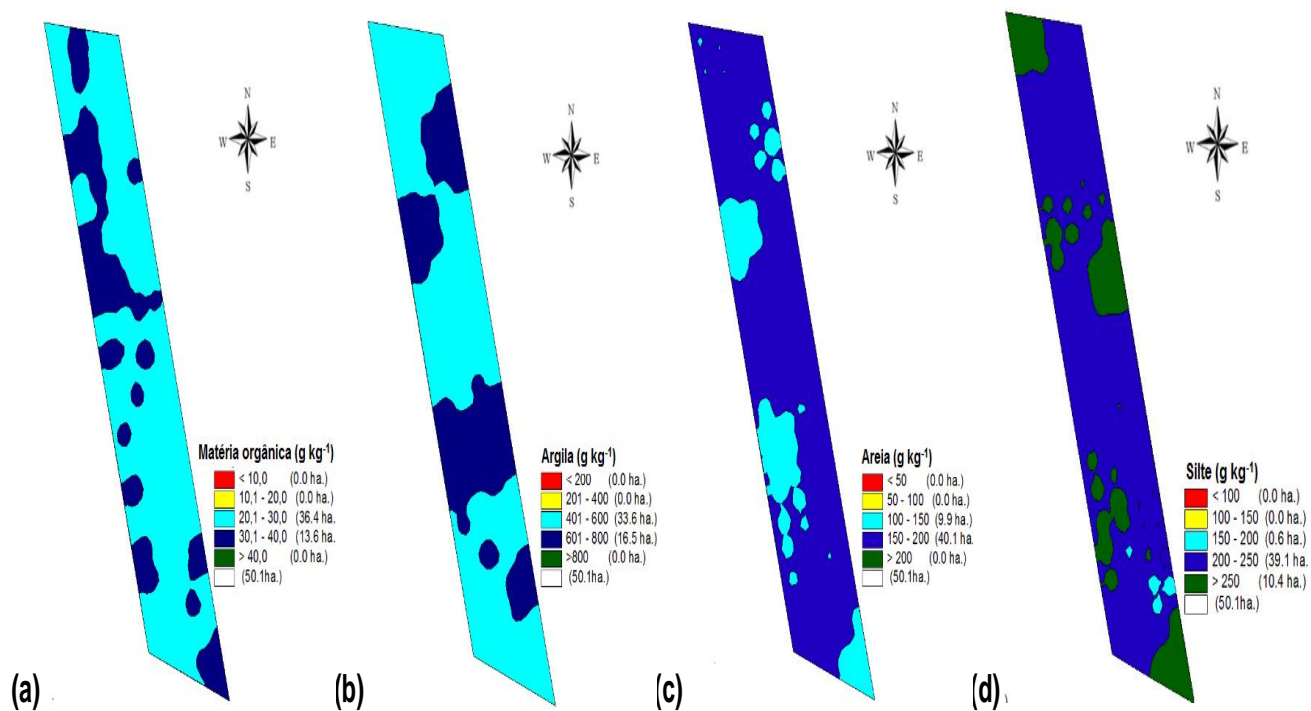


FIGURA 16 - Mapas de isolinhas: a) matéria orgânica, b) argila, c) areia e d) silte. Amostras coletadas antes da semeadura do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

É possível verificar semelhança entre os mapas de CEa, medida nas camadas de 0 a 0,3 m e 0 a 0,9 m (Figuras 17a e 17b), principalmente nos extremos sul e norte do mapa. Este comportamento pode ser visualizado também nos mapas de superfície dos atributos Ca e Mg trocáveis (Figuras 12a e b), indicando que os valores retornados pelo aparelho Veris, para CEa, estão expressando predominantemente os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Pode-se identificar nos mapas de pH H_2O e pH CaCl_2 (Figuras 11a e 11b), que as zonas com maiores valores coincidem com as zonas de maiores valores de CEa, tanto na medida rasa como na medida profunda. O comportamento foi inverso em relação ao mapa de H+Al (Figura 13c), onde os maiores valores foram obtidos onde a CEa foi menor. É importante salientar que a área localizada ao sul está nas cotas altimétricas menores, onde, por esta razão, acumula água por mais tempo.

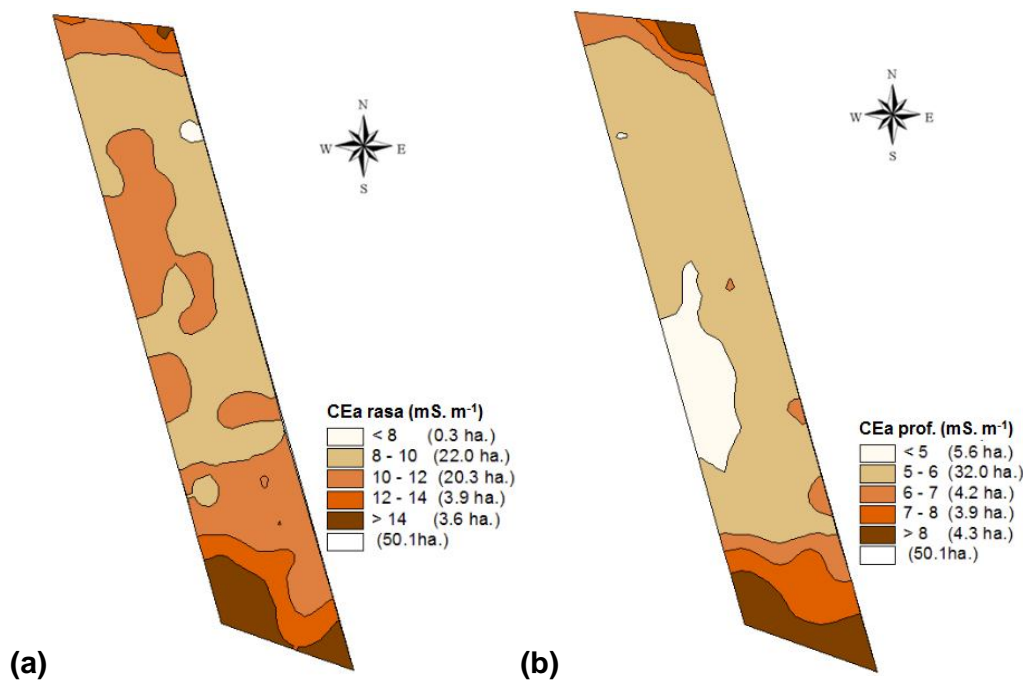


FIGURA 17 - Mapas de isolinhas da condutividade elétrica do solo: a) CEa rasa (0-0,3 m) e b) CEa profunda (0-0,9 m, safra 2010/11, Cristalina-GO.

4.5 Variabilidade espacial dos atributos de planta

Como a planta é consequência de uma combinação de fatores genéticos, climáticos e das variáveis de solo, a dependência espacial dos nutrientes nela contidos é forte e deve ser associada a variações intrínsecas do conjunto de características do solo (SALVIANO et al., 1998). Segundo Bernardi et al. (2002), os teores foliares de nutrientes para uma mesma espécie vegetal ou cultivar tendem a se manter dentro de uma determinada faixa de variação.

A partir dos componentes da semivariância e o IDE, relacionados às análises foliares de macro e micronutrientes verifica-se que, aos 70 DAE na safra 2010/11, todos os macronutrientes apresentaram ajuste ao modelo esférico, apresentando assim dependência espacial (Apêndices 10, 11 e 12). O modelo ajustado deve representar a tendência da semivariância (VIEIRA, 2000). Os nutrientes N e S medidos na folha expressaram alta dependência espacial, quando o IDE está abaixo de 25% (CAMBARDELLA et al., 1994). Esta situação permite inferir que a amostragem em malha de 1,8 amostra por hectare pode ser utilizada como indicador dos níveis nutricionais desses nutrientes, no caso presente.

É possível observar no mapa representativo dos teores foliares de N (Figura 18a) uma distribuição variável, onde 76,7% da área apresenta teores abaixo dos considerados adequados, entre 40 e 45 g kg⁻¹ (Tabela 11). Este comportamento é justificado, segundo Rosolem (2001), pela elevada taxa de absorção do nutriente no período entre a emissão dos primeiros botões florais e a abertura dos primeiros capulhos. No mapa (Figura 18a) pode-se identificar a região nordeste da área experimental como a mais limitante, em razão da deficiência de N.

Tratando-se dos teores foliares de P aos 70 DAE, todos os valores foram considerados abaixo do nível Suficiente para o algodão, que é de 3,0 a 4,0 g kg⁻¹, o que pode ser visualizado na Figura 18b. O mapa demonstrando os teores de P no solo extraído pelos diferentes métodos (Figura 14a e b) apresenta zonas onde o nível no solo é considerado Alto, mesmo com locais com níveis de P foliar Baixo. Como o P é facilmente translocado na planta, favorece o crescimento radicular e facilita a absorção dos demais nutrientes

(BATISTA et al., 2011), os baixos teores foliares, aos 70 DAE, podem ser decorridos pela competição de P nos pontos de crescimento (parte aérea e raízes) com o desenvolvimento de estruturas reprodutivas. Estes dados divergem dos de Motomiya et al. (2005), onde foi possível definir zonas homogêneas utilizando as análises foliares para P, Ca e Mg.

Os nutrientes Ca e Mg extraídos das folhas de algodão e apresentados pelas Figuras 18c e 18d, indicaram comportamento similar. Os níveis classificados como Suficiente ao desenvolvimento da cultura foram encontrados em grande parte da área experimental. Apesar dos mapas de disponibilidade no solo desses dois nutrientes indicarem variabilidade (Figura 12a e 12b), não se pode visualizar a mesma condição para as análises de folha aos 70 DAE (Figura 18c e d).

Dentre os macronutrientes, o K foliar apresentou o maior alcance espacial (640 m) para as amostras foliares coletadas aos 70 DAE. Aponta-se que 21 % do total da área em estudo se encontrava abaixo do nível considerado como Suficiente (entre 20 a 25 g kg⁻¹ – FUNDAÇÃO MT, 2001) para os teores foliares. A variabilidade encontrada na Figura 19a não foi relacionada ao teor de K trocável no solo (Figura 12a), onde houve predomínio de pontos de análise acima de 0,20 cmol_c dm⁻³. Mesmo quando o K trocável se encontrava em teores Suficientes no solo, o mesmo não é absorvido em quantidades suficientes quando da ocorrência de seca, excesso de água ou qualquer impedimento físico (ERNANI et al., 2007).

Cerca de 31,1% da área possuía plantas com teores foliares de enxofre abaixo dos nível de 4,0 g kg⁻¹ (Figura 19b), considerado adequado para a cultura. O enxofre adicionado via sulfato de amônio, adubação de base e, em alguns anos, como gesso agrícola e superfosfato simples (Tabelas 4, 6 e 7) foi necessário para manter o equilíbrio nutricional com N e P no crescimento das culturas e o seu uso como condicionador químico de ambiente radicular em subsuperfície (ALVAREZ et al., 2007). Não foi observada correspondência entre os mapas do teor de S no solo (Figura 13d) e demais mapas de isolinhas avaliados.

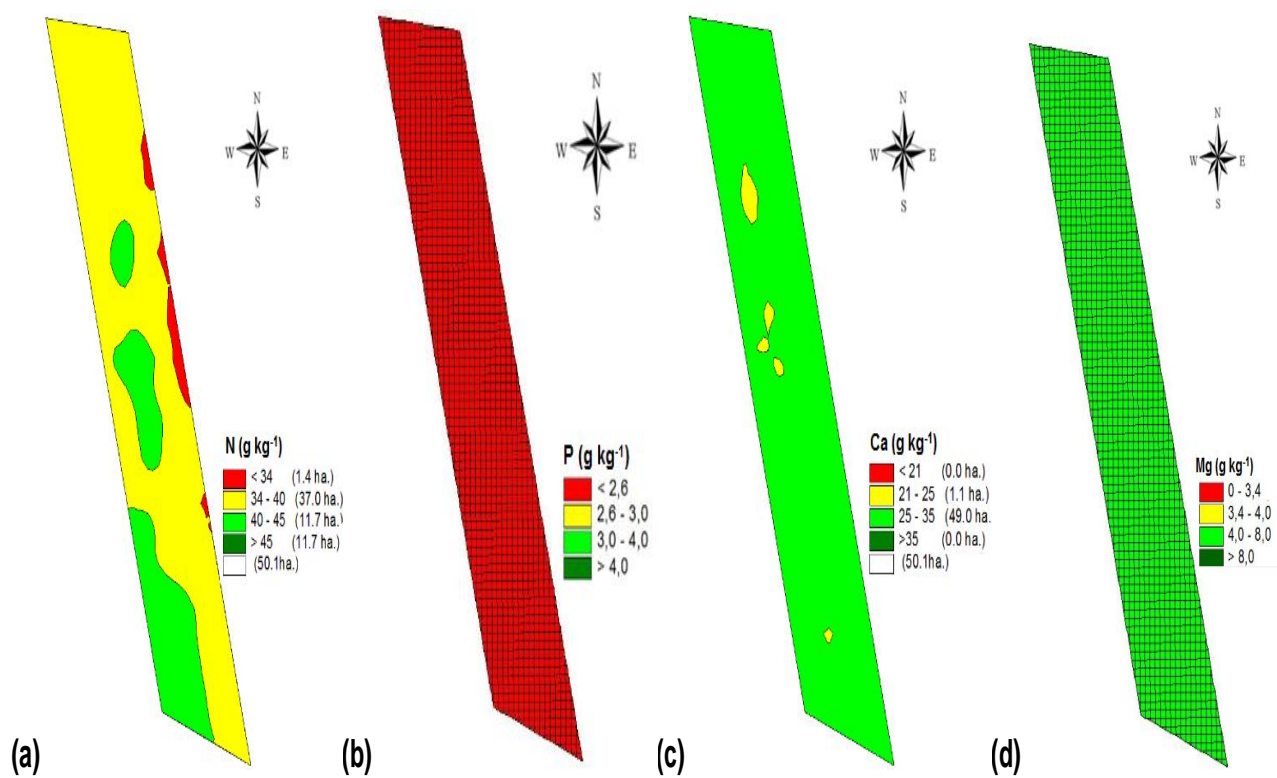


FIGURA 18 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) nitrogênio, b) fósforo, c) cálcio e d) magnésio, aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

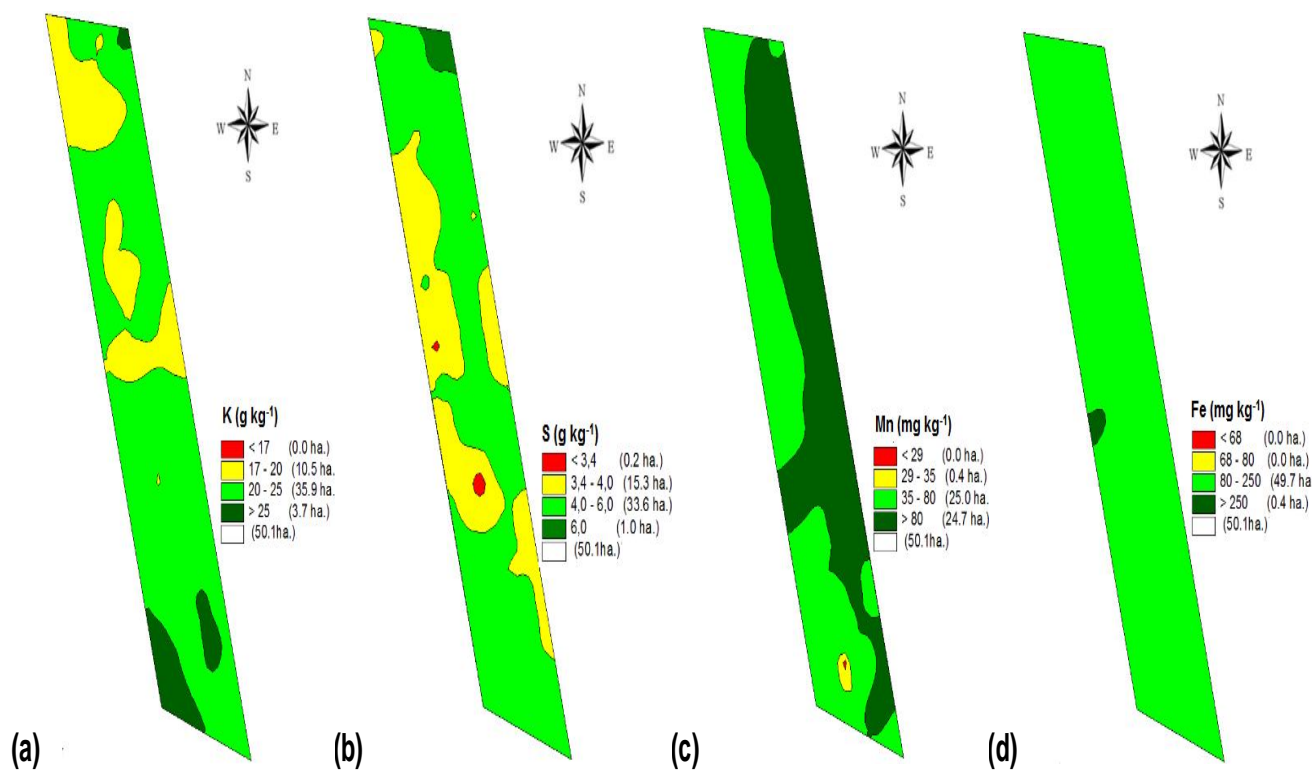


FIGURA 19 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) potássio, b) enxofre, c) manganês e d) ferro, aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

O estudo de Vieira et al. (2010) destaca que os resultados obtidos para alguns nutrientes possuem uma estrutura de variabilidade dependente da localização espacial, mesmo para uma área adubada com um mesmo formulado NPK. O alcance obtido pelos teores foliares para os macronutrientes aos 70 DAE variou de 220 m a 640 m (Tabela 15). Considerando uma malha de 200 x 200 m, os resultados para os teores de macronutrientes foliares poderiam ser representados por uma amostra para cada quatro hectares.

Para a determinação da variabilidade encontrada entre os teores de micronutrientes foliares aos 70 DAE, encontrou-se o modelo esférico como o mais indicado para o Mn, B e Cu e o modelo gaussiano para Fe (Tabela 15). O Cu não pode ser representado espacialmente, pois a ocorrência do EPP define uma variação que não pode ser explicada pela grade de amostragem. A Figura 20c mostra que praticamente toda a área experimental estava com os níveis foliares abaixo da suficiência para a cultura (20 g kg^{-1}).

O Mn foliar apresentou forte IDE e um alcance de 297 m, onde uma amostra pode ser explicada pela amostra vizinha. O mapa dos teores de Mn aos 70 DAE (Figura 19c) indicou que os teores foliares nas plantas estavam suficientes ao desenvolvimento das plantas, ao contrário do que foi observado para os teores do nutriente no solo (Figura 15a), onde foram identificadas zonas com teores no solo inferiores ao Suficiente na profundidade de 0 – 0,2 m. Possivelmente o sistema radicular do algodão absorveu do Mn em camadas de solo mais profundas, onde o pH é mais ácido e, conseqüentemente, o nutriente está mais disponível. Contribuiu para a situação de nutrição na classe Suficiente a aplicação de cloreto de manganês aos 33 DAE.

Os teores de B foliar, amostrados aos 70 DAE, proporcionaram inferir uma forte dependência espacial, com alcance de 440 m. Na Figura 20a, pode ser observado que os teores foliares foram classificados como superiores aos necessários para o desenvolvimento, o que, segundo Dechen & Nachtigall (2007), ocorre devido à baixa mobilidade do elemento na planta.

Os alcances de 512 e 422 m, obtidos para o Fe e o Cu foliares aos 70 DAE, respectivamente, evidenciam boa representatividade espacial da malha de amostras utilizadas. O Fe nas folhas mostrou atendimento na faixa de

Suficiência, de 80 a 250 mg dm⁻³ (Figura 19d). No entanto, o Cu foliar (Figura 20b) apresentou comportamento inverso, no qual todos os resultados obtidos estão abaixo da faixa suficiente que é de 10 a 15 mg dm⁻³, mesmo quando os teores no solo (Figura 15b) são classificados como Alto.

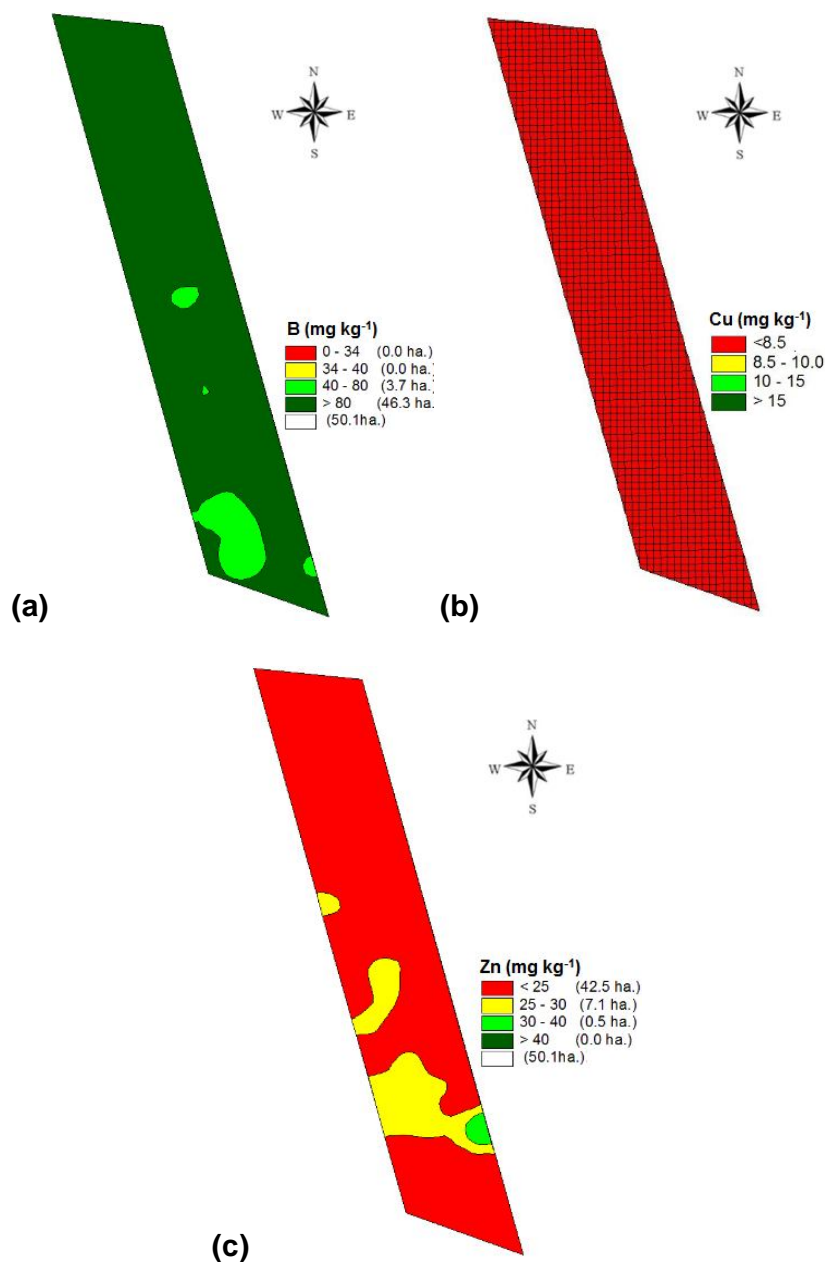


FIGURA 20 - Mapas de superfície dos teores de nutrientes foliares: a) boro, b) cobre e c) zinco, aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

TABELA 13. Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) dos macro e micronutrientes nas folhas em diferentes períodos e safras de algodão no cerrado, Cristalina-GO

Nutriente	Modelo	Semivariância			Alcance (A)	IDE ((C ₀ /(C ₀ +C ₁))*100)	Classe
		C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁			
----- 70 DAE - 2010/11 -----							
N	Esférico	1,5	4,8	6,3	330	24	F
P	Esférico	0,01	0,0165	0,0265	230	38	M
K	Esférico	2,7	5	7,7	640	35	M
Ca	Esférico	1,5	2,9	4,4	235	34	M
Mg	Esférico	0,08	0,085	0,165	220	48	M
S	Esférico	0,15	0,85	1	358	15	F
Mn	Esférico	70	300	370	297	19	F
Fe	Gaussiano	400	1100	1500	512	27	M
B	Esférico	70	250	320	440	22	F
Cu	Esférico	0,04	0,085	0,125	422	32	M
Zn	EPP	-	-	-	-	-	-
----- 110 DAE - 2010/11 -----							
N	EPP	-	-	-	-	-	-
P	EPP	-	-	-	-	-	-
K	EPP	-	-	-	-	-	-
Ca	Exponencial	2,3	0,8	3,1	437	74	M
Mg	EPP	-	-	-	-	-	-
S	Esférico	0,3	0,98	1,28	330	23	F
Mn	Gaussiano	70	100	170	480	41	M
Fe	Esférico	90	40	130	173	69	M
B	EPP	-	-	-	-	-	-
Cu	EPP	-	-	-	-	-	-
Zn	Esférico	2	2,7	4,7	331	43	M
----- 108 DAE - 2011/12 -----							
N	Esférico	2,8	3,6	6,4	246	44	M
P	Esférico	0,02	0,157	0,177	467	11	F
K	Esférico	3	12,5	15,5	241	19	F
Ca	Esférico	1,5	7,3	8,8	243	17	F
Mg	Esférico	0,08	0,15	0,23	364	35	M
S	Gaussiano	0,14	0,075	0,215	297	65	M
Mn	Esférico	23	62	85	332	27	M
Fe	EPP	-	-	-	-	-	-
B	EPP	-	-	-	-	-	-
Cu	Exponencial	0,2	0,39	0,59	480	34	M
Zn	Gaussiano	12	33	45	448	27	M

C₀: Efeito pepita; C₁: Contribuição; C₀+C₁: Patamar; Alcance (metros); IDE (%); Classe: F=Forte, M=Moderada.

A altura de plantas aos 70 DAE apresentou aderência ao modelo esférico com moderado grau de dependência espacial (Tabela 16). Nesta fase, as plantas estão em ambas as fases de crescimento vegetativo e reprodutivo e ocorrem variações na altura, sobretudo pela temperatura, disponibilidade de água, aplicação de reguladores de crescimento e população de plantas da área. Na Figura 21c, pode-se observar que 90 % da área possui plantas entre 0,50 e 0,75 m, comum para esse período. O alcance encontrado para esta situação foi elevado, de 435 m.

O índice de vegetação, obtido pelo índice SPAD, indicou que em apenas 1,0 ha, o mesmo foi menor do que 40,0 (Figura 21a). Estudos de Brandão et al. (2009), na região do semiárido brasileiro, definiram modelos para doses suplementares de N quando a unidade do SPAD estava abaixo de 40,0 e a produtividade relativa a ser atingida é de 90%. Com relação aos parâmetros do semivariograma experimental, o modelo melhor ajustado foi o esférico e sendo detectada forte dependência espacial, pelo IDE. O alcance obtido foi de 619 m (Tabela 16).

TABELA 14. Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) de atributos de planta obtidos por métodos não destrutivos

Atributo	Modelo	Semivariância			Alcance (A)	IDE $((C_0/(C_0+C_1))^*10_0)$	Classe
		C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁			
----- 70 DAE – safra 2010/11 -----							
Altura	Esférico	15	34	49	435	31	M
Índice clorofila	Esférico	2	11,5	13,5	619	15	F
IAF	Gaussiano	0,002	0,014	0,016	518	12	F
----- 110 DAE – safra 2010/11 -----							
Altura	Esférico	40	110	150	524	27	M
Índice clorofila	Esférico	5,5	5,5	11	185	50	M
IAF	Gaussiano	0,0015	0,0019	0,0034	474	44	M
----- 108 DAE – safra 2011/12 -----							
Altura	Linear	15	70	85	-	18	F
Índice clorofila	Esférico	4	11	15	158	27	M
Estande	Exponencial	2	3	5	313	40	M

C₀: Efeito pepita; C₁: Contribuição; C₀+C₁: Patamar; Alcance (metros); IDE (%); Classe: F=Forte, M=Moderada.

O IAF apresentou forte dependência espacial e um alcance de 518 m. Porém, diferentemente dos demais índices, apresentou maior ajuste ao modelo

gaussiano no semivariograma (Tabela 16b). A obtenção do IAF, através de imagens de sensores remotos, resultou em um mapa com grande semelhança ao índice SPAD (Figura 21a). Ambos os índices apontaram a região sul do mapa com maiores valores e a região norte com menores valores desses atributos, o que pode ser explicado pela maior altura de plantas, maior CEa, maior pH e menor H+Al, na parte sul do experimento. Aos 70 DAE, o N não pôde ser representado pelo IAF, devido à existência de solo descoberto, o que prejudica a precisão do sensor utilizado.

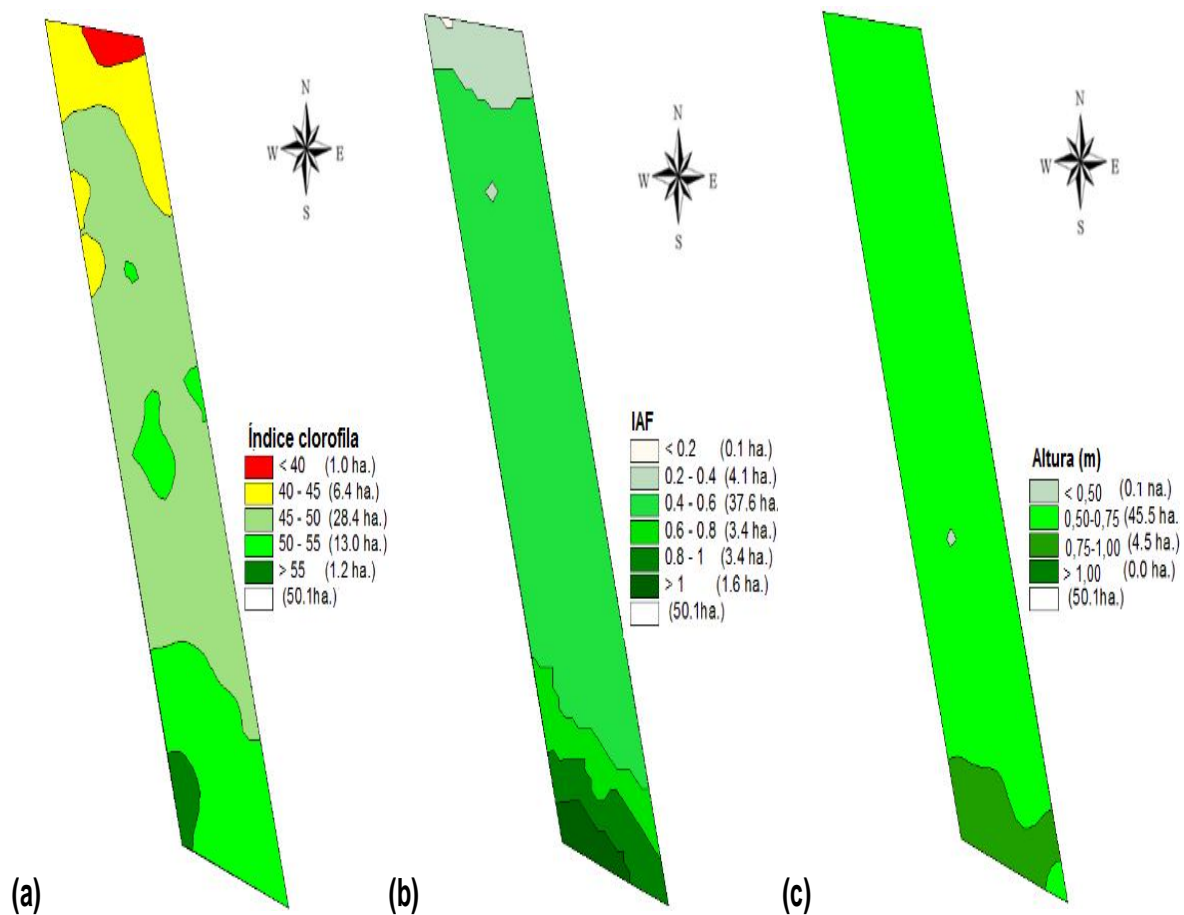


FIGURA 21 - Mapas de isolinhas de atributos de planta em amostras não destrutivas: a) índice de clorofila (SPAD), b) índice de área foliar (IAF) e c) altura de plantas, obtidos aos 70 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

Nas amostras coletadas aos 110 DAE da mesma safra (2010/11), observaram-se comportamentos diferentes aos encontrados aos 70 DAE. Nota-se claramente que os níveis foliares de N, P e K foram aumentando com a evolução do ciclo da cultura. Entre os macronutrientes analisados nas folhas do algodão, N, P, K e Mg apresentaram EPP e não puderam ser explicados pelo uso de ferramentas geoestatísticas (Tabela 15; Apêndices 13, 14 e 15). Seus respectivos mapas (Figuras 22a e b, 23a e 22d) apresentam variações entre os teores foliares, porém somente em parte da área foram classificados como abaixo da Suficiência ao desenvolvimento das plantas: em 3,4% da área para K, em 23,5% dela para P e em 38,9% para Mg . A ausência de dependência espacial é um indício de que as aplicações dos nutrientes via adubação foliar foram eficientes, com ênfase para o MAP purificado, aos 78 DAE, e nitrato de potássio, aos 78, 87 e 101 DAE.

O modelo exponencial foi o melhor ajustado para Ca foliar aos 110 DAE, apresentando um moderado IDE. A Figura 22c apresenta praticamente toda a área classificada com níveis Suficiente de Ca nas folhas de algodão. Já na primeira análise foliar aos 70 DAE, pode-se identificar o mesmo comportamento para o Ca nas folhas (Figura 18c). Devido à baixa variabilidade nos teores, o alcance obtido foi grande (437 m), e assim, a malha amostral foi representativa da área.

Considerando o mapa de S aos 110 DAE (Figura 23b), houve equalização dos teores foliares na classe considerada Suficiente e valores mais elevados, quando comparado ao período anterior, aos 70 DAE (Figura 19b). Na comparação entre os dois períodos, o S foliar foi classificado com forte IDE (Tabela 15). O modelo esférico proporcionou a melhor aderência ao semivariograma, que revelou um alcance de 330 m.

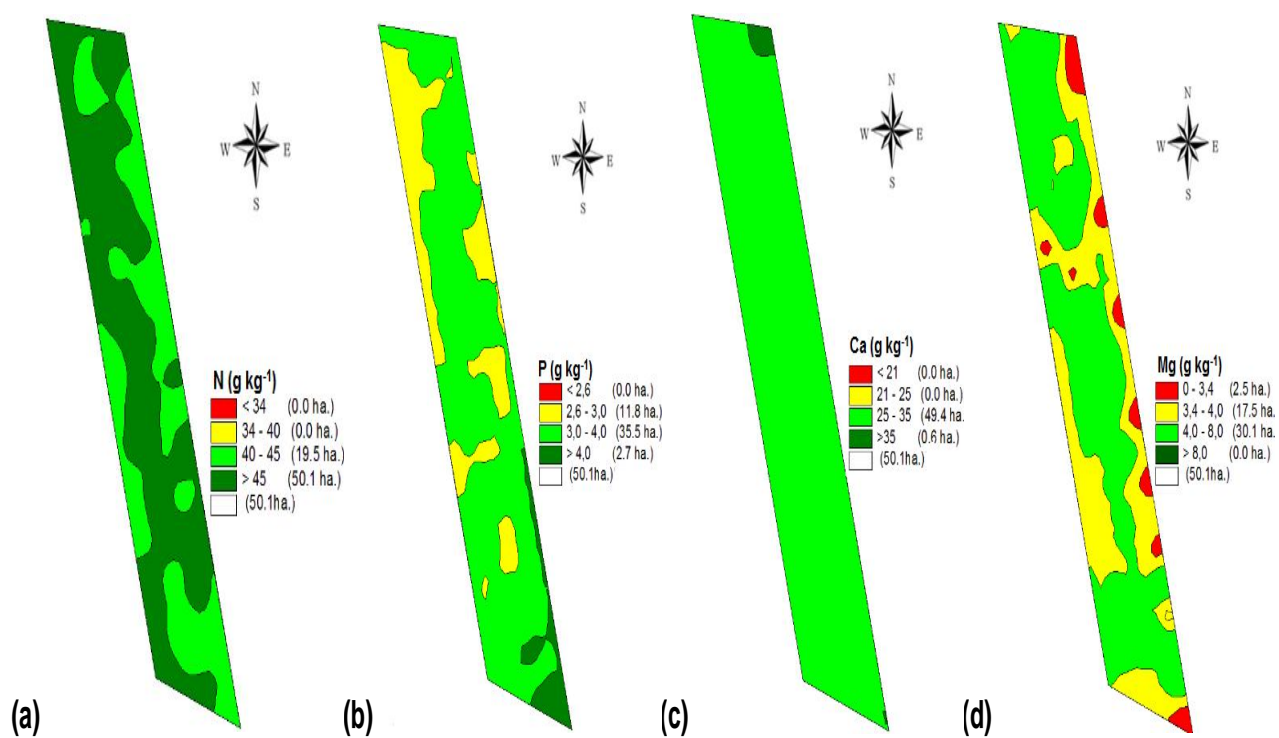


FIGURA 22 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) nitrogênio, b) fósforo, c) cálcio e d) magnésio, aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

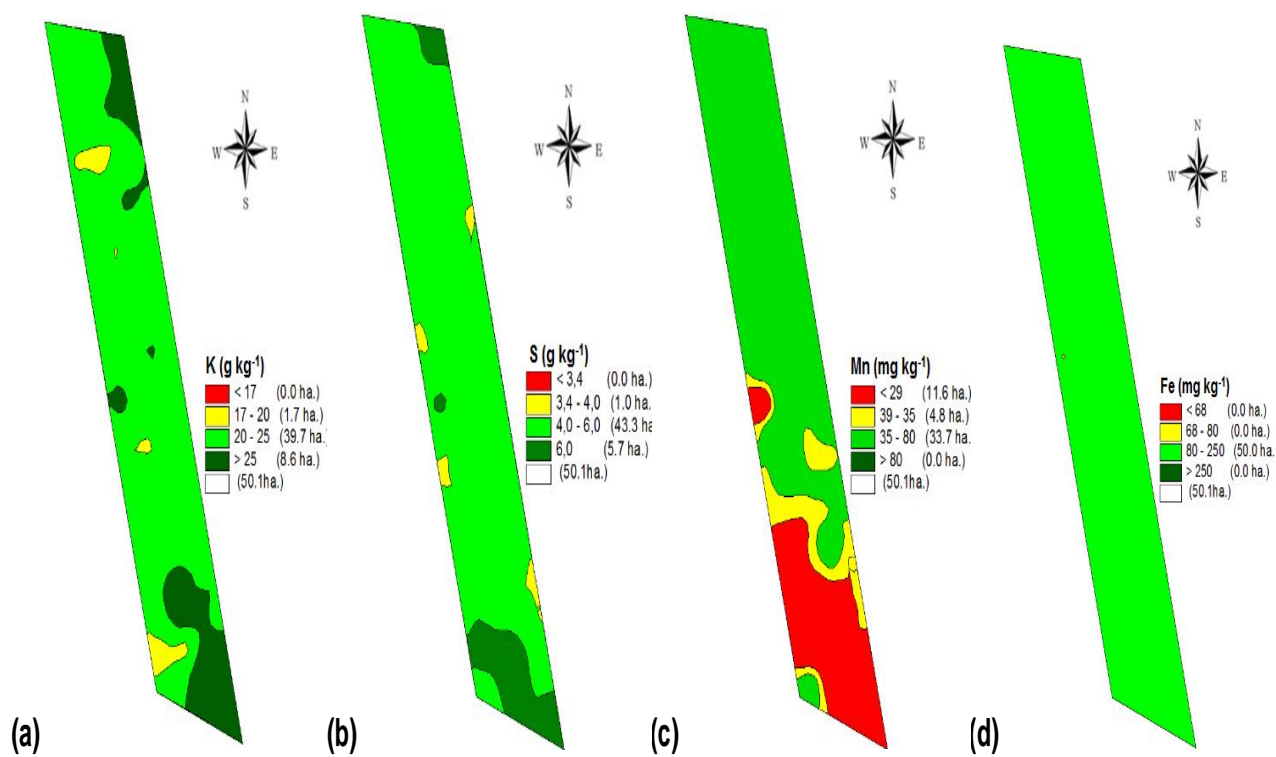


FIGURA 23 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) potássio e b) enxofre, c) manganês e d) ferro, aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

Os teores de micronutrientes nas folhas, analisados aos 110 DAE, mudaram o seu comportamento em relação aos 70 DAE. Para B e Cu não foi possível estabelecer parâmetros no semivariograma para a contribuição, levando ao EPP. O mapa gerado para B (Figura 24a) mostra somente na classe Suficiente, resultado das aplicações de B via adubação foliar aos 78 e 87 DAE. Aos 110 DAE, o B manteve os níveis foliares na faixa de suficiência, reforçando a sua pouca mobilidade na planta (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). Já o mapa demonstrativo de Cu foliar (Figura 24b) resultou em teores abaixo da Suficiência em toda a área ($< 8,0 \text{ mg kg}^{-1}$ – CAMACHO, 2012).

O Mn foliar apresentou deficiência em 32,7% da área experimental, aos 110 DAE (Figura 23c), havendo comportamento inverso ao pH H_2O (Figura 11b), evidenciando que, mesmo havendo teores adequados de Mn para o desenvolvimento das plantas, a disponibilidade no solo é limitada em condições de pH alto. O semivariograma foi adaptado ao modelo gaussiano, com um grande alcance (480 m).

Os níveis de Zn nas folhas de algodão mantiveram-se abaixo da Suficiência aos 70 e 110 DAE (Figuras 20c e 24c), conferindo semelhança entre os mapas de isolinhas. O IDE foi classificado como moderado e o alcance obtido foi de 331 m (Tabela 15). O comportamento para as análises de Fe das folhas foi similar em ambas amostragens (70 e 110 DAE), gerando mapas com teores foliares suficientes ao desenvolvimento da cultura (Figura 23d). O Fe apresentou melhor representação pelo modelo esférico de semivariograma, mas com baixo alcance, 173 m.

Aos 110 DAE, as plantas estão na fase de enchimento de maçãs e, segundo Rosolem (2001), é quando atingem a altura máxima, assim como a máxima interceptação de luz, para o fechamento da copa. Na Figura 25c, pode ser visualizado que a área ao sul do mapa apresentou a maior altura de plantas, mantendo o comportamento verificado na medição anterior (aos 70 DAE). O IDE encontrado foi moderado e o ajuste do melhor modelo de semivariograma foi o esférico (Tabela 16).

O índice de clorofila não apresentou valores abaixo de 40 (Figura 25a), porém certa similaridade foi visualizada no mapa de N foliar (Figura 22a). O

alcance fornecido pelo semivariograma experimental foi de 185 m (Tabela 16), indicando a necessidade de uma malha amostral mais intensa quando comparado aos demais nutrientes analisados através do tecido vegetal. O modelo de melhor ajuste foi o esférico.

Ao analisar o IAF, após o fechamento das linhas pelas plantas de algodão (110 DAE), houve um aumento na ordem 220% entre relação ao sensoriamento realizado aos 70 DAE. Todos os índices calculados resultaram em valores superiores a 1,0 (Figura 25). O índice de IDE foi classificado como Moderado e a representatividade das amostras alcançaram até 474 m.

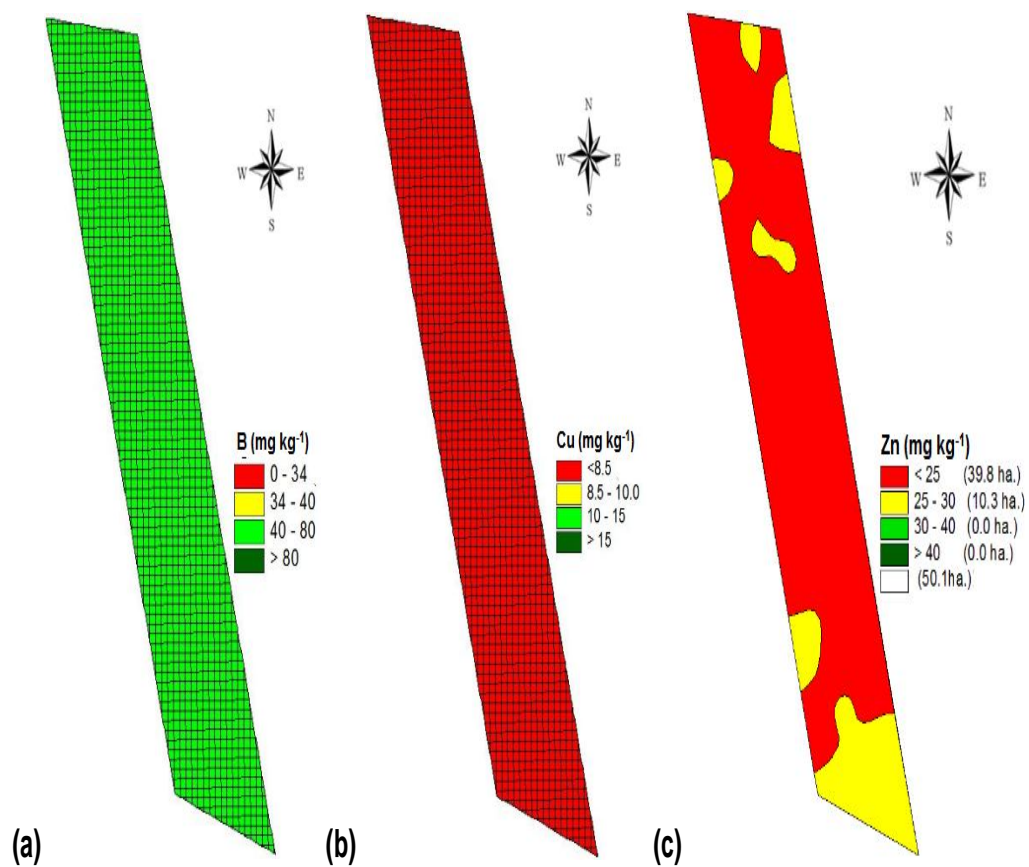


FIGURA 24 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) boro, b) cobre e c) zinco, aos 110 DAE, aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

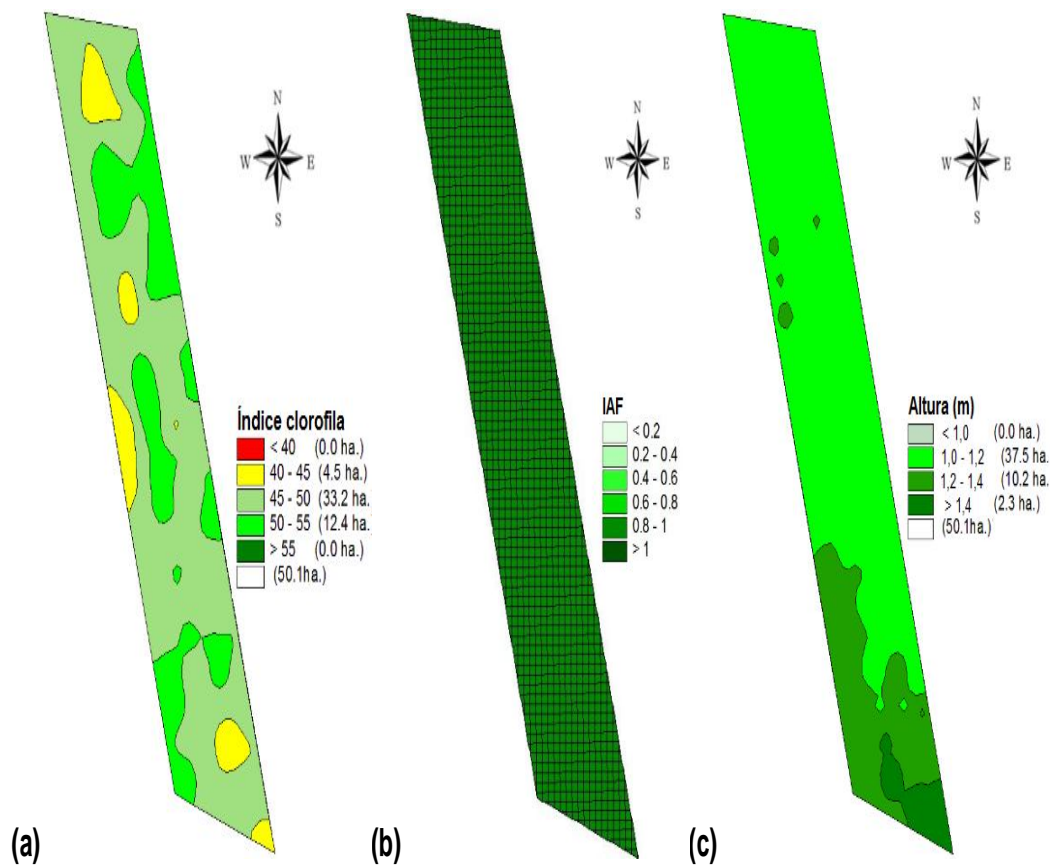


FIGURA 25 - Mapas de isolinhas de atributos de planta em amostras não destrutivas: a) índice de clorofila (SPAD), b) índice de área foliar (IAF) e c) altura de plantas, obtidos aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

Os comportamentos dos teores de macro e micronutrientes foliares, aos 108 DAE da safra 2011/12, foram totalmente condicionados pelas diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas na área experimental. As doses de fósforo foram aplicadas em faixas de semeadora e proporcionaram mapas que seguiram as faixas com as respectivas doses desse nutriente. Nessa safra, devido à ocorrência de uma precipitação elevada logo após a semeadura, o estabelecimento de plantas foi afetado e, conseqüentemente houve baixa população. Assim, decidiu-se realizar a ressemeadura com melhor sucesso. Porém, assim mesmo houve locais com população final de plantas inferior à média da lavoura. Os ajustes aos semivariogramas, para os teores foliares de nutrientes, aos 108 DAE estão demonstrados nos Apêndices 16, 17 e 18.

Independentemente disso, o teor de N nas folhas aos 108 DAE, estava abaixo do nível de suficiência em praticamente toda a área experimental (Figura 26a). O modelo melhor ajustado ao semivariograma experimental foi o esférico, originando um alcance de 246 m, não sendo possível estabelecer relação visual entre os teores de N foliar e as diferentes doses de P. Apesar das altas doses de P_2O_5 aplicadas em pré-semeadura (até $300 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$), não foi possível visualizar, no geral, variação nos teores foliares de P (Figura 26b). O comportamento está relacionado a disponibilidade de outros nutrientes em quantidades proporcionais, assim como, bem como a faixa considerada adequada pela literatura ($3,0 \text{ a } 4,0 \text{ g kg}^{-1}$), a qual deverá ser adaptada para as variedades de algodão modernas e com alto potencial produtivo. Em apenas duas pequenas áreas da lavoura, os teores nas folhas foram considerados adequados para o desenvolvimento da planta. Todavia, a série de dados geoestatísticos foi bem definida para o modelo esférico, ocorrendo forte dependência espacial e um alcance de 467 m para explicar o comportamento dos pontos amostrais (Tabela 15).

O K foliar com forte IDE, abaixo de 25%, apresentou o menor alcance entre os nutrientes estudados, 241 m. O modelo esférico possibilitou o melhor ajuste para o nutriente. O mapa de K (Figura 27a) delimitou duas zonas longitudinais no sentido norte/sul da área, em que se pode definir 96,6% da área com teores foliares considerados como abaixo da suficiência nas plantas. Apenas 3,4% da área atingiu os teores de suficiência.

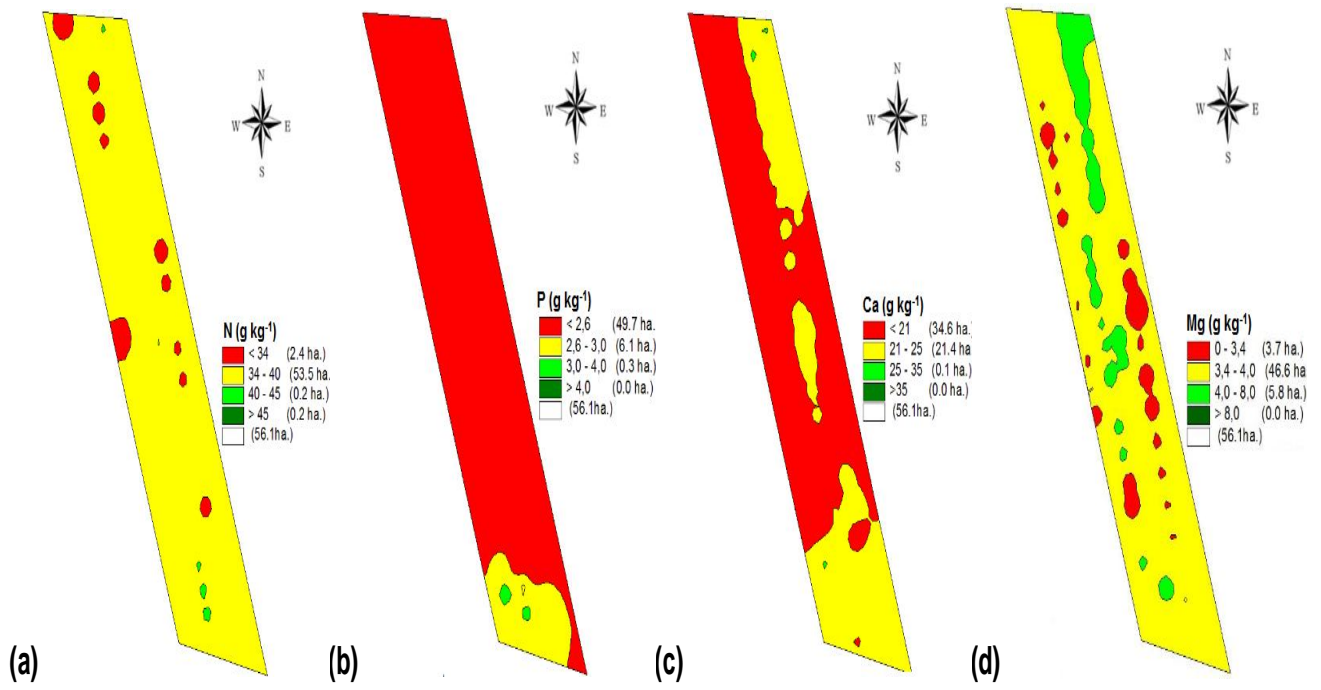


FIGURA 26 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) nitrogênio, b) fósforo, c) cálcio e d) magnésio, aos 108 DAE do algodão no cerrado, safra 2011/12, Cristalina-GO.

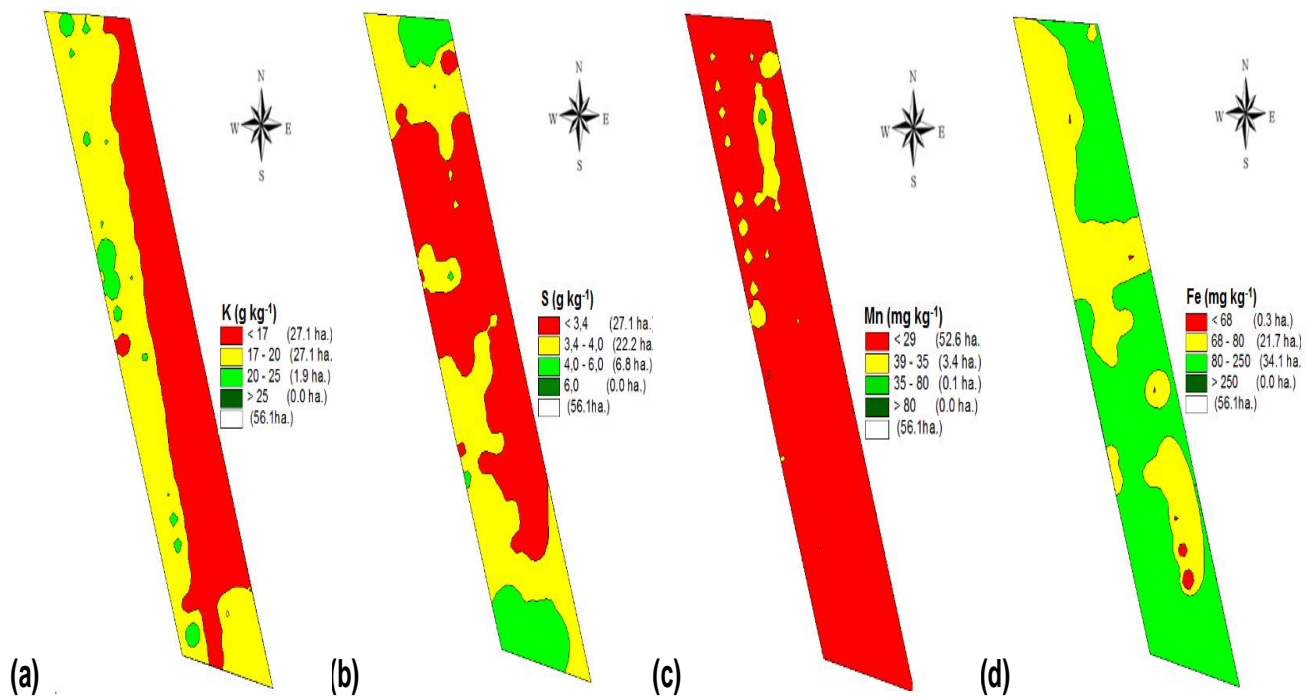


FIGURA 27 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) potássio, b) enxofre, c) manganês, e d) ferro, aos 108 DAE do algodão no cerrado, safra 2011/12, Cristalina-GO.

O Ca apresentou níveis foliares considerados abaixo da suficiência para a cultura do algodão (Figura 26c). Entre os parâmetros geoestatísticos, foi constatada forte dependência espacial e um alcance espacial de 243 m, indicando que a malha amostral identificou a variabilidade desse nutriente. Em referência ao Mg, a Figura 26d demonstra a influência das doses de P, onde claramente parte dos pontos sofreu alteração nos níveis foliares. O Mg apresentou deficiência, abaixo de $3,4 \text{ g kg}^{-1}$, justamente onde as doses P foram maiores, indicando desequilíbrio nutricional no solo e, conseqüentemente, nos níveis foliares. Em relação aos componentes geoestatísticos, houve melhor adequação ao modelo esférico e foi definido moderado IDE (Tabela 15).

O S foi ajustado ao modelo gaussiano como de melhor representatividade em relação ao conjunto de dados. As amostras estão relacionadas entre si, em um alcance de 297 m. Podem ser definidas duas zonas em que os níveis foliares de S estavam adequados, entre $4 \text{ e } 6 \text{ g kg}^{-1}$, nos extremos sul e norte da área experimental (Figura 27b).

Entre os micronutrientes medidos nas folhas aos 108 DAE, Fe e B apresentaram EPP, não podendo a variação ser explicada pela dependência espacial entre as amostras. Sendo assim, a malha amostral não foi suficientemente sensível para descrever a variabilidade. Nas Figuras 27d e 28a, representando Fe e B, respectivamente, praticamente não houve regiões definidas com plantas deficientes.

Mn, Cu e Zn apresentaram comportamento semelhante em seus mapas de nutrientes foliares (Figuras 27c, 28b e 28c), com predomínio de valores inferiores aos níveis suficientes para a cultura do algodão. Entre os parâmetros geoestatísticos, esses nutrientes apresentaram IDE moderado. Os modelos de melhor adequação ao semivariograma foram diferentes: esférico para Mn, exponencial para Cu e gaussiano no caso do Zn (Tabela 15).

Aos 108 DAE, ainda foram realizadas as avaliações de altura de plantas, população de plantas e leitura do índice de clorofila. Em relação à altura de plantas, observou-se maior crescimento na região sul do mapa (Figura 29b), enquanto na região norte do mapa, as plantas apresentaram menor

crescimento, abaixo de um metro de altura. A análise geoestatística resultou no comportamento de EPP, indicando não haver relação espacial para a malha de amostragem utilizada (Tabela 16). A altura de plantas não foi relacionada ao comportamento espacial do estande de plantas (Figura 29b e 29c), pois apresentou 41,0% da área com população próxima à população desejada de 6,8 plantas m^{-1} linear, no entanto, o restante da área ficou abaixo dessa população desejada. O algodão possui efeito compensatório em baixas populações, ocupando a área entre as linhas e entrelinhas de semeadura, na ausência de plantas vizinhas (ROSOLEM, 2001). Em relação ao IDE, obteve-se grau moderado e a análise geoestatística apresentou melhor ajuste para o modelo exponencial, com alcance de 313 m, bem superior à malha amostral utilizada na calibração deste trabalho (Tabela 16).

O índice de clorofila apresentou baixa variação espacial, uma vez que em cerca de 84,3% da área o índice foi entre 45,0 e 50,0 (Figura 29a). Na Tabela 16, constam os resultados da geoestatística aplicada, onde o modelo esférico foi o de melhor representatividade, proporcionando um alcance de 158 m. Para o IDE, o grau de dependência foi moderado.

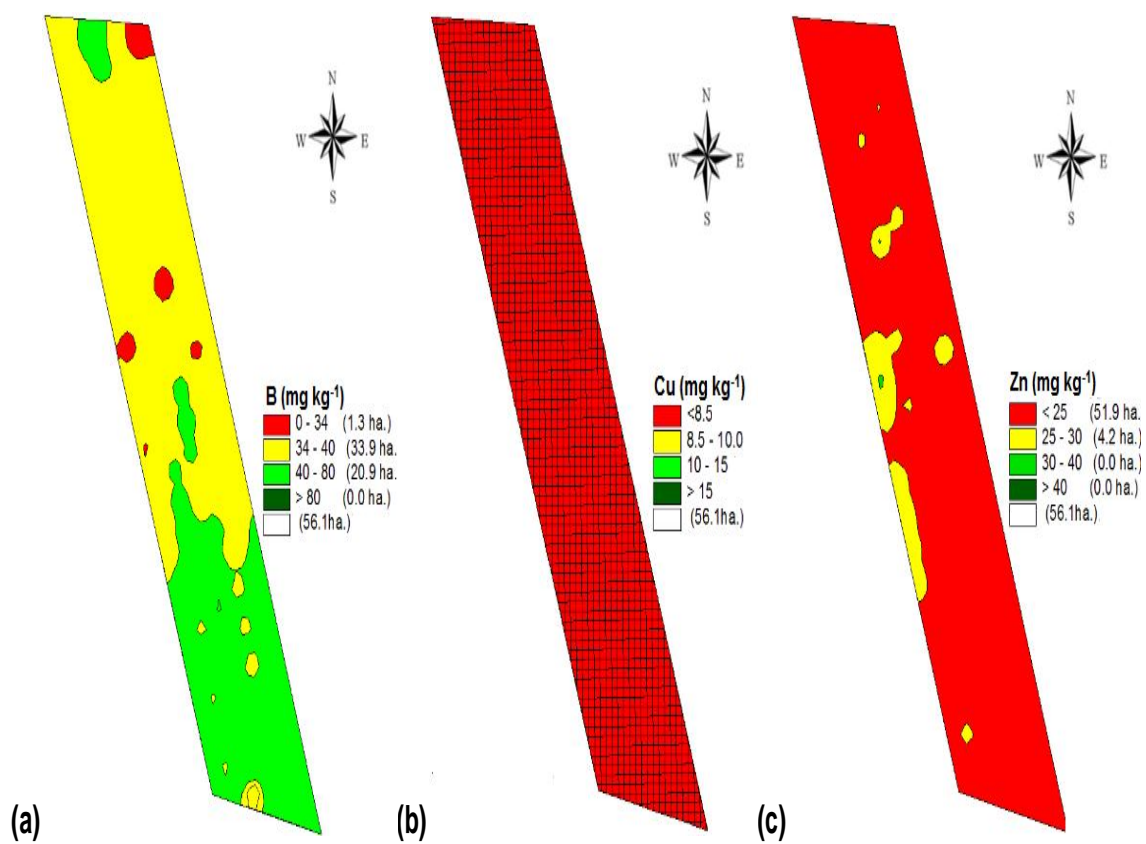


FIGURA 28 - Mapas de isolinhas dos teores de nutrientes foliares: a) boro, b) cobre e c) zinco, aos 108 DAE do algodão no cerrado, safra 2011/12, Cristalina-GO.

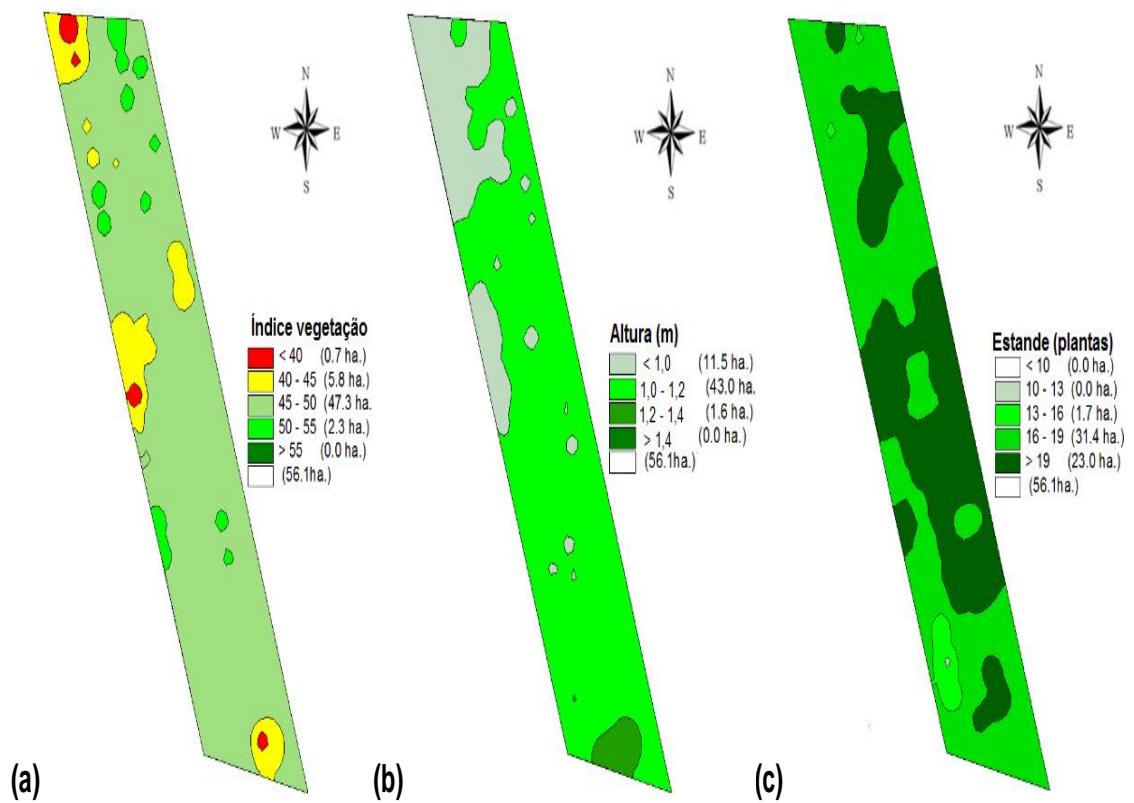


FIGURA 29 - Mapas de isolinhas de atributos de planta em amostras não destrutivas: a) índice de clorofila (SPAD), b) altura de plantas e c) estande de plantas, obtidos aos 110 DAE do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

4.6 Variabilidade espacial da produtividade

Uma das mais importantes opções de manejo utilizadas para minimizar os efeitos da variabilidade na produtividade das culturas é a agricultura de precisão. O mapa de produtividade da cultura é o indicador do efeito conjugado de todos os fatores que influenciam o rendimento, porque abrange fatores edáficos, antrópicos, biológicos e meteorológicos (CORWIN et al., 2003). A colheita com registro de produtividade do algodão é uma prática recente no Brasil. A coleta de dados pela colhedora (*cotton picker*), deve ser acompanhada de cuidados operacionais, uma vez que fatores como a largura efetiva de linhas na plataforma, entrada e saída da lavoura, número de manobras e a limpeza do sensor de rendimento estão entre os mais importantes cuidados para a obtenção de dados confiáveis.

Quando comparada os mapas resultantes da colheita obtida em máquinas equipadas com sensores de umidade e grãos e em *cotton picker*, percebe-se sua maior quantidade de informações registradas, devido ao comportamento da colheita em linhas, evitando espaços vazios no interior da lavoura, que ocorrem na maioria dos casos nas extremidades da lavoura.

O mapa resultante da utilização de sensores de produtividade, na safra 2010/11 (Figura 30), apresentou uma zona homogênea na faixa de 3500 a 4000 kg ha⁻¹, comportamento justificado devido pela falta de alguns registros de faixas de dados pelo conjunto de armazenamento, instalado na máquina. O modelo gaussiano foi o de melhor ajuste ao semivariograma, e o alcance obtido foi de 410 m, superior a vários atributos de solo e de planta. Os componentes do semivariograma definiram a produtividade desse ano com moderada dependência espacial (Tabela 17; Apêndice 9).

TABELA 15. Componentes da semivariância e Índice de Dependência Espacial (IDE) para produtividade nas safras 2010/11 e 2011/12.

Ano	Modelo	Semivariância			Alcance (A)	IDE (C ₀ /(C ₀ +C ₁))*100	Classe
		C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁			
Prod. 2010/11	Gaussiano	60000	45000	105000	410	57	M
Prod. 2011/12	Esférico	20000	175000	195000	648	10	F

C₀: Efeito pepita; C₁: Contribuição; C₀+C₁: Patamar; Alcance (metros); IDE (%); Classe: F=Forte, M=Moderada.

A variação espacial na produtividade identificada de forma visual (Figura 30) permite dizer que há variabilidade na área experimental, uma vez que 57,7% da área apresentou produtividade superior a 4.000 kg ha⁻¹ de algodão em caroço, considerado uma produtividade satisfatória para condições de sequeiro. A produtividade média obtida na área foi de 4.214 kg ha⁻¹ e sofreu influência de vários fatores externos, como regulador de crescimento, fertilização, população de plantas, incidência de pragas, doenças e ervas daninhas, as quais exerceram grande importância na produtividade obtida na safra 2010/11.

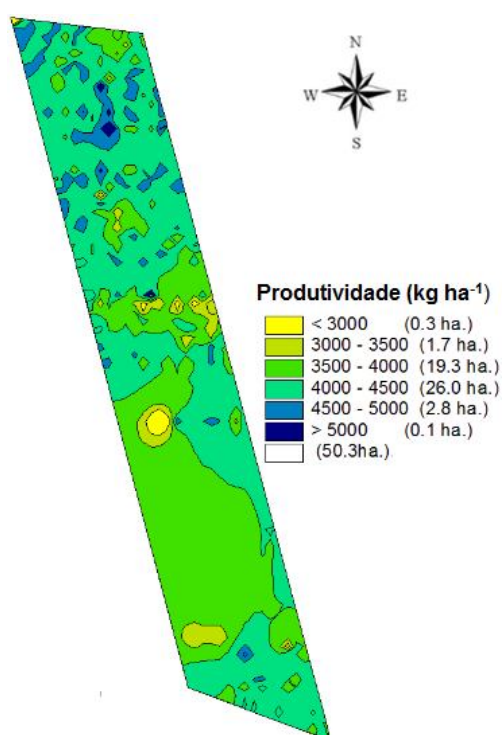


FIGURA 30 - Mapa de superfície representativo da variação espacial da produtividade de algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

Na safra 2011/12, foi realizada a colheita com a máquina, sendo possível registrar todos os pontos de produtividade na área, gerando o respectivo mapa de variabilidade da produtividade (Figura 31). Nessa safra, devido à ocorrência de grandes precipitações nas fases iniciais do ciclo do algodoeiro, houve uma menor população final de plantas (Figura 29c) e, em algumas regiões, falhas de semeadura. O bom estabelecimento da cultura é a chave para o sucesso da lavoura. Em termos de manejo, nesta fase o objetivo é estabelecer estande

adequado no mínimo tempo possível (ROSOLEM, 2001). Em anos onde a precipitação é regular, a produtividade tende a não apresentar grandes variações. Anos com precipitação em excesso ou de estiagem tendem a intensificar a variabilidade da produtividade (SANTI, 2007; GUEDES FILHO, 2009).

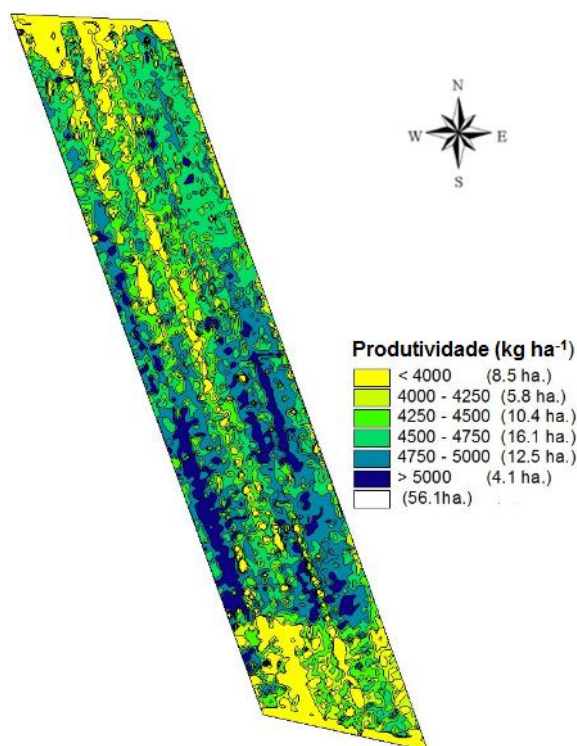


FIGURA 31 - Mapa de superfície representativo da variação espacial da produtividade de algodão no cerrado, obtido pelo sensor de fluxo instalado na máquina, safra 2011/12.

Ao longo dos anos, a exportação de nutrientes nos grãos e fibras pode criar zonas heterogêneas, onde as zonas mais produtivas tendem a melhor utilizar o fertilizante adicionado pela adubação e remover também uma parcela maior da reserva existente no solo. Essa situação é comum em lavouras onde a adubação é realizada pela média.

A produtividade obtida de forma mecanizada na safra 2011/12 (Figura 31) demonstra grande variabilidade espacial, uma vez que a produtividade foi influenciada pelas diferentes doses de P₂O₅ aplicadas, em faixas, na semeadura para verificar a resposta da cultura ao nutriente adicionado. O forte IDE pode ser explicado pelas faixas características com diferentes

produtividades. O modelo esférico definiu o comportamento do semivariograma experimental e o alcance obtido foi de 648 m.

A variabilidade apresentada no mapa de produtividade indicou que houve sensibilidade para identificar as zonas com diferentes doses de P. O mapa de isolinhas possibilitou verificar uma relação clara entre produtividade do algodão com a alternância das faixas de P adicionadas. O mapa também possibilitou detectar produtividades inferiores à média da lavoura nas extremidades sul e norte, que estão relacionadas com o estande de plantas e regiões de acúmulo de água (Figura 31).

Como consequência da aplicação das faixas com doses de fósforo, a área da lavoura que passou a ser incluída na análise foi a produtividade com diferentes doses de P, a área de análise passou a ser de 43,6 ha, ou seja, 87% da área, tendo em vista o direcionamento das mesmas (leste para oeste), não havendo aplicação do adubo em toda a lateral oeste (Figura 32a). Diante disso, somente 10,5% da área apresentou produtividade inferior a 4.000 kg ha^{-1} e a sua distribuição concentrou-se nas extremidades norte e sul da área experimental e no eixo central longitudinal, exatamente onde não houve adição de P_2O_5 (Figura 32b).

Na Figura 32c, foi possível identificar novamente áreas definidas com baixa produtividade, abaixo de 80 % em relação à média da área experimental. A produtividade normalizada permitiu confirmar regiões que poderiam futuramente ser tratadas de forma diferenciada, criando-se zonas de manejo. Principalmente nas regiões com menor potencial produtivo, houve semelhança visual com os mapas de CEa (Figura 17a e 17b). Sendo áreas definidas como de maior acúmulo de água ou encharcamento do solo durante a maior parte do ciclo da cultura. O fator umidade, em excesso, resultou em menor produtividade na safra 2011/12.

As informações geradas neste trabalho devem ter continuidade para garantir a análise temporal de mapas de produtividade e a confirmação e delimitação de zonas homogêneas, possibilitando a investigação dos fatores que limitam a produtividade das culturas e, conseqüentemente, a melhoria das condições de desenvolvimento das plantas. A produtividade do algodão ainda

está sujeita às condições climáticas, sobretudo à precipitação. Acompanhamento e análise de mapas de produtividade deve ser multi safra, para que várias culturas sejam contempladas e, assim, a variabilidade temporal e espacial possa ser visualizada (BLACKMORE et al., 2003).

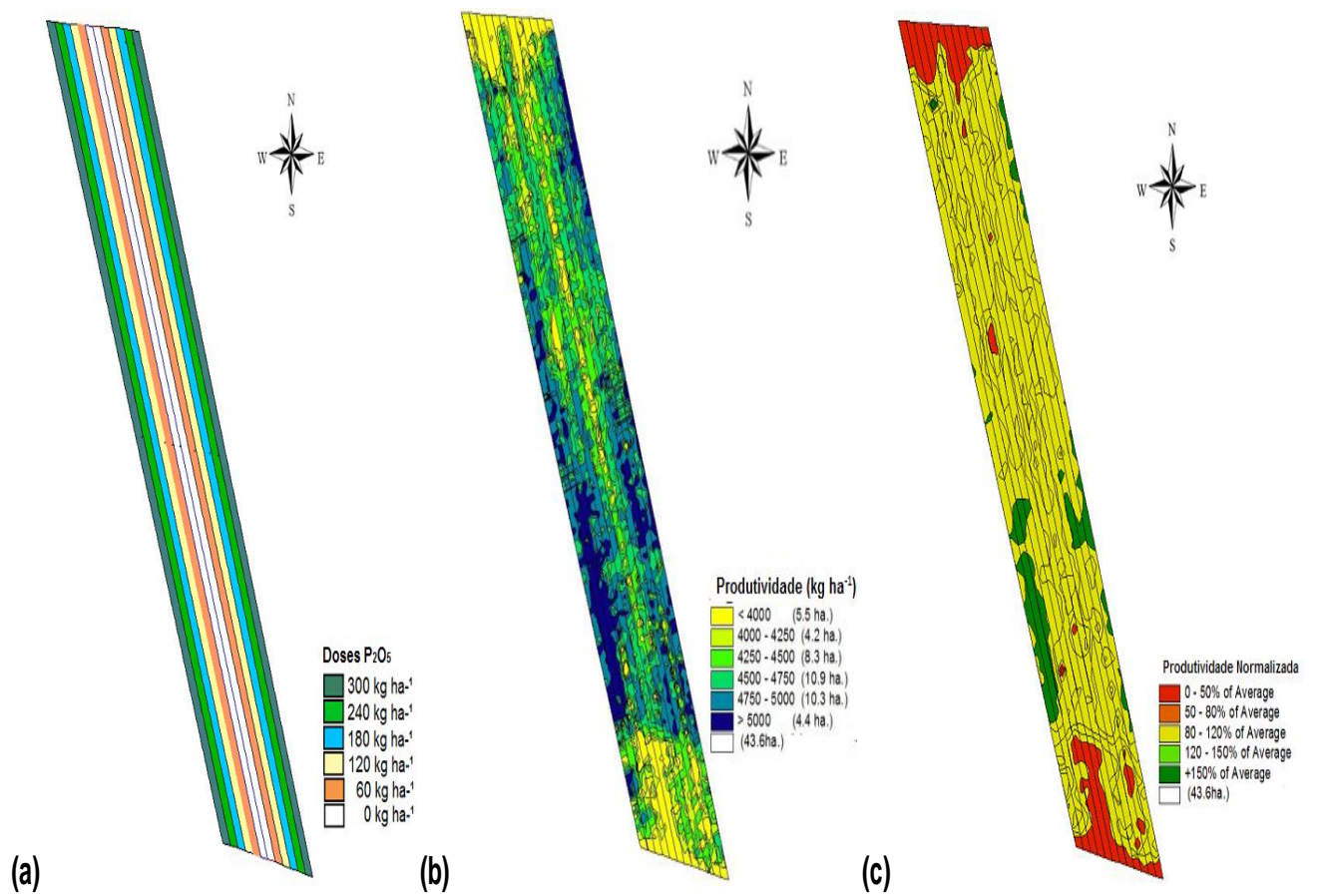


FIGURA 32 - Mapas de isolinhas representativos: a) doses de P₂O₅, b) variação espacial da produtividade de algodão obtida pelo sensor e c) produtividade normalizada, safra 2011/12, Cristalina-GO.

4.7 Correlações entre atributos de solo e de planta

Para estabelecer as relações entre os resultados de sensores e análises de solo e as análises e leituras realizadas nas plantas de algodão, foram realizados os testes do coeficiente de correlação simples, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson a 1% de probabilidade. Assim, no texto deste item, somente serão apresentadas e discutidas as correlações (valores de r) que apresentaram esse nível de significância. Os coeficientes de correlação entre as variáveis estudadas estão apresentados nas Tabelas 18 a 23.

4.7.1 Correlações entre atributos do solo

O processo convencional de amostragem e análise de solo em múltiplos pontos (em grade) pode-se tornar moroso e com elevado custo. Como alternativa para a utilização de amostras de solo, pode ser utilizada a condutividade elétrica aparente (CEa) do solo, utilizando sensores adaptados a equipamentos tracionados, conferindo maior número de dados e agilidade no mapeamento de zonas homogêneas. A CEa é a medida da corrente elétrica determinada pela concentração de íons na solução do solo, quando submetida à diferença de voltagem.

O pH é um indicador das condições químicas do solo, interferindo diretamente na disponibilidade de vários nutrientes, essenciais ao desenvolvimento vegetal. Além disso, o pH é sensível à força iônica do solo, que é alterada por variações dos teores dos íons presentes na solução do solo. Como o pH está relacionado a concentração de hidrogênio (H^+) na solução, quanto menor a sua concentração, maiores serão os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) e menor a saturação por alumínio (Al^{3+}). Quanto maior a concentração de cátions trocáveis, maior será a CEa e o pH. A utilização do sensor de contato Veris 3100, por ser uma metodologia rápida e com grande quantidade de pontos amostrais, torna-se uma boa ferramenta para delimitação de zonas homogêneas na AP, além de possibilitar a diminuição com os custos de amostragens convencionais em grade.

O pH H₂O apresentou a maior correlação com a CEa na camada superficial do solo (0-0,3 m), na ordem de 0,6 (Tabela 18). Esse comportamento é explicado pela maior concentração de cátions nessa camada pelas correções do solo com calcário, promovendo a neutralização da acidez do solo, a precipitação do Al³⁺ pelo aumento do pH, e a adição de Ca e Mg e ainda, as adubações com cloreto de potássio (adição de K⁺). Resultados obtidos por Costa (2011), em área de cerrado, mostraram correlação positiva entre pH H₂O e CEa, atingindo até 0,53, devido a diferentes condições de umidade no solo, utilizando o aparelho Landmapper ERM02.

Já o pH CaCl₂ e SMP apresentaram correlação maior para os resultados de CEa na camada mais profunda (0-0,9 m), de 0,58 e 0,75, respectivamente. Este fato está relacionado à diminuição das interferências antrópicas (manejo do solo, adubação e correção do solo) em camadas profundas. O pH SMP determina a quantidade de acidez potencial (H+Al) em uma solução e, assim, quanto maior a profundidade, maiores são os valores de H+Al e, conseqüentemente, diminuem os teores de cátions básicos. A relação entre o pH SMP e a recomendação de calagem foi estabelecida por Lund et al. (2005) em solos agrícolas dos Estados Unidos, sendo superior a 0,9, em três dos quatro solos estudados.

A CEa pode ser correlacionada com outros atributos, como relatado por Costa (2011), que encontrou relação da mesma com pH, V, H+Al e T. Corwin (2005) também indica a possibilidade de uso da CEa em AP, por sua relação com MOS e argila. No presente trabalho (Tabela 18), foi possível verificar correlação positiva entre CEa medida de 0 – 0,3 m com os atributos saturação por bases, K trocável, soma de bases trocáveis e Ca trocável, na ordem de 0,56, 0,48, 0,48 e 0,46, respectivamente. Estas relações foram devidas, principalmente, aos cátions dissolvidos na solução do solo (Ca²⁺ e K⁺) que, em potencial constante, a corrente elétrica é inversamente proporcional à resistência da solução (CORWIN, 2005). É possível obter estimativas da concentração de K trocável na solução do solo, principalmente em solos de textura franca ou arenosa (SANTANA, 2007).

TABELA 16. Coeficientes de correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e produtividade do algodão no cerrado, safra 2010/11, Cristalina-GO.

	Prod.	CEa (0,3m)	CEa (0,9m)	pH CaCl ₂	pH H ₂ O	pH SMP	H + Al	Ca	Mg	K	Soma bases	CTC pH 7,0	V%	P Mehlich 1	P resina	MOS	S	B	Fe	Mn	Cu	Zn	
Prod.	-																						
CEa (0,3m)	-0,19	-																					
CEa (0,9m)	-0,13	0,83*	-																				
pH CaCl ₂	0,10	0,42*	0,58*	-																			
pH H ₂ O	0,12	0,60*	0,53*	0,52*	-																		
pH SMP	-0,03	0,61*	0,75*	0,90*	0,63*	-																	
H + Al	0,02	-0,58*	-0,68*	-0,89*	-0,59*	-0,98*	-																
Ca	0,04	0,46*	0,56*	0,74*	0,54*	0,68*	-0,63*	-															
Mg	0,16	0,33*	0,30*	0,61*	0,51*	0,54*	-0,60*	0,65*	-														
K	0,01	0,48*	0,30*	0,38*	0,33*	0,38*	-0,42*	0,30*	0,45*	-													
Soma bases	0,08	0,48*	0,55*	0,76*	0,58*	0,70*	-0,68*	0,98*	0,80*	0,41*	-												
CTC pH 7,0	0,11	0,26	0,28*	0,42*	0,38*	0,28*	-0,24	0,88*	0,66*	0,26	0,88*	-											
V%	0,05	0,56*	0,62*	0,88*	0,63*	0,88*	-0,90*	0,85*	0,81*	0,48*	0,91*	0,61*	-										
P Mehlich 1	0,09	-0,21	-0,26	-0,08	-0,15	-0,23	0,20	0,04	0,15	-0,02	0,07	0,22	-0,05	-									
P resina	-0,02	0,01	0,00	0,06	-0,08	-0,02	0,02	0,16	0,21	0,13	0,19	0,26	0,11	0,90*	-								
MOS	0,05	0,00	-0,13	0,12	0,11	0,02	-0,05	0,20	0,29*	0,14	0,24	0,29*	0,19	0,13	0,08	-							
S	-0,02	-0,23	-0,12	-0,22	-0,28*	-0,26	0,35*	0,00	-0,34*	-0,39*	-0,11	0,09	-0,30*	0,28*	0,25	-0,14	-						
B	0,00	0,20	0,44	0,55*	0,13	0,52*	-0,52*	0,50*	0,40*	0,28*	0,51*	0,34*	0,56*	0,20	0,33*	0,06	0,03	-					
Fe	-0,08	0,06	0,00	-0,25	-0,25	-0,21	0,19	-0,19	-0,19	0,31*	-0,19	-0,12	-0,18	0,03	0,13	-0,07	-0,07	-0,01	-				
Mn	-0,03	0,35*	0,36*	0,19	0,16	0,23	-0,23	0,19	0,19	0,60*	0,23	0,16	0,26	0,14	0,28*	-0,10	-0,05	0,21	0,57	-			
Cu	-0,02	0,02	0,07	0,05	-0,10	0,07	-0,07	0,14	0,23	0,11	0,18	0,19	0,15	0,25	0,33*	-0,02	-0,10	0,16	0,06	0,15	-		
Zn	0,00	0,16	0,05	0,36*	0,27*	0,29*	-0,33*	0,27*	0,39*	0,28*	0,33*	0,22	0,39*	0,29*	0,31*	0,32*	-0,28*	0,15	-0,06	0,13	0,27	-	

*Correlação Pearson. Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; MOS = Matéria orgânica do solo; Prod. = Produtividade.

Correlação negativa foi encontrada entre a CEa com a acidez potencial, (H+Al), em -0,58, ou seja, conforme a CEa aumenta menor é o valor de H+Al das amostras de solo do experimento, assim como a saturação por Al no complexo de trocas (CTC), a atividade de H⁺ e maiores os teores dos outros cátions básicos na solução dos solo. Os resultados obtidos por Alcântara (2010) foram semelhantes, com os atributos de acidez do solo sendo inversamente proporcionais aos teores de nutrientes disponíveis. Tais comportamentos indicam que a CEa pode ser um indicativo de parâmetros de acidez do solo, concordando com os dados obtidos por Valente (2010), que apresentou correlação negativa entre CEa e acidez trocável. O potencial de utilização dos resultados de CEa podem ser utilizados para mapeamento do potencial produtivo da cultura, relações entre propriedades físico-químicas do solo e orientação de coleta de amostras de solo (CORWIN, 2005).

Ao aumentar a profundidade de leitura do sensor Veris para 0,9 m, obtiveram-se correlações superiores para saturação por bases, soma de bases trocáveis e Ca trocável, de 0,62, 0,55 e 0,56, respectivamente (Tabela 18). Porém, valores de correlação inferiores encontrados para K trocável de 0,30, são justificados devido à maior retenção destes nutrientes aos colóides do solo nas camadas mais rasas, em solos argilosos. A correlação negativa entre CEa e H+Al foi mais acentuada, representando 0,68.

A correlação entre pH CaCl₂ e pH SMP, H+Al, Ca trocável, Mg trocável, soma de bases trocáveis e saturação por bases foi alta, com valores de r de 0,90, -0,89, 0,74, 0,61, 0,76 e 0,88, respectivamente (Tabela 18). Isto indica a grande sensibilidade do pH para estabelecer relações com os componentes da acidez do solo. O estudo de Alcântara (2010) também indicou correlações similares entre os indicadores de acidez do solo e CEa. Para todas as correlações estabelecidas, o pH CaCl₂ apresentou as maiores, quando comparadas ao pH H₂O e pH SMP, exceção para a CEa e H+Al, onde o índice SMP foi superior.

O Ca trocável apresentou correlação significativa com a $CTC_{-pH\ 7,0}$ ($r = 0,88$) e com o Mg trocável ($r = 0,66$). Ca e Mg trocáveis também se correlacionam entre si ($r = 0,65$). Entre os cátions, o K trocável apresentou as menores correlações com os atributos de solo, com valores de r de 0,45, 0,48 e 0,60 para Mg trocável, soma de bases trocáveis e Mn disponível, respectivamente. Este comportamento é justificado pela adição anual de cloreto de potássio, de maneira uniforme, diferentemente da aplicação de calcário, que é realizada a cada três ou quatro anos. A acidez potencial apresentou correlação negativa com todos os cátions e ainda maior com a saturação por bases ($r = -0,90$), indicando que a presença de cátions de caráter básico no solo implica diminuição de formas de H^+ e Al^{3+} no complexo de troca.

As correlações obtidas neste trabalho permitem realizar estimativas de atributos com a utilização de outros (co-krigagem). Esse procedimento foi aplicado por Angélico (2006), que estimou pH e Mn extraível utilizando como co-variável a matéria orgânica. No estudo de Silva (2009), foi possível estimar o Ca trocável utilizando o pH do solo. É possível também obter a estimativa da necessidade de calcário pelos métodos de saturação por bases (Método de Saturação por Bases, RAIJ, 1991) e pH SMP (Método da Solução-Tampão SMP, TEDESCO et al., 1995).

O ânion SO_4^{2-} na solução do solo é controlado pelo regime hídrico, atividade microbiana, absorção pelas plantas e adição de fertilizantes (ALVAREZ et al., 2007). Quanto maior a acidez potencial ($H+Al$), maior a correlação com o S no solo sendo, no presente estudo, de 0,35. Os cátions Mg e K trocáveis apresentaram correlação negativa com S ($r = -0,34$ e $-0,39$, respectivamente). Para o íon Ca^{2+} , a correlação foi nula, pois esse elemento é o preferido na ligação com o ânion SO_4^{2-} .

Para os dois métodos de extração de P, P Mehlich 1 e P resina, as correlações obtidas foram consideradas baixas, próximas do limite inferior de significância ($r = 0,27$). Para o primeiro método, encontrou-se correlação de 0,28 com S e 0,29 com o Zn. - Para o segundo método, repetiu-se a correlação com Zn (0,31), sinalizando que foi mínimo o antagonismo entre P e Zn no solo. Foi possível encontrar correlação significativa do P resina para os micronutrientes B, Mn e Cu, com r de 0,33, 0,28 e 0,33, respectivamente. A

disponibilidade dos micronutrientes é fortemente relacionada ao pH do solo (SOUSA et al., 2007), onde Fe, Mn, Cu e Zn disponíveis diminuem sua disponibilidade com a sua elevação, tendo, como faixa adequada, o pH do solo de 5,0 a 6,5. Para a matéria orgânica, foi identificada correlação significativa, porém com a $CTC_{-pH7,0}$ e Mg trocável ($r = 0,29$). Para os demais macronutrientes, não houve correlação com a matéria orgânica do solo.

Entre os micronutrientes, o B extraível apresentou coeficientes de correlação de 0,55 com pH $CaCl_2$ e de 0,56 para saturação por bases, comportamento justificado pela faixa de pH de maior disponibilidade desse nutriente, entre 5,0 a 7,0 (ABREU et al., 2007). O B se correlacionou com matéria orgânica ($r = 0,33$), que disponibiliza o nutriente ao solo através da sua decomposição. O único micronutriente que se correlacionou com a CEa na camada de 0 – 0,3 m (sensor Veris), foi o Mn. O fato está relacionado, possivelmente, à presença na solução do íon Mn^{2+} na solução do solo. O Zn se correlacionou com todos os macronutrientes, indicando que a sua absorção é concomitante à absorção dos demais nutrientes.

A absorção de nutrientes pode ser limitada tanto pelo menor crescimento do sistema radicular como também pela redução da atividade radicular causada por fatores físicos e químicos do solo (CARVALHO et al., 2001). Para a textura do solo, argila, silte e areia, devido à baixa variação espacial, as correlações não foram expostas neste trabalho. Valente (2010) também não encontrou correlação significativa entre CEa e argila.

4.7.2 Correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 70 DAE, na safra 2010/11.

Dampney & Moore (1999) estudaram o histórico das culturas para caracterizar a variabilidade espacial do solo. Nas Tabelas 19 e 20, estão apresentados os coeficientes de correlação entre os atributos de solo e os atributos de planta aos 70 DAE (safra 2010/11). Os teores foliares de alguns nutrientes mostraram-se abaixo do nível adequado, devido à grande demanda da planta no crescimento vegetativo e no desenvolvimento das estruturas reprodutivas nessa fase. O N foliar se correlacionou ($p < 0,01$) com os atributos de solo CEa 0 – 0,3 m e com pH H_2O , com valores do coeficiente de Pearson

(r) de 0,36 e 0,29, respectivamente. No entanto, as maiores correlações foram encontradas entre os atributos de planta (Tabela 20).

TABELA 17. Coeficientes de correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 70 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.

Atributos de solo	Atributos de planta												SPAD	IAF
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Altura plantas		
CEa (0-0,3m)	0,36*	0,35*	0,55*	-0,16	-0,07	0,51*	-0,03	-0,50*	0,13	-0,04	-0,50*	0,59*	0,39*	0,56*
CEa (0-0,9m)	0,08	0,34*	0,55*	0,05	-0,10	0,73*	-0,02	-0,18	0,08	-0,20	-0,38*	0,51*	0,21	0,40*
pH CaCl ₂	-0,17	0,05	0,42*	0,15	-0,06	0,45*	0,23	-0,17	0,05	-0,19	0,08	0,19	-0,09	0,16
pH H ₂ O	0,29*	0,11	0,27*	-0,24	0,09	0,41*	0,05	-0,61*	-0,13	-0,07	-0,19	0,27*	0,07	0,26
pH SMP	-0,02	0,28*	0,50*	0,12	0,00	0,57*	0,13	-0,26	0,17	-0,13	-0,22	0,39*	0,14	0,36*
Ca	0,01	0,12	0,34	0,09	0,00	0,48*	0,09	-0,16	0,00	-0,24	0,02	0,16	-0,09	0,07
Mg	0,14	0,05	0,28*	-0,13	0,10	0,04	0,07	-0,25	0,08	-0,06	-0,04	0,19	0,09	0,30*
K	0,23	0,10	0,49*	-0,07	-0,17	0,16	0,12	-0,19	0,11	0,03	-0,13	0,46*	0,27*	0,54*
Soma bases	0,06	0,11	0,37*	0,04	0,02	0,40*	0,09	-0,20	0,02	-0,21	0,00	0,20	-0,03	0,16
Saturação bases	0,05	0,19	0,45*	0,03	0,01	0,40	0,13	-0,27*	0,12	-0,16	-0,13	0,36*	0,10	0,33*
CTC _{pH 7,0}	0,09	0,00	0,17	0,00	0,04	0,24	0,03	-0,09	-0,09	-0,20	0,14	-0,01	-0,15	-0,05
H + Al	0,03	-0,24	-0,48*	-0,08	0,02	-0,45*	-0,14	0,27*	-0,18	0,10	0,22	-0,43*	-0,17	-0,41*
P Mehlich-1	-0,02	-0,17	-0,13	-0,05	0,07	-0,15	0,00	0,03	-0,08	0,04	0,13	-0,12	-0,14	-0,15
P resina	-0,02	0,00	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	-0,05	-0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,02
Matéria orgânica	0,04	-0,25	-0,07	-0,28*	0,10	-0,20	-0,10	-0,29*	-0,07	0,16	0,06	0,06	-0,04	-0,06
S	-0,03	0,09	-0,08	0,23	0,05	0,22	-0,10	0,29*	0,10	0,03	0,04	-0,33*	-0,20	-0,43*
B	-0,12	0,20	0,22	0,27*	0,08	0,34*	0,04	0,17	0,14	-0,18	0,00	0,15	-0,03	0,10
Fe	0,21	0,08	0,12	0,10	-0,12	-0,04	0,06	0,08	0,04	-0,06	-0,13	0,13	0,23	0,29*
Mn	0,22	0,24	0,44*	0,06	-0,15	0,21	0,06	-0,08	0,09	-0,01	-0,16	0,34*	0,24	0,47*
Cu	-0,05	0,15	0,12	0,14	0,13	-0,05	-0,01	0,18	0,11	0,10	0,05	0,11	0,17	0,22
Zn	0,04	-0,09	0,08	-0,12	0,15	-0,07	0,08	-0,33	0,01	0,03	0,00	0,15	0,05	0,21

*Correlação Pearson. Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; SPAD = índice de clorofila; IAF = índice de área foliar

TABELA 18. Coeficiente de correlação entre os atributos de planta entre si e com a produtividade, aos 70 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.

	Prod.	SPAD	IAF	Altura plantas	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Produtividade	-														
SPAD	-0,30*	-													
IAF	-0,23	0,81*	-												
Altura plantas	-0,14	0,58*	0,69*	-											
N	-0,02	0,44*	0,42*	0,28*	-										
P	-0,25	0,48*	0,46*	0,34*	0,46*	-									
K	-0,20	0,41*	0,54*	0,41*	0,16	0,52*	-								
Ca	-0,09	-0,15	-0,18	-0,14	-0,19	0,42*	0,26	-							
Mg	-0,08	0,01	-0,07	-0,10	0,10	0,31*	0,10	0,27*	-						
S	-0,18	-0,10	0,01	0,19	0,15	0,42*	0,43*	0,36*	0,04	-					
Fe	-0,06	-0,16	0,01	-0,11	-0,08	0,05	0,16	0,41*	0,15	-0,02	-				
Mn	-0,01	-0,21	-0,35*	-0,29*	-0,43*	0,04	-0,14	0,48*	-0,05	-0,05	0,07	-			
Cu	-0,12	0,48*	0,34*	0,17	0,33*	0,59*	0,43*	0,34*	0,22	0,22	0,08	0,08	-		
Zn	-0,19	0,30*	0,20	0,08	0,17	0,30*	0,24	0,17	0,30*	0,30*	-0,03	-0,07	0,47*	-	
B	0,16	-0,46*	-0,47*	-0,49*	-0,49*	-0,41*	-0,21	0,29*	0,02	0,02	0,48*	0,31*	-0,26	-0,11	-

*Correlação Pearson. Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; Prod. = Produtividade; SPAD = índice de clorofila; IAF = índice de área foliar.

Segundo Brandão et al. (2009), a estimativa dos teores de N pelo clorofilômetro pode ser feita entre os 40 e 90 DAE, possibilitando a intervenção com adubação nitrogenada ainda na fase de desenvolvimento das plantas. Neste trabalho (Tabela 20), encontrou-se, aos 70 DAE, um coeficiente de correlação (r) entre N foliar e índice de clorofila, de 0,44. O comportamento do IAF em relação ao teor de N na folha foi semelhante ao índice de clorofila ($r = 0,42$). Outro fator relacionado ao teor de N na planta é o teor de P, cujo coeficiente foi de 0,48, evidenciando o efeito sinérgico que a adição de N ao solo promove na absorção de P (CANTARELA, 2007).

Entre os atributos das análises não destrutivas, obteve-se alta correlação entre índice de clorofila e IAF ($r = 0,81$). A altura das plantas aos 70 DAE variou juntamente com o índice de vegetação ($r = 0,58$). No caso do K foliar, houve correlação ($r = 0,41$) com o índice de vegetação, não havendo correlação entre os teores de N e K foliares, apesar da conhecida relação da similaridade quantitativa de absorção entre os mesmos.

O índice de área foliar (IAF) apresentou correlação com o índice de clorofila, havendo também correlação com altura ($r = 0,69$) e K no tecido ($r = 0,54$). Para altura de plantas, houve correlação positiva com os demais atributos estudados, com exceção ao B foliar, cuja correlação foi negativa, com $r = -0,49$.

Na avaliação aos 70 DAE, o P apresentou correlação positiva com todos os demais macronutrientes, indicando que os teores foliares estão com certo equilíbrio. Destaque para a correlação com K, cujo r foi de 0,52. Entre os micronutrientes analisados nas folhas, houve correlação do P com Cu, Zn e B, com valores de r de 0,59, 0,30 e -0,41, respectivamente (Tabela 20).

Os teores de Ca e Mg foliares (Tabela 20) se correlacionaram de forma significativa, porém baixa ($r = 0,27$). O Ca ainda se correlacionou com P, S, Fe, Mn, Cu e B, sendo que a maior delas foi com o Mn ($r = 0,48$). Parece não haver relação entre os teores foliares de Mg com outros nutrientes, além de Ca e P já citados, havendo, uma correlação baixa, porém significativa ($r = 0,30$) com o Zn. Para o S, foram encontradas correlações positivas, com r de 0,42, 0,43 e 0,36, com P, K e Ca, respectivamente.

Os teores de Mn e B nas folhas resultaram em correlação negativa com o N ($r = -0,43$ e $-0,49$, respectivamente). Enquanto outras relações entre nutrientes são antagônicas, Mn-N, Mn-Cu, Na-Cu, Zn-B (MALAVOLTA, 1980), o Cu foliar se correlacionou com o N ($r = 0,33$). Em relação ao índice de clorofila, a correlação com micronutrientes ocorreu com Cu, B e Zn ($r = 0,48$, $-0,46$ e $0,30$, respectivamente). Os dados de IAF se correlacionaram negativamente com Mn e B (r de $-0,35$ e de $-0,47$, respectivamente) e de forma positiva com Cu ($r = 0,34$).

As maiores correlações entre os micronutrientes foram entre B e Fe ($r = 0,48$) e Cu e Zn ($r = 0,47$). Tratando-se do B foliar, houve correlação negativa com os todos os macronutrientes, com exceção ao Ca. Este comportamento pode ser explicado pela baixa mobilidade desse nutriente (B) nas folhas, enquanto que os demais nutrientes podem ser realocados das folhas mais velhas para as mais novas (SILVA,1997; ROSOLEM, 2001).

4.7.3 Correlações entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 110 DAE, safra 2010/11

Observando as correlações entre os atributos de solo e os atributos de planta aos 110 DAE (Tabela 21), não foi possível estabelecer nenhuma correlação para os teores foliares de N, Mg, Fe e Cu e índice de clorofila. O P foliar nessa ocasião apresentou correlação com CEa 0 – 0,3 m, CEa 0 – 0,9 m, pH SMP, H+Al e Cu, cujos valores de “r” foram de 0,39, 0,45, 0,30, $-0,31$ e 0,27, respectivamente. Este comportamento foi semelhante ao encontrado na amostragem aos 70 DAE.

TABELA 19. Coeficientes de correlação entre os atributos químicos e físicos do solo e atributos de planta, aos 110 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO

Atributos de solo	Atributos de planta											Altura plantas	SPAD	IAF
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B			
CEa (0-0,3m)	-0,07	0,39*	0,11	0,28*	0,03	0,65*	0,17	-0,54*	0,12	0,25	-0,13	0,62*	-0,06	0,46*
CEa (0-0,9m)	-0,13	0,45*	0,35*	0,42*	-0,03	0,74*	0,19	-0,48*	0,13	0,29*	0,01	0,52*	-0,08	0,29*
pH CaCl ₂	-0,17	0,12	0,30*	0,16	-0,14	0,43*	0,23	-0,37*	-0,06	0,08	0,03	0,28*	-0,21	0,15
pH H ₂ O	-0,10	0,24	0,08	0,18	0,15	0,47*	0,25	-0,31*	0,23	0,25	0,02	0,42*	-0,19	0,25
pH SMP	-0,17	0,30*	0,38*	0,26	-0,04	0,62*	0,25	-0,51*	0,02	0,17	0,05	0,45*	-0,16	0,35*
Ca	-0,02	0,06	0,04	0,25	-0,11	0,49*	0,17	-0,20	0,07	0,02	0,11	0,28*	-0,03	0,09
Mg	-0,09	0,22	0,00	-0,05	0,02	0,17	0,15	-0,33*	0,08	0,16	0,14	0,40*	-0,22	0,15
K	-0,07	0,21	0,06	-0,05	-0,10	0,08	0,16	-0,25	0,04	0,19	0,03	0,50*	-0,01	0,24
Soma bases	-0,04	0,11	0,03	0,18	-0,09	0,44*	0,18	-0,26	0,08	0,06	0,13	0,35*	-0,08	0,12
Saturação bases	-0,13	0,22	0,17	0,14	-0,04	0,45*	0,21	-0,44*	0,02	0,13	0,07	0,17	0,00	-0,07
CTC _{pH 7,0}	0,07	-0,05	-0,19	0,11	-0,09	0,24	0,11	0,01	0,11	-0,03	0,14	0,45*	-0,15	0,27*
H + Al ³⁺	0,19	-0,31*	-0,36*	-0,20	0,03	-0,52*	-0,21	0,53*	0,01	-0,18	-0,03	-0,46*	0,17	-0,36*
P Mehlich-1	0,07	-0,05	-0,23	0,03	-0,03	-0,21	0,02	0,24	0,09	0,17	0,16	-0,05	0,01	-0,22
P resina	0,05	0,03	-0,18	0,10	-0,06	-0,02	0,08	0,11	0,05	0,15	0,13	0,06	0,00	-0,11
Matéria orgânica	0,10	0,01	-0,17	-0,06	0,13	-0,19	0,05	0,07	0,01	0,02	0,13	0,03	-0,05	0,01
S	0,18	-0,21	-0,10	0,17	0,00	0,03	-0,15	0,23	0,01	-0,21	0,06	-0,23	0,13	-0,21
B	-0,11	0,16	0,20	0,28*	-0,01	0,26	0,13	-0,13	-0,01	0,09	0,32*	0,16	-0,08	0,01
Fe	0,01	-0,12	-0,25	-0,11	-0,10	-0,23	0,02	0,16	-0,10	-0,04	-0,07	0,00	0,11	0,11
Mn	0,07	0,05	-0,07	0,04	-0,05	0,01	0,21	-0,02	0,09	0,20	-0,01	0,23	0,09	0,29*
Cu	0,03	0,27*	0,08	0,07	-0,07	0,01	0,07	-0,10	0,06	0,17	0,12	0,20	-0,03	0,18
Zn	0,06	0,14	-0,03	0,02	-0,02	0,04	0,11	-0,11	0,05	0,11	0,17	0,25	-0,11	0,16

*Correlação Pearson. Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; SPAD = índice de clorofila; IAF = Índice de área foliar.

Já o K foliar mostrou menores correlações aos 110 DAE quando comparado aos 70 DAE. Esta situação pode ser justificada pela correlação entre K e CEa 0 – 0,9 m, que diminuiu de 0,55 para 0,35. Segundo Rosolem & Witacker (2007), os teores de K nas folhas podem diminuir ou serem translocados com o desenvolvimento da planta. O Ca presente nas folhas aos 110 DAE apresentou correlação com a CEa 0–0,3m (0,28) e CEa 0–0,9m (0,42), ao contrário do que foi obtido aos 70 DAE, quando não foi constatada nenhuma correlação entre esses atributos.

Entre os nutrientes foliares, o S, determinado aos 110 DAE, apresentou melhor correlação com os demais atributos de solo, repetindo o comportamento ocorrido aos 70 DAE (Tabela 19). A importância do equilíbrio entre as concentrações de N e S no solo e na planta é refletido no crescimento e estado nutricional das plantas (ALVAREZ et al., 2007). Correlações de S ocorreram com CEa 0-0,3 e CEa 0-0,9, cujos coeficientes foram de 0,65 e 0,74, respectivamente. A correlação também ocorreu para todos os atributos de acidez no solo (Tabela 21). Isso permite dizer que amostras de folhas possuem grande sensibilidade para detecção da variação espacial de S podendo ser associada à atributos de solo.

Para os micronutrientes extraídos nas folhas do algodoeiro, o Mn se correlacionou de forma negativa com todos os atributos relacionados ao pH do solo e ao índice SMP, apresentando coeficiente de correlação de -0,51, e, a CEa 0-0,3m com -0,54. Tal comportamento confirma que em condições de pH do solo alto, menores são os teores de Mn nas folhas, devido à menor disponibilidade do mesmo no solo.

Via de regra, não houve correlação entre os nutrientes do solo e os teores foliares de cada nutriente, aos 110 DAE. Somente o B apresentou correlação ($r = 0,32$) entre os teores no solo e na folha.

Ao tratar das análises não destrutivas, como altura de plantas e IAF aos 110 DAE, podem ser visualizadas algumas correlações com os atributos de solo, amostrados antes da semeadura. Referente à altura de plantas, a correlação foi positiva e ocorreu para todos os atributos relacionados ao pH do solo. A altura de plantas foi maior onde foram maiores os atributos CEa 0-0,3m,

CEa 0-0,9m, pH SMP e K trocável (0,62, 0,52, 0,45 e 0,50, respectivamente). No caso do IAF, pode-se verificar comportamento semelhante à CEa 0-0,3m, CEa 0-0,9m e pH SMP, (com valores de r de 0,46, 0,29 e 0,35, respectivamente). Tudo indica que o crescimento de plantas de algodão, representado aqui pela altura de plantas e IAF, são influenciadas positivamente por condições de pH adequado à cultura, entre 5,5 e 7,0.

Aos 110 DAE (Tabela 22), houve uma maior correlação entre o teor de N na folha e o índice de clorofila ($r = 0,54$), superior ao obtido na avaliação feita aos 70 DAE (Tabela 20). Em estudos de Brandão et. al. (2009), as leituras obtidas com o clorofilômetro SPAD-502 possibilitaram a obtenção de modelos matemáticos para a predição do teor de N nas folhas, com elevado grau de precisão, economia de recursos e tempo de processamento de amostras. A utilização do clorofilômetro é uma prática que pode auxiliar na nutrição com nitrogênio no algodoeiro. Entretanto, variações devido ao uso de regulador de crescimento, cultivar e locais de cultivos devem ser considerados na interpretação das curvas elaboradas com esse índice (SILVA et al., 2011). A análise de características ópticas das folhas pode ser relacionada com o teor de N na cultura, pois a reflectância na região do visível possui variação conforme a concentração do teor de clorofila no tecido foliar.

Estudando a correlação entre os atributos de plantas aos 110 DAE (Tabela 22), o coeficiente de correlação obtido entre altura de plantas e IAF foi de 0,56. A altura de plantas pode ser correlacionada também com P ($r = 0,48$) e S ($r = 0,47$).

O P foliar apresentou correlação positiva com grande parte dos demais nutrientes nas folhas (Tabela 22), sendo correlacionado com o K ($r = 0,50$), Ca ($r = 0,40$) e S ($r = 0,42$) entre os macronutrientes, negativa com Mn ($r = -0,46$) e positiva com Cu ($r = 0,42$), Zn ($r = 0,65$) e B (0,35), reforçando os dados obtidos aos 70 DAE da mesma safra. Tem sido publicado que na interação entre P e Zn, o P pode aumentar a absorção de Zn (ARAÚJO e MACHADO, 2006). Para efeitos deste estudo, o P foliar pode fornecer informações sobre os teores de outros nutrientes nas folhas de algodão com os quais se correlacionou, positiva ou negativamente.

TABELA 20. Coeficiente de correlação entre os atributos de planta entre si e com a produtividade aos 110 DAE, safra 2010/11, Cristalina-GO.

	Prod.	SPAD	IAF	Altura plantas	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Produtividade	-														
SPAD	-0,15	-													
IAF	-0,20	0,13	-												
Altura plantas	-0,07	-0,05	0,56*	-											
N	-0,06	0,54*	0,21	-0,04	-										
P	-0,14	-0,15	0,28*	0,48*	-0,02	-									
K	0,14	-0,22	0,09	0,12	-0,19	0,50*	-								
Ca	-0,24	-0,03	-0,06	0,14	0,12	0,40*	0,11	-							
Mg	-0,07	-0,12	0,17	0,08	0,17	0,24	-0,13	0,31*	-						
S	-0,16	-0,12	0,24	0,47*	-0,06	0,42*	0,32*	0,56*	-0,01	-					
Fe	-0,02	-0,02	0,07	0,04	0,14	0,26	0,24	0,19	0,12	0,27*	-				
Mn	0,06	0,18	-0,49*	-0,59*	0,17	-0,46*	-0,35*	0,08	-0,07	-0,43*	0,03	-			
Cu	0,02	0,03	0,06	0,20	0,33*	0,42*	0,23	0,41*	0,16	0,27*	0,38*	0,22	-		
Zn	0,00	-0,09	0,13	0,29*	-0,07	0,65*	0,28*	0,41*	0,22	0,20	0,30*	-0,07	0,53*	-	
B	-0,07	-0,01	-0,11	0,03	0,19	0,35*	0,21	0,41*	0,37*	0,08	0,39*	0,19	0,46*	0,29*	-

*Correlação Pearson. Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; Prod. = produtividade; SPAD = Índice de clorofila; IAF = Índice de área foliar.

Os teores dos cátions K, Ca e Mg nas folhas aos 110 DAE, demonstraram relação com alguns outros nutrientes. Para o K, foi possível correlacionar com os teores de S ($r = 0,32$), Mn ($r = 0,35$) e Zn ($r = 0,28$). Já o Ca foliar obteve maiores coeficientes de correlação, com $r = 0,31$ para o Mg, $r = 0,56$ para S e $r = 0,41$ para Cu, Zn e B. Porém o elemento Mg e Ca na folha, somente foram correlacionados com B ($r = 0,37$).

Entre as correlações significativas com os micronutrientes das folhas, as maiores foram obtidas entre Cu vs Zn e Cu vs B, com $r = 0,53$ e $0,46$, respectivamente.

A variabilidade encontrada entre os diversos atributos de solo e de planta permite criar zonas homogêneas. É um indicativo de que outros fatores estão interagindo, condicionando a absorção de nutrientes de maneira diferenciada dentro da área experimental, e de que a utilização da média aritmética não representaria adequadamente o estado nutricional da planta (VIEIRA et al., 2010).

Em decorrência dos dados apresentados, pode-se afirmar que o sensoriamento remoto pode ser utilizado como base para determinação de zonas homogêneas, uma vez que o IAF obtido através de imagens de satélite pode ser relacionado em associação a outros atributos de solo e da cultura do algodão. Da mesma forma, verificou-se que a utilização do sensor Veris para medir a CEa foi eficiente para definir zonas com comportamento similar, as quais podem ser corrigidas, ou, quando isto não for possível, considerações sobre suas limitações devem ser levadas em conta na tomada de decisões de manejo.

4.7.4 Correlações entre atributos de planta aos 108 DAE, safra 2011/12

Aos 108 DAE da safra 2011/12, as análises foliares realizadas representam as diferentes faixas de P_2O_5 adicionadas ao solo antes do plantio. O índice de vegetação se correlacionou com N foliar ($r = 0,49$). Os teores de N, juntamente com os de P, apresentaram as maiores correlações com outros nutrientes (Tabela 23). A altura de plantas pode ser correlacionada com N ($r =$

0,37) e P ($r = 0,61$), indicando que plantas mais altas tendem a ter maior concentração de P na folha. Houve também correlação de altura de plantas, que foi positiva para Ca, S, B, Cu e Fe ($r = 0,29, 0,35, 0,37, 0,36, 0,33$), respectivamente e negativa para Mn ($r = -0,49$), possivelmente associadas ao pH do solo (Tabela 23).

O efeito da adição de P ao solo pode ser verificado pelas análises foliares, onde a coeficiente de correlação de N com P foi de 0,67, evidenciando que onde as doses de P foram maiores, também foi maior o teor de N na folha. O N e o P interagem de forma sinérgica, promovendo aumentos na produção vegetal (ARAÚJO & MACHADO, 2006). Segundo Cantarella (2007), a adição de fertilizantes nitrogenados aumenta a absorção de P.

O coeficiente de correlação entre N e S nas folhas foi de 0,50. A relação positiva desses nutrientes é importante, pois o S é constituinte de aminoácidos (CANTARELLA, 2007). A importância do equilíbrio entre as concentrações de N e S no solo e na planta é refletida no crescimento e no estado nutricional do vegetal (ALVAREZ et al., 2007).

Cantarella (2007) aponta que, devido à grande quantidade de N absorvido pelas plantas, a alteração do pH da rizosfera pode afetar a disponibilidade de micronutrientes. As correlações (valores de r) entre os teores foliares de N e micronutrientes aos 108 DAE ocorreram para B (0,45), Cu (0,66), Fe (0,52) e Zn (0,28) (Tabela 23). A alta correlação entre N e Cu deve ter sido determinada pelo aumento da disponibilidade de P. Mesmo assim, os teores foliares de Cu ficaram abaixo do nível considerado adequado para o algodão, diferentemente de Souza et al. (2008), principalmente de Cu e Mn em algodão no estado de Goiás.

Ca e Mg no tecido do algodão apresentaram correlação positiva com N aos 108 DAE da safra 2011/12, com valores de r de 0,52 e 0,40, respectivamente. Esses resultados estão em contraponto aos obtidos na safra 2010/11, onde essa correlação foi observada.

O P apresentou coeficiente de correlação de 0,69 com o S, aos 108 DAE. A adição conjunta de P e de S apresenta elevada resposta positiva no desenvolvimento das culturas (ALVAREZ et al., 2007). Foi possível também

correlacionar os cátions Ca, Mg e K significativamente com P ($r = 0,52, 0,34$ e $0,27$, respectivamente).

O estudo das relações entre os teores de nutrientes nos tecidos das plantas pode ser utilizado para estabelecer relações de equilíbrio nutricional no algodoeiro. A utilização de ferramentas de diagnose e recomendação (DRIS) é uma alternativa que possibilita o diagnóstico nutricional dos teores de cada nutriente em relação aos demais. (SOUZA, 2008; SERRA et al., 2010).

TABELA 21. Coeficiente de correlação entre os atributos de planta entre si e com a produtividade aos 108 DAE, safra 2011/12, Cristalina-GO.

	SPAD	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Altura plantas	Produtividade
SPAD	-													
N	0,49*	-												
P	0,12	0,67*	-											
K	-0,19	0,07	0,27*	-										
Ca	0,23	0,52*	0,52*	-0,35*	-									
Mg	0,24	0,40*	0,34*	-0,03	0,45*	-								
S	0,00	0,50*	0,69*	0,34*	0,35*	0,19	-							
B	-0,03	0,45*	0,54*	0,07	0,23	0,12	0,27*	-						
Cu	0,13	0,66*	0,73*	0,03	0,60*	0,26	0,52*	0,47*	-					
Fe	0,10	0,52*	0,60*	0,03	0,37*	0,27*	0,44*	0,43*	0,49*	-				
Mn	0,08	0,03	-0,15	0,26	-0,14	0,04	-0,10	-0,15	-0,02	-0,02	-			
Zn	-0,03	0,28*	0,32*	0,58*	-0,12	0,02	0,38*	0,09	0,17	0,18	0,21	-		
Altura plantas	0,11	0,37*	0,61*	-0,03	0,39*	0,06	0,35*	0,37*	0,36*	0,33*	-0,49*	-0,01	-	
Produtividade	0,27*	-0,09	-0,30*	-0,22	-0,14	-0,13	-0,46*	-0,14	-0,19	-0,15	0,14	0,06	-0,14	-

*Correlação Pearson. Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; SPAD = Índice de clorofila.

A disponibilidade de P no solo em níveis maiores ou menores provocou uma alta correlação entre os níveis foliares de P e os de micronutrientes. A correlação entre P e Cu ($r = 0,73$) foi a mais alta nesta safra em relação à safra anterior. Para os demais, os coeficientes maiores foram de 0,60 para Fe, 0,54 para B e 0,32 para Zn.

Dentre os macronutrientes, o K e Mg apresentam baixas correlações com outros nutrientes. Esses cátions apresentaram correlação com Ca com $r = 0,35$ e 0,45, respectivamente, o que, para efeitos deste trabalho, não houve competição com os demais cátions na membrana plasmática das células da raiz da planta, razão pela qual não houve correlação entre Mg e Zn, caracterizando, inibição competitiva, que ocorre quando dois elementos competem pelo mesmo sítio, diminuindo a absorção do nutriente que está em menor concentração (MALAVOLTA, 1997) Em relação ao conteúdo de S no tecido foliar de algodão, ocorreu correlação com quase todos os nutrientes, com exceção ao Mg e ao Mn.

Alguns micronutrientes, por sua vez, correlacionaram-se entre si: o Fe apresentou correlação com B ($r = 0,43$) e Cu ($r = 0,49$); O Cu, apresentou correlação com B ($r = 0,47$). Contudo, não foi possível encontrar nenhuma correlação de Mn e Zn com os demais nutrientes nas folhas de algodão, aos 108 DAE.

4.8 Correlações entre produtividade e atributos de solo e de planta

Para Corwin et al. (2003), a variabilidade da produtividade do algodoeiro pode ser explicada pela CEa do solo. Já para Guedes Filho (2009), as relações espaciais entre as produtividades das culturas e os atributos físicos e químicos do solo indicam que a área de lavoura pode ser dividida em zonas de manejo. No presente trabalho, na safra 2010/11, a produtividade do algodão obtida utilizando sensor na colheita não apresentou correlação ($p < 0,01$) com os atributos químicos e físicos do solo (Tabela 23).

A inexistência de correlação entre a produtividade do algodão com os atributos químicos do solo pode estar relacionada à influência de outros fatores

que afetam a produção, como a população de plantas, ocorrência de pragas, doenças e ervas daninhas. Assim, no estudo de Smith et al. (1998), também não foi encontrada correlação entre a produtividade do algodão e parâmetros químicos do solo onde, possivelmente, áreas de baixa fertilidade poderiam estar associadas a áreas de boa produtividade, devido à ocorrência de outros fatores favoráveis ao ambiente de produção.

Montezano et al. (2006) não encontraram correlação entre a produtividade do milho e o P, S, K, Ca e Mg disponíveis no solo. No campo, a resposta dos atributos da fertilidade do solo com a produtividade da cultura tem sido normalmente baixa, uma vez que não tem sido possível isolar todos os fatores envolvidos, principalmente quando foram realizadas historicamente várias adubações. A amostragem de atributos químicos e físicos do solo baseada em zonas de manejo, definidas a partir do histórico dos mapas de produtividade, permite, muitas vezes, explicar a maior parte da variabilidade total da área e suas relações com o rendimento relativo das culturas (SANTI, 2007).

A utilização de sensores que estimam os índices de vegetação, por exemplo o NDVI, durante o ciclo da cultura pode explicar cerca de 70% da variabilidade da produtividade do algodão em áreas heterogêneas (GUO, 2005). Ao contrário dos cereais, o algodão possui crescimento indeterminado, onde ocorrem simultaneamente o ciclo vegetativo e o reprodutivo. Com isso, prever o rendimento do algodão, utilizando dados de sensoriamento remoto é um desafio, pois obter um IAF superior em determinados locais da área não resulta necessariamente em maior produtividade da cultura.

Entre todos os atributos de plantas, destrutivos ou não, analisados neste estudo, a única correlação obtida foi com o índice de clorofila (-0,30), aos 70 DAE, demonstrando que, na safra 2010/11, a produtividade não pouco influenciada pelos atributos estudados. Assim como no estudo de Brandão et al. (2009), o índice SPAD apresentou elevada correlação com os teores foliares de N e com a produtividade, com o coeficiente de correlação variando entre 0,92 e 0,99. Nesse mesmo trabalho, a correlação entre o índice SPAD e a produtividade variou, com os valores de r entre 0,88 a 0,98. Correlações tão altas foram justificadas pela adição de diferentes doses de N. As plantas de algodão com teores foliares de N entre 37 e 45 g kg⁻¹ foram bem nutridas com

esse nutriente para atingir produtividades de até 5.000 kg ha⁻¹ de algodão em caroço (CARVALHO et al., 2008).

A associação de vários mapas de produtividade da mesma área, incluindo culturas de grãos, como soja e milho, permitirá definir zonas homogêneas com comportamento temporal sobre os fatores que estão influenciando a produtividade das culturas. A rotação soja-milheto / algodão proporciona maior produtividade do algodoeiro em plantio direto no cerrado (CORRÊA e SHARMA, 2004).

Na safra 2011/12, a colheita originou um volume de dados composta de 3.528 leituras, possibilitando correlacionar com a malha de 90 pontos amostrais (Tabela 23). A produtividade das culturas pode ser estimada pela utilização do índice de clorofila. Motomiya et al. (2012) encontraram correlação entre produtividade do algodão e índice de clorofila, com r de 0,44 e 0,82 aos 41 e 52 DAE, respectivamente. No trabalho de Sant'ana et al. (2010), a produtividade de grãos e a leitura SPAD apresentaram respostas quadráticas às doses de N adicionadas e ao teor de N nas folhas do feijoeiro. A produtividade mecânica apresentou correlação baixa com o índice de clorofila ($r = 0,27$), evidenciando que a quantidade de leituras para o índice SPAD deveria ser maior para correlacionar com os dados de produtividade dos sensores.

O monitoramento da colheita pela máquina possibilitou encontrar relação entre a produtividade, sendo negativa para os teores de P e para os de S no tecido vegetal ($r = -0,30$ e $-0,46$, respectivamente) aos 108 DAE. No estudo de Camacho et al. (2009), as produções de algodão mais elevadas foram correlacionados com teores foliares de P variando de 3 a 8 g kg⁻¹.

4.9 Produtividade do algodoeiro em relação a doses de fósforo

Os níveis de nutrientes encontrados em solos de lavouras comerciais do cerrado têm demonstrado que o P pode ser o nutriente mais limitante à produção do algodoeiro (SANTOS et al., 2005). Para culturas anuais, a aplicação de fertilizantes fosfatados a lanço e incorporados ao solo promovem sistema radicular mais volumoso. Essa forma de aplicação deve ser utilizada

para doses de P superiores a 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 em solos com baixa disponibilidade de P (SOUSA & LOBATO, 2004).

A produtividade de algodão em caroço obedeceu a uma resposta linear para as diferentes doses de P (Figura 33), atingindo o máximo de 4.729 kg ha^{-1} na dose de 300 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Resultados semelhantes foram obtidos por Camacho et al. (2009), em casa de vegetação, e Carvalho et al. (2005), no campo na região do cerrado brasileiro.

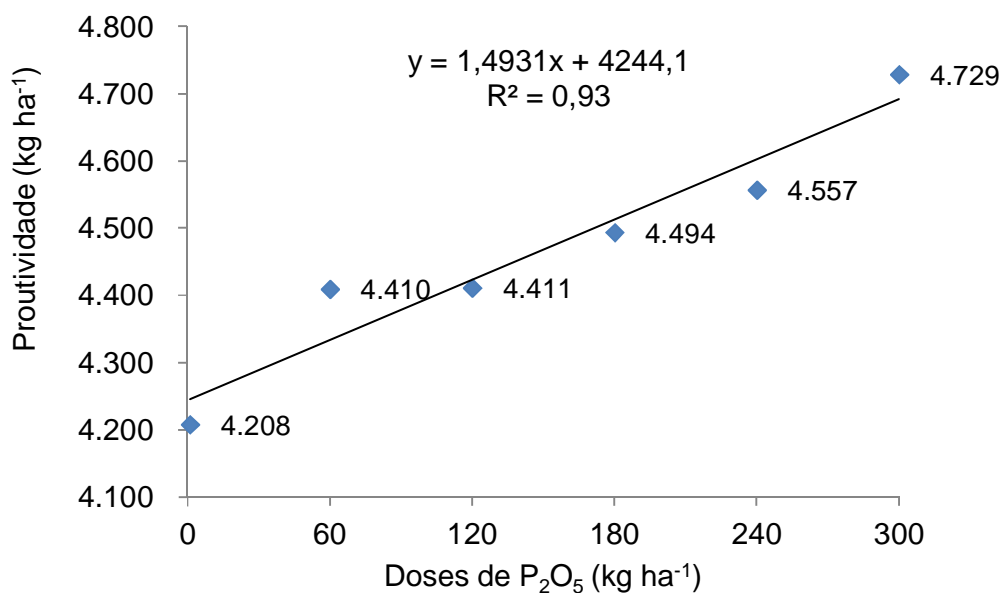


FIGURA 33 - Produtividade de algodão em caroço em função das doses de P adicionadas ao solo, safra 2011/12, Cristalina-GO.

Quanto maior a dose de P aplicada no algodoeiro, maior foi a sua produtividade (Figura 33). A produtividade do algodoeiro obedeceu a uma tendência linear com o aumento das doses de P_2O_5 , indicando que ainda se poderia atingir maiores produtividades. O nível de suficiência de P, com base no P extraído por Mehlich 1 para o solo em questão, é de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$, conforme classificação do teor de argila ($> 60 \%$) (SOUSA et al., 2004). O P extraído por Mehlich 1 (Figura 14a), anteriormente à primeira semeadura é possível identificar ao sul e no eixo central da área classes inferiores a esse nível. Na safra 2011/12, mesmo com as aplicações de diferentes doses de P_2O_5 , as regiões que apresentaram produtividade baixa (Figura 31) foram semelhantes às regiões com os menores valores de P Mehlich-1 no solo.

A média de algodão em caroço sem a adição de P_2O_5 foi de 4.208 kg ha^{-1} , indicando que, nesta condição, o solo conseguiu suprir a cultura e ainda garantir uma boa produtividade. A diferença de produtividade entre os tratamentos 0 e 300 kg ha^{-1} de P_2O_5 foi de 521 kg ha^{-1} de algodão em caroço, ou seja, incremento de 12,37%. Em condições de baixa disponibilidade de P, o algodoeiro se desenvolve muito lentamente, apresentando folhas pequenas, de cor verde-escuro, brilhantes e com eventuais manchas ferruginosas nos bordos, que evoluem para um crestamento, resultando em plantas improdutivas (CARVALHO et al., 1999).

O baixo incremento na produtividade, comparando a testemunha e a dose máxima (300 kg ha^{-1}), pode ser justificado devido à disponibilidade de água durante o ciclo da cultura (não houve restrição). O transporte de P até as raízes está relacionado ao fluxo difusivo deste nutriente, que está diretamente ligado a quantidade de água no solo. Outros estudos também não obtiveram resposta (KANEKO et al., 2011; FERRARI, et al., 2005). Apesar de grande resposta do algodoeiro com adubação fosfatada, os solos com alta disponibilidade e bem manejados não possuem incremento de produtividade (CARVALHO et al., 2007). Em solos argilosos, altas doses não possuem resposta na produtividade do algodoeiro (ZANCANARO E TESSARO, 2006).

A grande maioria dos solos argilosos do cerrado possui uma alta capacidade de fixação de íon fosfato ao solo, mesmo com a adição de quantidades elevadas de P_2O_5 na cultura do algodão. Conseqüentemente, ocorre baixa recuperação pela planta desse fósforo aplicado ao solo. O manejo localizado tendeu a apresentar produtividades homogêneas e superiores em relação a sua aplicação uniforme sobre o solo incorporado na linha de semeadura (MILANI et al., 2006). A identificação dos fatores que afetam a produtividade do algodão é o principal resultado a ser verificado, pois afetam diretamente o resultado econômico. Os fatores que afetam a disponibilidade deste nutriente no solo são as quantidades adicionadas, o tempo e o volume de contato do fertilizante com o solo, o tipo e a quantidade de minerais presentes no solo e o pH do solo (NOVAIS et al., 2007).

A adubação com P possui, neste tipo de solo, eficiência baixa, sendo somente de 2 a 20%, como observado em trabalho realizado por Pavinato (2009).

5. CONCLUSÕES

A produtividade do algodoeiro apresenta forte dependência espacial, apesar de não haver correlação com os atributos de solo, apresenta correlação com o índice de clorofila. A produtividade dessa cultura correlacionou-se negativamente com os teores foliares de fósforo e enxofre, por influencia de diferentes doses de fósforo.

Os atributos de solo apresentam moderada a forte variabilidade espacial, com destaque para pH-H₂O, boro extraível, teor de argila e condutividade elétrica. A distribuição dos dados foi aleatória para alumínio trocável, fósforo disponível (resina) e silte e não pode ser representada pela grade amostral.

Dentre os nutrientes no tecido foliar que apresentam variabilidade espacial, o nitrogênio, o enxofre, o manganês e o boro são os que possuem forte dependência espacial.

A condutividade elétrica mostrou-se uma boa ferramenta para identificar variabilidade de acidez e fertilidade no solo, pelas relações obtidas com pH-H₂O, pH CaCl₂, índice SMP, soma de bases, saturação por bases, Ca, Mg e K trocáveis e correlação negativa com H+Al e Mn extraível. Zonas de manejo de adubação e tratos culturais diferenciados podem ser utilizadas no algodoeiro utilizando esta ferramenta.

O índice de clorofila e o índice de área foliar possibilitam identificar a variabilidade, devido a forte dependência espacial encontrada, possibilitando identificar variação no estado nutricional, especialmente com nitrogênio foliar, o que evidencia o potencial dessa ferramenta no manejo da adubação nitrogenada.

O teor de fósforo nas folhas pode ser um indicador importante no estado nutricional do algodoeiro, uma vez que sua variação no solo se relaciona com o estado nutricional dos demais nutrientes na planta.

Somente os mapas de produtividade da cultura do algodoeiro não são suficientes, para isolar todos os atributos de solo e de planta que são responsáveis pela variabilidade na produtividade. Para isso, pode-se associar os mapas de CEa e os índices de vegetação de diversas culturas.

Neste trabalho, a adição de crescentes doses de P_2O_5 não proporcionou incremento de produtividade do algodoeiro, que resultem em viabilidade econômica.

Os mapas de isolinhas possibilitam visualizar a variação dos teores de nutrientes no solo, com potencial para delimitação de zonas que poderão ser tratadas como diferentes unidades de manejo. Desta forma, na área experimental pode ser dividida em três zonas distintas, ao sul e ao norte, com menor potencial, e a zona central, com maior potencial produtivo do algodoeiro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de mapas de rendimento do algodoeiro associados aos de outras culturas, temporalmente, permitem definir, com maior precisão, os atributos que explicam a variabilidade na área e as suas relações com a produtividade das culturas. Como as plantas de algodão tendem a ocupar o espaço nas linhas e entrelinhas de semeadura, a sua produtividade pode ser compensada.

A condutividade elétrica aparente (CEa) do solo, medida pelo sensor de contato, poderá ser utilizada como indicativo de acidez do solo pela correlação positiva encontrada com pH CaCl₂ e pH H₂O e correlação negativa com acidez potencial (H+Al). Possui potencial para determinação da necessidade de calagem, desde que sejam realizados trabalhos de calibração com os métodos tradicionais de determinação da necessidade de calcário. Como ocorre correlação positiva da CEa com os teores de cálcio e magnésio trocáveis, ela pode ser utilizada como indicador desses nutrientes no solo e de sua disponibilidade para o algodoeiro. Como se trata de uma determinação rápida e precisa, a CEa poderá ser utilizada como ferramenta na estimativa dessa disponibilidade, reduzindo o tempo e os gastos com amostragem e análises químicas de solo.

As relações verificadas entre os atributos de solo e os atributos de planta indicam que o algodoeiro é sensível às condições de solo para absorção de nutrientes. Assim, como os teores de nutrientes presentes nas folhas de algodão refletem as condições de sua disponibilidade no solo, para garantir uma produtividade adequada o solo deve ter sua acidez corrigida para a faixa de pH entre 6,0 a 6,5, onde a disponibilidade dos nutrientes para as plantas é maior. Nesse contexto e nas condições deste trabalho, a distribuição em taxa variável de fertilizantes e de calcário pode ser utilizada, como estratégias de manejo, visando garantir condições adequadas de disponibilidade de nutrientes e de desenvolvimento do algodoeiro.

Tendo em vista as correlações obtidas entre CEa e atributos químicos do solo, pode-se recomendar a utilização combinada CEa rasa e profunda para a estimativa dos atributos químicos de solo, como pH, H+Al, Ca, Mg e K trocáveis, para isso deve ser utilizado o semivariograma cruzado, chamado de co-krigagem.

A avaliação não destrutiva de atributos de planta pode ser promissora, se associada à avaliação dos atributos de solo. Assim, a utilização de sensores de condutividade elétrica, na pré-semeadura, associada à utilização de sensores de planta, pode auxiliar na delimitação de zonas homogêneas de manejo.

A utilidade da amostragem de solo em grade, considerada vantajosa para as condições deste trabalho (Fazenda Pamplona), dependerá de como as análises serão utilizadas. Quando o objetivo for realizar a investigação da variabilidade de macronutrientes, a grade máxima a ser utilizada é do nutriente com menor alcance obtido nos semivariogramas, neste caso o P disponível (extraído por Mehlich-1), que é de uma amostra (1) para até 1,05 ha. A variabilidade horizontal desse fósforo (disponível) tem origem principalmente na forma de aplicação, em linha de semeadura, e na adsorção do P nos argilo-minerais do solo. Afora esse nutriente, o enxofre extraível foi o de menor alcance de todos, com uma (1) amostra representando até 3,8 ha. Entre os micronutrientes, o Cu extraível apresentou o menor alcance, assim a grade máxima de amostragem seria de uma (1) amostra representando até 2,7 ha. Os atributos físicos, argila, silte e areia, por serem menos sujeitos a variações de manejo, podem ser representados em grades de amostragens superiores, em relevo plano, uma amostra representando até 8,0 ha.

Nas amostras de folhas, considerando o período até as fases vegetativa / floração, a grade de coleta indicada é de até uma (1) amostra representando até 4,8 ha. Essa amostragem visa suprir eventuais necessidades de complementação de nutrientes via adubação foliar, ou servir de base de informações para as próximas safras. Porém, nas fases de floração / enchimento de maçãs, a grade de uma amostra para cada 0,56 ha não é suficiente para representar o estado nutricional das folhas. Sendo assim, não é indicado realizar coleta de amostras em grade, uma vez que, não há tempo hábil para a adubação complementar, além de não haver adequada

representação da área, devido ao grande número de amostras a serem coletadas. Nessa fase, mesmo com as aplicações de nutrientes via foliar, a competição entre crescimento vegetativo e reprodutivo se acentua.

As análises não destrutivas foram bem representadas pela grade de 0,56 ha por amostra e a utilização do equipamento SPAD 502-Minolta®, para os dois cultivos analisados, exige pelo menos uma leitura a cada 2,5 ha. As análises de índice de área foliar podem ser utilizadas para monitoramento da cultura, possuindo potencial para estimativa de N foliar. Com a utilização do clorofilômetro, é possível comprovar que o teor de N foliar pode ser expresso pela medida do índice de clorofila nesse equipamento, simplificando o processo de identificação de sua deficiência nutricional e, ainda, com a possibilidade de realizar adubações nitrogenadas complementares.

Os teores de nutrientes nos tecidos das plantas poderão ser utilizados para estabelecer relações de equilíbrio nutricional no algodoeiro. Recomenda-se a utilização de um sistema de diagnose e recomendação (DRIS), o qual possibilitará um diagnóstico nutricional dos teores de cada nutriente em relação aos demais.

Mesmo que se tenha constatada resposta do algodoeiro à doses crescentes de adubação fosfatada, na faixa de Suficiência no solo, a prática de sua adubação não é economicamente viável, em razão da pequena magnitude de resposta e do alto custo dos fertilizantes fosfatados.

A aplicação de fertilizantes em taxa variável torna-se uma ferramenta racional de utilização de fertilizantes, visando elevar os teores de P no solo à faixa de Suficiência, aumentando as doses em regiões abaixo e diminuindo as doses em regiões acima desse nível.

A utilização de atributos de solo, associados aos atributos de planta se constituem em um importante banco de dados descritivos do histórico da lavoura, que ao serem comparados com os mapas de produtividade podem melhor delimitar as zonas com potenciais produtivos semelhantes. O tratamento diferenciado dessas zonas aumenta a eficiência dos recursos existentes para obter o maior retorno econômico por unidade produzida, que é objetivo principal da agricultura, especialmente a de precisão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A. de; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G dos. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 645-736.

ALCÂNTARA, G. R. **Variabilidade espacial de características físico-químicas e condutividade elétrica aparente do solo sob plantio direto**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2010.

ALLEN, R. et al. **SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land**, Idaho implementation: advanced training and users manual: version 1.0. Idaho: The Idaho Department of Water Resources, 2002.

ALLEN, R. A. W.; RAMSEY, R. D.; WEST, N. E. Spatiotemporal mapping of the dry season vegetation response of sagebrush steppe, *Community Ecology*. **Akadkmiat Kiadd**, Budapest, v. 5, n. 1, p. 69-79, 2004.

ALVARES, V. H. V. et al. Enxofre. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 595-644.

ALVES, M. M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011. 422 p.

AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1101-1110, 2007.

ANGELICO, J. C. Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade dos atributos de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 931-936, 2006.

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Potafos/ Anda, 2003. 1 CD-ROM.

ANTUNIASSI, U. R.; BAILO, F. H. R.; SHARP, T. C. Agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 6., 2007, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2007. Tema do evento: O algodão como oportunidade de negócios. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/cba6/palestras/1622.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2013.

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T de T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 253-280.

BAYER CROPSCIENSE. **Sementes FiberMax**. Disponível em: <<http://www.certificacaofibermax.com.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

BARBER, S. A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, Philadelphia, v. 93, p. 39-49, 1962.

BATISTA, C. H. et al. Teor de nutrientes e produtividade do algodoeiro herbáceo com a aplicação de fósforo nos cultivos de sequeiro e irrigado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, p. 182-189, 2011.

BELTRÃO, N. E. M. et al. Algodão brasileiro em relação ao mundo. In: AZEVÊDO, D. M. P., BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 1309 p. v. 1.

BERNARDI, A. C.C. et al. **Variabilidade espacial de teores de nutrientes em folhas de soja como ferramenta para agricultura de precisão**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 5 p. (Comunicado técnico, 17).

BLACKMORE, B. S.; GODWIN, R. J.; FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. **Biosystems Engineering**, London, v. 84, p. 455-466, 2003.

BLANCO-CANQUI H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An On-Farm Assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 693-701. 2008.

BRANDÃO, Z. N. et al. Detecção da necessidade de suplementação nitrogenada para o algodoeiro usando imagens do sensor AWiFS e espectrorradiometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE/SELPER, 2013.

BRANDÃO, Z. N. et al. Condutividade elétrica aparente e sua correlação com o pH em solos no cerrado de Goiás. In: INAMASU, R.; BERNARDI, A. C. C. (Ed). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. 389 p. Disponível em: <<http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/laboratorio-nacional-de-agricultura-de-precisao/livro-agricultura-de-precisao-um-novo-olhar/3.7>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2009a.

BRANDÃO, Z. N. et al. Predição da adubação nitrogenada através da utilização do índice SPAD para o algodoeiro no semiárido. **Engenharia Ambiental**, Campina Grande, v. 6, p. 368-382, 2009.

BRANDÃO, Z. N. et al. Determinação de índices de vegetação, usando imagens de satélite para agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Resumos...** Salvador: ABRAPA, ABAPA, EMBRAPA ALGODÃO, 2005.

BRANDÃO, Z. N. et al. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVEDO, D. M. P., BELTRÃO, N. E. M. (Ed.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 1309 p. v. 2.

BROUDER, S. M.; CASSMAN, K. G. Root development of two cotton cultivars in relation to potassium uptake and plant growth in vermiculite soil. **Field Crops Research**, East Lansing, v. 23, p.187-203, 1990.

BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. 301 p.

CAMACHO, M. A.; MACEDO, F. G.; SCHIAVO, J. A. Fósforo no crescimento e produção do algodoeiro em condições controladas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 7., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRAPA, 2009. p. 2178-2186.

CAMACHO, M. A.; NATALE, W.; BARBOSA, J. C. Faixa de suficiência para a cultura do algodão no Centro-Oeste do Brasil: II. Micronutrientes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 993-1000, 2012.

CAMARGO, E. C. G.. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING)**. 1997. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

CAMARGO, W. P. et al. Análise temporal da produtividade espacial de mapas de produtividade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 1., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2004.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CANTARELLA, C. A. de.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. dos. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 475-470.

CAPELLI, N. L. **Agricultura de precisão**: - novas tecnologias para o processo produtivo. Base de dados. Disponível em: <<http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>>. Acesso em: 28 ago. 2011.

CARVALHO, M. C. S. et al. Nutrição calagem e adubação. In: BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, D. M. P. (Ed.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2008. 1309 p. v. 2.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição e calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no Cerrado no Brasil**. Brasília, DF: Abrapa, 2007. p. 581-648.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B. **Calagem e adubação do algodoeiro no Cerrado**. Campina Grande: Embrapa, 2006. 16 p. (Circular técnica, 92).

CARVALHO, M. C. S.; BARBOSA, K. A.; LEANDRO, W. M. Resposta do Algodoeiro a doses e modos de aplicação de fósforo em sistemas de plantio direto e convencional no cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: ABAPA/EMBRAPA-CNPA/FUNDEAGRO /GOVERNO DA BAHIA, 2005.

CARVALHO, M. A. C. et al. Uso da adubação foliar nitrogenada e potássica no algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 60, p. 239-244, 2001.

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, O. L.; SILVA, O. R. R. F. da; MEDEIROS, J. da C. Adubação e Calagem. In: O AGRONEGÓCIO do algodão no Brasil. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. v. 2, p. 173-206.

CASTRO, C. N. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas**. 2004. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

CHERUBIM, M. R. **Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização de atributos químicos em Latossolos manejados com agricultura de precisão**. Frederico Westphalen, 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.

COELHO, A. M. Agricultura de Precisão em Sistemas Agrícolas. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. de (Ed.). **Savanas**: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2008. p. 1063-1080.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal em solos e das culturas. In: CURTI, N.; et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 249-290.

CONAB. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. 2005. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf> Acesso em: 02 ago. 2011.

CORRÊA, J. C.; SHARMA, R. D. Produtividade do algodoeiro herbáceo em plantio direto no Cerrado com rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília: v. 39, p. 41-46. 2004.

CORWIN, D. L.; LESH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agricultural. **Computers and Electronics in Agriculture**, Riverside, v. 46, p. 11-43, 2005.

CORWIN, D. L. et al. 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.

COSTA, M. M. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta para agricultura de precisão em uma área sob Cerrado**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2321-2329. 1999.

DAMPNEY, P. M. R.; MOORE, M. Precision agriculture in England: current practice and research-base advice to farmers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part. A, p. 661-673.

DANTAS, J. P. Boro. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Ed.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato/CNPq, 1991. p. 113-130.

DARNELL. P. Photointerpretation criteria for land-resources studies. In: INTERNATIONAL training course in remote sensing applications to land resources. Roma: FAO, 1990. v. 54, p. 19-26.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 91-132.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja Região Central do Brasil, 2001/2002**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 267 p. (Documentos, 167).

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja região central do Brasil 2011**. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste, 2010. 255 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistemas de Produção: **cultura do algodão no cerrado**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoCerrado/index.htm>> Acesso em: 05 nov. 2011.

EMBRAPA. **Caracterização, monitoramento e manejo da variabilidade espaço temporal em sistemas de culturas anuais**. 2009. 18 p. Projeto.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. dos. Potássio. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 551-594.

FERNANDES, M.; SOUZA, S. R. Transporte no floema. In: KERBAUY, G. B., (Ed). **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. p. 179-197.

FERRARI, J. V. et al. Aplicação de adubação fosfatada para os cultivares de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) iac 24 e delta opal na região de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Anais...** Abapa: EMBRAPA: Abrapa: Governo da Bahia, 2005. 1 CD-ROM.

FERREIRA, G. B.; CARVALHO, M. C. S. **Adubação do algodoeiro no Cerrado: com resultados de pesquisa em Goiás e Bahia**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. 71 p. (Documentos, 138).

FILHO, O. G. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, 2009.

FREIRE, E. C. História do algodão no Cerrado. In: FREIRE, E. C (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. Brasília: ABRAPA, 2008. 918 p. v. 1.

FRANÇA, G. E. et al. Análise preliminar de mapas de variabilidade da fertilidade de solo. In: BORÉM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 339-356.

FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa de algodão**. Rondonópolis, 2001. 238 p. (Boletim, 4).

FUNDAÇÃO MT. Cultivares. Disponível em: <<http://www.fundacaomt.com.br/aguarde.php?pg=Algodão%20-%20Cultivares>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, v. 4, p. 11-20, 1965.

GIBSON, P. J.; POWER, C. H. **Introductory remote sensing - digital image processing and applications**. London: Routledge, 2000. 261 p.

GODWIN, R. J.; MILLER, P. C. H. A Review of the technologies for mapping within-field variability. **Biosystems Engineering**, London, v. 84, p. 393-407, 2003.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Window, version 7**. Colorado, 1999. 1 CD-ROM.

GUEDES FILHO, O. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta**. Campinas, 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo de Campinas, 2009.

GUO, W. **Spatial and temporal variability in cotton yield in relation to soil apparent electrical conductivity, topography, and remote sensing imagery**. 2005. 176 f. Dissertation (Agronomy) - Faculty of Texas, Texas-USA, 2005.

HABOUDANE D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, Saint Paul v. 81, p. 416– 426, 2002.

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

INAMASSU, R. Y. et al. **Sistema de medida de condutividade elétrica do solo adaptado a um implemento agrícola (subsolador)**. [S.l.]: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007. (Circular técnica, 40).

IBGE. **Mapas interativos**: mapa de Biomas do Brasil. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>> Acesso em: 07 mar. 2013.

IBGE. **Mapas interativos**: mapa de solos do Brasil. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://mapasinterativos.ibge.gov.br/sigibge/>> Acesso em: 07 mar. 2013.

INPE. **Utilização de imagens de satélite**. [S.l.]: INPE/CPTEC/DAS, 2006. Disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/ndvi/info_ndvi.jsp>. Acesso em: 02 ago. 2012.

JOHN DEERE. **Operator's manual**: green star harvest doc system. Moline, Illinois: John Deere Ag Management Solutions, 2006.

JOHN DEERE. **Colhedora de algodão John Deere**: base de dados. Disponível em: <http://www.deere.com.br/pt_BR/ag/products/cottonpicker_model_1.html>. Acesso em: 02 set. 2012.

JOHNSON, R. M. et al. Variability in cotton fiber yield, fiber quality and soil properties in a Southeastern Coastal Plain. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 1305-1316, 2002.

JOHNSON, C. K.; et al. Status of soil electrical conductivity studies by central state researchers. **American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 48, p. 979-989, 2005

KAMINSKI, J. **Fatores da acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul**. 1974. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

KANEKO, F. H. et al. Resposta do algodão adensado a doses de fósforo na região dos chapadões”. CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 8.; COTTON EXPO, 1.; 2011, São Paulo. Evolução da cadeia para construção de um setor forte. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2011. p. 1676-1681. 1 CD-ROM.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 19, p. 395-401, 1995.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, Johannesburg, n. 52, p. 119-139, 1951.

LARSON, W. E., ROBERT, P. C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. Ed. **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 103–112.

LARK, R. M. et al. Analysis of yield maps in support of field investigation of soil variation. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., Odense, Dinamarca. **Proceedings...** Odense, 1999. p. 151-162.

LINCOLN, T.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. In: PLANT physiology. 3rd ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 710 p.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449 p.

LUCHIARI, A. et al. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER RESOURCE MANAGEMENT, 5., 2000, Minnesota. **Proceedings...** Minnesota: ASA/CSSA/SSSA, 2001. 10 p. 1 CD-ROM.

LUND, E. D. et al. Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go soil sensors. In: STAFFORD, J. (Ed.). **Precision agriculture'05**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005. p. 457-464.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 310 p.

MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. Londres: Academic Press, 2012. 651 p.

MARUR, C. J. Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro. In: Instituto Agrônomo do Paraná. **Recomendações para cultura do algodoeiro no Paraná**. Londrina, 1993. p. 2-7. (Circular, 107).

MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, p. 313-317, 2001.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application**. Fontainebleau: Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, 1971. v. 5.

McMICHAEL, B. L. Root-shoot relationships in cotton. In: BOX JR., J. D.; HAMMOND, L. C. (Ed.). **Rhizosphere dynamics**. Boulder: Westview Press, 1990. p. 232-249.

MENDES, A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 39, p. 19-27, 2008.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, p. 126-134, 2004.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 425 p.

MILANI, L.; SOUZA, E. G. de; et al. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Lavras, v. 28, p. 591-598, 2006.

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

MOLIN, J. P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In: BOREM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 200. p. 237-257.

MOLIN, J. P. Definição de Unidades de Manejo a partir de mapas de Produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 83-92, 2002.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 31, p. 90-101, 2011.

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

MOREIRA, M. A. Metodologia de análise de dados espectrais coletados em solo e suborbital. In: FUNDAMENTOS do sensoriamento remoto. 4. ed. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.

MOTOMIYA, A. V. de A. et al. Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 1159-1165, 2012.

NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, p. 386-392, 2011.

NEVES, D. C.; JUNIO, E. F.; FILHO, V. V. V. Fatores determinantes do índice SPAD em algodoeiro. CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO. 7., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Embrapa Algodão, 2009. p. 859-865.

NOGUEIRA JUNIOR, S.; BARBOSA, M. Z. **O papel da pesquisa e a importância do Cerrado para a reorganização da cotonicultura brasileira**. São Paulo: [S.n.], 2005. v. 52, p. 87-98.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 471-551.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of cotton plant. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 35-55.

ORNELLAS, A. P. et al. **Boletim de pesquisa de algodão**. Rondonópolis: Fundação MT, 2001. 238 p. v. 4.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P.; PEDRO JÚNIOR, M. J. **Normais climatológicas dos postos meteorológicos do Instituto Agrônomo**. 1. Campinas: Instituto Agrônomo, 1995. 13 p. (Boletim técnico, 155).

PARKIN, T. B. Spatial variability of microbial process in soil – a review. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 22, p. 409-417. 1993.

PAVINATO, A. **Carbono e nutrientes no solo e a sustentabilidade do sistema soja-algodão no cerrado brasileiro**. 2009. 117 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PONTELLI, C. B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas de agricultura de precisão**. 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa MARIA, 2006.

POTASH PHOSPHATE INSTITUTE. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa de Potassa e do Fosfato, 1989. 189 p.

ROSNOW, J. Plant pigment absorption spectrum. In: PLANTING Science. Disponível em: <<http://www.plantingscience.org/index.php>> Acesso em: 10 abr. 2013.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agrônomo Ceres, POTAFOS, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação de fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

REDE FERTBRASIL. **Programa de fortalecimento da Embrapa**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redefertbrasil/>> Acesso em: 23 ago. 2012.

RESENDE, A. V. de. **Adubação de soja em áreas do cerrado: micronutrientes**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004, 29 p. (Documentos 115).

RESENDE, A. V. et al. Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: USP: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

REICHERT, J. M. et al. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 981-988, 2008.

RODRIGUES, J. B. T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos de solo e produtividade na agricultura de precisão**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

ROSOLEM, C. A.; BASTOS, G. B. Deficiências minerais no cultivar de algodão IAC 22. **Bragantia**, Campinas, v. 56, p. 377-387, 1997.

ROSOLEM, C. A. **Problemas em nutrição mineral, calagem e adubação do algodoeiro**. [S.l.]: Potafos, 2001. 17 p. (POTAFOS. Informações agrônômicas. Encarte técnico, 95).

ROSOLEM, C. A. **Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro**. [S.l.]: Potafos, 2001. 9 p. (POTAFOS. Informações agrônômicas. Encarte técnico, 95).

ROSOLEM, C. A.; WITACKER, J. P. T. Adubação foliar com nitrato de potássio em algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 147-155, 2007.

ROSOLEM, C. A.; MELLIS, V. van. Monitoring nitrogen nutrition in cotton. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1601-1607, 2010.

ROSOLEM, C. A. et al. Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio pelo algodoeiro sob irrigação cultivado em sistemas convencional e adensado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 457-466, 2012.

SALET, R. L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio direto**. 1998. 109 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

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 Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 115-122, 1998.

SANTI, A. L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. 150 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SANTOS, J. L. S. et al. Níveis de fertilidade do solo em área comercial cultivada com algodoeiro em Ipameri, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Resumos...** Salvador: ABRAPA, ABAPA, EMBRAPA ALGODÃO, 2005. p. 193.

SANT'ANA, E. V. P.; SANTOS, A. B. dos; SILVEIRA, P. M. Adubação Nitrogenada na produtividade, leitura SPAD e teor de nitrogênio em folhas de Feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, p. 491-496, 2010.

SERRA, A. P. et al. Desenvolvimento de Normas de DRIS e CND e avaliação do estado nutricional da cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 97-104, 2010.

SFREDO, G. S. et al. Eficácia de productos contendo micronutrientes, aplicados via semente, sobre produtividade e teores de proteína da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 41-45, 1997.

SGEMS. **Stanford geostatistical modeling software**. Disponível em: <<http://sgems.sourceforge.net/>> Acesso em: 12 nov. 2012.

SINGH, R. P. et al. Influence of high temperature and Breeding for heat tolerance in Cotton: a review. **Advances in Agronomy**, Hardbound v. 93, p. 313-385, 2007.

SILVA, J. A. F. et al. Avaliação de diretas fontes de cálcio e magnésio adicionadas a micronutrientes na cultura do citros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 1 CD-ROM.

SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 27, p. 1013-1020, 2003.

SILVA, R. P. et al. Variabilidade espacial e controle estatístico no processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, p. 742-752, 2007.

SILVA, M. A. C. da. et al. Estabelecimento e validação de normas DRIS para a cultura do algodão no centro-oeste do Brasil. **Acta Scientiarum Agronomy**, Lavras, v. 31, p. 93-99, 2009.

SILVA, S. A. et al. Cokrigagem aplicada ao mapeamento de atributos químicos do solo em Reduto-MG. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2009, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2009. Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/sgea/Docs/42.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2013.

SILVA, P. R. T.; FULANI JUNIOR, E.; NEVES, D. C. Efeito manejo de regulador e cultivar no índice SPAD em algodoeiro. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 23., 2011, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 2011. 1 CD-ROM.

SLC Agrícola S. A. **Apresentação institucional**. [S.I.], 2011. Power point.

SLC Agrícola S. A. **Banco de dados**. [S.I.], 2012. Excel

SLC Agrícola S. A. **Manual de qualidade do algodão**. [S.I.], 2012. Word.

SMITS, F. M. Measurements of sheet resistivities with the four-point probe. **Bell System Technical Journal**, New York, v. 37, p. 711-718, 1958.

SMITH, S. A. et al. Site-specific nutrient management: variability in cotton yield response and soil chemical characteristics. **Better Crops**, Atlanta, v. 82, p. 12-14, 1998.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIENCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBSC-Nucleo Regional Sul, 2004. 400 p.

SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistema de manejo**. Porto Alegre, 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 147-168.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DE SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27., 2006, Bonito. **Anais...** Bonito: EMBRAPA, 2006. 1 CD-ROM.

SUDDUTH, K. A. et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, Riverside, v. 46, p. 263-283, 2005.

SST SOFTWARE. **SSToolbox, version 10**. Stillwater, 2009. 1 CD-ROM.

TEDESCO, J. M. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim técnico de solos, 5).

USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE). **Cotton area, yield, and production**. Washington, 2013. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>> Acesso em: 11 mar. 2013.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 104 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VANNI, S. M. **Modelos de regressão: estatística aplicada**. São Paulo: Legmar Informática, 1998. 177 p.

VERIS TECHNOLOGIES. **Home page**. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.veristech.com>>. Acesso em: 02 set. 2012.

VENDRAME, P. R. S. et al. Fertility and acidity status of latossolos (oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 82, p. 1085-1094. 2010

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J. E. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E., (Ed.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 169-183.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um Latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1503-1514, 2010.

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

WIEGAND, C. L; RICHARDSON, A. J; ESCOBAR D. E. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, Saint Paul, v. 35, p. 105-109, 1991.

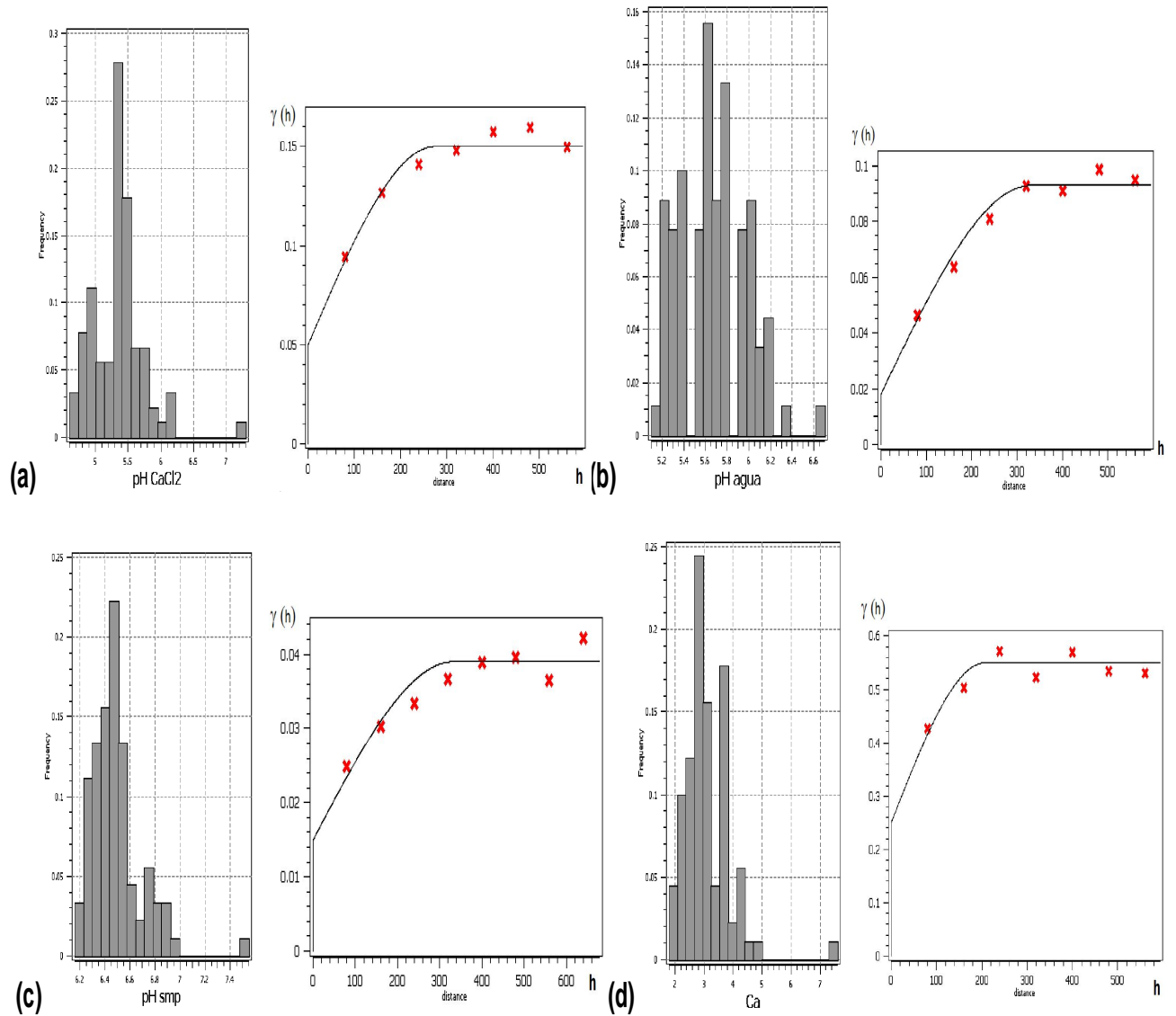
ZANCANARO, L.; TESSARO, L. C. Calagem e adubação. In: MORESCO, E. (Org.). **Algodão: pesquisas e resultados para o campo**. Cuiabá: Fundo de Apoio à Cultura do Algodão : FACUAL, 2006. p. 57-81.

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

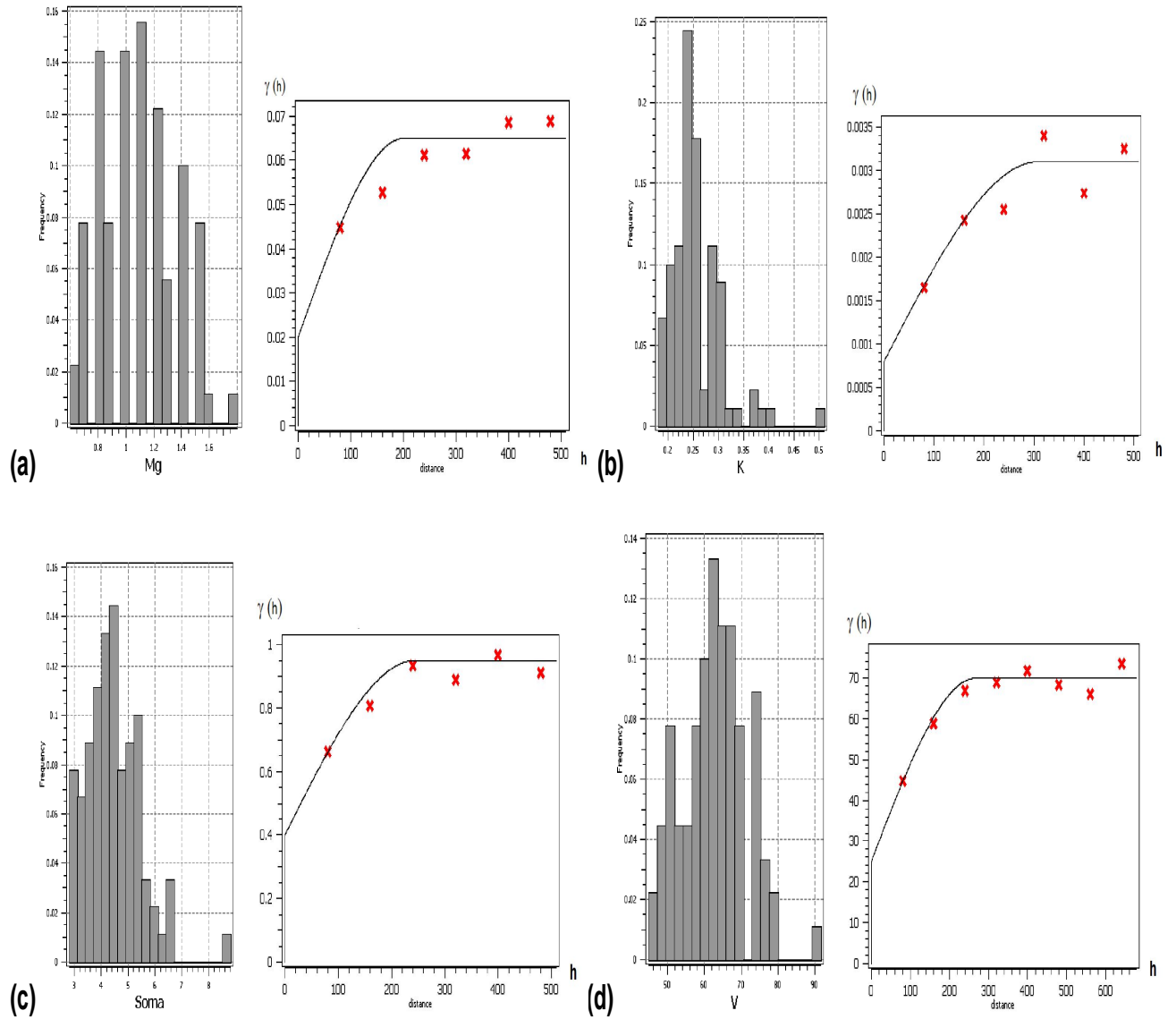
ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZOTARELLI, L. et al. **Calibração do medidor de Clorofila Minolta SPAD-502 para uso na cultura do Milho**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2002. 4 p. (Comunicado técnico, 55).

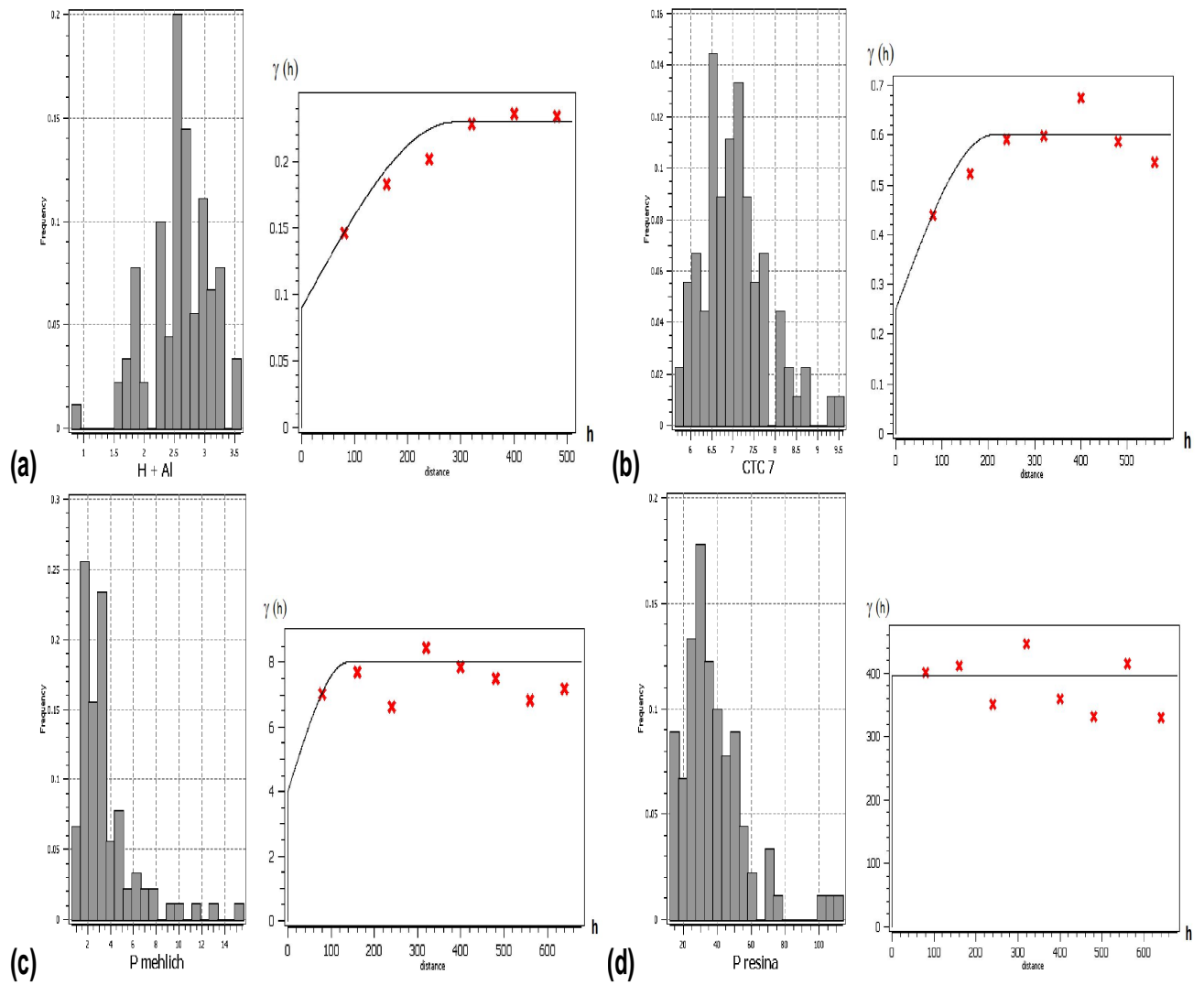
8. APÊNDICES:



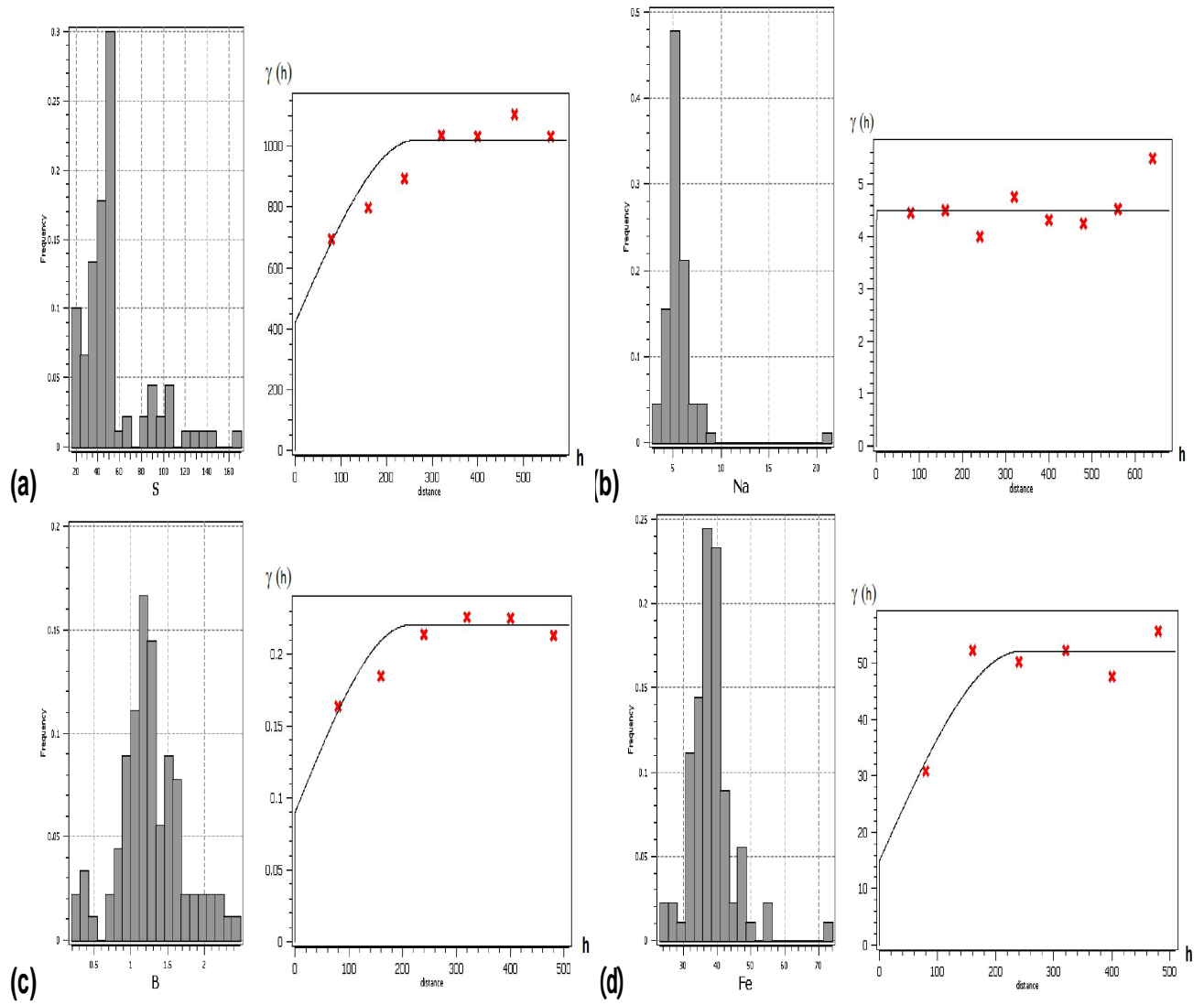
APÊNDICE 1 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) pH CaCl₂, b) pH H₂O, c) pH SMP e d) cálcio trocável (Software: SGeMS).



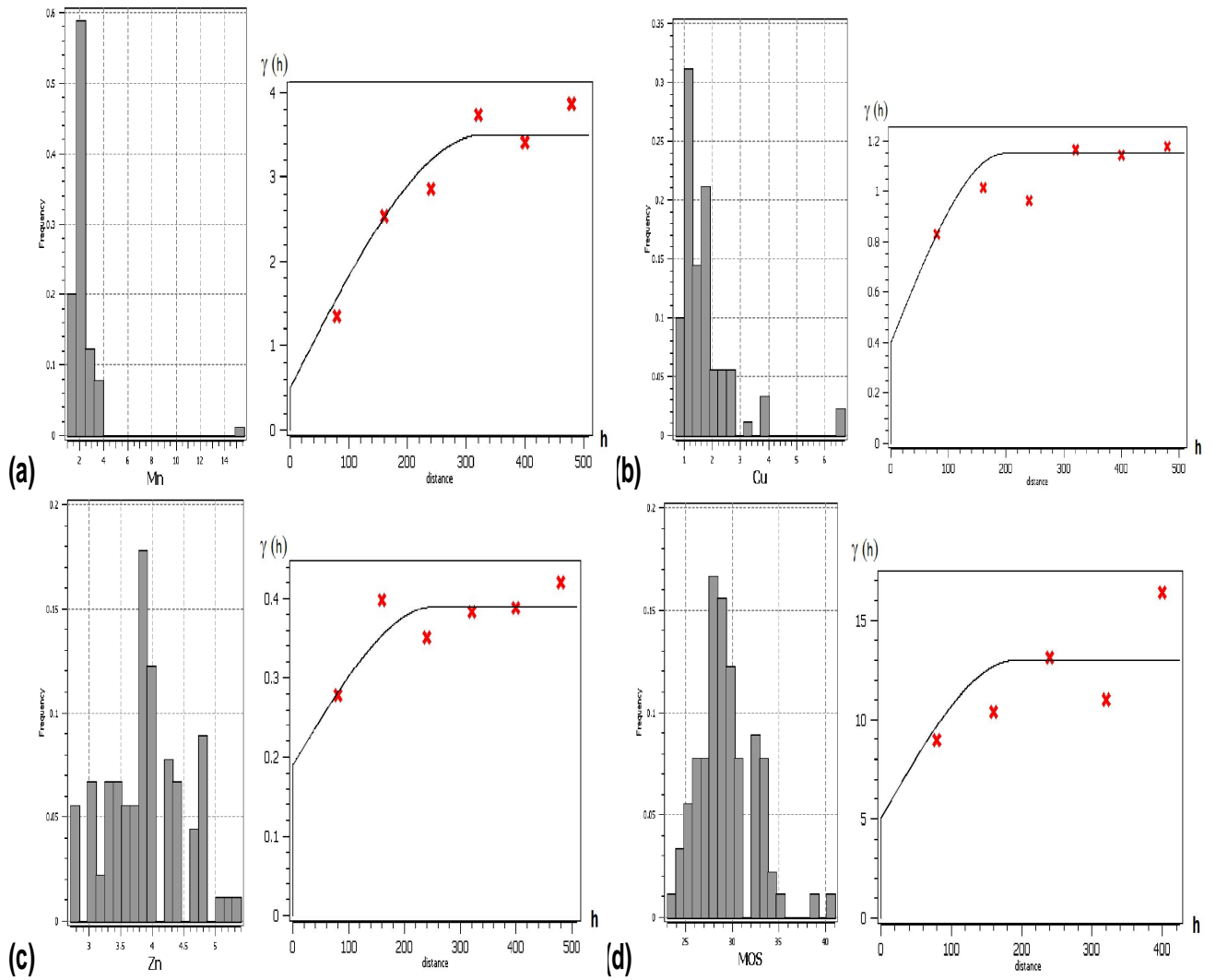
APÊNDICE 2 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio trocável, b) potássio trocável, c) soma de bases trocáveis e d) saturação por bases (Software: SGeMS).



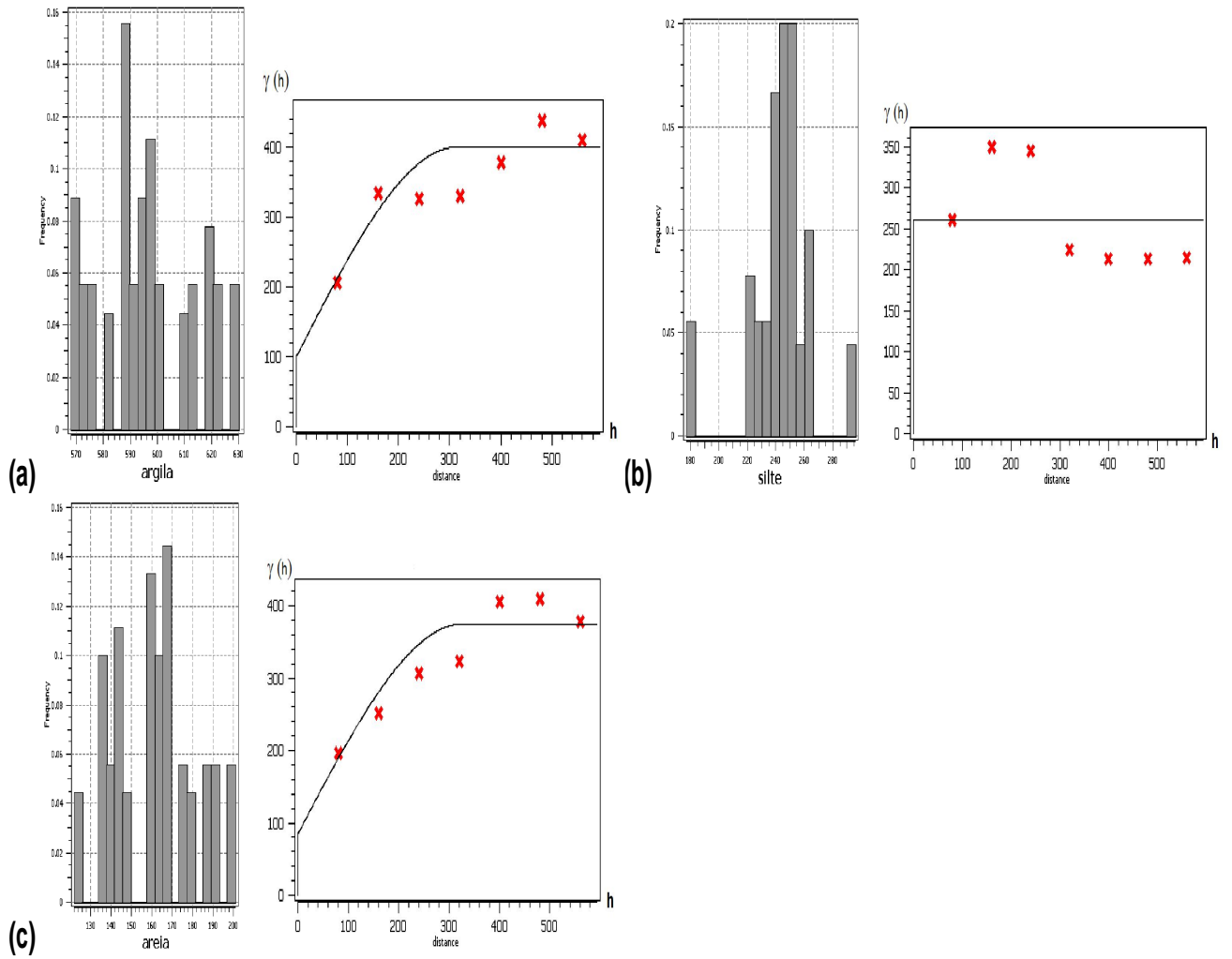
APÊNDICE 3 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) H+Al trocável, b) CTC $pH\ 7,0$, c) P Mehlich 1 e d) P resina (Software: SGeMS).



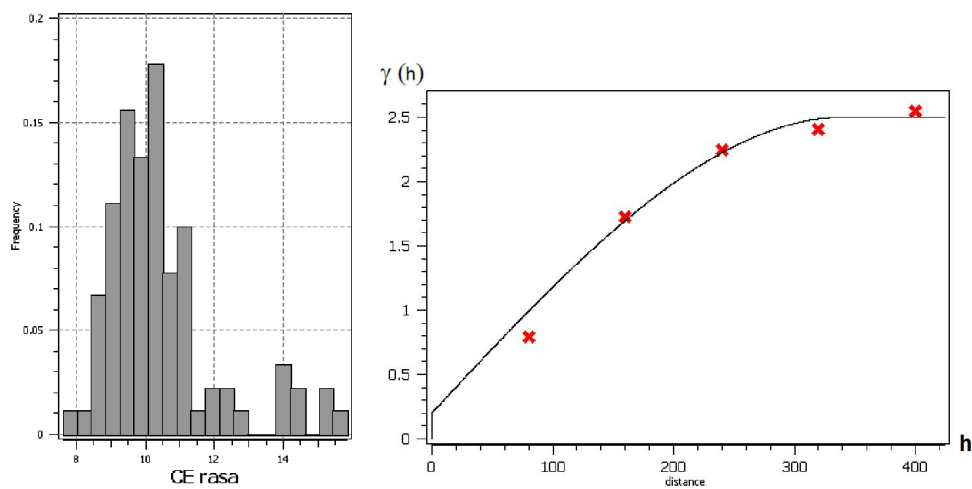
APENDICE 4 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) enxofre disponível, b) sódio trocável, c) boro disponível e d) ferro disponível (Software: SGeMS).



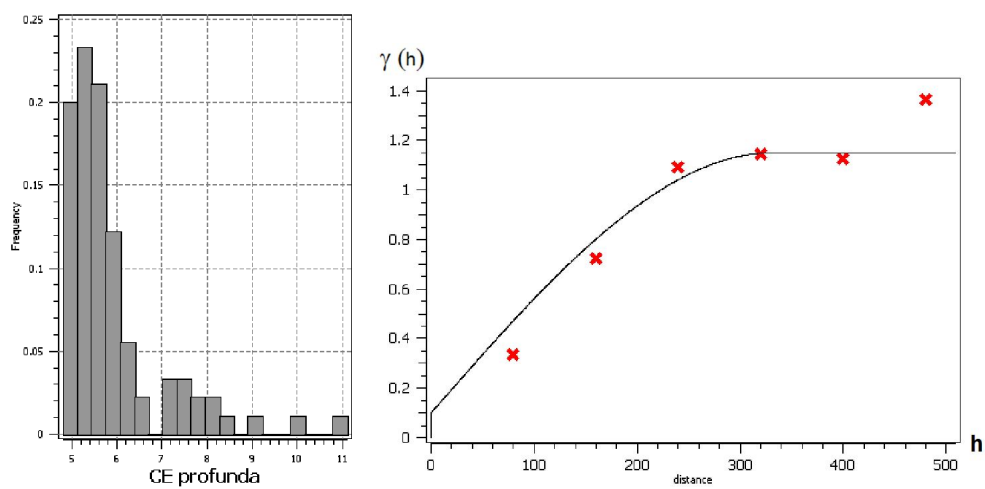
APÊNDICE 5 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) manganês disponível, b) cobre disponível, c) zinco disponível e d) matéria orgânica (Software: SGeMS).



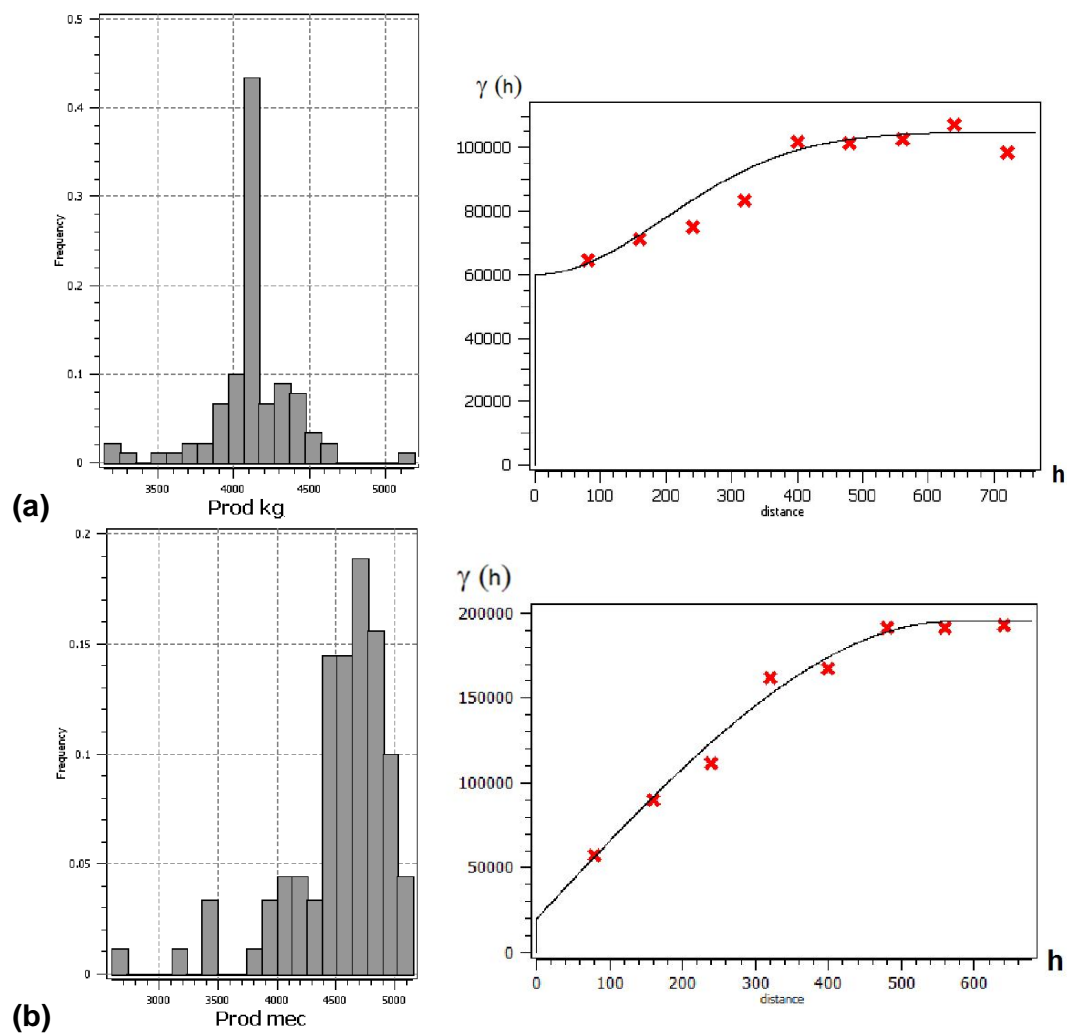
APÊNDICE 6 - Histogramas e semivariogramas teóricos para: a) argila, b) silte e c) areia (Software: SGeMS).



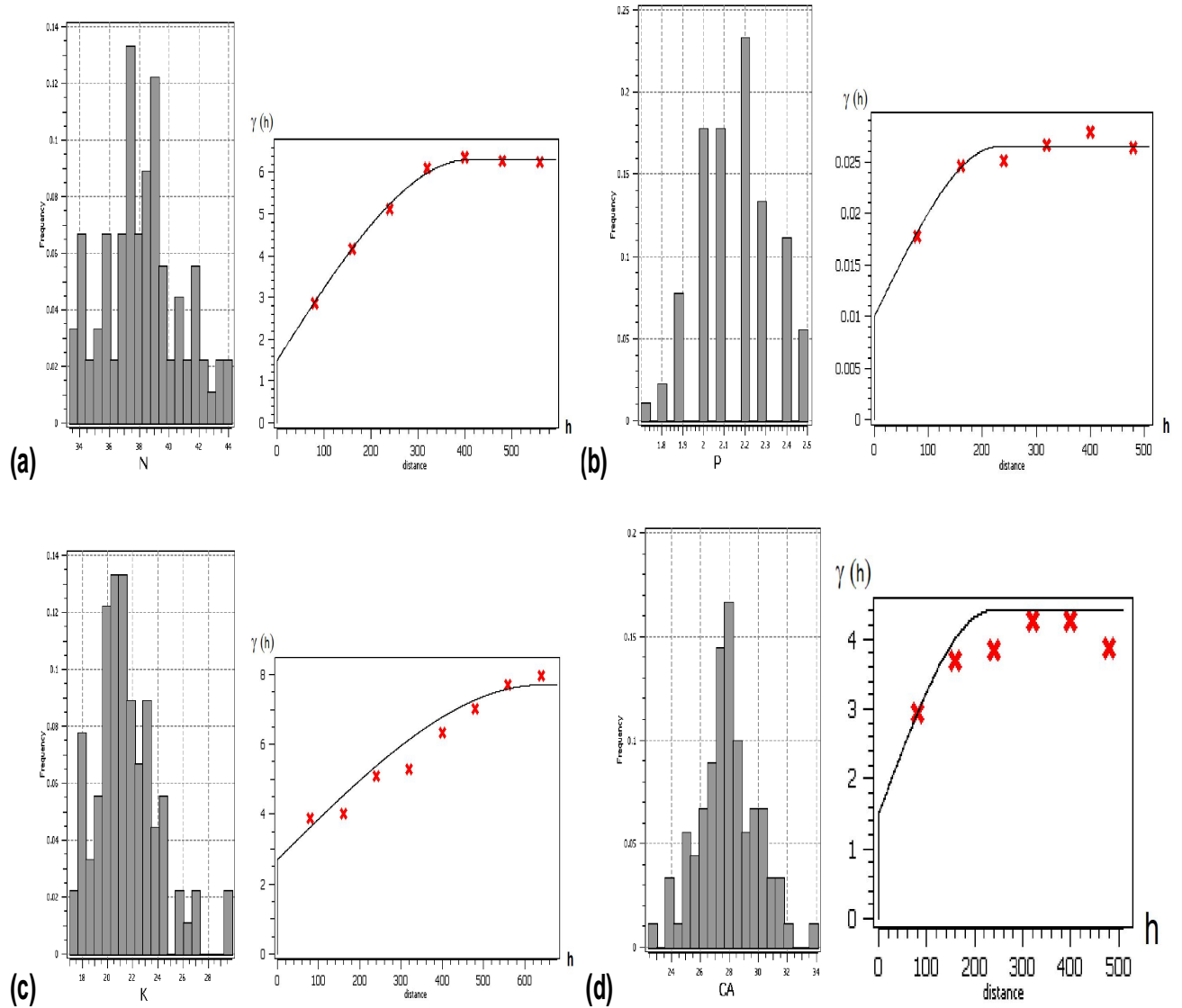
APÊNDICE 7 - Histogramas e semivariograma teórico para CEa rasa 0 – 0,3m (Software: SGeMS).



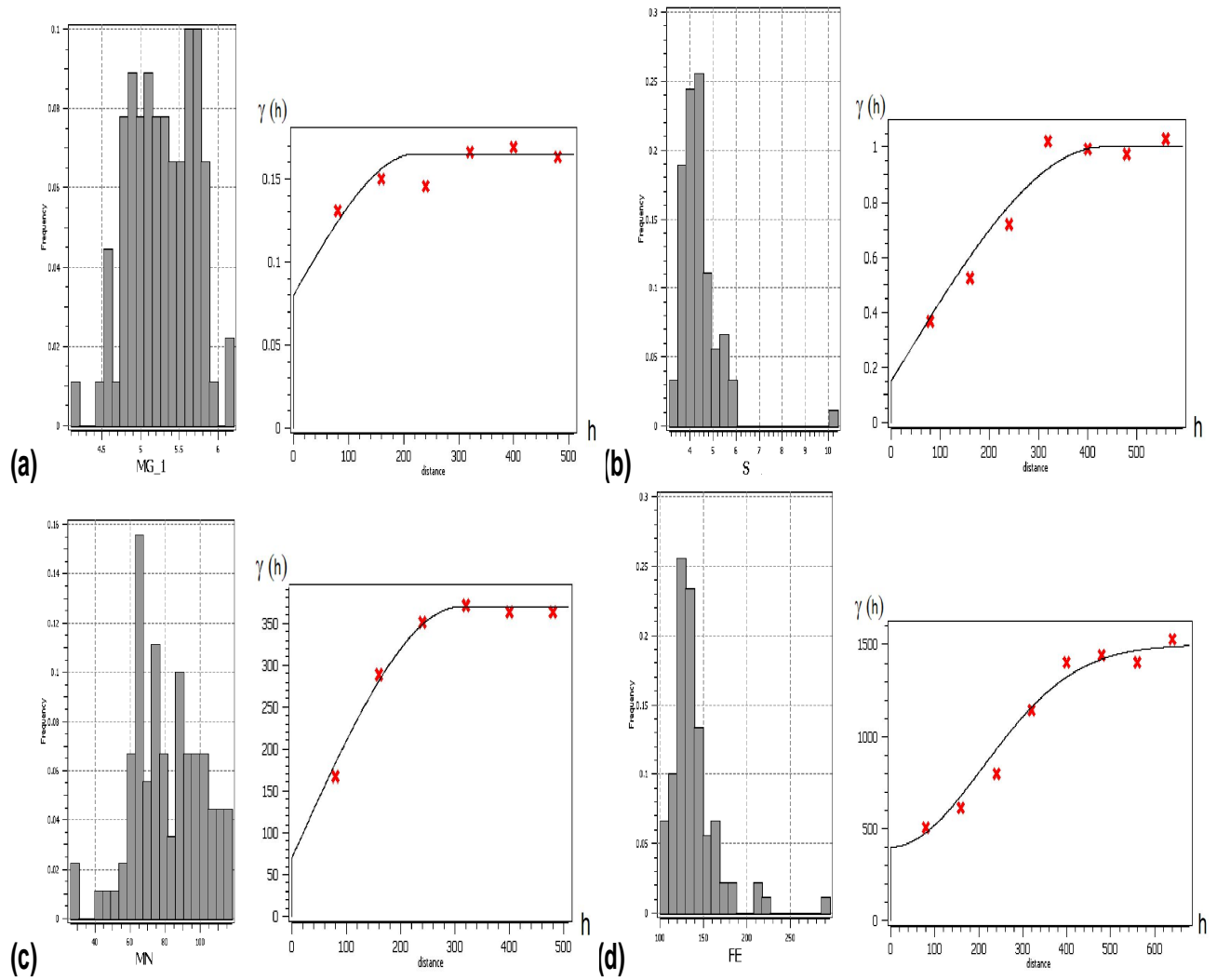
APÊNDICE 8 - Histogramas e semivariograma teórico para CEa profunda 0 – 0,9m (Software: SGeMS).



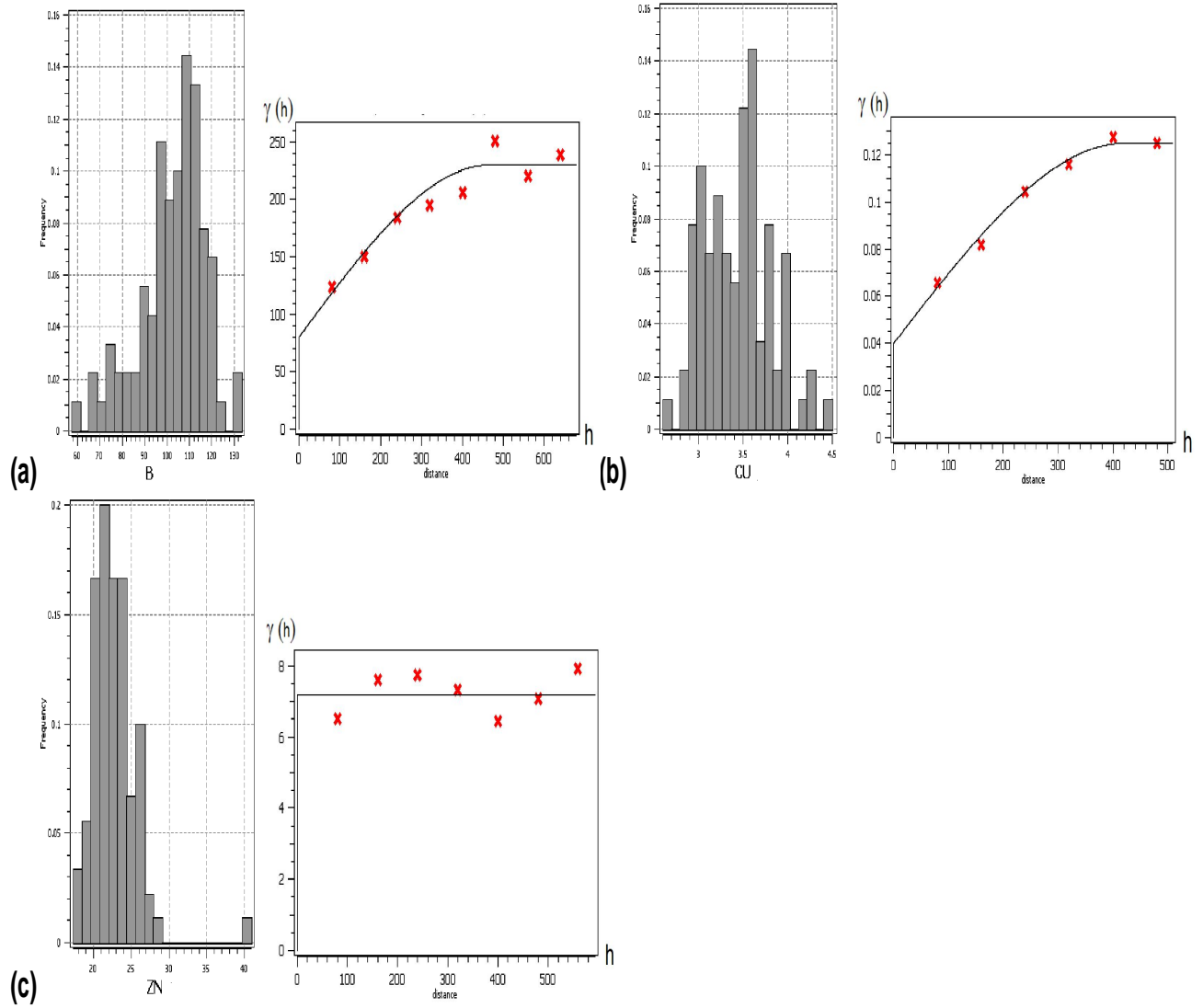
APÊNDICE 9 - Histogramas e semivariogramas teóricos para: a) produtividade colheita mecânica safra 2010/11 e b) produtividade colheita mecânica, safra 2011/12 (Software: SGeMS).



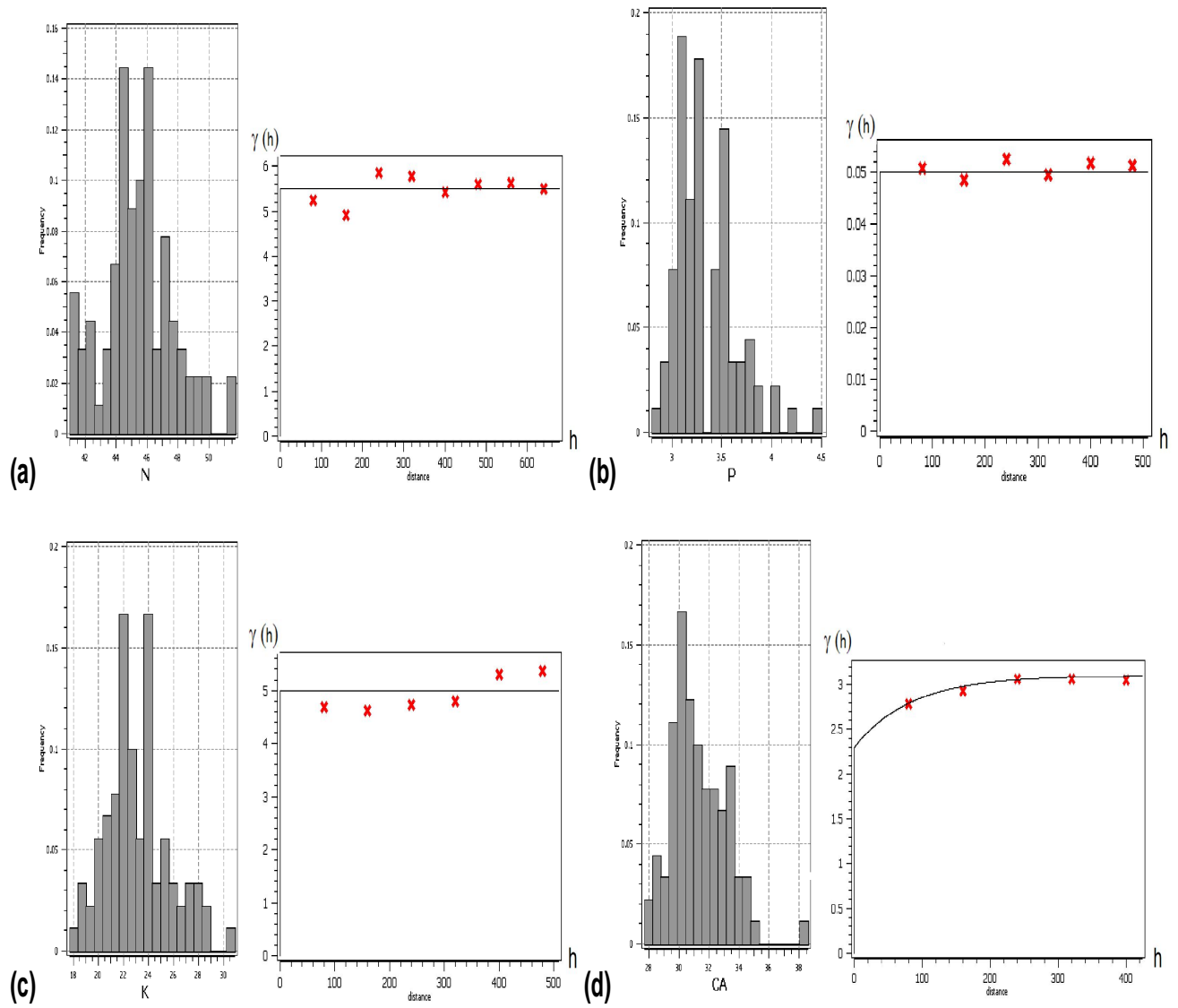
APÊNDICE 10 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) nitrogênio foliar, b) fósforo foliar, c) potássio foliar e d) cálcio foliar, aos 70 DAE, na safra 2010/11 (Software: SGeMS).



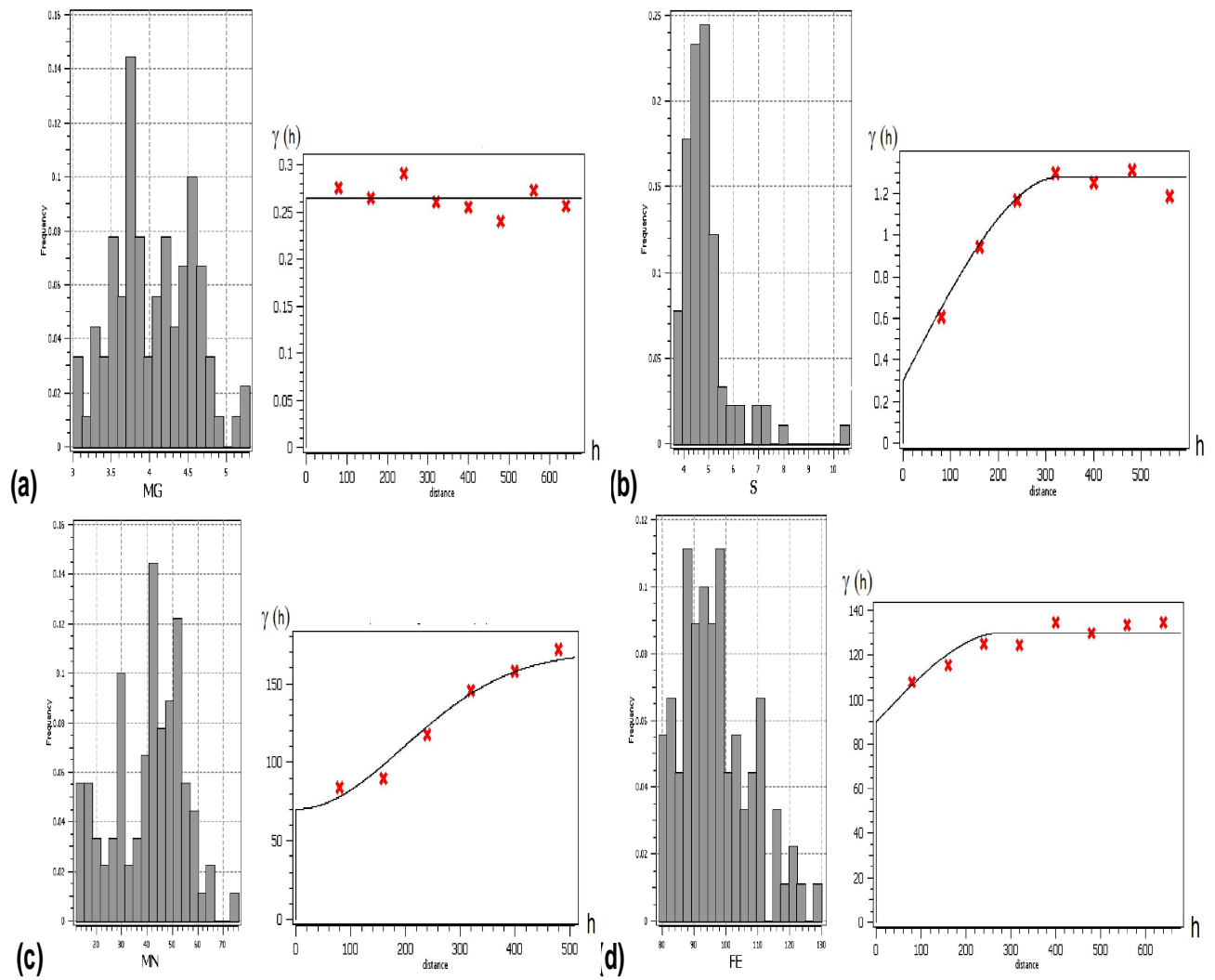
APÊNDICE 11 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio foliar, b) enxofre foliar, c) manganês foliar e d) ferro foliar, aos 70 DAE, na safra 2010/11 (Software: SGeMS).



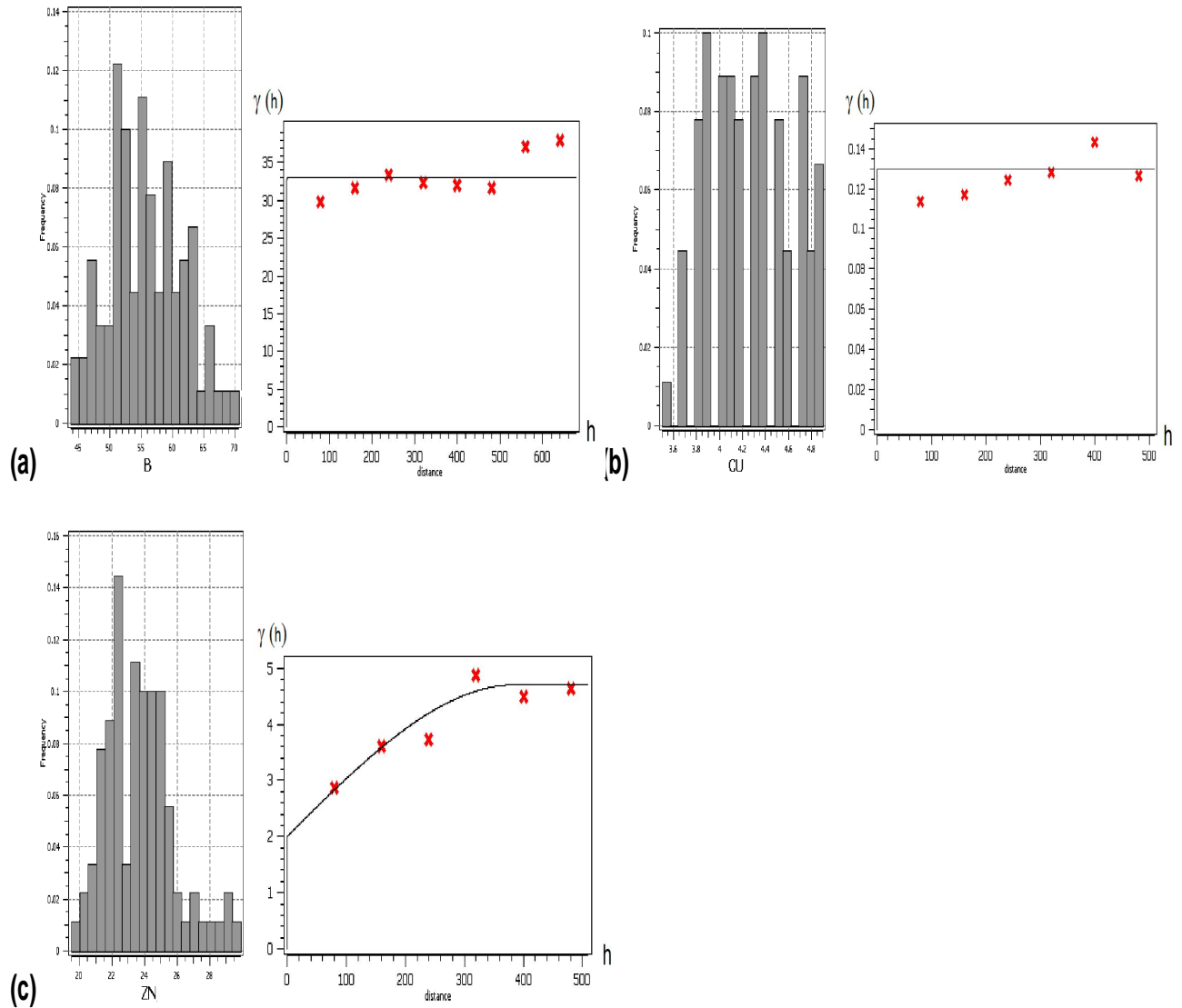
APÊNDICE 12 - Histogramas e semivariogramas teóricos para: a) boro foliar, b) cobre foliar e c) zinco foliar, aos 70 DAE, na safra 2010/11 (Software: SGeMS).



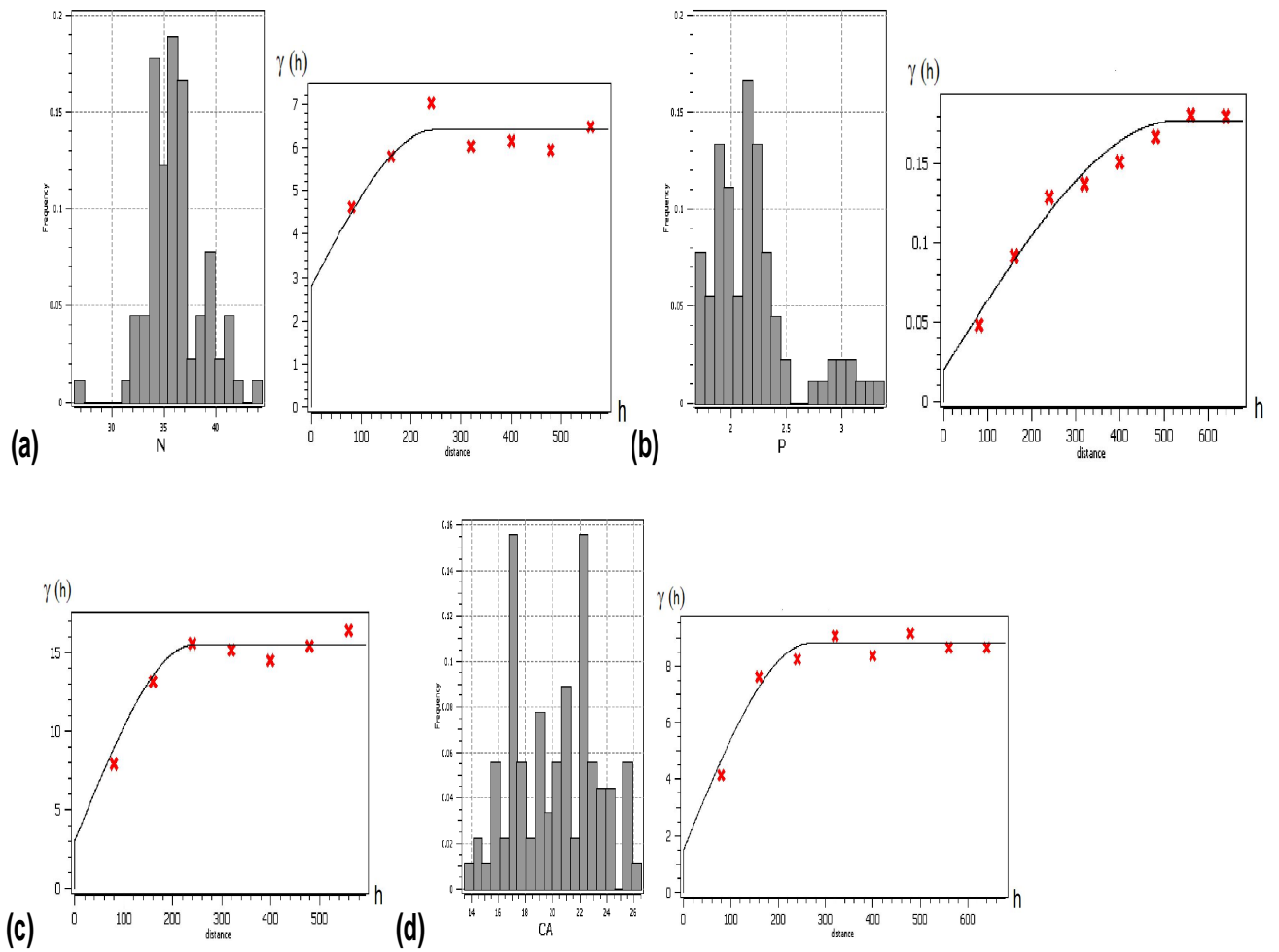
APÊNDICE 13 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) nitrogênio foliar, b) fósforo foliar, c) potássio foliar e d) cálcio foliar, aos 110 DAE, na safra 2010/11 (Software: SGeMS).



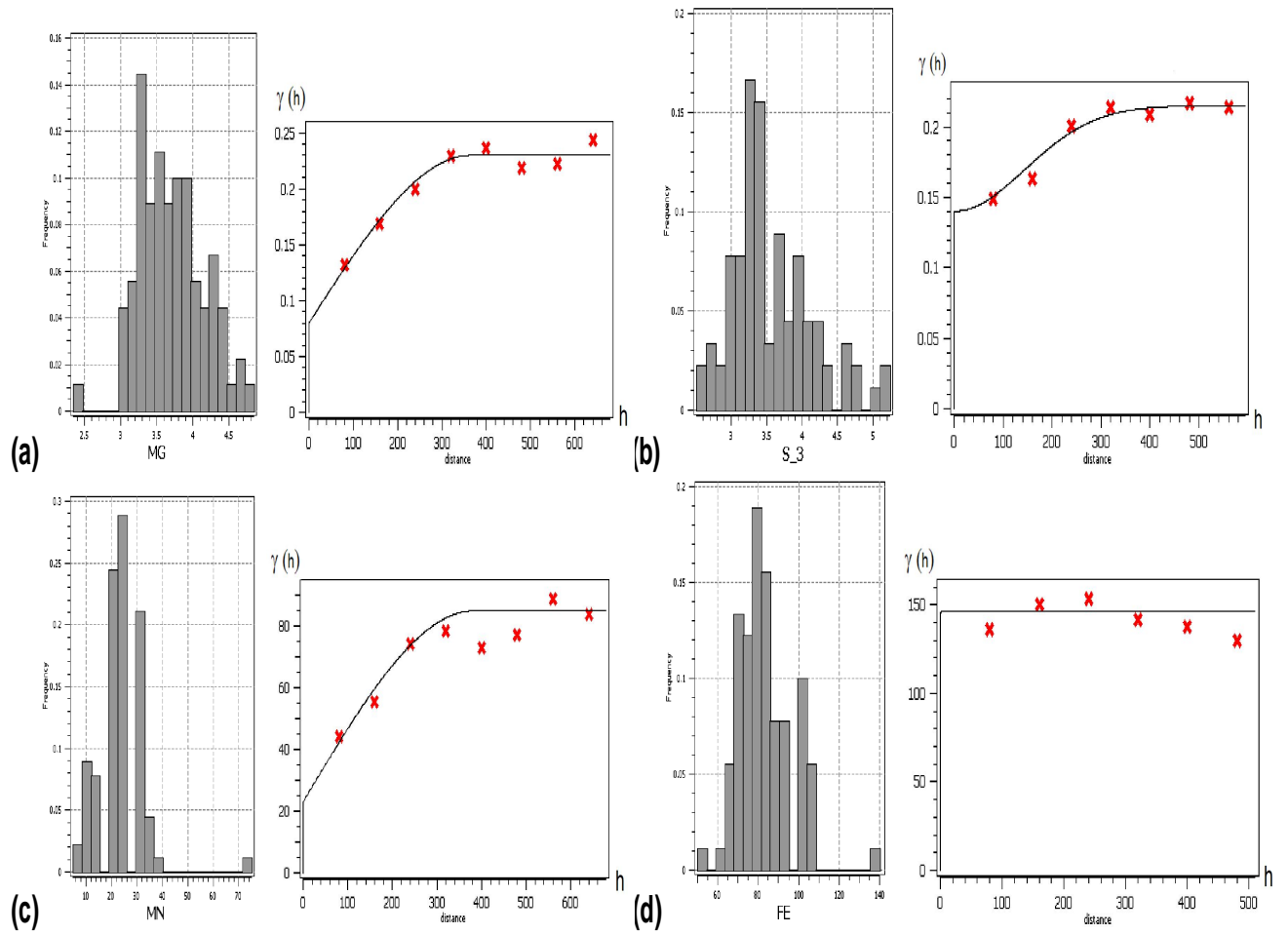
APÊNDICE 14 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio foliar, b) enxofre foliar, c) manganês foliar e d) ferro foliar, aos 110 DAE, na safra 2010/11 (Software: SGeMS).



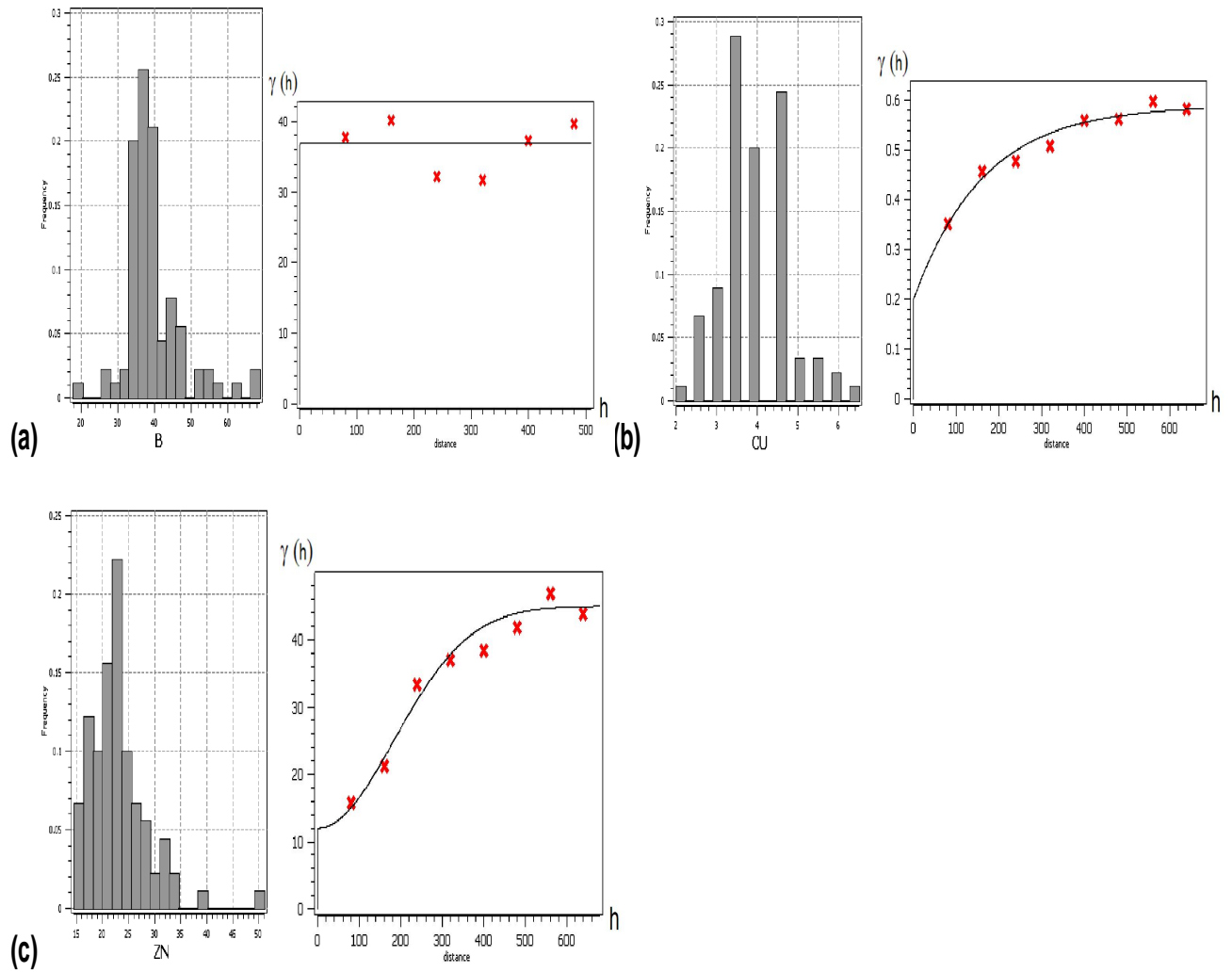
APÊNDICE 15 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) boro foliar, b) cobre foliar e c) zinco foliar, aos 110 DAE, na safra 2010/11 (Software: SGeMS).



APÊNDICE 16 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) nitrogênio foliar, b) fósforo foliar, c) potássio foliar e d) cálcio foliar, aos 108 DAE, na safra 2011/12 (Software: SGeMS).



APÊNDICE 17 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) magnésio foliar, b) enxofre foliar, c) manganês foliar e d) ferro foliar, aos 108 DAE, na safra 2011/12 (Software: SGeMS).



APÊNDICE 18 - Histogramas e semivariograma teórico para: a) boro foliar, b) cobre foliar, c) zinco foliar, aos 108 DAE, na safra 2011/12 (Software: SGeMS).