

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

**USO RACIONAL DA ÁGUA EM ALFACE DESENVOLVIDA EM
AMBIENTE PROTEGIDO CONSIDERANDO A VARIABILIDADE
ESPACIAL**

IVANA FÚRIO BATISTA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia
– Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU – SP
Fevereiro – 2006

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

**USO RACIONAL DA ÁGUA EM ALFACE DESENVOLVIDA EM
AMBIENTE PROTEGIDO CONSIDERANDO A VARIABILIDADE
ESPACIAL**

IVANA FÚRIO BATISTA

Orientadora: Prof.^a Dra. Célia Regina Lopes Zimback

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia
– Irrigação e Drenagem.

**BOTUCATU – SP
Fevereiro – 2006**

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

Batista, Ivana Fúrio, 1967-
B333u Uso racional da água em alface desenvolvida em ambiente
 protegido considerando a variabilidade espacial / Ivana
 Fúrio Batista. - Botucatu : [s.n.], 2006.
 xiv, 128 f. : il. color., gráfs., tabs.

 Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Fa-
 culdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006
 Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
 Inclui bibliografia

1. Análise espacial (Estatística). 2. Fertirrigação. 3.
Solos - Fertilidade. 4. Irrigação por gotejamento. I. Zim-
back, Célia Regina Lopes. II. Universidade Estadual Pau-
lista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Fa-
culdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

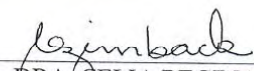
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

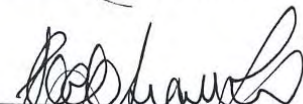
**TÍTULO: "USO RACIONAL DA ÁGUA EM ALFACE DESENVOLVIDA EM AMBIENTE
PROTEGIDO CONSIDERANDO A VARIABILIDADE ESPACIAL"**

ALUNA: IVANA FURIO BATISTA

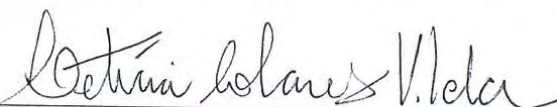
ORIENTADORA: PROFA. DRA. CELIA REGINA LOPES ZIMBACK

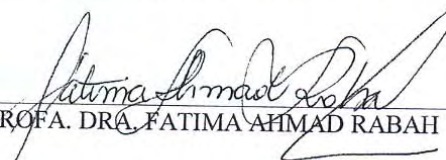
Aprovado pela Comissão Examinadora:


PROFA. DRA. CELIA REGINA LOPES ZIMBACK


PROF. DR. HELIO GRASSI FILHO


PROF. DR. CARLOS ALBERTO O. DE MATOS


PROFA. DRA. LETICIA COLARES VILELA


PROFA. DRA. FATIMA AHMAD RABAH

Data da Realização: 03 de fevereiro de 2006.

CONFIANÇA

Tu, que habitas sob a proteção do Altíssimo,
que moras à sombra do Oniponte,
dize ao Senhor: “Sois meu refúgio e minha cidadela,
meu Deus, em que eu confio.”
É ele que te livrará do laço do caçador,
e da peste perniciosa.
Ele te cobrirá com suas plumas;
sob suas asas encontrarás refúgio.
Sua fidelidade te será um escudo de proteção.
Tu não temerás os terrores noturnos,
nem a flecha que voa à luz do dia,
nem a peste que se propaga nas trevas,
nem o mal que grassa ao meio-dia.
Caíam mil homens à tua esquerda e dez mil à tua direita:
tu não serás atingido.
Porém, verás com teus próprios olhos,
contemplarás o castigo dos pecadores,
porque o Senhor é teu refúgio.
Escolheste, por asilo, o Altíssimo.
Nenhum mal te atingirá,
nenhum flagelo chegará à tua tenda,
porque aos seus anjos ele mandou
que te guardem em todos os teus caminhos.
Eles te sustentarão em suas mãos,
para que não tropeces em alguma pedra.
Sobre serpente e víbora andarás,
calcarás aos pés o leão e o dragão.
“Pois que se uniu a mim, eu o livrarei;
e o protegerei, pois conhece o meu nome.
Quando me invocar, eu o atenderei;
na tribulação estarei com ele.
Hei de livrá-lo e o cobrirei de glória.
Será favorecido de longos dias,
e mostrar-lhe-ei a minha salvação.”

(Salmo 90)

À DEUS E A NOSSA SENHORA

por estarem sempre presentes em todos estes anos de caminhada, nos momentos fáceis e difíceis e também por me guiarem em todas as viagens à Botucatu nesses últimos seis anos...

Ao meu querido irmão **VALDINEI**

que sei que de onde está, sempre me protege...

AGRADEÇO

Aos meus queridos pais

ARNALDO E NOEMIA

pelas suas lutas e renúncias ao longo de nossas vidas; pela constante dedicação e apoio irrestrito e, principalmente, por me transmitirem uma infindável perseverança e coragem de lutar por todos os meus ideais...

À minha querida irmã **DERCI** e

ao meu cunhado **IBRAIM**

pela força que me deram acolhendo o meu filho, como se fosse deles, para que eu pudesse terminar mais esta etapa de minha vida profissional...

Meus Sobrinhos

ARNALDO, DANIELLE, THAÍS e RODRIGO, que acolho como se fossem meus próprios filhos...

ALINI, GABRIELA, GIULIA e ‘ZEZINHO’, sobrinhos de coração...

OFEREÇO

AO MEU ESPOSO

“RUBINHO”, meu eterno companheiro de caminhada, pelo amor,
pelo apoio incansável em todos os momentos...

E AO MEU FILHO

PEDRO HENRIQUE, pelo qual sou capaz de enfrentar qualquer
desafio nesta vida e pela imensa felicidade que trouxe à minha vida...

DEDICO

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Neste momento tão importante de minha escolha profissional, não poderia deixar de lembrar e agradecer a todos os que me auxiliaram ou que, às vezes, em diversos momentos, caminharam comigo.

À querida Professora Dra. Célia Regina Lopes Zimback, que desde 1986, faz parte de minha vida profissional, quando ainda minha professora no Curso de Graduação, agradeço a brilhante orientação deste trabalho, com os conhecimentos científicos transmitidos e o constante estímulo à pesquisa e descobertas e por fazer tudo isso com a maior humildade e generosidade.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/CT-Hidro – Brasil, pelo apoio concedido na realização desse trabalho.

À Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP – Campus de Botucatu, por me oferecer a oportunidade de aperfeiçoar os meus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Antônio Evaldo Klar, professor da FCA desde a década de 60, por acreditar na importância da realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, Coordenador do Curso de Pós-Graduação “Irrigação e Drenagem” no início do curso e ao atual Coordenador Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz pela constante atenção, sempre que necessário.

Ao Prof. Dr. Norberto da Silva, pela concessão da estufa para a realização do experimento.

Ao Prof. Dr. Hélio Grassi Filho pelas sugestões concedidas para o desenvolvimento do experimento.

À todos os funcionários da Fazenda Experimental São Manuel, pela responsabilidade e profissionalismo na condução das pesquisas realizadas, em especial, ao Nilton Antonio de Moraes, José Luís Zanela, Geraldo Lourençon, Luís Antonio da Silva e Luís Antonio Gallo, agradeço todo o auxílio recebido durante a realização do experimento.

Ao Eng^o Agr^o Luiz Andrade, pela concessão de todo o sistema de irrigação (Petroísa) para a realização do experimento.

A todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais – Ciência do Solo, e em especial ao Sr. Adenir, Jair, De Pieri, Dorival, Maurício, Garcia e Sônia pelo auxílio concedido em algumas atividades.

Ao pessoal da Seção Pós-Graduação: Kátia, Marilena, Marlene e Jaqueline pelo atendimento concedido.

Aos funcionários da biblioteca, em especial à Denise, Maria Aparecida, Maria Inês, Hellen e Célia pelo excelente atendimento prestado.

Ao Gilberto Winckler, funcionário do Departamento de Engenharia Rural e ao Wagner Vilella pela contribuição na implantação do experimento.

Ao Reginaldo Barboza da Silva, pelo auxílio na curva de retenção do solo.

A todos os amigos do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas (GEPAG): André, Débora, Juliana, Caetano, Carlão, entre outros; pela amizade e convivência.

Às amigas Gláucia e Andréa pelo apoio que me deram no período de minha gravidez e condução deste trabalho.

Aos companheiros de curso Karen, Cristina, Carlos (“Peruano”), Yeoschua, Marcelo Lopes, Wagner, entre outros, pela amizade construída. Em especial, à amiga Andréa Bogatti Guimarães Tomazela pela amizade fortalecida e sincera, pela acolhida e pelo auxílio irrestrito todas as vezes que precisei.

Aos Professores. Carlos Alberto Oliveira de Matos e Pedro Veridiano Baldotto, por algumas sugestões concedidas e pelo apoio e amizade desde 1986.

Aos Professores Denis Maurílio Maricato e Mirtes Brochado Falcone, pelo apoio e amizade.

Às amigas Célia Aparecida Benício Rodrigues, Eliane Estela de Freitas, Ieda Francischetti, Júlia Maria de Brito Alves, Luciane Rezende Costa Kill, Silvia Helena Sarmento Beccari Ciciliati e Rita de Cássia Pereira de Oliveira, pela amizade sincera.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTADE FIGURAS.....	XIII
RESUMO.....	1
SUMMARY.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Cultura de alface	7
2.2 Cultivo em ambiente protegido.....	9
2.3 A racionalização do uso da água e nutrientes na cultura de alface.....	11
2.4 Geoestatística e variabilidade espacial.....	16
2.4.1 Variograma.....	17
2.4.2 Ajuste do variograma.....	21
2.4.3 Krigagem.....	24
2.4.4 Estudos da variabilidade espacial em pesquisa agronômica do sistema água-solo-planta.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1 Material e métodos utilizados para a montagem do experimento.....	38
3.1.1 Caracterização da área experimental.....	38
3.1.2 Caracterização da estufa e malha experimental.....	40
3.1.3 Manejo da irrigação.....	41

3.1.3.1 Manejo da irrigação para a determinação da umidade do solo.....	42
3.1.3.2 Teor de água no solo e manejo da irrigação para a condução da cultura.....	43
3.1.4 Determinação dos atributos físicos e químicos do solo.....	45
3.1.4.1 Determinação dos atributos físicos do solo.....	45
3.1.4.1.1 Determinação da umidade do solo.....	45
3.1.4.1.2 Determinação da granulometria do solo.....	46
3.1.4.2 Determinação da fertilidade do solo.....	46
3.1.5 Características e condução da cultura.....	47
3.2 Análise espacial dos dados.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1 Coeficiente de uniformidade de distribuição dos gotejadores.....	53
4.2 Análise espacial.....	53
4.2.1 Análise dos atributos físicos do solo.....	53
4.2.1.1 Análise variográfica da granulometria e da umidade do solo.....	53
4.2.1.2 Krigagem da granulometria e da umidade do solo.....	59
4.2.2 Análise dos atributos químicos do solo.....	64
4.2.2.1 Análise variográfica da fertilidade do solo.....	64
4.2.2.2 Krigagem da fertilidade do solo.....	72
4.2.3 Análise dos parâmetros de produtividade de alface.....	86
4.2.3.1 Análise variográfica dos parâmetros de produtividade de alface.....	86

4.2.3.2 Krigagem dos parâmetros de produtividade de alface.....	91
4.2.4 Correlações entre atributos do solo antes e após o plantio e produtividade de alface.....	95
..	
4.2.5 Manejo da irrigação, adubação e produtividade de alface baseados na análise espacial.....	100
4.2.5.1 Mapa de aplicação de água.....	100
4.2.5.2 Mapa dos teores de nutrientes.....	102
4.2.5.3 Mapa da produtividade de alface.....	105
4.2.6 Considerações finais.....	106
5 CONCLUSÕES.....	109
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Atributos físicos da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.....	39
2. Atributos químicos da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.....	39
3. Valores dos teores de água no solo (g g^{-1}) e potencial matricial (kPa) para a camada de 0-20 cm.....	40
4. Parâmetros estimados pelo Programa SWRC para o modelo de Van Genutchen na camada de 0-20 cm do solo.....	43
5. Parâmetros variográficos da granulometria e da umidade do solo.....	55
6. Validação cruzada da krigagem dos dados da granulometria e da umidade do solo.....	63
7. Parâmetros variográficos da fertilidade do solo antes e após a implantação da cultura de alface.....	66
8. Validação cruzada da krigagem dos dados de fertilidade do solo.....	84
9. Parâmetros variográficos da produtividade da cultura de alface.....	88
10. Validação cruzada da krigagem dos dados de produtividade de alface.....	94
11. Coeficiente de correlação linear (r) entre atributos do solo antes do plantio e produtividade de alface.....	96
12. Coeficiente de correlação linear (r) entre atributos do solo após o plantio e produtividade de alface.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1. Figura esquemática do variograma.....	18
2. Esquema da malha experimental demarcada na estufa com os pontos de amostragem.....	41
3. Disposição dos canteiros de alface com o sistema de irrigação por gotejamento e tensiômetros.....	48
4. Variogramas isotrópicos da AG (a); AM (b); AF (c); AMF (d); areia total (e); argila (f); silte (g) e umidade (h).....	57
5. Representação bidimensional da krigagem da AG (a); AM (b); AF (c) e AMF (d) do solo.....	60
6. Representação bidimensional da krigagem da areia total (a); argila (b); silte (c) e umidade (d) do solo.....	61
7. Variogramas isotrópicos do pH, M.O., P e H + Al do solo; (a), (c), (e) e (g) - antes do plantio de alface; (b), (d), (f) e (h) - após o plantio de alface.....	68
8. Variogramas isotrópicos do K, Ca, Mg e SB do solo; (a), (c), (e) e (g) - antes do plantio de alface; (b), (d), (f) e (h) - após o plantio de alface.....	69
9. Variogramas isotrópicos da CTC e V% do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.....	70
10. Representação bidimensional da krigagem do pH e M.O. do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.....	75
11. Representação bidimensional da krigagem do P e H + Al do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.....	77
12. Representação bidimensional da krigagem do K e Ca do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.....	79
13. Representação bidimensional da krigagem do Mg e SB do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.....	81

14. Representação bidimensional da krigagem da CTC e V% do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.....	82
15. Canteiros de alface no ponto de colheita.....	86
16. Variogramas isotrópicos da MF (a); MFC (b); MSC (c) e DCC (d).....	89
17. Representação bidimensional da krigagem da MF (a); MFC (b); MSC (c) e DCC (d).....	92
18. Mapa da aplicação de água.....	101
19. Mapa dos teores de P – período I (a); P- período II (b); K – período I (c) e K período II (d).....	103
20. Mapa da produtividade de alface: MFC (a) e DCC (b).....	105

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade de alguns atributos físicos e químicos do solo e de produtividade de alface (massa de matéria fresca da parte aérea total – MF; massa de matéria fresca da parte aérea comercial – MFC; massa de matéria seca da parte aérea comercial – MSC e diâmetro de cabeça comercial – DCC), oferecendo subsídios ao mapeamento da estufa em diferentes zonas de manejo de água e nutrientes, almejando uma maior produtividade de alface e a irrigação de precisão, com a otimização do uso da água e de nutrientes. O experimento foi conduzido em uma estufa com alface irrigada por gotejamento e malha de amostragem com 152 pontos, na Fazenda Experimental São Manuel, da Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Botucatu, no município de São Manuel, Estado de São Paulo, Brasil. Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial forte; com exceção do atributo DCC que apresentou dependência moderada e do atributo MSC que não apresentou dependência espacial; os valores de umidade até 1,15 m apresentaram dependência espacial e valores de granulometria apresentaram dependência espacial variando de 1,35 m a 4,53 m; os valores de atributos químicos do solo nos períodos I e II apresentaram dependência espacial variando de 0,93 m a 10,52 m; os valores de atributos de produtividade de alface apresentaram alcance de dependência espacial de 0,41 m a 0,72 m; a krigagem mostrou-se um bom interpolador para a estimação de valores não amostrados; dos dados obtidos, apenas MF x MFC, MF x DCC e MFC x DCC apresentaram correlação; o mapa da aplicação de água

apresentou duas zonas distintas para o manejo da irrigação; a variabilidade espacial encontrada para a umidade influenciou no desenho do sistema de irrigação; considerando-se a necessidade da cultura em nutrientes, não foi possível estabelecer duas áreas distintas de aplicação dos elementos P (fósforo) e K (potássio) por ocasião da adubação de plantio; através dos mapas de produtividade de alface com os atributos MFC e DCC, foi difícil estabelecer áreas distintas de manejo para a produtividade de alface, com dados observados de apenas um ciclo cultural.

RATIONAL USE OF WATER IN LETTUCE CULTIVATED UNDER PROTECTED ENVIRONMENT CONSIDERING THE SPATIAL VARIABILITY. Botucatu, 2006. 128p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: IVANA FÚRIO BATISTA

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

SUMMARY

The objective of this work was to study the variability of some physical and chemical soil attributes and lettuce yield attributes (mass of total shoot fresh matter – MF; mass of commercial shoot fresh matter – MFC; mass of commercial shoot dry matter – MSC and commercial diameter of the head – DCC); offering subsidies to the mapping of the greenhouse in different areas of water and nutrients management, longing for a larger yield lettuce and the precision irrigation, with the optimization of the use of the water and nutrients. The experiment was carried out in a greenhouse with lettuce irrigated by drip irrigation and sampling grid with 152 points, at São Manuel Experimental Farm, Agronomic Sciences College, São Paulo State University, Campus of Botucatu, in São Manuel city, São Paulo State, Brazil. All of the studied attributes presented strong spatial dependence; except for the DCC attribute that presented moderate dependence and the MSC attribute that didn't present spatial dependence; the soil moisture values up to 1.15 m presented spatial dependence and granulometric values presented spatial dependence varying from 1.35 m to 4.53 m; the soil chemical attributes values in the I and II periods presented spatial dependence varying from 0.93 m to 10.52 m; the lettuce yield attributes values presented the range of spatial dependence of 0.41 m to 0.72 m; the krigagem was shown a good interpolador for the estimate of no sampling values; of the obtained data, just MF x MFC, MF x DCC and MFC x DCC presented correlation; the water application map presented two different areas for the irrigation management; the spatial variability found for soil moisture influenced the irrigation system

drawing; considering the crop necessity in nutrients, it wasn't possible to establish two different areas from application of the elements P (phosphorus) and K (potassium) for the plantation fertilization occasion; through the lettuce yield maps with the attributes MFC and DCC, it was difficult to establish different areas for lettuce yield management, with data observed in just one crop cycle.

Keywords: geostatistics, spatial dependence, drip irrigation, fertigation, soil fertility.

1 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das espécies de hortaliças folhosas mais conhecidas e o seu consumo na dieta brasileira é feito principalmente na forma de saladas cruas. De modo especial, a alface americana, antes consumida basicamente nos Estados Unidos, vem adquirindo uma importância econômica expressiva no Brasil, devido à expansão das redes de lanchonetes e restaurantes do tipo “fast food”, que apresentam uma preferência pela mesma, devido à facilidade de transporte e manuseio, maior durabilidade; além de características peculiares de consistência. Tal demanda é ainda mais significativa no verão, período do ano de maior dificuldade para sua produção, principalmente na Região Sudeste do Brasil, onde o verão caracteriza-se por temperaturas elevadas e chuvas excessivas.

Considerando o consumo significativo desta hortaliça, justifica-se o cultivo de alface em ambientes protegidos, como uma alternativa para os produtores controlarem as adversidades climáticas, reduzindo desta forma os riscos e alterando os padrões de sazonalidade, permitindo previsibilidade e constância na oferta da produção.

No contexto atual de desenvolvimento agrícola, o cultivo em ambiente protegido aliado à irrigação por gotejamento e fertirrigação tem permitido um aumento na produção, melhoria na qualidade dos produtos, produção na entressafra, otimização de pequenas áreas, além da racionalização do uso da água e nutrientes.

Porém, o cultivo protegido é um sistema de cultivo no qual o manejo de atributos físicos e químicos do solo, bem como o manejo da água, deve ser executado

adequadamente, pois, do contrário, problemas com salinização e distúrbios fisiológicos, poderão ocorrer nas plantas. Além disso, estudos comprovam que o cultivo em ambiente protegido quando comparado em relação ao campo, tem como característica o fato de realçar os efeitos de variações dos fatores climáticos, tais como umidade, evapotranspiração, etc. Assim, devido a existência da variabilidade espacial, em função da localização das plantas ao longo de uma estufa, estas estariam expostas a condições diferentes, o que levaria também a uma variabilidade na produção.

Nos últimos anos, a geoestatística efetivou-se no auxílio do melhor entendimento da variabilidade espacial de diversos parâmetros de interesse nas ciências agrárias, permitindo a interpretação de dados baseados na estrutura de sua variabilidade natural, considerando a dependência espacial no espaço a ser estudado.

Com o advento das técnicas de agricultura de precisão, observa-se um grande conjunto de práticas agrícolas altamente adaptadas às condições do local de cultivo e variabilidade das propriedades do solo, visando a racionalização do uso de insumos, a diminuição dos custos de produção, o aumento da produtividade e do retorno econômico, além da redução dos impactos ambientais.

É coerente também, quando se almeja a eficiência do uso da água, a descrição espacial dos atributos de solo e da cultura, importantes no manejo da irrigação, bem como a realização de subdivisões da área em zonas homogêneas quanto aos atributos de solo e da cultura, para posteriormente se definir um manejo de irrigação diferenciado para cada sub-região.

O presente trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade da umidade e de algumas propriedades físicas e químicas do solo e seus efeitos nos parâmetros de produtividade de alface; oferecendo desta forma subsídios ao mapeamento da estufa em diferentes zonas de manejo de água (irrigação) e nutrientes, detectando possíveis áreas consideradas ótimas ao desenvolvimento de alface, almejando uma maior produtividade de alface e a irrigação de precisão, com a otimização do uso da água e de nutrientes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura de alface

A alface (*Lactuca sativa* L.), pertencente à família *Asteraceae*, é uma planta originária de espécies silvestres ainda encontradas em regiões de clima temperado, no sul da Europa e na Ásia Ocidental. A planta é herbácea, delicada, com caule diminuto, ao qual se prendem as folhas. Estas são amplas e crescem em roseta, em volta do caule, podendo ser lisas ou crespas, formando ou não uma “cabeça”, com coloração em vários tons de verde ou roxa, conforme a cultivar (FILGUEIRA, 2002).

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma espécie mundialmente conhecida e considerada a mais importante hortaliça folhosa. É consumida na dieta brasileira, principalmente na forma de saladas cruas, sendo considerada uma planta de propriedades tranqüilizantes, com alto conteúdo de vitaminas A, B e C, além de cálcio (Ca), fósforo (P), potássio (K) e outros minerais (MALLAR, 1978 e MAROTO, 1992, citados por FERNANDES e MARTINS, 1999).

A alface é consumida em todo o Brasil e é considerada como uma das principais espécies, tanto do ponto de vista econômico, ocupando a sexta posição dentro das hortaliças, como de consumo, pois, em termos de volume de comercialização, ocupa a oitava posição (NADAL et al., 1986, citados por GOTO, 1998). No Brasil, a alface é a hortaliça folhosa de maior aceitação pelo consumidor (YURI et al., 2002).

IBGE (1996) descreveu que a produção de alface no Brasil, incluindo proprietários, arrendatários, parceiros e ocupantes foi de aproximadamente 312.000 toneladas no ano de 1996.

Observou-se que o volume comercializado de alface no CEAGESP (Centro de Entrepasto e Armazenamento Geral do Estado de São Paulo) no ano de 2003 foi de 26.549 toneladas, sendo que foi observado um aumento do volume comercializado de alface crespa entre os anos de 2002 e 2003, passando de 12.072 para 12.504 toneladas (ALFACE, 2004).

Ao comparar-se os dados da cultura de alface, observou-se que os mesmos registraram uma expansão, tanto da área cultivada, quanto da produção colhida no Estado de São Paulo entre os anos de 2003 e 2004, passando respectivamente de 6.580 para 7.538 ha e de 4.792 para aproximadamente 5.063 mil engradados de 9 dúzias (ESTATÍSTICAS, 2004, 2005).

Filgueira (2002) agrupou as cultivares comercialmente utilizadas, considerando-se as características das folhas, bem como o fato de estas reunirem ou não, formando uma cabeça repolhuda, subdividindo-as em seis grupos: Repolhuda-Manteiga, Repolhuda-Crespa (Americana), Solta-Lisa, Solta-Crespa, Mimosa e Romana. O tipo Americana apresenta as folhas caracteristicamente crespas, bem consistentes, com nervuras destacadas, formando uma cabeça compacta. É uma alface altamente resistente ao transporte e recomendada para o preparo de sanduíches, uma vez que resiste melhor ao contacto com alimentos quentes.

A alface americana, também denominada “Crisphead Lettuce”, vem adquirindo importância no Brasil, em virtude da expansão das redes de “fast-food” (ALVARENGA et al., 2000; MADEIRA et al., 2000).

Dentre as cultivares de alface do grupo americana, destaca-se a cultivar Lucy Brown. Yuri e Souza (2000) conduziram um experimento no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, a uma altitude de 1050 m, em solo classificado como Latossolo Vermelho-Escuro, com a finalidade de avaliar o comportamento de várias cultivares de alface do grupo americana em duas épocas de cultivo (outubro e março). Em ambas as épocas de plantio, a cultivar Lucy Brown obteve bom desempenho. Ainda Yuri et al. (2002) conduziram experimentos similares em estufas (túnel alto) no município de Boa Esperança

(MG), onde na primeira época (outubro), sobressaiu-se a cultivar Lucy Brown, com a produção total de 58,3 t ha⁻¹, com peso médio por planta de 972 g.

Junqueira et al. (2000), ao analisarem a origem, volume e preço de alface comercializada no CEASA/DF nos últimos cinco anos, observaram que devido ao aumento da produção em estufas, bem como da adoção da irrigação localizada, tem-se verificado o aumento da oferta nos meses secos do ano, diminuindo o preço médio mensal do produto, principalmente nos meses de junho, julho, agosto e setembro. Filgueira (2002) mencionou que no campo, o ciclo de alface varia de 60 a 80 dias, da semeadura à colheita, sendo que, em estufa, o ciclo é ainda mais reduzido, de 45-50 dias.

Neste sentido, o cultivo de alface em ambientes protegidos tem se destacado como uma alternativa para os agricultores não somente controlarem as adversidades climáticas, mas também regularizar a oferta da produção.

2.2 Cultivo em ambiente protegido

Wittwer e Castilla, 1995, citados por Della Vecchia e Koch (1999) mencionam que a expressão cultivo protegido tem sido utilizada, na literatura internacional, com um significado bastante amplo. Ela engloba um conjunto de práticas e tecnologias (quebra-ventos, mulches de solo, casas de vegetação, túneis altos, túneis baixos, irrigação, etc.), utilizados pelos produtores para um cultivo mais seguro e protegido de suas lavouras.

Desde o começo dos anos 50, o sucesso da agricultura está relacionado com a utilização dos materiais plásticos, apesar dos mesmos serem corretamente empregados somente nos últimos dez anos. Em 1951 surgiu no Japão, o primeiro filme de PVC para emprego agrícola (Sganzerla, 1997).

No Brasil, Goto (1997) relatou que as primeiras citações da utilização do plástico no cultivo de hortaliças são referentes aos trabalhos pioneiros realizados por Kimoto e Conceição, em 1967, onde os autores demonstraram a eficiência do plástico na cultura do morango, cobrindo os canteiros (mulching). Já com relação à utilização do plástico em estruturas, com finalidade de proteção contra adversidades climáticas, há os trabalhos de Martins, em 1983, realizados em Manaus (AM), no final da década de 70, que provaram a eficiência da utilização desse material na produção de hortaliças. Ressaltou também no Estado

de São Paulo, na década de 80, a utilização da técnica de cultivo de hortaliças em ambiente protegido por produtores cooperados da extinta Cooperativa Agrícola de Cotia na região do cinturão verde da cidade de São Paulo.

Sganzerla (1997) relatou que no Brasil, na década de 80 a 90, objetivando a difusão da plasticultura, houve uma iniciativa nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo através do desenvolvimento do Projeto São Tomé, em meados da década de 80. Nesse projeto, os resultados obtidos com as culturas desenvolvidas dentro das estufas foram de extrema surpresa e incredibilidade. A estufa foi uma agradável novidade que apareceu e atraiu a atenção de muitas pessoas até mesmo ligadas a outras atividades.

Della Vecchia e Koch (1999) relataram que no Brasil, observou-se também um rápido crescimento desse cultivo, e no decorrer da década, com o objetivo de difusão do cultivo em ambiente protegido, houve a realização do I Fórum Internacional de Cultivo Protegido em Botucatu – SP, em 1997; além da instalação do Comitê Brasileiro de Plasticultura, em 1999. Ainda, Della Vecchia e Koch (1999) afirmaram que estimativas da área de produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil, para o ano de 1998, não corroboram com as expectativas de crescimento do início da década. De acordo com levantamento efetuado em 1999, cerca de 1.390 ha foram cultivados com hortaliças nesse sistema, no Brasil, no ano de 1998. São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul foram os estados com maior área de produção. Dentre as hortaliças mais utilizadas destacaram-se o pimentão, a alface, o tomate e o pepino.

Também Goto (1997) apontou alguns fatores que nesta época foram responsáveis pelo baixo crescimento do cultivo protegido no Brasil: falta de informações adequadamente testadas e geradas pela pesquisa, impossibilidade por parte dos produtores de executarem o manejo adequado, devido a tamanha complexidade do cultivo protegido, entre outros. Porém, concluiu que existe grande perspectiva para os cultivos protegidos, pois esta é uma tecnologia bastante utilizada em algumas regiões e os produtores que estão desde o início ou que estão há pelo menos cinco anos na atividade não vão retroceder e tão pouco pretendem voltar a cultivar somente em campo aberto. Considerou ainda a existência de uma grande perspectiva de expansão desta tecnologia, que é capaz de utilizar pequenas áreas e produzir pelo menos uma vez e meia ou o dobro do que se consegue produzir em campo aberto, desde

que se saiba manejar a estrutura e o ambiente em questão, respeitando a espécie a ser instalada.

Em se tratando da cultura de alface, Goto et al. (1997) ressaltaram que o sistema de produção de alface vem passando nos últimos cinco anos por expressivas mudanças; a par do cultivo tradicional em campo aberto, vem crescendo o cultivo em ambiente protegido. Porém, devido às características peculiares do ambiente protegido, há necessidade de obtenção de informações específicas da cultura de alface desenvolvida nesse ambiente.

2.3 A racionalização do uso da água e nutrientes na cultura de alface

A racionalização do uso da água tem sido o alvo de muitas investigações na agricultura, através de sistemas que possibilitem uma maior eficiência, procurando explorar os recursos naturais de uma forma mais direcionada e consciente.

Há estimativas de que até o ano 2025, o planeta terá dobrado o número de habitantes, porém, ao contrário do crescimento populacional, os recursos hídricos são finitos e a expansão de terras cultivadas limitadas. Com o objetivo de aumentar a produção de alimentos, caminharemos para uma agricultura intensiva, na qual o melhoramento do manejo de fertilizantes agrícolas, dos métodos de irrigação e da eficiência do uso da água serão particularmente importantes para o aumento da produção de alimentos, bem como para a proteção do ambiente e da saúde pública (PAPADOPOULOS, 1999).

Atualmente, a água não é utilizada de forma tecnológica e com adequada eficiência para irrigação. Nos países em desenvolvimento, a média observada de uso da água para irrigação, situa-se acima de 13 mil $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, bem superior ao valor da ordem de 7.500 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, obtido através de manejo adequado nas mesmas regiões. As eficiências na condução da água, na sua distribuição pelos sistemas e na aplicação aos cultivos são baixas, motivo que leva a indicar um esforço na otimização do uso da água (CHRISTOFIDIS, 2001). A produção em estufas tem uma eficiência mais alta de uso da água, que talvez seja a razão para a rápida expansão de áreas de cultivo protegido em regiões semi-áridas (STANGHELLINI, 2000).

Portanto, somente o intenso desenvolvimento da agricultura, aliado à modernas tecnologias de produção poderá atender o aumento demográfico.

Procurando minimizar os riscos e solucionar problemas de sazonalidade da produção agrícola, observa-se um crescente aumento por parte dos produtores da utilização do cultivo em ambiente protegido.

A irrigação, ou seja, o fornecimento artificial de água para as plantas tem evoluído constantemente. Segundo Christofidis (2001), a irrigação tem papel fundamental na revolução verde e na segurança alimentar mundial e os produtores buscam através desta prática a obtenção de: maior produtividade, segurança de produção, antecipação de safras e obtenção de melhoria de frutos, que resultam num maior retorno financeiro ao irrigante.

Goto (1998) ressaltou que em todas as culturas, o manejo adequado da irrigação, objetivando a maximização de lucros e utilização racional da água, torna-se cada vez mais necessário, e de modo peculiar; em sistemas de produção em cultivo protegido isto é mais relevante, pois a aplicação excessiva de água provocará um ambiente propício para o aparecimento de doenças.

Existem diversos sistemas de irrigação, cada qual com características diferenciadas, apresentando vantagens e limitações em função de fatores como disponibilidade e qualidade de recursos hídricos, características da área e também da cultura.

Dependendo da forma com que a água é aplicada às plantas, os sistemas podem ser agrupados em superficiais, subsuperficiais, aspersão e microirrigação. Microirrigação compreende sistemas como gotejamento, microaspersão, entre outros, nos quais a água é, em geral, aplicada ao solo, próximo à planta, em baixo volume e alta frequência (MAROUELLI e SILVA, 1998). A irrigação por gotejamento surgiu em Israel, com o objetivo de contornar os problemas gerados pela escassez de recursos hídricos (MANFRINATO, 1985).

Carrijo et al. (1999) relataram que os métodos de irrigação passíveis de ser utilizados sob estufas são: sulcos, aspersão e sistemas localizados. Ressaltaram também que o gotejamento é a irrigação mais conhecida, recomendada e utilizada para o cultivo protegido, pois com ele pode-se obter economia de custeio da irrigação e de mão-de-obra, alta economia e eficiência de aplicação da água no solo, além de boa uniformidade de aplicação dos adubos minerais através da água de irrigação.

Atualmente, no Brasil, já não há mais dúvidas de que o gotejamento possa ser uma opção vantajosa, em termos agronômicos e econômicos, de irrigar hortaliças em ambientes protegidos.

Dentre as hortaliças, a alface é considerada uma das mais exigentes em água e uma das que responde com maior intensidade aos efeitos oriundos da aplicação, ou não, desse fator de produção (PEREIRA e LEAL, 1989, citados por LEITE JÚNIOR, 2000).

Ceretti et al., 1988, citados por Andrade Júnior (1994), observaram a influência de diferentes níveis de água no solo sobre a produção e qualidade de plantas em cultura de alface e constataram que o aumento no teor de água no solo proporcionou incremento na produção de “cabeças” comerciáveis, que variaram de 18,8 a 50,9 t ha⁻¹.

Filgueira (2002) salientou que devido ao fato da alface ser uma cultura altamente exigente em água, as irrigações devem ser freqüentes e abundantes, devido à ampla área foliar e à evapotranspiração intensiva, bem como ao sistema radicular delicado e superficial e à elevada capacidade de produção. Experimentalmente, demonstra-se que a produtividade, o peso unitário da planta e a qualidade das folhas aumentam, linearmente, com a quantidade de água aplicada.

Portanto, em cultura de alface, paralelamente à utilização do sistema de produção em cultivo protegido, justifica-se a utilização do sistema de irrigação por gotejamento.

Marouelli e Silva (1998) salientaram que o sistema por gotejamento é o sistema preferido em cultivo protegido de hortaliças, pelo fato de possibilitar total automação do sistema, controle eficiente da água e uso intensivo da fertirrigação.

De um modo geral, a fertirrigação consiste na fertilização combinada com a irrigação, isto é, os adubos minerais ou resíduos orgânicos injetados na água de irrigação, para formar “água de irrigação enriquecida” (PIZARRO CABELLO, 1996).

A fertirrigação é efetuada pela adição de pequenas doses de fertilizantes durante o período de crescimento das plantas, sem causar-lhes problemas de deficiência ou toxidez de nutrientes. A aplicação em pequenas quantidades evita a lavagem dos fertilizantes, que é comum na adubação convencional, além de manter o nível ideal de nutrientes no solo e permitir o melhor aproveitamento do adubo que, dissolvido na água, será facilmente absorvido pelas plantas (SANTOS e PINTO, 2001). Segundo Filgueira (2002),

devido ao ciclo curto da alface, e ao sistema radicular superficial, os adubos minerais utilizados devem fornecer os nutrientes em forma prontamente assimilável.

Portanto, o sistema de irrigação por gotejamento, proporciona não somente a racionalização do uso da água, como de produtos químicos, que no caso dos fertilizantes aplicados via fertirrigação é um diferencial significativo em termos de produtividade e qualidade dos produtos colhidos.

Kalil (1992) realizou um estudo comparativo entre a adubação nitrogenada via fertirrigação por gotejamento e a aplicação convencional na produção de alface. Foi verificada uma produtividade superior em todos os níveis de adubação nitrogenada, testados via fertirrigação. Observou uma maior eficiência na absorção de nitrogênio pelas plantas de alface, pois as mesmas apresentaram maior número de folhas, maior altura, maior diâmetro de cabeça e de caule, além de maior produção de matéria seca. Segundo o mesmo autor, a produtividade obtida pela cultura no sistema convencional com 60 kg ha^{-1} de N, foi atingida com apenas 12 kg ha^{-1} de N no sistema de fertirrigação, representando uma economia de 80% de nitrogênio aplicado. Utilizando-se a quantidade de 60 kg ha^{-1} de N em cobertura, via fertirrigação, obteve-se uma produção de $5,57 \text{ t ha}^{-1}$ a mais que no sistema convencional, ou seja, um acréscimo de 16,19% na produtividade.

Andriolo (2000) mencionou que, com os avanços recentes da tecnologia, a maior parte dos fatores de produção pode ser manejados ou controlados e que com isso, as possibilidades de manejo das culturas em ambiente protegido são muito maiores. Afirmou também, que o manejo correto da água e da nutrição mineral é essencial para não limitar a fotossíntese e que a presença de elementos minerais é indispensável para a elaboração da matéria seca final; não bastando apenas a disponibilidade destes elementos, mas também a concentração em torno das raízes, de modo a não comprometer a disponibilidade dos nutrientes.

Nakagawa (2000) destacou a importância do manejo do solo em ambiente protegido, uma vez que neste sistema de cultivo fechado, onde a água é controladamente oferecida, poderão ocorrer problemas com salinização e distúrbios fisiológicos, ocasionando a queda da qualidade e produtividade, o que na maioria das vezes é a causa principal do abandono do cultivo em ambiente protegido.

Especificamente, na cultura de alface, Gervásio et al. (2000) ao conduzirem um experimento em casa de vegetação, com o objetivo de verificar o efeito de diferentes sais da água de irrigação na produção de alface americana, bem como verificar a sua acumulação no extrato saturado durante um ciclo de cultivo; observaram que à medida que se aumenta os níveis de salinidade da água de irrigação, o consumo de água pelas plantas diminui durante o ciclo de produção; além de que, o aumento da salinidade proporcionou decréscimos em todas as variáveis vegetativas analisadas. Observaram também que a máxima produção comercial de alface americana foi obtida quando a condutividade elétrica do extrato saturado atingiu o valor limite de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$ e que para cada aumento unitário desta condutividade além do limite citado, houve uma redução de 17% na sua produção comercial. Entretanto Viana et al. (2001) ao conduzirem um experimento em ambiente protegido, com o objetivo de estudar o efeito da salinidade da água de irrigação sobre a produção de alface cultivar 'Elba', concluíram também que o rendimento final da alface cultivar 'Elba' decresceu linearmente com o aumento da salinidade, com redução de 9% por incremento unitário de condutividade elétrica da água de irrigação.

Também Blanco e Folegatti (2001) mencionaram que o excesso de fertilizantes e o manejo inadequado da irrigação nos cultivos protegidos, têm levado à salinização dos solos, implicando na redução de produtividade das culturas. Nesse sentido, ao desenvolverem um trabalho objetivando avaliar diferentes formas de lavagem e métodos de aplicação na recuperação de um solo salinizado em ambiente protegido, os autores concluíram que a aplicação por gotejamento foi mais eficiente na lixiviação dos sais acumulados no solo.

Testezlaf (2002) mencionou que as plantas dentro de ambientes fechados beneficiam-se das condições ideais que este ambiente oferece, para ter um melhor desenvolvimento e maior produção. Com isso, a aplicação de água e fertilizantes torna-se um fator determinante para que o produtor obtenha sucesso em seu empreendimento. Também Reis (2002) afirmou que pode-se economizar insumos como fertilizantes, água, energia e agrotóxicos, manejando adequadamente o ambiente protegido e as plantas.

Neste contexto, o manejo da água e da disponibilidade de nutrientes em ambiente protegido é de fundamental importância para a obtenção de altas produtividades de alface, produtos com excelente qualidade, além da redução de custos de produção.

Neste mesmo contexto é interessante investigar, mesmo dentro de um mesmo ambiente, a heterogeneidade da área visando ao manejo mais adequado, tratando distintamente as diferenças ambientais.

2.4 Geoestatística e variabilidade espacial

Ao considerarmos uma determinada propriedade que apresente uma variação de um local para outro, com um certo grau de organização ou continuidade, caracterizado por dependência espacial, pode-se utilizar métodos tradicionais da estatística não espacial associados aos métodos geoestatísticos ou espaciais.

A preocupação com a variabilidade espacial do solo pode ser encontrada em trabalhos da primeira metade do século XX, mas só recentemente foi possível a incorporação da geoestatística na descrição da variabilidade de forma coerente, tanto na teoria, como na prática.

O termo “geoestatística” acha-se consagrado como um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que tem um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as totalmente determinísticas (LANDIM, 1998).

Também Landim (1998) atribuiu a origem da geoestatística à África do Sul, onde pesquisadores, destacando entre eles o engenheiro de minas D. G. Krige e o estatístico H.S. Sichel, desenvolveram empiricamente, uma técnica própria de estimação que, posteriormente, recebeu um tratamento formal levado a cabo pelo grupo liderado por Matheron, no Centre de Morphologie Mathematique, em Fontainebleau, França, sendo que os trabalhos iniciais datam de 1962 e 1963.

Matheron (1963) concretizou os fundamentos da geoestatística, desenvolvendo a Teoria das Variáveis Regionalizadas. Definiu a variável regionalizada como sendo uma função espacial numérica, que apresenta uma variação de um local para outro, com uma continuidade aparente, caracterizando uma certa dependência espacial.

Para a aplicação da geoestatística, é de fundamental importância o estudo da função $\gamma(h)$, conhecida como variograma.

2.4.1 Variograma

A função da variância espacial permite verificar a dependência espacial através da medida da variância das diferenças dos valores amostrais entre todos os pontos, separados por uma distância h . A função da variância espacial pode ser, em termos práticos, estimada por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (01)$$

onde $N(h)$ é o número de pares de valores amostrados, $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$, separados pelo vetor h (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978). O gráfico $\gamma^*(h)$ versus h é chamado de variograma experimental e expressa a variabilidade espacial entre as amostras, sendo uma função que só depende do vetor h e, portanto, depende de ambos, magnitude e direção de h .

Ocorrem três tipos de variogramas: observado ou experimental (obtido a partir das amostras colhidas no campo), verdadeiro (real, mas desconhecido) e teórico (de referência, utilizado para o ajuste do modelo).

A representação esquemática do variograma, com seus respectivos parâmetros (C_0 , $C_0 + C_1$ e a) é apresentada na Figura 1, conforme Takeda (2000):

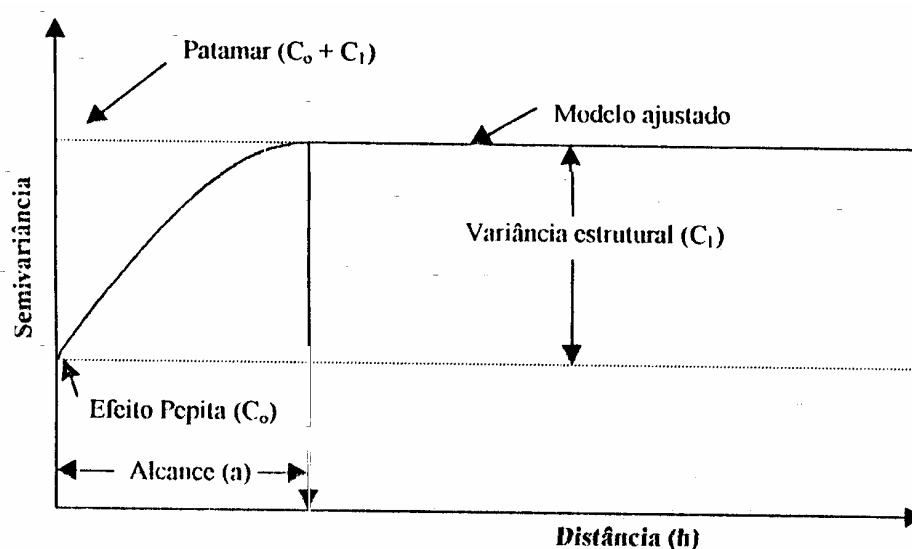


Figura 1. Figura esquemática do variograma.
Fonte: Takeda (2000).

A Figura 1 mostra um variograma com características bem próximas do ideal, o seu comportamento representa o que, intuitivamente, se deve esperar de dados de campo.

As características do variograma, bem próximas do ideal, serão comentadas a seguir:

- Efeito Pepita (C_0):

Espera-se que as diferenças $[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]$ decresçam assim que h , a magnitude de separação entre elas, decresça. É esperado também que localizações mais próximas sejam mais parecidas do que observações separadas por distâncias maiores. Entretanto, na prática, quando h aproxima de 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado de Efeito Pepita (“nugget effect”) e que recebe o símbolo C_0 . Este valor revela a descontinuidade do variograma próximo à origem em distâncias menores do que a menor distância de amostragem; podendo esta descontinuidade ser devida à variabilidade em escalas menores do que à distância de amostragem ou mesmo a erros de medição (DELHOMME, 1976; citados por VIEIRA et al., 1983).

Segundo Valente (1989), o Efeito Pepita reflete microestruturas não captadas pela menor escala de amostragem, erros de amostragem, de análises laboratoriais, entre outros.

O Efeito Pepita é, portanto, um parâmetro importante do variograma, indicando a variabilidade não explicada ao se considerar a distância de amostragem. Quando o Efeito Pepita (C_0) for aproximadamente igual ao Patamar ($C_0 + C_1$), tem-se o Efeito Pepita Puro, o que demonstra uma ausência total de dependência espacial para a escala pesquisada (TRANGMAR et al., 1985).

Uma vez detectada que a amostra não recebe a influência espacial, o método estatístico aplicável é o da estatística não espacial, visto que ocorre uma distribuição espacial totalmente aleatória (SILVA et al., 1989, citados por VIEIRA, 1995).

- Patamar ($C_0 + C_1$):

À medida que h aumenta, $\gamma^*(h)$ também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza. Este valor no qual $\gamma^*(h)$ se estabiliza chama-se patamar ("sill") e é aproximadamente igual à variância dos dados (TAKEDA, 2000; VIEIRA, 1995). Segundo Trangmar et al. (1985), o patamar corresponde à variância da amostra (s^2) para dados estacionários. O patamar é, portanto, o ponto onde toda variância da amostra é de influência aleatória.

- Alcance (a):

A distância na qual $\gamma^*(h)$ atinge o patamar é chamada de alcance ("range"), recebe o símbolo de 'a' e é a distância limite de dependência espacial.

Trangmar et al. (1985) afirmaram que amostras separadas por distâncias mais próximas ao alcance são espacialmente relacionadas e que aquelas separadas por distâncias maiores do que o alcance, não são espacialmente relacionadas porque a variância iguala a s^2 , implicando variação aleatória; sendo, portanto independentes entre si. Portanto, o valor de $h = a$, representa a máxima distância de separação, nas quais os pares de valores observados mantêm-se correlacionados. Guerra (1988) menciona que o alcance corresponde ao conceito da zona de influência ou de dependência espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes.

Cambardella et al. (1994) sugeriram os seguintes intervalos para avaliar a % da variância espacial: $\leq 25\%$ - forte dependência espacial ou variável espacial fortemente dependente; entre 25% e 75% - moderada dependência espacial ou variável espacial moderadamente dependente e $\geq 75\%$ - fraca dependência espacial ou variável espacial fracamente dependente.

Porém, o programa geoestatístico GS + (GS +, 2000) propõe a seguinte relação:

$$\% \text{ variância estrutural} = \frac{C}{(C + Co)} \cdot 100 \quad (02)$$

Zimback (2001) adaptou os limites propostos por Cambardella et al. (1994), afirmando que a dependência espacial para valores $\leq 25\%$ é considerada fraca; entre 25% e 75%; moderada e $\geq 75\%$ dependência forte.

Landim (1998) afirmou que num estudo geoestatístico, a parte mais importante refere-se à determinação do variograma. Segundo o mesmo autor, os variogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostram o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, a anisotropia (quando os variogramas se mostram diferentes para diferentes direções do terreno) e também a continuidade da característica estudada no terreno, expressa pela forma do variograma.

Vários trabalhos de estudo da água no solo têm utilizado a função variograma para verificar a dependência espacial entre as variáveis relacionadas ao comportamento da água, como: Brooker, 2001; Brooker e Winchester, 1995; Folegatti, 1996; Netto et al., 1999; Sales, 1992; Sousa e Pereira, 1999; Utset e Castellanos, 1999; entre outros. Outros autores também utilizaram o variograma para o estudo da variabilidade, dependência espacial e representação das propriedades físicas e químicas dos solos, como: Carvalho et al., 1998; Cavalcante, 1999 e Souza et al., 1997. Especificamente, para os atributos químicos dos solos, outros autores como: Cahn et al., 1994; Davis et al., 1995; Marx et al., 1988; Oliveira et al., 1999 e para propriedades físicas dos solos: Horn et al., 1994; Puentes et al., 1992 e Vieira et al., 1992; estudaram a variabilidade espacial dos atributos através de variogramas.

2.4.2 Ajuste do variograma

Após a construção do variograma, o passo seguinte é ajustá-lo a um modelo matemático. Para tanto, deve-se considerar alguns modelos: linear, esférico, exponencial e gaussiano (VIEIRA et al., 1983).

Vieira et al. 1981, citados por Vieira et al., 1983 mencionou que o ajuste do modelo teórico ao variograma experimental é um dos mais importantes aspectos da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambigüidade nas suas aplicações, visto que todos os cálculos dependem do valor do variograma para distâncias especificadas.

Nesse sentido, McBratney e Webster (1983) ressaltaram a importância do conhecimento do variograma para a propriedade de interesse, que é usada para calcular as variâncias na vizinhança de cada ponto de observação, de maneira que o variograma deve ser conhecido antes que uma ótima intensidade de amostragem possa ser escolhida. Os autores comentaram que em estudos regionais de solo para determinar os valores médios de propriedades específicas de amostras de solos, a estimativa do número de observações necessárias tem normalmente sido baseada em teorias de amostragem clássica, sem considerar a dependência espacial nos dados. Como resultado, eles têm sido excessivamente exagerados e, freqüentemente, desencorajado os investigadores de prosseguirem seus objetivos. Para este propósito, os autores demonstraram um método para determinar o tamanho da amostra, isto é, o número de observações necessárias, levando em conta a dependência espacial.

Com o mesmo propósito de se estimar o número de amostras necessárias para a obtenção do variograma, Webster e Oliver (1992) consideraram que quando o variograma é feito para situações típicas em solo e observações ambientais, parece que variogramas computados com menos do que 50 dados são de pequeno valor e que no mínimo 100 dados são necessários. Experimentos conduzidos pelos autores sugerem que para variável isotrópica normalmente distribuída, um variograma computado de uma amostra de 150 dados pode muitas vezes ser satisfatório, enquanto um derivado de 225 dados terá maior confiabilidade.

Zhang et al. (1994) desenvolveram um estudo em que ótimos tamanhos de amostragem são relacionados à heterogeneidade de índices e variogramas. Ao procurarem avaliar o efeito da heterogeneidade dos dados, seus efeitos na forma da amostra e num ótimo tamanho de amostragem, os autores relatam que um variograma com um menor alcance efetivo, tem um efeito mais profundo num ótimo tamanho de amostragem. Comparado com o tamanho ótimo de amostragem, o custo relativo de diferentes tamanhos de amostragem, mostrou ser uma função do raio de uma área de amostragem básica e do alcance do variograma. Já para um campo não isotrópico, o ótimo tamanho de amostragem depende da grande heterogeneidade de índices nas direções X e Y, isto é, depende da direção da ampla heterogeneidade nas propriedades no campo. Por considerar a variabilidade espacial da heterogeneidade dos solos, estas relações podem providenciar diretrizes para a eficiência de amostragem em termos de custo e precisão.

Portanto, o ajuste do variograma, com a escolha de valores de alcances distintos, podem influenciar não somente na intensidade de amostragem, obtendo uma maior eficiência, como também no custo da amostragem, uma vez que em um mesmo tamanho de área a ser amostrada, para variáveis isotrópicas, alcances menores requerem uma intensidade maior de amostragem, envolvendo um maior dispêndio de mão-de-obra, tempo e capital.

Torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de trabalhos no sentido de definir o número de observações necessárias para uma ótima amostragem e também para assegurar a confiabilidade quanto a melhor escolha de um modelo teórico de variograma e o seu posterior ajuste ao variograma experimental.

Ribeiro Júnior (1995) relatou que o método de ajuste dos modelos de variogramas mais tradicional é o chamado “ajuste a sentimento”. Uma vez obtido o variograma experimental, este serve de indicação visual sobre a forma e os parâmetros do modelo a serem adotados; desse modo com a apresentação e discussão de métodos de ajuste mais disponíveis, a tendência é que o método de “ajuste a sentimento” seja cada vez mais utilizado, onde as variâncias geradas pelas menores distâncias têm maior peso sobre o ajuste.

Os modelos de variogramas pressupõem a existência de um valor inicial (efeito pepita), de um valor em torno do qual o variograma se estabiliza (patamar), exceto no caso do modelo linear sem patamar e de um valor de distância (h) para o qual ocorre estabilização (alcance). Caso o modelo linear sem patamar se ajuste ao variograma, pode-se

inferir que os dados não apresentam estacionariedade de segunda ordem, sendo válida a hipótese intrínseca, desde que o 1º critério seja atendido. De uma forma geral, a krigagem é robusta em relação ao modelo de variograma, ou seja, diferentes modelos ajustados terminarão por gerar krigagens semelhantes.

O ajuste de modelos matemáticos pelo Método dos Quadrados Mínimos Ordinários é desaconselhável, quando este dá igual importância a todos os pontos (Journel e Huijbregts, 1978). No entanto, cada ponto no variograma pode ser gerado a partir de um número diferente de pares, quando se trata de dados originais obtidos a partir de amostragem segundo uma malha, o que associa a cada um deles, diferentes níveis de confiabilidade. Assim, muitos autores argumentam a favor do ajuste segundo um critério visual (Folegatti, 1996).

Entretanto, Van Groenigen (2000), por notar que a variação na krigagem é consideravelmente influenciada pelos parâmetros do variograma, investigou a influência destes parâmetros na otimização de esquemas de amostragem para mapeamento por krigagem. O autor observou que um variograma gaussiano produziu um esquema diferente de amostragem do que um variograma exponencial com o mesmo efeito pepita, patamar e alcance efetivo. Observou também que variogramas exponencial, esférico e linear sem patamar resultaram em irregulares esquemas de amostragem similares. Um alcance muito pequeno resultou em esquemas de amostragem irregulares, com observações separadas por distâncias maiores do que duas vezes o alcance. Já para o variograma esférico, a magnitude do relativo efeito pepita não afetou os esquemas de amostragem, exceto para altos valores.

De acordo com Goovaerts (1999), a descrição de modelos espaciais é raramente um objetivo por si só. O autor afirma que primeiramente deseja-se detectar a dependência espacial, para posteriormente prever propriedades de solo para locais não amostrados. Um passo fundamental entre descrição e estimação é a modelagem da distribuição espacial dos valores do atributo, mas, segundo o autor, a maneira na qual modelos permissíveis são escolhidos e seus parâmetros (alcance, patamar) são estimados, ainda apresenta controvérsias. Vários métodos têm sido propostos, variando de procedimentos totalmente aleatórios, que envolvem uma escolha automática e ajuste do modelo por aproximações visuais, nas quais o modelo é selecionado assim que o ajuste pareça graficamente satisfatório. Afirma também que, a utilização de critérios estatísticos para reduzir

a modelagem do variograma a um exercício de ajuste de uma curva a valores experimentais, é restritivo demais. Concluiu que o objetivo da análise estrutural deve ser a construção de um modelo permissível que capture a maior parte das características do atributo em estudo.

É importante salientar que nem sempre os variogramas apresentam os valores $C_0 + C_1$, C_0 ou 'a'. Porém, o conhecimento desses valores nos variograma são fundamentais para a confecção de mapas contínuos pela interpolação pelo método da krigagem, o que permite estimar valores da propriedade em questão em locais não amostrados.

2.4.3 Krigagem

Através da análise do variograma, se for verificada a dependência espacial, poderá estimar-se valores utilizando o procedimento de interpolação conhecido como krigagem, em qualquer posição do campo em estudo, expressando-se os resultados em forma de mapas de isolinhas e mapas de superfícies.

Vieira et al. (1983) mostraram que supondo que se queira estimar valores z^* para todas as localizações x_0 onde se têm valores não medidos, a estimativa de um ponto qualquer x_0 , pertencente ao espaço amostral, é dada pelo processo de krigagem, definido por:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (03)$$

onde: $Z^*(x_0)$ é o valor estimado no ponto x_0 ; N é o número de valores medidos, $Z(x_i)$, envolvidos na estimativa; λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $Z(x_i)$.

No método da krigagem, os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no variograma. O que torna a krigagem um ótimo interpolador, então, é a maneira como os pesos são distribuídos, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA et al., 1983).

Conforme descrito por Landim (1998), krigagem, do francês “Krigeage” e do inglês “kriging”, é um termo cunhado pela escola francesa de geoestatística em homenagem ao sul-africano e pioneiro na aplicação de técnicas estatísticas em avaliação

mineira, D. G. Krige. Afirma que é um processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo variograma. A krigagem pode ser usada para: previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico, serve para o cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico; além de estimação da tendência (“drift”), de modo similar à análise de superfícies de tendência. Em todas essas situações, o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos à sua disposição. O autor também menciona que a krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, ou uma área ou um volume. Como o variograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos serão diferentes de acordo com seu arranjo geográfico. A krigagem é descrita como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estudada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. As formas mais usuais são conhecidas como krigagem simples, ordinária, universal e intrínseca. Já krigagens não-lineares são regressões lineares de alguma transformação não-linear apropriada aos dados originais, e incluem krigagem lognormal, multigaussiana, indicativa, probabilística e disjuntiva.

Deutsch e Journel (1992), citados por Van Groenigen (2000), mencionaram que a krigagem ordinária é ainda o método de interpolação mais largamente usado em geoestatística.

Myers (1994) ao realizar uma revisão sobre interpoladores para dados espaciais, relatou que uma das distinções entre a krigagem e outros interpoladores é a incorporação do suporte das amostras e estimação explícita de funções lineares, tais como integrais espaciais.

Para a comparação dos métodos de interpolação pode ser utilizado o critério do coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados obtidos pela Validação Cruzada (“cross-validation”), proposto por Leenaers et al. (1990).

Como o método de ajuste dos modelos de variogramas mais tradicional é o chamado “ajuste a sentimento” (RIBEIRO JÚNIOR, 1995), é necessário que se tenha uma maneira para checar se o modelo ajustado é ou não satisfatório.

Davis (1987) relata que a validação cruzada é uma útil ferramenta exploratória e que a validação cruzada é usada melhor como técnica exploratória, uma vez que ela conduz o usuário a reexaminar e reformular modelos mais adequados com os dados em mãos.

Segundo Myers (1997), a técnica de validação cruzada é bastante simples, pois se remove um dado do conjunto de dados amostrais e, usando-se um estimador e função ponderada relacionada com a distância, estima-se o valor retirado, utilizando-se as amostras remanescentes. Tem-se, portanto, dois valores para o mesmo ponto, o real e o estimado. O erro da estimação pode ser calculado pela diferença entre o valor real e o estimado, sendo repetido para cada local amostrado.

Isaaks e Srivastava (1989) ressaltaram que a estimação do valor depende do modelo variográfico escolhido, ou seja, aquele que teve o melhor ajuste.

É necessário, portanto, validar o plano de krigagem antes de usá-la para a construção de mapas.

2.4.4 Estudos da variabilidade espacial em pesquisa agrônômica do sistema água-solo-planta

A partir dos estudos em mineração, a geoestatística está sendo aplicada à várias áreas da pesquisa agrônômica, principalmente relacionadas a atributos físicos e químicos do solo, bem como variáveis físico-hídricas, além de atributos que direta ou indiretamente são responsáveis pela produção agrícola.

No Brasil, as primeiras publicações datam dos anos 80, como Valente, 1982, sendo que inicialmente, as aplicações eram apenas para questões de geologia mineira; posteriormente estendendo-se para outros campos, e, notadamente, nesses últimos anos, para problemas ligados ao meio ambiente (LANDIM, 1998).

Devido à grande heterogeneidade dos solos, o conhecimento da variabilidade espacial de suas diversas propriedades é de fundamental importância, visto que se procura diminuir os efeitos da variabilidade dos solos, para que esta não venha afetar a produção das culturas. Com esse propósito, diversos trabalhos têm sido realizados para explorar a variabilidade das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Vieira et al. (1983) mencionaram que pesquisadores tem trabalhado em problemas de variabilidade desde o início dos anos de 1900 e que muitos experimentos de campo têm sido feitos para determinar os efeitos da variabilidade de solos em vários campos; a partir daí, amostragem tornou-se uma disciplina, sendo que por volta de 1960 muitos livros tem sido escritos sobre teorias de amostragem e eles apresentam esquemas comuns como os tirados ao acaso e amostragem estratificada. Quanto à forma de análise de dados usados, pode-se usar métodos de estatística não espacial, como análise de variância; os quais assumem independência entre as amostras e as observações seguem uma distribuição normal. Contudo, um dado conjunto de observações podem ser normalmente distribuídos, apesar de toda a distância de amostragem, podendo existir uma boa autocorrelação, dependendo do processo. Por fim, os autores ressaltam que para a análise da autocorrelação é requerida uma nova estatística, relativamente abordada e denominada geoestatística.

Trangmar et al. (1985) afirmaram que cientistas do solo às vezes são limitados a observações restritas de superfícies de solo, necessitando da extrapolação das propriedades do solo de locais onde elas são conhecidas para outros locais, onde elas não são conhecidas, e que a precisão de tal extrapolação é fortemente influenciada pela variabilidade dos solos, à medida que se aumenta a heterogeneidade dos mesmos. Similarmente, a probabilidade de transferência das experiências de uso do solo de lugares conhecidos para não conhecidos é fortemente influenciada pela variabilidade espacial e temporal dos solos e outros parâmetros envolvidos.

Reichardt et al. (1986) realizaram um estudo, onde revisaram importantes trabalhos da área de Ciência do Solo e compararam a aplicação de técnicas de estatística tradicional e técnicas geoestatísticas. Os autores relataram que torna-se cada vez mais necessário considerar a variabilidade em três dimensões, em todas as áreas da Ciência do Solo: física, química, fertilidade, conservação, etc., uma vez que têm-se aumentado as exigências para a manutenção de altos níveis de produtividade nas culturas.

Neste sentido, diversos autores avaliaram a variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas do solo, objetivando oferecer subsídios para esquemas de amostragem e planejamento de experimentos com citros (SOUZA et al., 1997); planejamento de experimentos em solo salino-sódico (OLIVEIRA et al., 1999) e experimentos de preparo do solo (MELLO, 2001). Também, outros autores avaliaram a variabilidade espacial de atributos

físicos em um Latossolo Vermelho (COSTA et al., 2005) e atributos químicos em áreas com abacaxi, banana e citros (SOUZA et al., 2005), objetivando a amostragem e planejamento experimental.

Também avaliando atributos químicos e físicos do solo, alguns autores utilizaram a krigagem com a finalidade de identificação e mapeamento de áreas homogêneas de produção de biomassa de pastagens e características do solo (BOYER et al., 1996) e identificação da intensidade de amostragem apropriada para propriedades de solos em larga escala (CHIEN et al., 1997).

Outros autores utilizaram a geoestatística para estudos de mapeamento de características específicas, bem como a variabilidade e dependência espacial destas nos solos, tais como: medidas de umidade e temperatura superficiais do solo (DAVIDOFF e SELIM, 1988), condutividade hidráulica e densidade dos solos (BRESLER et al., 1984; CIOLLARO e ROMANO, 1995; GUPTA et al., 1995 e ROGOWSKI e WOLF, 1994), retenção de água (BURDEN e SELIM, 1989; MALLANTS et al., 1996 e VOLTZ e GOULARD, 1994), resistência à penetração (LEY e LARYEA, 1994 e MOOLMAN e VAN HUYSSTEEN, 1989), nível do lençol freático (ABOUFIRASSI e MARIÑO, 1983), resistência e plasticidade (ALLI et al., 1990) e processos erosivos (CREMERS et al., 1996).

A geoestatística também tem sido usada para análise de diversos atributos de solo, que podem ser utilizados para a construção de diversos mapas, particularmente importantes para o seu manejo, ou ainda para o estudo de áreas onde, às vezes, se requer um manejo particular, considerando a aplicação mais econômica de insumos, conservação do solo e, principalmente o aumento da produção com diminuição dos impactos ambientais.

Assim, alguns autores, preocupados em implementar os aspectos de manejo das culturas e conservação do solo, avaliaram a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos de solo em diferentes áreas, tais como: produção comercial de cana-de-açúcar com Crotalaria juncea - *Crotalaria juncea* L. sob condições de erosão severa (SALVIANO et al., 1998); diferentes superfícies geomórficas com a produção de café (SANCHEZ, 1999); cultivo sob videira - *Vitis vinifera* L. (TAKEDA, 2000). Especificamente para atributos físicos de solo, Silva e Chaves (2001) em uma área de Perímetro Irrigado; Eguchi et al. (2002) em um solo hidromórfico; Souza et al. (2004) em uma área de uso

intensivo com cana-de-açúcar; Kitamura e Carvalho (2005) avaliaram a variabilidade espacial de atributos dos solos em uma área de feijão sob plantio direto. De forma a integrar os diversos fatores que interferem no desenvolvimento das culturas, alguns autores estudaram a variabilidade espacial de fatores físico-hídricos em áreas de Latossolo Vermelho Escuro, textura argilosa, em uma região do Cerrado, com a cultura da soja submetida ao plantio direto e convencional (GUIMARÃES, 2000) e em solos com sistema de produção agroecológica (FARIAS et al., 2005). Também, com o mesmo objetivo, em um solo submetido à diferentes sucessões de cultivo, Carvalho et al. (1999) estudaram a variabilidade temporal de alguns atributos químicos de solo. Já com a finalidade de identificar, caracterizar e comparar a estrutura da dependência espacial dos micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco solúveis, Couto e Klamt (1999) realizaram um estudo em um Latossolo Vermelho Escuro sob pivô central após 14 anos de uso intensivo.

Especificamente, na cultura de alface, e com a finalidade de otimizar o manejo de um campo salinizado, visando definir áreas consideradas ótimas para a produção de alface, Panagopoulos et al. (2006) utilizaram três técnicas geoestatísticas de interpolação e um sistema de informação geográfica (SIG). Para isso, os autores baseados na interpretação gráfica de algumas propriedades físicas e químicas do solo (nitrogênio mineral total, fósforo, potássio, pH, condutividade elétrica e condutividade hidráulica saturada) e características da cultura (peso individual e diâmetro por ocasião do final do ciclo cultural), e através da geoestatística num SIG, confeccionaram vários mapas de propriedades de solos nos campos cultivados com a alface. Dentre as técnicas de interpolação, a krigagem ordinária foi a melhor para cada propriedade de solo estudada, fato este detectado através da validação cruzada. Os mapas resultantes das técnicas de interpolação foram introduzidos num SIG e após a reclassificação de valores e modelagem espacial foi desenvolvido um mapa final de capacidade de produção de alface. Os autores concluíram também que não havia na área estudada um campo considerado ótimo para a produção de alface; porém os problemas localizados com propriedades do solo que foram encontrados através do estudo, puderam ser solucionados com tratamentos localizados de correção.

A geoestatística, ao estudar a variabilidade dos solos e relacioná-las com a produção de culturas, também adquire importância quando a agricultura convencional é deixada de lado e parte-se para um razoavelmente novo conceito de produção de culturas, que

é a agricultura de precisão. Somente através da geoestatística, consegue-se uma análise mais precisa dos atributos dos solos, bem como sua posterior modelagem espacial para associação com a produção e posterior aplicação em agricultura de precisão, ou seja, da tecnologia do manejo do solo num local específico.

Mermut e Eswaran (2001) comentaram que a informatização de todos os aspectos de manejo, faz da agricultura de precisão a mais avançada e científica abordagem para o produtor, além de ser rentável e dirigida à muitas preocupações ambientais, indicando uma nova era da agricultura.

Com o objetivo da aplicação da agricultura de precisão, Stein et al. (1997) investigaram métodos para comparar modelos espaciais de produção de milho com variáveis de solo. Também, Johann et al. (2004), correlacionando atributos físicos e de produtividade de soja e através de técnicas de geoestatística e interpolação por krigagem ordinária, confeccionaram mapas de contorno de um Latossolo Bruno distrófico, na região de Cascavel –PR.

Além de sua importância para o estudo de vários atributos do solo, a geoestatística também apresenta consideração merecida, quando se pensa em utilização da água para fins agrícolas. Em agricultura irrigada, torna-se necessário considerar fatores relativos à água, ao solo, à planta e à atmosfera, que apresentam um comportamento variável no tempo e no espaço, o que exige uma análise estatística adequada para a interpretação de dados. Para esse propósito, pode-se utilizar não somente a análise descritiva geral, como a análise descritiva espacial. A análise geoestatística dos dados servirá para o suporte de decisões, que poderão nortear as técnicas de manejo de uma determinada área.

Com essa finalidade, diversos trabalhos vêm sendo conduzidos para o estudo da variabilidade espacial de vários parâmetros relacionados com a utilização da água no solo.

Sales (1992), ao estudar a variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica pelo método do infiltrômetro de anéis concêntricos e ao determinar a condutividade hidráulica saturada, avaliou e associou algumas propriedades físicas e químicas às camadas superficial e sub-superficial de dois solos; Latossolo Roxo e Podzólico Vermelho-Amarelo. As propriedades físicas da camada de 60-80 cm do Podzólico Vermelho-Amarelo apresentaram uma melhor associação com a velocidade de infiltração básica, enquanto que

para Latossolo Roxo, isso foi verificado na camada de 0-20 cm. Foram estabelecidas relações funcionais em ambos os solos e pôde-se observar que a condutividade hidráulica saturada constitui-se na melhor propriedade para estimar a velocidade de infiltração básica. O modelo linear foi ajustado aos variogramas experimentais da velocidade de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada (60-80 cm) do Podzólico Vermelho-Amarelo e observou-se anisotropia geométrica, enquanto que no Latossolo Roxo não se observou dependência espacial. O autor, ao comparar o número de amostras necessárias para estimar a velocidade de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada através da geoestatística e da estatística clássica; constatou que o número de amostras determinadas pela geoestatística foi bem menor que o número de amostras da estatística clássica.

Moura et al. (1998) realizaram um estudo da dinâmica da água no solo, através da irrigação localizada subsuperficial, utilizando-se procedimentos de simulação numérica, com o desenvolvimento de um modelo computacional, procurando-se estimar, com base em dados de características de retenção de água no solo (teor de água inicial, parâmetros da curva de retenção da água no solo e condutividade hidráulica saturada) e características do emissor (vazão), a distribuição do teor de água no meio após determinado intervalo de tempo. Os autores, ao analisarem os dados através da estatística clássica, observaram que tanto o processo de simulação, quanto os resultados observados foram altamente influenciados pelas características dos parâmetros físicos medidos, principalmente por sua variabilidade espaço-temporal, o que implica, por certo, em condições de anisotropia que não foram previstas para a utilização do modelo de simulação. Também comentaram que a intensa variabilidade espaço-temporal, dificulta a caracterização de tais parâmetros em determinado tipo de solo e que devem ser usadas novas ferramentas para a análise deste problema, uma vez que métodos estatísticos clássicos não tratam o problema de forma explícita.

Folegatti (1996) conduziu um trabalho no campo experimental da Universidade da Califórnia – Davis, com o objetivo de estudar a estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade do solo nas profundidades de 0,15 e 0,30 m, e do armazenamento médio de água a 0,40 m de profundidade de solo. O experimento foi conduzido durante 191 dias, onde ocorreram seis processos de secagem e umedecimento do perfil. Foi utilizada uma transeção de 50 m de comprimento, onde a cada metro foram instaladas sondas de nêutrons para as medições da umidade do solo. As análises mostraram

que a umidade do solo, nas duas profundidades, apresentou estabilidade temporal, sendo possível desta forma identificar pontos ao longo da transeção que, se amostrados, fornecem valores de umidade que constituem boas estimativas da média de todos os dados da transeção. Observou-se que os variogramas para umidade do solo nas duas profundidades apresentaram estrutura de variação no espaço quando o solo estava úmido, indicando que esta propriedade não ocorre aleatoriamente em um alcance de 10m. O armazenamento de água no solo também apresentou estrutura de variação no espaço com mesmo alcance, e com patamar crescente à medida que o solo secava. O autor observou também que, devido a semelhança dos seus variogramas, é possível uma correlação espacial entre o conteúdo médio de argila e o armazenamento de água; porém, no entanto, seria necessário um maior número de observações para descrevê-la.

Também, Coelho Filho et al. (2001), ao desenvolverem um trabalho em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão, constataram através dos variogramas cruzados uma forte correlação espacial entre a umidade e a argila, indicando uma estreita correlação espacial entre o conteúdo de argila e retenção de água no solo.

Utilizando a geoestatística e considerando a vasta variabilidade espacial de parâmetros de solo juntamente com a estreita relação entre textura do solo e suas características hidrodinâmicas, Plana et al. (2002) realizaram um estudo relacionando textura do solo e umidade do solo. Os locais onde a umidade é medida devem ser cuidadosamente escolhidos, uma vez que as leituras são às vezes extrapoladas para outros locais onde não foram efetuadas as leituras. Levando isso em consideração e devido ao fato das variações de textura comportarem-se como variáveis regionalizadas, os autores consideraram que uma análise geoestatística da textura do solo é a ferramenta mais apropriada para identificar tais locais. Com essa finalidade, um mapa de isovalores de d_{50} (diâmetro médio correspondente à 50% do peso das partículas do solo; intimamente relacionado com a granulometria do solo) foi obtido por krigagem em plantação de damasco. Concluíram que o mapa pode ser usado para localização de medidas de umidade de solo para estudos de balanço hídrico nas referidas plantações.

Lima e Silans (1999) utilizaram técnicas geoestatísticas para caracterizar a variabilidade espacial da infiltração e dos parâmetros hidrodinâmicos do solo das equações teóricas de Philip e de Green & Ampt (equações de infiltração); além de

efetuarem medições de granulometria, densidade do solo e umidade volumétrica antes e depois dos testes de infiltração. Concluíram que a geoestatística foi eficiente, uma vez que permitiu detectar a existência de uma certa estrutura ou grau de organização na distribuição espacial dos parâmetros estudados e que através da krigagem, é possível o mapeamento dos mesmos e a identificação, no campo, do local que representaria os valores médios do volume infiltrado. Entretanto, os autores concluíram que as correlações entre textura, através da taxa percentual da fração argila + silte, e entre os parâmetros hidrodinâmicos são insignificantes.

Fietz et al. (1999) avaliaram a influência da variabilidade do armazenamento de água no solo na qualidade da irrigação por aspersão. Baseados em curvas características e lâminas de irrigação de 144 pontos amostrais de uma grade de 5 x 5 m e utilizando-se técnicas geoestatísticas, confeccionaram uma malha 1 x 1 m de 3096 pontos. Para cada ponto da malha através dos valores de lâmina real necessária e de lâmina aplicada, foram determinadas a eficiência de armazenamento e a drenagem profunda. Concluíram que a variabilidade do armazenamento da água no solo não influenciou, de forma relevante, a eficiência de armazenamento nem os índices de drenagem profunda.

Também Grego et al. (2005) avaliaram a variabilidade espacial do armazenamento de água do solo, em um Latossolo Vermelho eutroférico, no sistema de plantio direto, considerando que o conhecimento da variabilidade espaço-temporal do armazenamento de água no solo pode indicar o local e a melhor época de aproveitamento pelas plantas, além de locais que necessitam de alternativas de manejo e irrigação. Através de dois períodos de amostragens; sendo o primeiro período com 102 pontos e o segundo período com 302 pontos, constataram que mesmo para as amostragens mais intensas, a variabilidade do armazenamento da água pode ser melhor representada a distâncias menores do que 10 m.

Isto reforça a utilidade de ferramentas como a geoestatística ao tratar-se de variabilidade espaço-temporal. Assim, outros estudos referentes à dinâmica da água no solo têm utilizado a geoestatística para verificar a dependência espacial entre os vários atributos de água e solo, objetivando conciliar o comportamento da planta em relação a um determinado sistema de irrigação.

Tabor et al. (1984) utilizaram a geoestatística através de variogramas e krigagem para determinar a variabilidade espacial de nitratos em pecíolos de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) irrigado. Observaram que nitratos em pecíolos mostraram ser

espacialmente dependentes em sete campos comerciais estudados. Contudo, para áreas de amostragem menores que 1 m (lado a lado), a dependência espacial foi considerada insignificante, quando comparada com a variabilidade inerente de amostragem e análises laboratoriais. Portanto, para este local e áreas de amostragem muito pequenas (menores que 1 m²), a análise de estatística clássica, requerendo amostras independentes, pode ser aplicada; porém, para distâncias interamostrais maiores do que 1 m, a independência requer uma verificação. Os dados de uma malha de 360 em 360 m indicaram uma anisotropia de dependência espacial, onde os variogramas e mapas krigados de nitratos em pecíolos sugeriram uma forte influência devido a práticas culturais, tais como a direção das fileiras e irrigação.

O incremento da agricultura de precisão impõe novos conceitos, métodos e técnicas que devem ser incorporados ao processo produtivo, onde a crescente demanda por alimentos também torna o uso da irrigação de precisão imperativo em busca de produções crescentes. Portanto, diante deste novo paradigma, alguns trabalhos vem sendo desenvolvidos no sentido de associar a variabilidade espacial de atributos do solo com a utilização da água, procurando oferecer subsídios, não somente à agricultura de precisão, mas também à irrigação de precisão.

Brooker e Winchester (1995) realizaram um estudo geoestatístico de dados de solo de um vinhedo irrigado, perto de Waikerie, sul da Austrália. Considerando a capacidade de retenção de água pelo solo, profundidade do solo e textura do solo, estudaram a variabilidade espacial da água prontamente disponível através de variogramas, cujas variáveis serviram de auxílio para detectar áreas de abertura de válvulas de irrigação na cultura em questão. A precisão das estimativas dessas áreas foi realizada através da krigagem. Para tal finalidade e considerando a profundidade da zona radicular, a propriedade foi amostrada com uma malha de 75 x 75 m, sendo que as áreas de válvulas de irrigação eram tipicamente de 1,3 ha. Observaram que a krigagem se destacou em relação às estimativas usando uma média simples de amostras contidas dentro da área; uma vez que permitiu detectar as áreas para a abertura de válvulas de irrigação e, também, o melhor formato das mesmas. Os autores observaram anisotropia nos variogramas, o que influenciou o desenho da amostragem.

Também Sousa et al. (1999), ao desenvolverem um trabalho objetivando avaliar a variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água

disponível de um solo aluvial, com a finalidade de manejo adequado da irrigação, destacou a importância do processo de krigagem ao utilizá-la para estimar os valores de água disponível para o mapa de isolinhas, ressaltando que constituiu-se numa ferramenta importante para orientação do manejo da irrigação.

Visando a análise da variação regional das necessidades de água de irrigação aplicada para produção de batata (*Solanum tuberosum* L.) em Trás-os-Montes (Portugal), Sousa e Pereira (1999) coletaram dados de 106 estações de precipitações e de 8 estações climáticas, com a finalidade de utilizá-los numa simulação de modelo de programa de irrigação. Usando dados de produção de batata e estimativa da evapotranspiração de referência, foi validado o modelo, e este posteriormente aplicado nas 106 localizações, cada uma com um conjunto de dados regionalizados da necessidade de água para irrigação por um período de 19 anos. Foi utilizada a krigagem para estimar a distribuição espacial das necessidades de água na região e um SIG (Sistema de Informação Geográfica) para o contorno da variável em estudo. Tanto a krigagem quanto a seleção do modelo foram apropriados para a simulação dos conteúdos de água no solo e produção de batata na região. Os resultados foram promissores para o uso dessa técnica no desenho de mapas relativos às necessidades mensais de irrigação ou mesmo para a programação de práticas adicionais de irrigação na forma de desenvolvimento de calendários ou tabelas de irrigação, adotados para a variação regional das necessidades de irrigação em culturas.

Sabe-se que para o estabelecimento de um programa de irrigação, objetivando o aumento da produção agrícola, é de fundamental importância o balanço hídrico do solo, que depende por sua vez, da precipitação pluviométrica. Nesse sentido, Zamboti (2001), utilizando dados de observações da precipitação pluviométrica, estudou a existência, a estrutura e a modelagem da dependência espacial, bem como a interpolação de valores para locais não amostrados e construção de mapas de contornos para a precipitação pluviométrica e comparou esses mapas com as respectivas cartas geográficas da precipitação pluviométrica no Paraná. Ao comparar as modelagens utilizadas para a obtenção dos mapas no referido trabalho e das cartas climáticas do Paraná, o autor concluiu que o trabalho apresentou melhoria das estimativas.

Com o objetivo de avaliar a necessidade do redimensionamento do sistema de irrigação em subáreas de um vinhedo irrigado, Brooker (2001) investigou a

influência da variabilidade das características dos solos no desenho e manejo dos sistemas. O primeiro sistema constou de aspersores superficiais que cobriram uma área maior (24 x 22 m); o segundo sistema constou de áreas menores (3 x 3 m), que devido a altos níveis de salinidade da água do rio, sofreram mudanças para aspersores individuais, que irrigavam a base das plantas. Utilizou-se a geoestatística para o estudo da variabilidade do solo; porém em ambos os casos, a variação de áreas molhadas dentro dos diferentes sistemas foi similar. O pequeno aumento da variabilidade que ocorreu na instalação do segundo sistema, não foi suficiente para justificar um novo desenho de sistema de irrigação, portanto a análise geoestatística mostrou que a variação extra não era considerável e não havia, portanto, necessidade de redesenhar as áreas irrigadas.

Um fator que merece consideração quando se pensa em manejo de irrigação é a salinidade do solo. A salinidade é uma propriedade que apresenta variabilidade espacial e temporal, requerendo, portanto, processos adequados de amostragens, determinações e análises dos dados, que permitam obter informações de seu comportamento. O monitoramento da salinidade é de fundamental importância para orientar as práticas de manejo da irrigação e as técnicas de recuperação de áreas afetadas.

Queiroz et al. (1997) comentaram que, ao tratar análise de dados de salinidade, os recursos da estatística clássica e da geoestatística se complementam na análise e interpretação dos dados; porém somente através da geoestatística é possível caracterizar a estrutura da dependência espacial entre os parâmetros que definem a salinidade do solo. Ressaltaram também a importância do mapeamento pelo processo de krigagem para a orientação no manejo e controle da salinidade, uma vez que permite a visualização espacial da salinidade na área de interesse, constituindo-se num aspecto de inquestionável importância no manejo da agricultura irrigada em zonas áridas e semi-áridas.

Outros estudos abordaram ainda aspectos relacionados à salinidade, como: drenagem em solos salinos (AGRAWAL et al., 1995) e salinidade do lençol freático (HOODA et al., 1986 e SAMRA et al., 1989).

Há também considerações da utilização da geoestatística para fins de experimentação em cultivo protegido.

Cataneo (1997), ao comparar o cultivo protegido com o cultivo a céu aberto, relatou que o ambiente protegido tem como característica principal em relação ao

campo, o fato de realçar os efeitos de variações de fatores climáticos e seus correlatos. Dessa forma, afirmou que as parcelas de experimentos localizadas em diferentes proximidades das paredes de qualquer tipo de ambiente protegido, poderão estar expostas a condições de temperaturas mais elevadas que outras pela manhã, sendo que a tarde poderá ocorrer o contrário; além de outras variações como umidade, evapotranspiração, possibilidade de desenvolvimento de doenças, etc. Finalmente, o autor sugere que devido a existência da variabilidade espacial, a utilização da geoestatística é mais interessante.

Batista (2002), ao estudar a variabilidade da umidade do solo em irrigação por gotejamento em condições de ambiente protegido, detectou que o atributo apresentou distribuição espacial anisotrópica; com dependência espacial de aproximadamente 3,30 m no sentido do comprimento da estufa. Nas condições em que foram desenvolvidos o trabalho, pode-se constatar também que a krigagem foi um ótimo interpolador para o mapeamento da umidade do solo.

Além de inúmeras aplicações, muitos autores fazem um retrospecto de todos os estudos desenvolvidos com a finalidade de definir variabilidade dos solos e suas implicações. Com esse propósito, Burrough (1993) revisou o progresso que tem sido feito nos últimos 20 anos em nossa habilidade para registrar, analisar, entender e utilizar informações sobre a variabilidade espacial do solo. Nesse trabalho, aborda o assunto com vários enfoques, tais como: modelos conceituais de variabilidade espacial de solos; avanços técnicos para registro e armazenamento de dados de levantamentos de solos, classificação numérica, classificação contínua e variabilidade de solo, métodos geoestatísticos para descrição da variabilidade do solo, enfim, múltiplas escalas que abordam a variabilidade do solo, como: modelagem espacial, caos e fractais. Informações sobre a variabilidade espacial são essenciais ao estudar modelagem de formação do solo e seus processos de manejo. Mas, o conhecimento sobre a variabilidade do solo é ainda disperso e mal organizado. Segundo o autor, há uma necessidade em sistematizar nossos conhecimentos em variabilidade de solo.

Os estudos da correlação espacial entre dados de produção de culturas e atributos do solo em cultivo protegido são inexistentes na literatura. Kitamura e Carvalho (2005) estudaram as correlações entre parâmetros de granulometria e produção de feijão no campo. Encontraram baixas correlações, mas mesmo assim avaliaram a hipótese da existência de correlação espacial entre os parâmetros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material e métodos utilizados para a montagem do experimento

3.1.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental São Manuel, da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, localizada no município de São Manuel, Estado de São Paulo, a 22°46'05" de latitude sul e 48°34'11" de longitude oeste de Greenwich, a 740 m de altitude.

Carvalho et al. (1983) descreveu um total médio de 1.314 mm de chuvas anual e uma temperatura média mensal de 19,4°C. De acordo com valores médios observados, pela classificação de Köppen, o clima da região pertence à classe Cwa (mesotérmico de inverno seco), em que a temperatura do mês mais quente não ultrapassa 22°C, sendo julho o mês mais seco e mais frio. A estação seca vai de maio a setembro, enquanto o mês mais quente e úmido é janeiro. O balanço hídrico, pelo Método de Thornthwaite, 1948, citado por Carvalho et al. (1983), revelou uma deficiência total de água de 29 mm anualmente (de maio a setembro) e um excedente hídrico de 439 mm (outubro a abril).

O solo, no qual foi instalado o experimento, pertence a uma faixa de

solo classificada como Latossolo Vermelho Amarelo, de textura média, com camada superficial de textura arenosa e relevo suave ondulado.

Os atributos físicos do solo foram obtidos de amostras de solo da área, coletadas em “zigue-zague” e retiradas na profundidade de 0-20 cm. A análise granulométrica do solo foi determinada pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP, conforme EMBRAPA (1997) e os valores encontrados encontram-se dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.

Prof.	AMG	AG	AM	AF	AMF	Areia total	Argila	Silte	Textura do solo
(cm)	----- (g kg ⁻¹) -----								
0-20	traços	10	310	360	120	800	120	80	arenosa

AMG – areia muito grossa, AG – areia grossa, AM – areia média, AF – areia fina, AMF – areia muito fina.

O valor da massa específica do solo encontrado foi de 1,62 kg dm⁻¹.

Os atributos químicos do solo foram obtidos de amostras de solo da área, coletadas em “zigue-zague” e retiradas na profundidade de 0-20 cm. Foram determinadas no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP, conforme Raij et al. (2001) e os resultados encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Atributos químicos da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.

Prof.	pH	M.O.	P _{resina}	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
(cm)	(CaCl ₂)	(g dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	----- mmol _c dm ⁻³ -----							
0-20	6,7	10	137	0	12	1,1	37	18	56	68	82

Os valores dos teores de água no solo, para a camada de 0-20 cm, com amostras deformadas, foram determinados, segundo Leite Júnior (2000) e Antunes (2001) no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP e encontram-se dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos teores de água no solo (g g^{-1}) e potencial matricial (kPa) para a camada de 0-20 cm.

Ψ (kPa)	U_{0-20} (g g^{-1})
-10	0,1050
-30	0,0976
-50	0,0755
-100	0,0700
-500	0,0590
-1500	0,0550

Adicionalmente, também foram determinados mais dois valores dos teores de água no solo relativos ao potencial matricial de -8 kPa e -6 kPa para a camada de 0-20 cm com amostras indeformadas, cujos valores foram, respectivamente de 0,1097 e 0,1242 g g^{-1} .

3.1.2 Caracterização da estufa e malha experimental

Para a condução do experimento foi utilizada uma estufa de dimensão de 5,0 x 20,0 m (100 m^2) e altura na parte central de 2,65 m. A estrutura foi coberta com um filme transparente de 150 micras de espessura, esticado e preso nas laterais das estruturas por sarrafos de madeira ($2 \frac{1}{2}'' \times 1''$) por meio de pregos e parafusos. Todas as bordas da estufa foram revestidas com o mesmo filme transparente, sendo que o mesmo foi enterrado e esticado no solo até a largura de 1,50 m, com a finalidade de evitar a infiltração de água nas laterais.

Na estufa procedeu-se o estaqueamento da área com a finalidade de demarcar os pontos de amostragem, que acrescidos dos pontos de adensamento, totalizaram 152 pontos de amostragem. Nestes pontos foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm para a determinação dos atributos físicos e químicos, além dos parâmetros de produtividade da cultura de alface. A Figura 2 apresenta a malha experimental com os 152 pontos de amostragem utilizados para a coleta dos dados.

A malha de amostragem constou de 5 adensamentos de 16 pontos cada cujas áreas de adensamento tiveram localização aleatória. O espaçamento usado para o

adensamento seguiu o espaçamento da cultura, ou seja, de 0,30 m, tanto no sentido vertical, como no sentido horizontal. É importante salientar que espaços ligeiramente maiores que podem ser observados na Figura 2, são devidos ao espaçamento entre canteiros de alface.

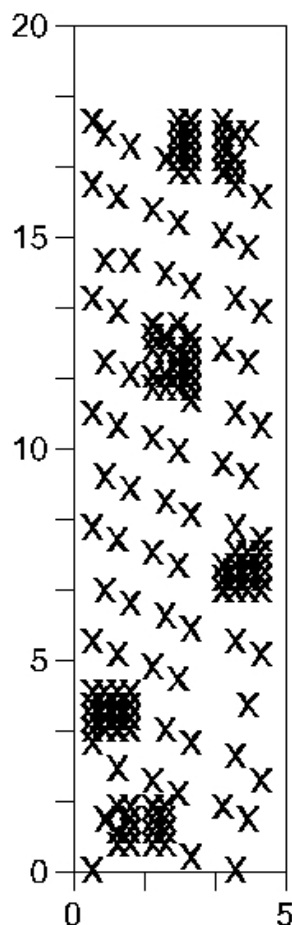


Figura 2. Esquema da malha experimental demarcada na estufa com os pontos de amostragem.

3.1.3 Manejo da irrigação

Para o bombeamento da água no sistema foi utilizada uma bomba trifásica de 5 CV, cuja pressão adequada foi mantida pelo regulador de pressão. O suprimento de água do sistema foi feito por meio de um reservatório de 20 m³, cuja água é proveniente de uma mina, com uma condutividade elétrica igual a 162,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e pH igual a 7,46 a 25 °C.

Utilizou-se dois sistemas distintos de irrigação, um sistema para a

determinação da umidade do solo e outro sistema para a condução da cultura de alface.

Para a determinação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) de ambos os sistemas de irrigação por gotejamento, utilizou-se um método proposto por Keller e Karmeli, conforme descrito por Bernardo (2002). Com essa finalidade, utilizou-se o seguinte material: cronômetro, copos plásticos apropriados para a coleta da água distribuída e proveta para a medição do conteúdo de água. Foram amostrados os pontos, em três coletas, sendo a média dos valores obtidos nas três coletas utilizada para os cálculos. Para a determinação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) dos gotejadores utilizados para a determinação da umidade do solo e para a condução da cultura, foi utilizada, respectivamente, a pressão de 10,0 mca e 7,0 mca.

3.1.3.1 Manejo da irrigação para a determinação da umidade do solo

Para a determinação da umidade do solo para a análise espacial, utilizou-se o sistema de irrigação por gotejamento, com Fita Gotejadora Chapin; 8 mil/200 micra de espessura da parede; vazão média de $2,41 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ à pressão de 10,0 mca e espaçamento entre saídas de gotas de 20 cm, com cinco linhas laterais de irrigação, dispostas superficialmente ao longo da estufa no sentido longitudinal. A linha principal, de PVC com 25 mm de diâmetro externo, foi colocada na lateral da estufa, sendo nesta instalada uma linha de derivação, com um registro geral de esfera de $\frac{3}{4}$ ", filtro de tela de aço de 150 mesh, um regulador de pressão e um manômetro tipo Bourbon, com glicerina, para proceder a verificação. As cinco linhas laterais de irrigação foram conectadas à linha de derivação através de derivações tipo "T" e presas através de braçadeiras.

Foi instalada também uma bateria de 6 tensiômetros de mercúrio, com profundidade de instalação de 20 cm ($h_2 = 20\text{cm}$), dispostos aleatoriamente no interior da estufa, para que se pudesse verificar o ponto de saturação e a capacidade de campo do solo.

Para a determinação da umidade, foi considerada a umidade na capacidade de campo, utilizando o potencial matricial da ordem de 0,06 atm (- 6KPa) para a determinação do ponto de capacidade de campo, considerando o exposto por Reichardt (1988).

Procedeu-se a irrigação da área, utilizando o sistema de irrigação por gotejamento com a pressão de 10,0 mca, até que o solo atingisse o ponto de saturação. Após a

saturação do solo, o sistema de irrigação foi desligado para atingir a capacidade de campo. Para essa verificação, foi considerado o valor médio de h , ou seja, a média dos seis valores de h encontrados para os seis tensiômetros instalados. Portanto, quando os tensiômetros acusaram o ponto da capacidade de campo, imediatamente, procedeu-se a coleta das amostras deformadas para a posterior determinação da umidade do solo.

3.1.3.2 Teor de água no solo e manejo da irrigação para a condução cultura

Com os valores dos teores de água no solo, para a camada de 0-20 cm, apresentados na Tabela 3, acrescidos dos valores dos teores de água no solo relativos ao potencial matricial de -8 kPa e -6 kPa, obteve-se a curva de retenção de água no solo.

O ajuste das curvas foi realizado através do software SWRC – “Soil Water Retention Curve” (DOURADO NETO et al., 1990), utilizando-se o modelo proposto por Van Genuchten (1980), segundo a Equação 04, especificada abaixo:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n\right]^m} \quad (04)$$

onde: θ = teor de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); α , m , n = parâmetros empíricos; θ_r = teor de água residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_s = teor de água em solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ψ_m = potencial matricial (kPa).

A Tabela 4 apresenta os parâmetros da equação de Van Genuchten obtidos para a camada de 0-20 cm do solo.

Tabela 4. Parâmetros estimados pelo Programa SWRC para o modelo de Van Genuchten na camada de 0-20 cm do solo.

Prof. (cm)	α	M	N	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
0-20	0,040351	0,345441	1,527745	0,089	0,275

Para a condução da cultura de alface, foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento, disposto superficialmente ao longo dos canteiros, com uma linha de irrigação para duas linhas de cultivo, totalizando seis linhas laterais de irrigação. A linha principal, de PVC com 25 mm de diâmetro externo, foi colocada na lateral da estufa, sendo nesta instalada uma linha de derivação, com um registro geral de esfera de $\frac{3}{4}$ ", filtro de tela de aço de 150 mesh, um regulador de pressão e um manômetro tipo Bourbon, com glicerina, para proceder a verificação. Além disso, também foi instalado na linha de derivação, um hidrômetro para o controle de lâmina de água aplicada para a irrigação da cultura de alface. As seis linhas laterais de irrigação foram conectadas à linha de derivação através de derivações tipo "T" e presas através de braçadeiras.

Para o manejo da irrigação da cultura foram instalados 09 tensiômetros de mercúrio, dispostos aleatoriamente no interior da estufa e sobre os canteiros, para que se pudesse efetuar as leituras da coluna de mercúrio. Foi utilizada a média das leituras dos nove tensiômetros como base para tomada de decisão no momento de irrigação e também utilizadas para se obter o potencial matricial da água no solo, segundo a equação 05:

$$\psi_m = \frac{(-12,6 \cdot h + h_1 + h_2)}{100} \quad (05)$$

onde: Ψ_m = potencial mátrico (KPa); h = altura de mercúrio no tensiômetro (cm); h_1 = altura da superfície do mercúrio na cuba em relação à superfície do solo (cm); h_2 = profundidade de instalação do tensiômetro (cm); adotada como 12,5 cm; valor intermediário proposto por Carrijo et al. (1999), que considera que para solos cultivados em estufa, pelo menos dois tensiômetros devem ser instalados na profundidade de maior concentração das raízes (10 – 15 cm).

As leituras da coluna de mercúrio foram efetuadas diariamente às 14:00 h. Após o cálculo do volume de água a ser aplicado, procedeu-se as irrigações, utilizando-se a Fita Gotejadora Chapin; 8 mil/200micra de espessura da parede, com furos espaçados de 10 cm e pressão média de 7,0 mca. Com essa pressão, a fita oferecia uma vazão média de $7,24 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ por gotejador.

A profundidade efetiva do sistema radicular, utilizada para promover a

irrigação foi de 25 cm, utilizando-se desta forma um valor intermediário ao proposto por Marouelli et al. (1996), que considera a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura de alface como sendo de 15-30 cm.

Todos os canteiros foram irrigados igualmente, elevando-se o teor de água no solo à capacidade de campo, com a frequência de irrigação de um dia.

Os cálculos do volume de água a ser aplicado foram feitos utilizando-se as fórmulas descritas por Pizarro Cabello (1996), em que levam em consideração o teor de água na capacidade de campo, o teor de água no solo, além da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. O teor de água no solo foi determinado após a leitura dos tensiômetros e utilizando-se a curva de retenção de água no solo. O teor de água na capacidade de campo foi anteriormente pré-estabelecido, utilizando-se também a curva de retenção de água no solo. O volume de água aplicado foi controlado pelo hidrômetro.

3.1.4 Determinação dos atributos físicos e químicos do solo

3.1.4.1 Determinação dos atributos físicos do solo

3.1.4.1.1 Determinação da umidade do solo

Para a determinação da umidade do solo, utilizou-se o trado tipo holandês, para diminuir a porção retirada de solo, evitando assim uma destruição em proporções maiores da camada superficial do mesmo. Para a acomodação das amostras, utilizou-se latas de alumínio numeradas e adequadamente vedadas com fita adesiva. Para a secagem das amostras, utilizou a estufa; para o esfriamento das amostras, utilizou-se o dessecador e para a pesagem das amostras, utilizou-se a balança de precisão, sendo todos os instrumentos relatados pertencentes ao Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP.

Foram realizadas três coletas de solo para a determinação da umidade do solo na capacidade de campo em 152 pontos, sendo que os valores considerados para a análise dos dados foram resultantes da média das três coletas. A profundidade do solo utilizada para a coleta das amostras para a determinação de umidade do solo foi de 0-20 cm.

A análise da umidade do solo, com base em peso seco, foi realizada conforme EMBRAPA (1997), pelo método da umidade atual (método gravimétrico).

3.1.4.1.2 Determinação da granulometria do solo

Foram coletadas as amostras para a análise granulométrica do solo na profundidade de 0-20 cm, considerando que o sistema radicular é muito ramificado e superficial, explorando apenas os primeiros 25 cm de solo, quando a cultura é transplantada (FILGUEIRA, 2002). Para a retirada das amostras de solo, utilizou-se o trado tipo caneca, sendo as amostras acondicionadas em sacos plásticos devidamente limpos. Os atributos físicos do solo foram determinadas no Laboratório de Física de Solo, do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP, segundo EMBRAPA (1997). Foram avaliados os seguintes atributos: areia muito grossa – AMG (%), areia grossa – AG (%), areia média – AM (%), areia fina – AF (%), areia muito fina – AMF (%), areia total (%), argila (%) e silte (%).

3.1.4.2 Determinação da fertilidade do solo

Similarmente à coleta de amostras para a análise granulométrica do solo e considerando Filgueira (2002), as amostras para a análise da fertilidade do solo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm.

Para a retirada das amostras de solo, utilizou-se o trado tipo caneca, sendo as amostras acondicionadas em sacos plásticos devidamente limpos. Os atributos químicos do solo ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, M.O., P_{resina} , $\text{H} + \text{Al}$, K, Ca, Mg, SB, CTC e V%) foram determinados no Laboratório de Fertilidade do Solo, do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP, segundo Raij et al. (2001). Foram realizadas duas coletas para a determinação da fertilidade do solo; sendo uma coleta efetuada antes e outra após a implantação da cultura de alface.

3.1.5 Características e condução da cultura

Foi utilizado um híbrido de alface americana (*Lactuca sativa* L.), cuja denominação comercial é “Lucy Brown”, com coloração das folhas verde escuro, do tipo repolhuda-crespa, com folhas bem consistentes, que formam uma cabeça compacta, apresentando resistência à temperaturas mais elevadas e ao pendoamento precoce, que são problemas comuns em ambientes protegidos.

A produção das mudas foi realizada em uma estufa, no local do experimento. No dia 19 de agosto de 2003, foi realizada a semeadura em bandejas de poliestireno expandido (isopor) de 128 células, utilizando sementes peletizadas, com uma semente por célula. Para o enchimento das bandejas foi utilizado o substrato feito com uma mistura de terra de barranco, casca de arroz carbonizada e substrato comercial “Plug mix” (proporção de 1:1:1), com o fertilizante N-P-K (04-14-08) e termofosfato magnésiano enriquecido com boro e zinco. Além disso, foi realizada uma adubação de cobertura nas bandejas, com o nitrocálcio, na proporção de 1 g L^{-1} . As mudas foram irrigadas 2 vezes ao dia, até atingirem de 4 a 5 folhas definitivas, quando então estavam prontas para o transplante em canteiro definitivo. O transplante para os canteiros definitivos foi realizado no dia 23 de setembro de 2003.

O ensaio foi instalado em três canteiros medindo 1,20 m de largura por 18,00 m de comprimento. O espaçamento utilizado foi de 0,30 x 0,30 m, com quatro linhas por canteiro; 60 plantas por linha; 240 plantas por canteiro, totalizando 720 plantas.

O solo foi preparado com uma enxada rotativa acoplada a um microtrator. Os canteiros foram preparados manualmente. A calagem e a adubação, baseadas na análise do solo, foram de acordo com Raij et al. (1996), utilizando-se a proporção de 40 kg ha^{-1} de N, 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 100 kg ha^{-1} de K_2O para a adubação química de plantio.

Também foi realizada a adubação orgânica, com o esterco de galinha humificado, na proporção de 6-8 L m^{-2} . Os adubos utilizados no plantio foram aplicados manualmente, com posterior incorporação.

Segundo Raij et al. (1996) para a adubação mineral de cobertura para a cultura de alface no sistema de transplante de mudas, deve-se parcelar o nitrogênio aos 10, 20 e 30 dias após o transplante e a dosagem utilizada é de 60 a 90 kg ha^{-1} de nitrogênio. No

presente experimento foi utilizada a dosagem de 90 kg ha^{-1} e, como foi utilizada a fertirrigação, tal dosagem foi subdividida e distribuída em intervalos de aplicação de 2 dias. Foi realizada a fertirrigação durante a reposição de água para a cultura. O adubo utilizado foi o nitrato de cálcio, com 15,5% de nitrogênio total e 19,0% de cálcio; de grande solubilidade, próprio para ser utilizado em fertirrigação. Foi utilizada uma bomba submersa em uma caixa de cimento amianto de 1000 L, com potência de 750 W para pressurização das soluções. As soluções foram preparadas em baldes.

Para a condução da cultura foram realizados tratos culturais, como capinas, com a finalidade de manter a cultura livre de plantas daninhas.

Na Figura 3, pode ser observada a estufa utilizada para o experimento, com os canteiros com a cultura de alface em desenvolvimento.



Figura 3. Disposição dos canteiros de alface com o sistema de irrigação por gotejamento e tensiômetros.

Fonte: Batista (2006).

As plantas foram colhidas, cortando-se o diminuto caule, logo que atingiram o máximo de desenvolvimento, porém apresentando as folhas ainda tenras, com bom sabor e sem nenhum sinal de pendoamento; algumas folhas exteriores também foram eliminadas por ocasião da colheita, segundo o proposto por Filgueira (2002). A colheita foi realizada no dia 12 de novembro de 2003, ou seja, com 85 dias após a semeadura. Para a avaliação da produtividade de alface, foram avaliadas 152 plantas de alface após a colheita.

Foram avaliados os seguintes parâmetros: massa de matéria fresca da parte aérea total (g) - MF, massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g) - MFC, massa de matéria seca da parte aérea comercial (g) - MSC e diâmetro de cabeça comercial (cm) - DCC. Para a obtenção da massa de matéria fresca da parte aérea total, as plantas foram pesadas em balança de precisão imediatamente após a colheita. Para a avaliação dos parâmetros de produtividade comerciais, as plantas foram desfolhadas até atingir o ponto ideal de comercialização, uma vez que as folhas externas, devido ao gosto mais amargo e aparência devem ser descartadas na produção comercial. Após a retirada das folhas externas, obteve-se a parte comercial, que são as cabeças de alface, que foram pesadas em balança de precisão para a obtenção da massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g) e diâmetro das cabeças (cm), sendo utilizado um paquímetro de madeira. As cabeças de alface foram embaladas em sacos de papel e foram colocadas em estufa para a secagem das plantas. Após a secagem, foram pesadas, em balança de precisão, e obtida a massa de matéria seca da parte aérea comercial (g).

3.2 Análise espacial dos dados

Para a análise geoestatística dos dados, duas etapas distintas de coleta dos atributos da área estudada necessitaram de consideração: num primeiro momento, ou seja, antes da implantação da cultura de alface, foi realizada a coleta dos dados de umidade do solo, para a avaliação da variabilidade espacial da umidade do solo, em sistema de irrigação por gotejamento sob cultivo protegido e coleta dos atributos relacionados à granulometria e fertilidade do solo; num segundo momento, ou seja, após a implantação da cultura, foi realizada a coleta dos atributos relacionados à fertilidade do solo e coleta de parâmetros relacionados à produtividade de alface.

Para o estudo da variabilidade e dependência espacial dos atributos da área estudada, procedeu-se a associação dos 152 pontos às suas respectivas posições no campo. Foram determinadas as coordenadas espaciais de cada ponto amostrado, conforme técnica proposta por Isaaks e Srivastava (1989).

A análise da dependência espacial, determinada pelo variograma, foi obtida com o auxílio do Programa Geoestatístico GS+ “Geostatistical for Environmental Sciences”, Versão 5.0.3 Beta (GS+, 2000), que utilizou os valores das variáveis associados as suas respectivas coordenadas de campo.

Tipicamente, todos os pares de amostras possíveis foram examinados e agrupados dentro de classes (“Lags”) de distâncias e direções aproximadamente iguais. Para esse processo, foram construídos os variogramas experimentais (DEUTSCH e JOURNAL, 1998) e, posteriormente, definidos os modelos teóricos de variogramas. Os modelos teóricos de variogramas (esférico, exponencial, gaussiano, linear e linear com patamar) foram superpostos à sequência de pontos obtidos no variograma experimental, de modo que a curva que melhor se ajustou aos pontos do variograma até onde a curva se estabilizasse.

Na análise estrutural do variograma foram fornecidos o efeito pepita (C_0), o patamar ($C + C_0$) e o alcance (a). Além desses, outros parâmetros foram fornecidos para análise posterior: alcance efetivo, estrutura ou proporção espacial ($C/C+C_0$), coeficiente de determinação ou regressão (r^2).

A análise da variabilidade espacial foi estudada pela detecção do índice de dependência espacial, proposto por Zimback (2001), como: índice $\leq 25\%$ – fraca dependência espacial; de 25 a 75% – moderada dependência espacial e $\geq 75\%$ – forte dependência espacial.

Na análise do variograma, foi verificada a possibilidade das variáveis estudadas possuírem a propriedade de anisotropia, que é a heterogeneidade das distribuições das variâncias em ângulos diferentes no espaço (ENGLUND e SPARKS, 1988); sendo que no variograma isotrópico, apenas um (o omnidirecional) é suficiente para descrever a variabilidade da variável no campo.

Foram estudadas as correlações espaciais entre os atributos químicos e físicos do solo e a produtividade de alface, elaborando, então, os variogramas cruzados para as variáveis que apresentaram uma alta correlação.

A Krigagem ordinária dos valores obtidos dos atributos estudados, que consiste numa interpolação desses valores entre os pontos amostrados, foi efetuada pelo módulo Interpolação – Krigagem do programa GS+ (GS+, 2000), com a opção pontual por serem utilizadas amostras simples (WEBSTER, 1985).

Os cálculos para a confecção dos mapas de krigagem seguiram o protocolo descrito por Burgess e Webster (1980).

A visualização dos resultados foi feita na forma de mapas bidimensionais através do programa GS+ (GS+, 2000).

A Validação Cruzada (“cross-validation”) foi empregada para avaliar os resultados obtidos. Para isso, cada valor de dado foi eliminado e daí esse valor foi estimado usando-se informações dos dados restantes, de acordo com o método descrito por Kane et al. (1982) e Goovaerts (1997).

Segundo Goovaerts (1997), um fator que afeta o cálculo de precisão do método de interpolação é o número de amostragens vizinhas usadas para a estimação. O número de amostras foi fixado em 16, que é o número escolhido automaticamente pelo programa e verificado que é o que melhor estima os pontos.

A exatidão da seleção do modelo do variograma foi medida através do erro entre os dados medidos e os valores estimados (ZHANG et al., 1995). O critério de validação cruzada empregado para selecionar o variograma foi o coeficiente de determinação entre os valores obtidos e estimados (MYERS, 1991).

Pela interpolação dos dados foram confeccionados separadamente os mapas de distribuição espacial dos atributos físicos, químicos e de produtividade de alface.

Foram elaboradas as correlações entre parâmetros culturais e do solo estudados.

Com a finalidade de oferecer subsídios para a tomada de decisões num processo de produção em equilíbrio com o meio ambiente, visando a agricultura de precisão e mais especificamente a irrigação de precisão e associando os atributos físicos e químicos do solo estudado com os parâmetros de produtividade de alface e através de técnicas de

geoestatística e interpolação por krigagem ordinária, foram confeccionados os mapas de aplicação de água e distribuição de nutrientes em zonas de manejo e mapas de parâmetros de produtividade de alface.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Coeficiente de uniformidade de distribuição dos gotejadores

O CUD (coeficiente de uniformidade de distribuição) encontrado para os gotejadores utilizados para a determinação da umidade do solo na capacidade de campo e para os gotejadores utilizados para a condução da cultura de alface foi de 97,97% e de 96,76%, respectivamente, caracterizando uma ótima distribuição para ambos os casos.

4.2 Análise espacial

A análise espacial foi efetuada por meio da análise dos variogramas, conforme descrito por Journel e Huijbregts (1978) e Isaaks e Srivastava (1989), no programa GS+ (GS+, 2000), onde os dados apresentaram distribuição normal.

4.2.1 Análise dos atributos físicos do solo

4.2.1.1 Análise variográfica da granulometria e da umidade do solo

As análises espaciais foram processadas pelo módulo “Análise da variância” do programa GS+.

Todos os 152 pontos escolhidos para a determinação da granulometria do solo e da umidade do solo foram localizados espacialmente, para que pudessem ser processados pelo referido programa. Foram avaliadas os seguintes atributos físicos do solo: areia muito grossa – AMG (%), areia grossa – AG (%), areia média – AM (%), areia fina – AF (%), areia muito fina – AMF (%), areia total (%), argila (%), silte (%) e umidade (%). Porém para a análise espacial, não será considerada a AMG (%), visto que através da análise física em laboratório não foi possível a quantificação da mesma, encontrando-se apenas traços.

Pela análise da superfície de tendência fornecida pelo próprio programa, não foi observada evidência de anisotropia para os atributos de granulometria e umidade do solo estudados, segundo os parâmetros estabelecidos por Zimmerman (1993).

Primeiramente, para o ajuste dos variogramas teóricos ao variograma experimental foi selecionada a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) como índice de avaliação do erro de ajuste, descrito por Zimmerman e Zimmerman (1991), como a melhor medida de avaliação.

A função foi ajustada apenas para os dados das distâncias menores, onde há uma tendência de elevação da curva do variograma, isto é, onde ocorre a influência do espaço na variabilidade dos dados, descrito por Ribeiro Júnior (1995), como ajuste “a sentimento”.

Os parâmetros obtidos para a análise variográfica da granulometria e da umidade do solo, encontram-se dispostos na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros variográficos da granulometria e da umidade do solo.

Variável	Modelo	Efeito Pepita Co	Patamar Co + C	Alcance (m)	r^2	SQR ⁽¹⁾	C/ (C + Co)	Classe de dependência espacial
AG (%)	exponencial	0,0010	0,3230	2,48	0,948	4,223E-03	0,997	forte
AM (%)	esférico	0,1000	93,3000	1,48	0,922	699,0	0,999	forte
AF (%)	esférico	0,1000	63,1500	1,54	0,910	422,0	0,998	forte
AMF(%)	esférico	0,0100	4,8230	1,35	0,904	1,97	0,998	forte
Areia total (%)	esférico	0,0010	1,3430	4,12	0,938	0,956	0,999	forte
Argila (%)	esférico	0,0010	1,5990	4,53	0,955	0,572	0,999	forte
Silte (%)	esférico	0,0010	0,7550	1,93	0,913	0,0762	0,999	forte
Umidade (%)	esférico	0,0010	2,1860	1,15	0,895	0,366	1,000	forte

⁽¹⁾ SQR – soma dos quadrados dos resíduos.

Pela análise dos dados da Tabela 5, observa-se que para o ajuste dos variogramas, o modelo esférico foi o escolhido na maior parte das variáveis, sendo o modelo exponencial escolhido apenas para AG (%).

A soma dos quadrados dos resíduos (SQR) descreve melhor o ajuste do variograma do que o parâmetro r^2 . De acordo com os padrões estabelecidos por Zimmerman e Zimmerman (1991), foi verificado que os valores dos erros encontrados experimentalmente para os atributos físicos do solo neste trabalho foram os menores e mostraram o melhor ajuste.

A análise da variabilidade espacial detectada pelo índice de dependência espacial, proposto por Zimback (2001), mostrou que todos os atributos físicos do solo estudados apresentaram forte dependência espacial.

A Figura 4 apresenta os variogramas isotrópicos para a granulometria e umidade do solo.

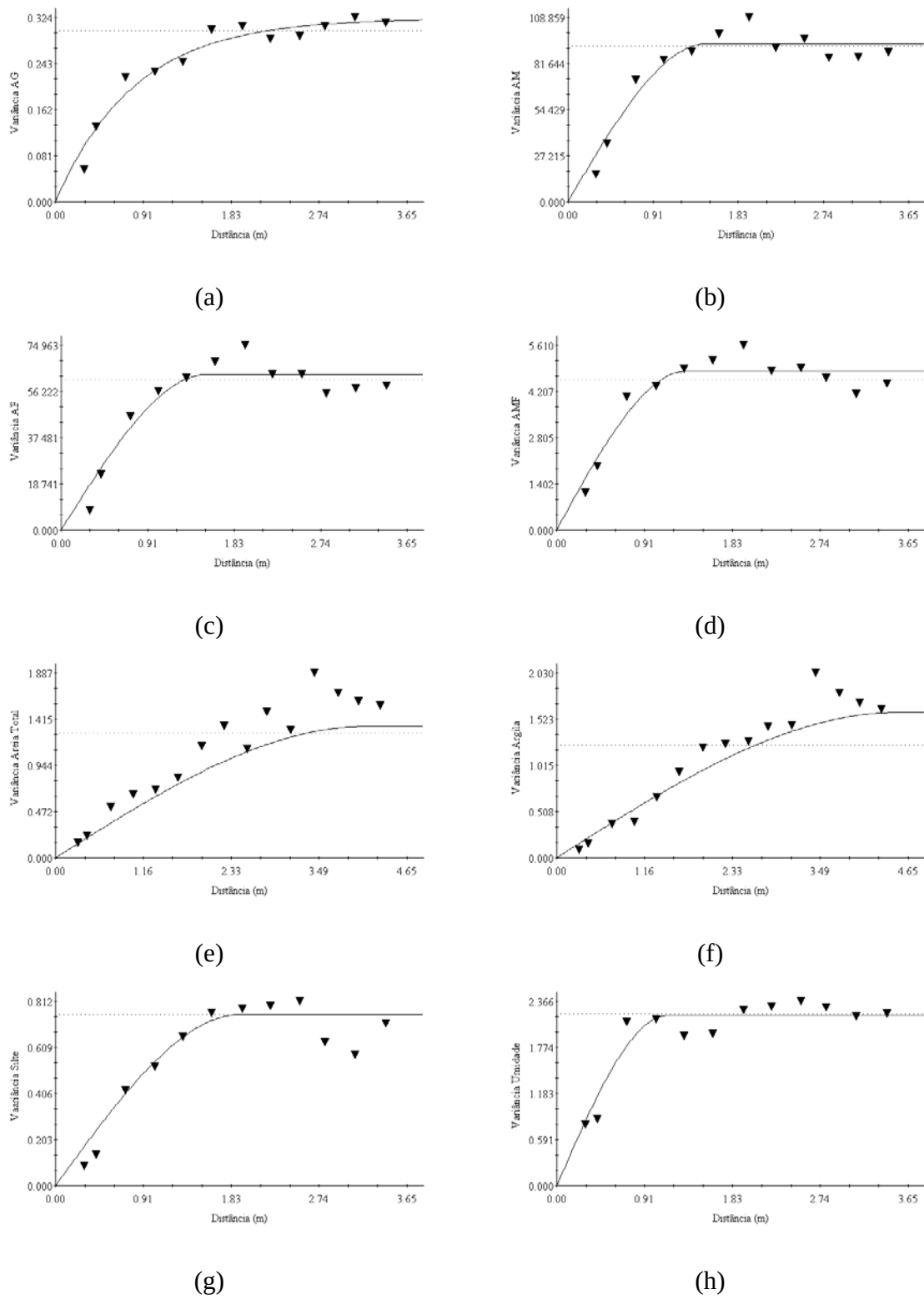


Figura 4. Variogramas isotrópicos da AG (a); AM (b); AF (c); AMF (d); areia total (e); argila (f); silte (g) e umidade (h).

A distância entre amostras ou escala utilizada no presente trabalho, mostrou-se eficiente para detectar a dependência espacial para todos os atributos físicos analisados (Figura 4 e Tabela 5), uma vez que apresentaram coeficientes de dependência espacial de 99 a 100%.

Através da análise da Tabela 5, pode-se notar que os valores de AG, AM, AF, AMF, areia total, argila e silte mostraram comportamento dos variogramas semelhantes entre si, com variância espacial de 99% da variância total das amostras.

O patamar visualiza a grandeza da variabilidade total da amostragem, sendo que, o maior valor encontrado foi para AM e o menor valor para AG, conforme demonstrado na Tabela 5.

O parâmetro alcance determina até qual distância os dados apresentam dependência espacial. Na análise espacial da Tabela 5, pode-se notar que o alcance variou de 1,35 m (AMF) a 4,53 m (argila).

Especificamente, para a umidade do solo, o parâmetro alcance encontrado foi de 1,15 m. Segundo Guerra (1988), o alcance corresponde ao conceito da zona de influência ou dependência espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes. Trangmar et al. (1985) mencionam que amostras separadas por distâncias menores que o alcance são espacialmente relacionadas e que aquelas separadas por distâncias maiores do que os alcances, não são espacialmente relacionados.

Portanto, o alcance da dependência espacial da umidade representa a distância na qual os pontos de amostragem apresentam-se correlacionados, sendo um parâmetro de fundamental importância para planejamento e avaliações de experimentos de irrigação, não somente para determinar a intensidade de amostragem, como também ajudar no planejamento de programas de irrigação, uma vez que detecta até onde uma variável em estudo apresenta dependência espacial. A umidade do solo também é importante, pois a partir de seus valores pode-se avaliar o armazenamento de água ao longo do perfil do solo em uma determinada profundidade.

Como foi encontrada dependência espacial para todos os atributos, a escala utilizada na amostragem para a determinação da dependência espacial dos dados de granulometria e umidade do solo foi adequada, não necessitando um maior adensamento das amostras.

4.2.1.2 Krigagem da granulometria e da umidade do solo

Considerando o exposto por Vieira et al. (1983), Zimmerman e Zimmerman (1991), Brooker e Winchester (1995) e Chien et al. (1997) que mencionaram a krigagem como um bom interpolador, foi gerado o mapa interpolado por krigagem de todas os atributos físicos da área estudada.

Foram utilizados também, para o cálculo da krigagem ordinária, os parâmetros obtidos pela análise espacial, ou seja, o alcance, efeito pepita e patamar, uma vez que a krigagem é um método geoestatístico de interpolação, sendo necessário detectar a distância espacial entre as amostras, para cada atributo em estudo (YOST et al., 1982).

A Figura 5 apresenta os mapas interpolados pelo método Krigagem para os seguintes atributos de granulometria do solo: AG (a), AM (b), AF (c) e AMF (d). A Figura 6 apresenta os mapas interpolados pelo método Krigagem para os demais atributos de granulometria do solo: areia total (a), argila (b) e silte (c); além de umidade (d) do solo.

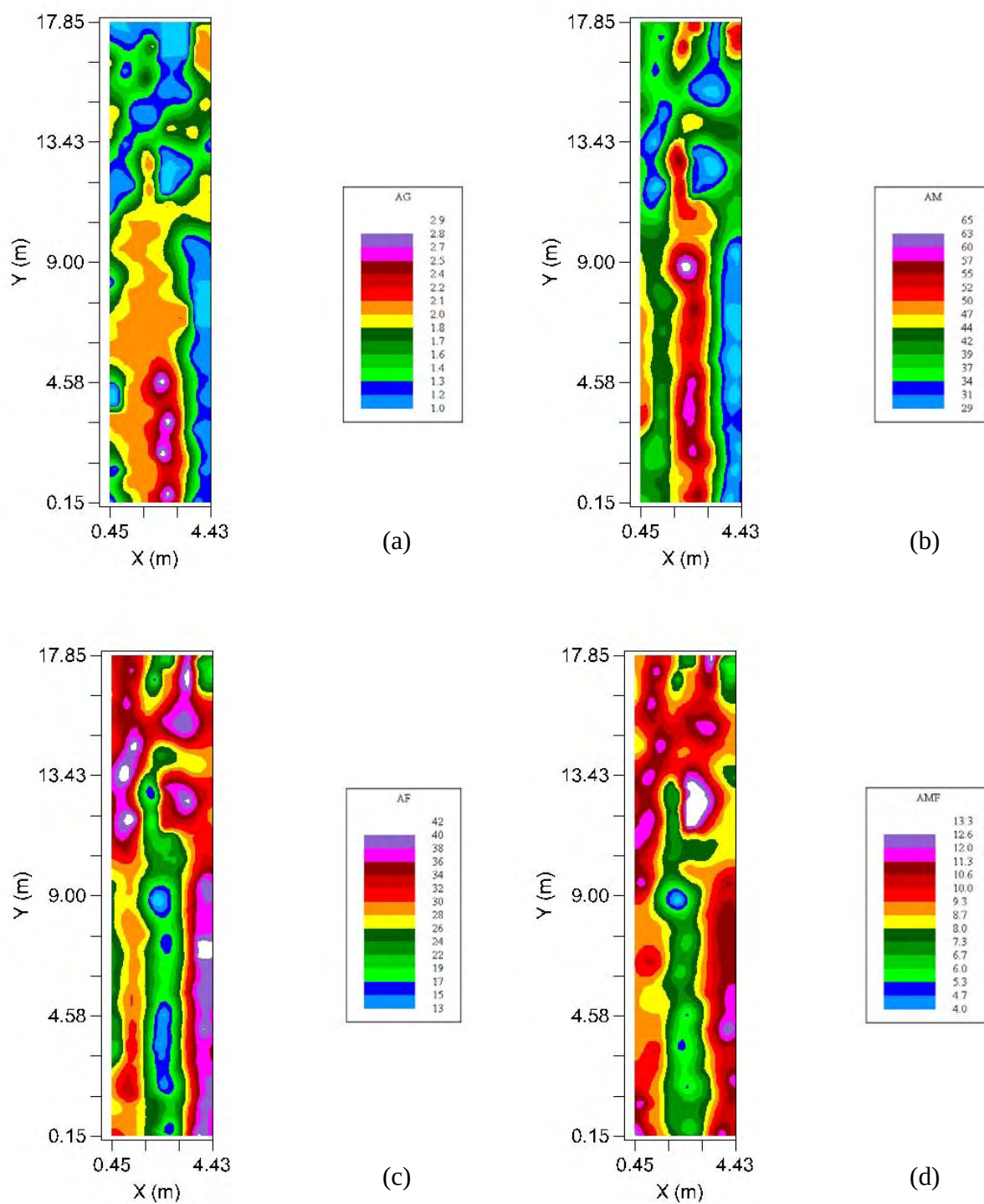


Figura 5. Representação bidimensional da krigagem da AG (a); AM (b); AF (c) e AMF (d) do solo.

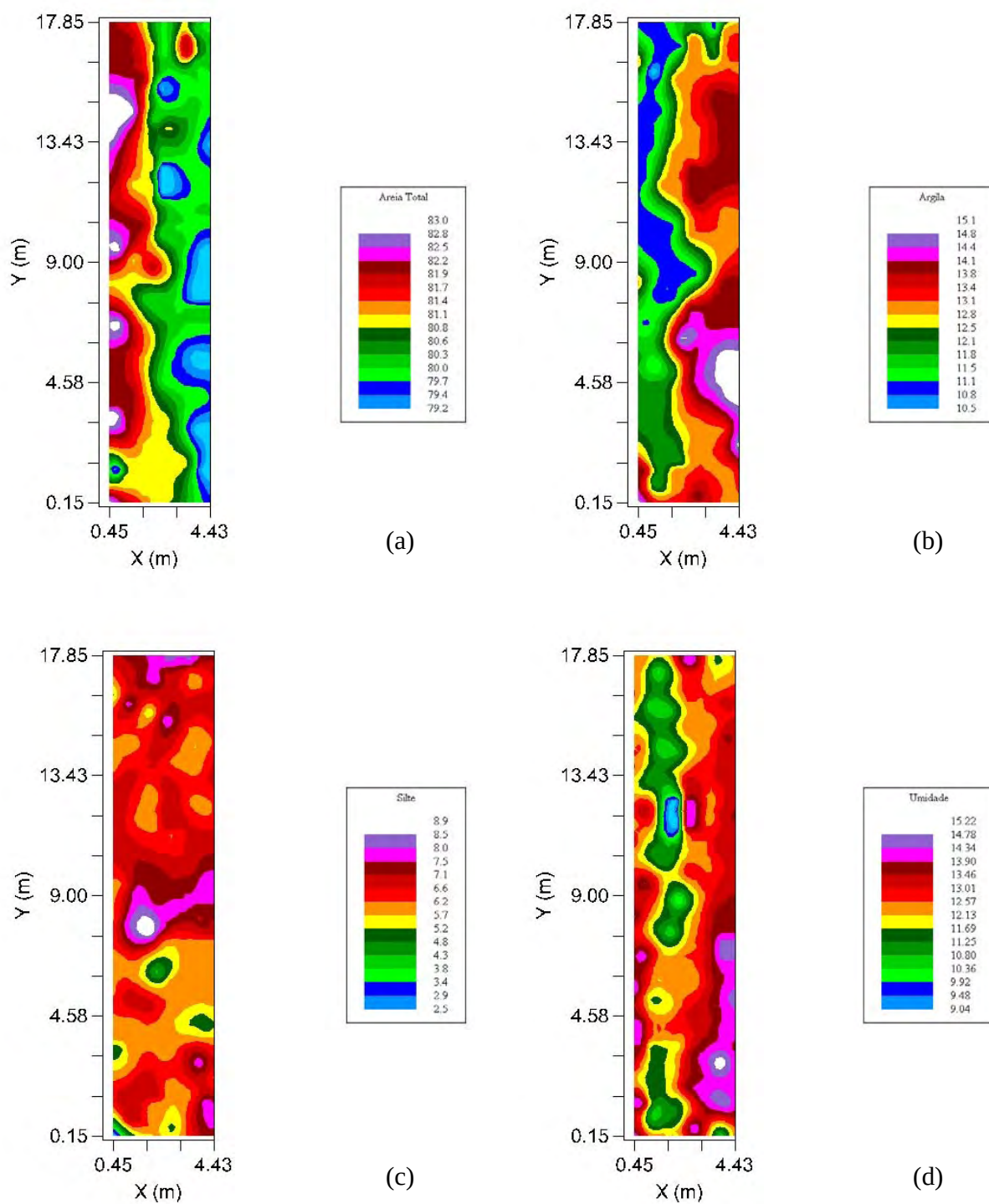


Figura 6. Representação bidimensional da krigagem da areia total (a); argila (b); silte (c) e umidade (d) do solo.

Nas Figuras 5 e 6, os dados de granulometria do solo e umidade do solo foram interpolados. Com dependência espacial forte, os mapas interpolados pelo método da krigagem mostraram-se com valores contínuos, sem aparentes mudanças abruptas entre classes vizinhas.

Analisando o mapa bidimensional da krigagem da umidade do solo (Figura 6d) e considerando-se os valores de umidade analisados, observou-se uma heterogeneidade na distribuição da água na maior parte da estufa utilizada no presente estudo. Apesar do valor do coeficiente de uniformidade de distribuição ser considerado ótimo, pode-se também observar, valores maiores de umidade do solo na porção inicial da estufa, no canto inferior direito do mapa, fato este atribuído a uma maior proximidade dos gotejadores à saída de água, ou seja, ao início do sistema de irrigação, onde se tem uma menor perda de carga e uma maior distribuição de água. Já na porção final da estufa, mais precisamente no canto superior esquerdo do mapa, observou-se uma diminuição dos valores de umidade do solo, o que pode ser justificável pelo fato de ser esta uma área característica de final de linha lateral do sistema de irrigação por gotejamento, onde a perda de carga é considerável.

Segundo Davis (1987), a validação cruzada é um método adequado para definir a exatidão da krigagem como interpolador. Também foi utilizada a validação cruzada para todos os atributos físicos do solo estudados, cujos parâmetros obtidos estão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6. Validação cruzada da krigagem dos dados da granulometria e da umidade do solo.

Variável	Coeficiente de regressão	Erro padrão	Erro padrão estimado	r^2
AG (%)	0,938	0,091	0,419	0,417
AM (%)	1,000	0,083	6,837	0,493
AF (%)	1,013	0,085	5,588	0,488
AMF(%)	0,932	0,093	1,655	0,402
Areia total (%)	0,960	0,051	0,612	0,707
Argila (%)	0,921	0,058	0,683	0,624
Silte (%)	0,459	0,106	0,819	0,111
Umidade (%)	0,994	0,073	0,994	0,552

Na Tabela 6, através da análise dos parâmetros da validação cruzada obtido para os dados de granulometria e umidade do solo, e mais precisamente através da análise do coeficiente de regressão, pode-se verificar que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, mostrando que as funções lineares que representam os dados estimados tem comportamento semelhante aos dados reais, comprovando que a krigagem ordinária foi um ótimo interpolador para os seguintes atributos físicos do solo estudado: AG (Figura 5a), AM (Figura 5b), AF (Figura 5c), AMF (Figura 5d), areia total (Figura 6a), argila (Figura 6b) e umidade do solo (Figura 6d). Entretanto, pode-se observar que para o silte obteve-se um baixo coeficiente de regressão da validação cruzada, demonstrando que o mapa da krigagem desse atributo provavelmente não representa com fidelidade a sua distribuição na estufa.

4.2.2 Análise dos atributos químicos do solo

4.2.2.1 Análise variográfica da fertilidade do solo

As análises espaciais foram processadas pelo módulo “Análise da variância” do programa GS+.

Todos os 152 pontos escolhidos para a determinação da fertilidade do solo antes e depois da implantação da cultura de alface foram localizados espacialmente, para que pudessem ser processados pelo referido programa. Foram avaliados os seguintes atributos de fertilidade do solo: pH (CaCl_2), M.O. (g/dm^3), P_{resina} (mg/dm^3), $\text{H} + \text{Al}$ ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$), K ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$), Ca ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$), Mg ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$), SB ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$), CTC ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) e V% ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$).

Pela análise da superfície de tendência fornecida pelo próprio programa, não foi observada evidência de anisotropia para os atributos de fertilidade do solo antes e depois da implantação da cultura de alface, segundo os parâmetros estabelecidos por Zimmerman (1993).

Primeiramente, para o ajuste dos variogramas teóricos ao variograma experimental foi selecionada a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) como índice de

avaliação do erro de ajuste, descrito por Zimmerman e Zimmerman (1991), como a melhor medida de avaliação.

O ajuste ocorreu apenas para as distâncias menores, onde há uma tendência de elevação da curva do variograma, isto é, onde ocorre a influência do espaço na variabilidade dos dados, descrito por Ribeiro Júnior (1995), como ajuste “a sentimento”.

Os parâmetros obtidos para a análise variográfica da fertilidade do solo antes e após a implantação da cultura de alface, encontram-se dispostos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros variográficos da fertilidade do solo antes e após a implantação da cultura de alface.

Variável	Período (1)	Modelo	Efeito Pepita Co	Patamar Co + C	Alcance (m)	r ²	SQR ⁽²⁾	C/ (C + Co)	Classe de dependência espacial
pH (CaCl ₂)	I	esférico	0,0245	0,1240	9,88	0,589	0,0177	0,802	forte
	II	esférico	0,0012	0,0248	2,32	0,915	9,684E-05	0,954	forte
M.O.	I	esférico	0,0010	3,2070	1,81	0,820	2,98	1,000	forte
(g dm ⁻³)	II	esférico	0,0010	1,4190	1,70	0,912	0,284	0,999	forte
P _{resina}	I	esférico	1,0000	1885,0000	4,29	0,963	535790,0	0,999	forte
(mg dm ⁻³)	II	esférico	4,0000	633,8000	3,12	0,923	77365,0	0,994	forte
H + Al	I	esférico	0,1000	4,3570	10,52	0,894	20,8	0,977	forte
(mmol _c dm ⁻³)	II	esférico	0,0010	1,1460	2,22	0,941	0,184	0,999	forte
K	I	esférico	0,0001	0,1990	1,30	0,904	3,483E-03	0,999	forte
(mmol _c dm ⁻³)	II	esférico	0,0001	0,1202	2,22	0,941	1,834E03	0,999	forte
Ca	I	esférico	0,1000	108,8000	1,29	0,865	1817,0	0,999	forte
(mmol _c dm ⁻³)	II	esférico	0,1000	53,1800	2,36	0,976	258,0	0,998	forte
Mg	I	esférico	0,0100	25,4300	1,32	0,913	76,7	1,000	forte
(mmol _c dm ⁻³)	II	esférico	0,0100	17,9500	2,40	0,843	130,0	0,999	forte
SB	I	esférico	0,1000	231,1000	1,29	0,877	11242,0	1,000	forte
(mmol _c dm ⁻³)	II	esférico	0,1000	113,2000	2,56	0,930	2225,0	0,999	forte
CTC	I	esférico	0,1000	228,7000	1,29	0,878	7674,0	1,000	forte
mmol _c dm ⁻³	II	esférico	0,1000	97,1000	2,58	0,926	2658,0	0,999	forte
V%	I	esférico	1,3000	56,0600	0,93	0,613	814,0	0,977	forte
mmol _c dm ⁻³	II	esférico	0,0100	5,5470	2,52	0,965	5,13	0,998	forte

⁽¹⁾ I – período antes da implantação da cultura de alface; II – período após a implantação da cultura de alface.

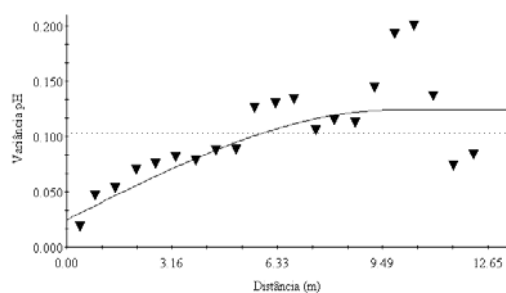
⁽²⁾ SQR – soma dos quadrados dos resíduos.

Pela análise dos dados da Tabela 7, observa-se que para o ajuste dos variogramas, o modelo esférico foi o escolhido para todos os atributos químicos nos dois períodos.

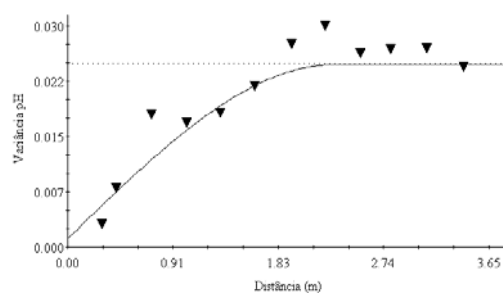
A soma dos quadrados dos resíduos (SQR) descreve melhor o ajuste do variograma do que o parâmetro r^2 . De acordo com os padrões estabelecidos por Zimmerman e Zimmerman (1991), foi verificado que os valores dos erros encontrados experimentalmente para os atributos químicos do solo neste trabalho foram os menores e mostraram o melhor ajuste.

A análise da variabilidade espacial detectada pelo índice de dependência espacial, proposto por Zimback (2001), mostrou que todos os atributos químicos do solo estudados apresentaram forte dependência espacial.

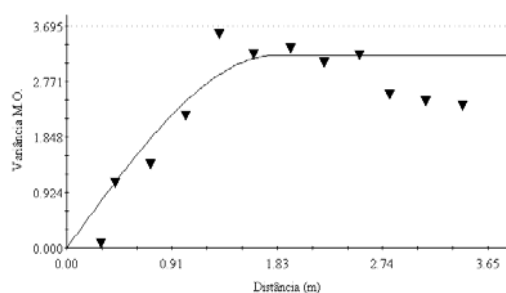
As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os variogramas teóricos para os atributos de fertilidade do solo antes e após a implantação da cultura de alface.



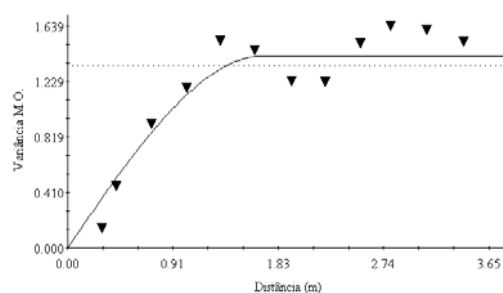
(a)



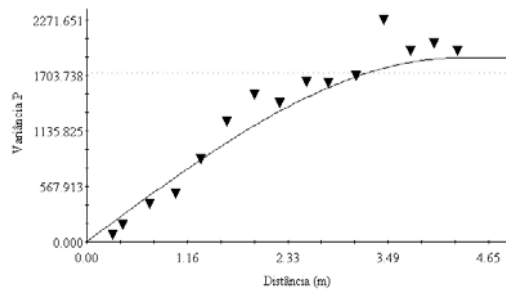
(b)



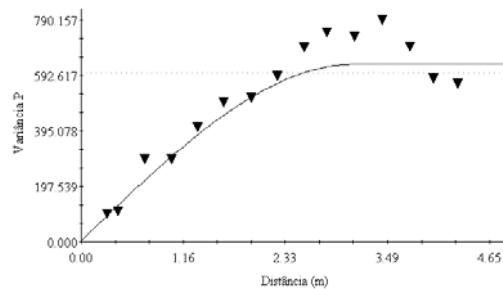
(c)



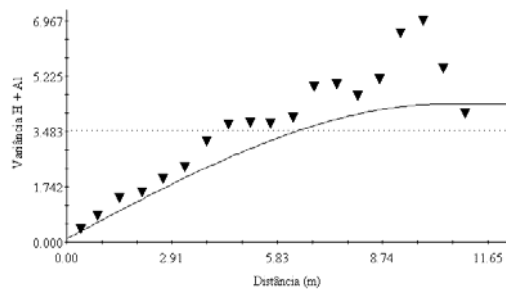
(d)



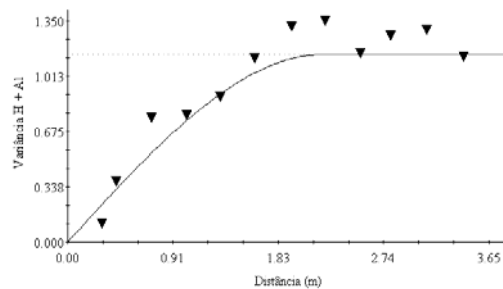
(e)



(f)

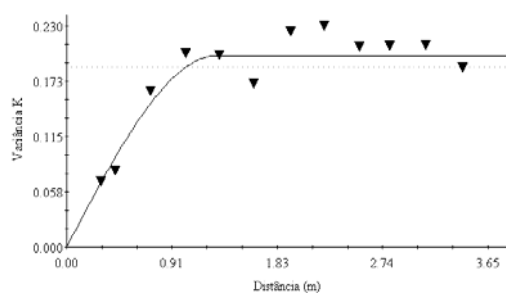


(g)

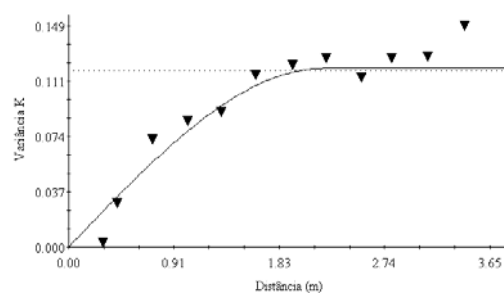


(h)

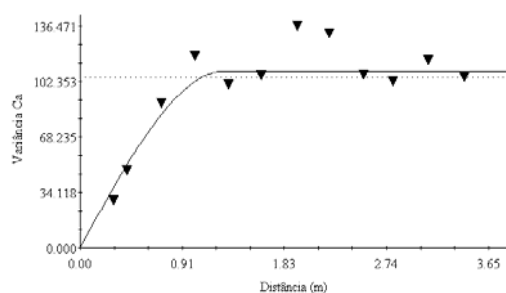
Figura 7. Variogramas isotrópicos do pH, M.O., P e H + Al do solo; (a), (c), (e) e (g) - antes do plantio de alface; (b), (d), (f) e (h) - após o plantio de alface.



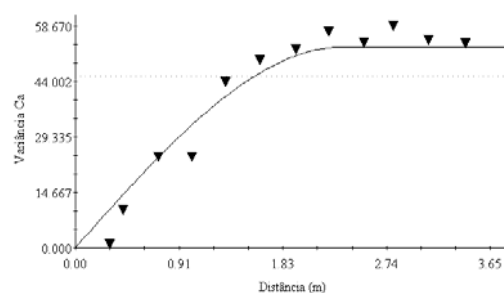
(a)



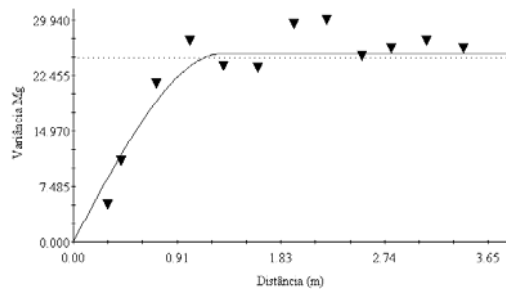
(b)



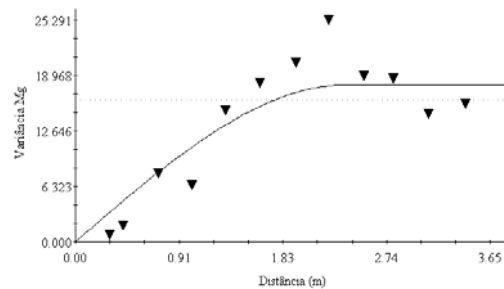
(c)



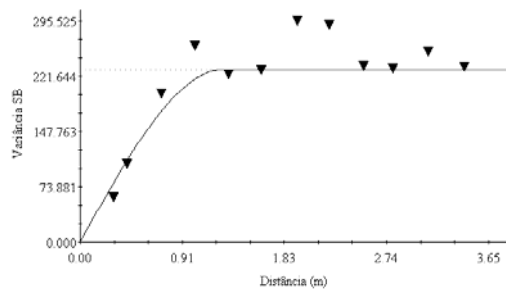
(d)



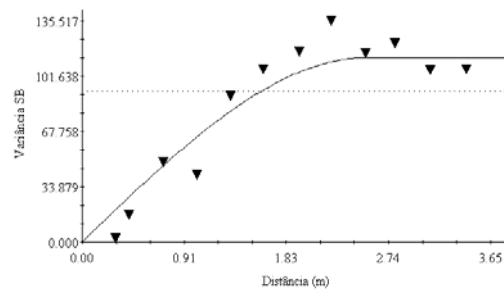
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 8. Variogramas isotrópicos do K, Ca, Mg e SB do solo; (a), (c), (e) e (g) - antes do plantio de alface; (b), (d), (f) e (h) - após o plantio de alface.

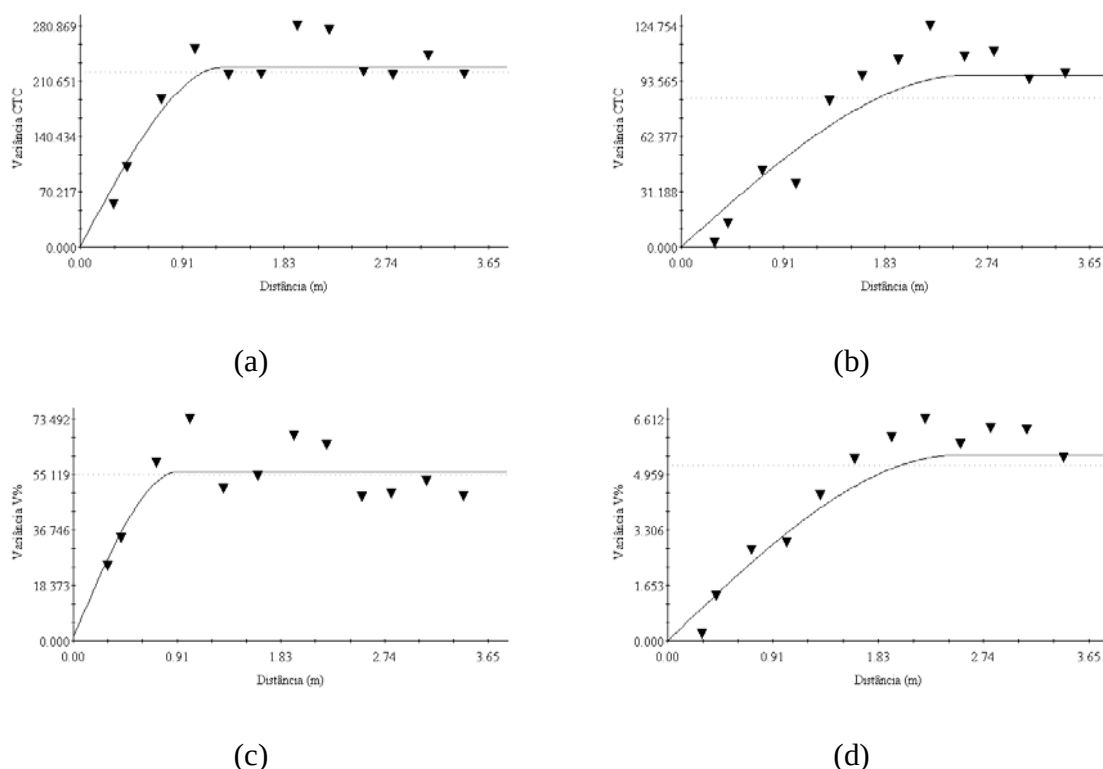


Figura 9. Variogramas isotrópicos da CTC e V% do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.

As Figuras 7e e 7f apresentam os variogramas para o P do solo nos períodos I e II, respectivamente. O efeito pepita é maior no período II do que o período I, muito embora seja difícil a visualização destas diferenças através das figuras expostas. Como o efeito pepita mostra outras influências para a variação do P do solo, além da localização das amostras, pode-se deduzir que o manejo e os tratamentos culturais inerentes à cultura, ou mesmo o simples fato de ocupação do solo com a cultura provocaram uma alteração significativa neste atributo, tornando a aleatoriedade das variações maiores.

Já um comportamento inverso pode ser observado para os atributos pH (Figuras 7a e 7b), H + Al (Figuras 7g e 7h) e V% (Figuras 9c e 9d), onde ao comparar os períodos I e II, observa-se uma diminuição do efeito pepita, mostrando que o cultivo da cultura contribuiu para tornar a aleatoriedade das variações menores. Ao analisar os valores máximos e mínimos de pH antes e após o plantio, denota-se um aumento tanto dos valores máximos, quanto dos valores mínimos, o que desperta a hipótese de que uma possível salinização tenha ocorrido.

Para os demais atributos (M.O. – Figuras 7c e 7d; K – Figuras 8a e 8b; Ca – Figuras 8c e 8d; Mg – Figuras 8e e 8f; SB – Figuras 8g e 8h e CTC – Figuras 9a e 9b) não foi observada a variação nos valores de efeito pepita, encontrando-se os mesmos valores para os períodos I e II, conforme os dados da Tabela 7.

A distância entre amostras ou escala utilizada no presente trabalho, mostrou-se eficiente para detectar a dependência espacial para todos os atributos químicos analisados (Figuras 7, 8 e 9), não necessitando portanto de maior adensamento de amostragem.

Os valores de H + Al (Figuras 7g e 7h) e V% (Figuras 9c e 9d) mostraram comportamento dos variogramas semelhantes entre si.

Os valores de K (Figuras 8a e 8b), Ca (Figuras 8c e 8d), Mg (Figuras 8e e 8f), SB (Figuras 8g e 8h) e CTC (Figuras 9a e 9b) mostraram comportamento dos variogramas semelhantes entre si. A similaridade dos variogramas de K, Ca e Mg é coerente, uma vez que todos estes atributos representam as bases do solo. O variograma da SB simplesmente generaliza e exterioriza o comportamento de todas as bases do solo, uma vez que é obtido através da soma das mesmas.

O patamar visualiza a grandeza da variabilidade total da amostragem, sendo que, a maior variação ocorreu em P_{resina} I e II e a menor variação ocorreu em K I e II, conforme demonstrado na Tabela 7.

O parâmetro alcance determina até qual distância os dados apresentam dependência espacial. Nos dados da Tabela 7, pode-se notar que o alcance variou desde 0,93m (V% I) até 10,52m (H + Al I).

Pela Tabela 7 pode-se notar que, para os teores de cátions (Ca, Mg, K) no solo, bem como a SB e CTC no solo estudado, a amplitude de dependência espacial é sempre maior no período II, mostrando mais uma vez que o manejo e os tratamentos culturais inerentes a cultura influenciaram na variabilidade espacial.

Pela Tabela 7 pode-se notar também que para os valores de V% no solo, a amplitude de dependência espacial é sempre maior no período II, ou seja, após o plantio obteve-se um valor de alcance maior. É interessante observar que tal comportamento seria esperado se no solo estudado tivesse sido feita a operação de calagem antes do plantio da cultura, visando a correção de acidez do solo e à elevação do valor de V%. Entretanto, mesmo não tendo sido feita esta operação, o aumento do valor de alcance ocorreu, aumentando a

dependência espacial, que é o que se espera quando se trabalha com agricultura de precisão, ou seja, que ao longo dos cultivos, com tratamentos localizados de correções e adubações, consiga-se diminuir as variações, tornando as áreas mais homogêneas e diminuindo a intensidade de amostragem. Isto talvez também tenha ocorrido devido a uma possível salinização do ambiente protegido, mostrando que este ambiente por ocasião dos cultivos apresenta comportamento peculiar, reforçando a idéia de que devido a complexidade do sistema água-solo-planta, estudos cada vez mais acurados com relação a variabilidade espacial dos atributos solo-planta são requeridos, quando o que se almeja é a agricultura de precisão.

De modo generalizado, notou-se a existência de variabilidade espacial ao se tratar de atributos químicos do solo em cultivo protegido, necessitando-se cada vez mais desenvolver estudos que considerem a variabilidade espacial dos atributos do solo neste ambiente, onde é realizado um número sucessivo de cultivos e os dados são de aplicação a longo prazo, principalmente para condução de experimentos. Na implantação de uma cultura visando avaliar o grau e resposta a determinadas adubações, comportamento em relação a um manejo do solo específico, ou ainda, um melhoramento genético, mais estudos são interessantes. É importante considerar também que, devido ao cultivo protegido apresentar certas peculiaridades, torna-se necessário que estudos neste sentido sejam mais detalhados, quando se pensa em padronização de uma escala de amostragem para tal ambiente, uma vez que os métodos clássicos, ao fazerem inferências sobre o comportamento dos atributos do solo, deixam lacunas quanto à eficiência da recomendação de adubação e calagem.

Ainda, em ambiente protegido, onde a irrigação é o único meio de fornecimento de água às plantas, principalmente através da irrigação por gotejamento, estudos envolvendo a variabilidade espacial de água e nutrientes são cada vez mais interessantes, necessitando também de um tratamento localizado a nível de fertirrigação, quando o que se almeja é a irrigação de precisão, através da racionalização do uso da água e nutrientes.

4.2.2.2 Krigagem da fertilidade do solo

Considerando o exposto por Vieira et al. (1983), Zimmerman e Zimmerman (1991), Brooker e Winchester (1995) e Chien et al. (1997) que mencionaram a

krigagem como um bom interpolador, foi gerado o mapa interpolado por krigagem de todos os atributos químicos da área estudada.

Foram utilizados também, para o cálculo da krigagem, os parâmetros obtidos pela análise espacial, ou seja, o alcance, efeito pepita e patamar, uma vez que a krigagem é um método geoestatístico de interpolação, sendo necessário detectar a distância espacial entre as amostras, para cada atributo em estudo (YOST et al., 1982).

Nas Figuras 10, 11, 12, 13 e 14 estão dispostos os mapas dos atributos químicos do solo obtidos por krigagem ordinária.

As Figuras 10a e 10b apresentam, respectivamente, os mapas interpolados pela krigagem, para o pH do solo antes e após a implantação da cultura de alface. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para o mesmo atributo (Figuras 7a e 7b), o componente espacial foi responsável por 80% da variância total antes do plantio e por 95% após o plantio de alface. Com dependência espacial forte, para o pH antes e após o plantio de alface, os mapas interpolados pelo método da krigagem mostraram-se com valores contínuos, sem aparentes mudanças abruptas entre classes vizinhas, fato este comprovado pelos altos coeficientes de regressão, com valores de 1,028 e 0,970, respectivamente, para o pH antes e pH após o plantio de alface, conforme apresentado na Tabela 8. Através da análise do coeficiente de regressão para o pH do solo, pode-se verificar que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, mostrando que as funções lineares que representam os dados estimados tem comportamento semelhante aos dados reais, comprovando que a krigagem ordinária foi um ótimo interpolador para o pH do solo em ambos os períodos.

As Figuras 10c e 10d apresentam, respectivamente, os mapas interpolados pela krigagem para a M.O. do solo antes e após a implantação da cultura de alface. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para a M.O. (Figuras 7c e 7d), o componente espacial foi responsável por 100% da variância total antes do plantio e por 99% após o plantio de alface. Com dependência espacial forte, para a M.O. antes do plantio de alface, o mapa interpolado pela krigagem mostrou-se com boa distribuição e continuidade, fato este comprovado pelos alto coeficiente de regressão, com o valor de 1,004 apresentado na Tabela 8. Verificou-se que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, mostrando que krigagem ordinária foi um ótimo interpolador para a M.O. do solo antes do plantio da cultura. Entretanto, mesmo com dependência espacial forte para os dados de M.O.

do solo após o plantio de alface, o coeficiente de regressão da validação cruzada apresentado na Tabela 8 não apresentou um alto valor como o que pode ser observado antes do plantio, porém os desvios são considerados regulares, mostrando que krigagem foi um bom interpolador para a M.O. do solo após o plantio da cultura.

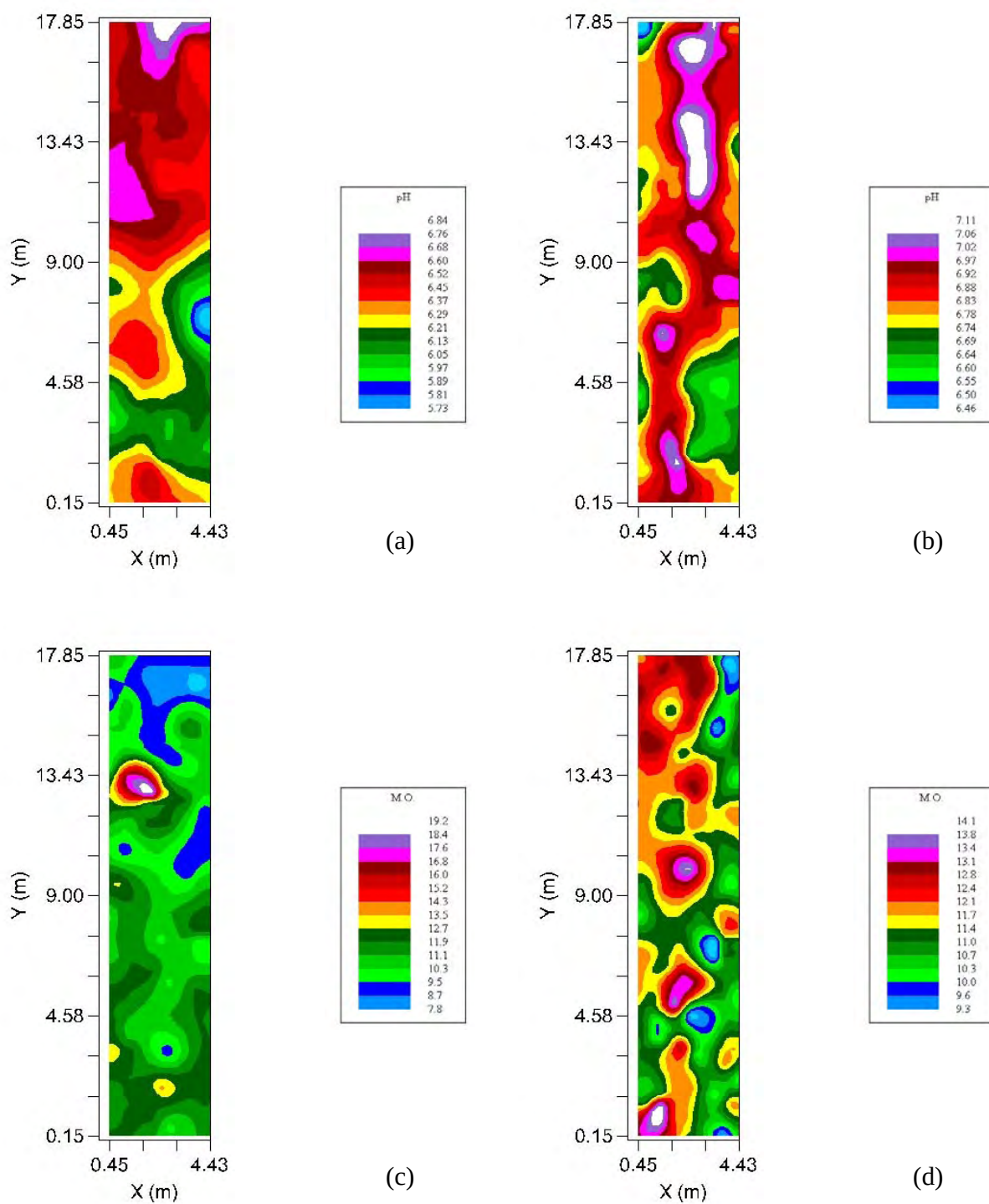


Figura 10. Representação bidimensional da krigagem do pH e M.O. do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.

As Figuras 11a e 11c apresentam, respectivamente, os mapas interpolados pela krigagem para o P e H + Al do solo antes do plantio, enquanto que as Figuras 11b e 11d, para os mesmos atributos após o plantio. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para o P (Figuras 7e e 7f), o componente espacial foi responsável por 99% da variância total antes e após o plantio de alface. Pelos variogramas obtidos para o H + Al (Figuras 7g e 7h), o componente espacial foi responsável por 97% da variância total antes e por 99% após o plantio de alface. Com dependência espacial forte, para o P e H + Al antes do plantio de alface, os mapas interpolados pelo método da krigagem mostraram-se também com boa distribuição e continuidade; com o valor de coeficiente de regressão da validação cruzada de 0,993 e 1,011, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 8, verificando-se que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, mostrando que krigagem ordinária foi um ótimo interpolador para os atributos antes do plantio da cultura. Já para o P e H + Al do solo após o plantio, os coeficientes de regressão da validação cruzada apresentados na Tabela 8 foram um pouco menores, mostrando as estimações para o P e H + Al após o plantio foram ligeiramente menos acuradas do que as estimações para os mesmos atributos antes do plantio.

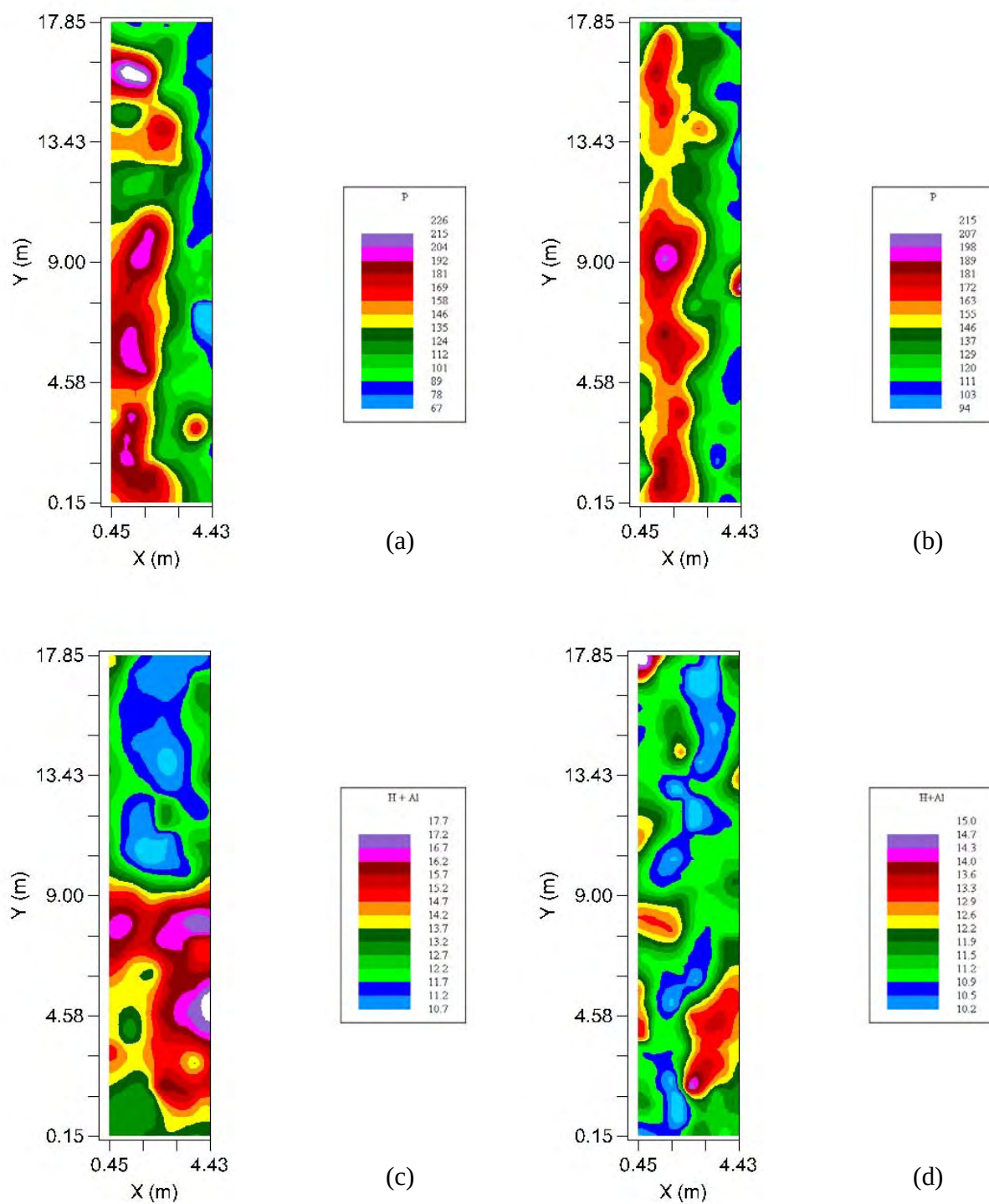


Figura 11. Representação bidimensional da krigagem do P e H + Al do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.

As Figuras 12a e 14c apresentam, respectivamente, os mapas interpolados pela krigagem para o K e V% do solo antes do plantio, enquanto que as Figuras 12b e 14d para os mesmos atributos após o plantio. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para o K e V% (Figuras 8a e 9c), o componente espacial foi responsável, respectivamente, por 99% e 97% da variância total antes do plantio e pelos variogramas obtidos para o K e V% (Figuras 8b e 9d), o componente espacial foi responsável por 99% da variância total após o plantio de alface. Com dependência espacial forte, para o K e V% antes do plantio de alface, os mapas interpolados pelo método da krigagem mostraram-se com boa distribuição e continuidade; com coeficientes de regressão desde 0,959 a 1,002, conforme apresentados na Tabela 8, verificando-se que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, mostrando que krigagem ordinária foi um ótimo interpolador para os atributos K e V% antes do plantio da cultura. Já para os mesmos atributos após o plantio, o coeficiente de regressão da validação cruzada obtido foi um pouco menor (Tabela 8), porém os mapas interpolados para os atributos também apresentaram uma boa continuidade, mostrando que a krigagem foi satisfatória para a interpolação do atributo.

As Figuras 12c e 12d apresentam os mapas interpolados pela krigagem para o Ca do solo, respectivamente, antes e após a implantação da cultura de alface. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para o Ca (Figuras 8c e 8d), o componente espacial foi responsável por 99% da variância total antes e após o plantio de alface; caracterizando dependência espacial forte. O mapa gerado para o Ca antes do plantio (Figura 12c) apresentou boa continuidade para o atributo antes do plantio. Entretanto, para o Ca após o plantio, apesar da alta dependência espacial, a análise do coeficiente de regressão da validação cruzada, observado na tabela 8, mostrou que o método de interpolação por krigagem não foi tão satisfatório quanto para o Ca antes do plantio, fato que pode ser visualizado através da Figura 12d.

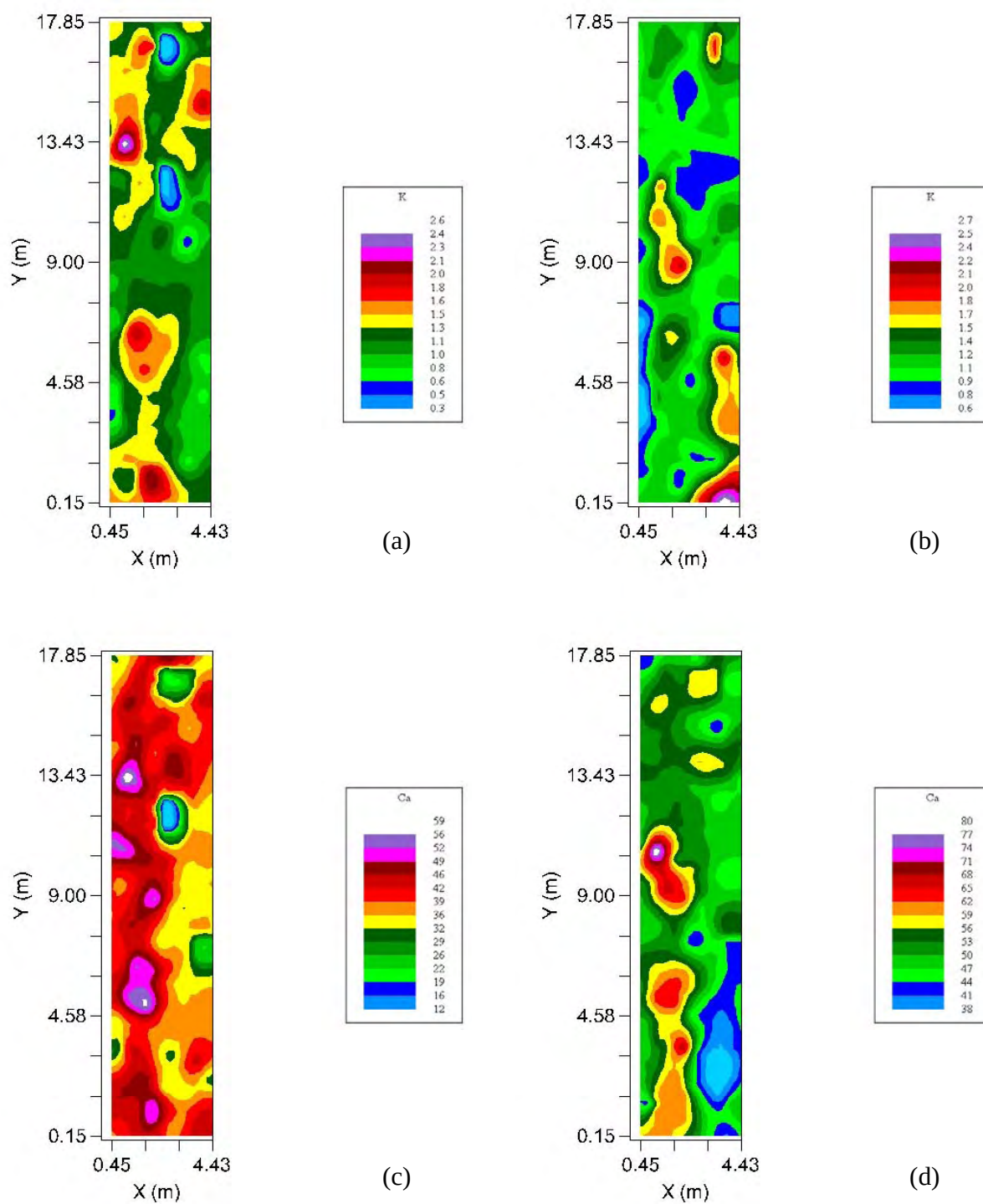


Figura 12. Representação bidimensional da krigagem do K e Ca do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.

As Figuras 13a, 13c e 14a apresentam, respectivamente, os mapas interpolados pela krigagem para o Mg, SB e CTC do solo antes do plantio, enquanto que as Figuras 13b, 13d e 14b para os mesmos atributos após o plantio. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para o Mg, SB e CTC (Figuras 8e, 8g e 9a), o componente espacial foi responsável por 100% da variância total antes do plantio e pelos variogramas obtidos para o Mg, SB e CTC (Figuras 8f, 8h e 9b), o componente espacial foi responsável por 99% após o plantio de alface. Com dependência espacial forte, para o Mg, SB e CTC antes do plantio de alface, os mapas interpolados pelo método da krigagem mostraram-se com boa distribuição e continuidade, com coeficientes de regressão muito próximos, de 0,967 a 0,968, conforme apresentados na Tabela 8, verificando-se que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, mostrando que krigagem ordinária foi um ótimo interpolador para os atributos Mg, SB e CTC antes do plantio da cultura. Entretanto, para os atributos Mg, SB e CTC após o plantio, os coeficientes de regressão da validação cruzada obtidos foram muito baixos, com valores de 0,446 a 0,511 (Tabela 8), mostrando que os dados estimados apresentam um certo desvio em relação aos dados reais. As estimações mostraram, portanto, baixa exatidão sem uma certa continuidade e distribuição para os mapas interpolados para os atributos Mg, SB e CTC após o plantio (Figuras 13b, 13d e 14b, respectivamente), mostrando que para estes atributos a krigagem não foi um bom interpolador, apesar da alta dependência espacial detectada pelos variogramas (Figuras 8f, 8h e 9b), cujo componente espacial foi responsável por 99% da variância total após o plantio.

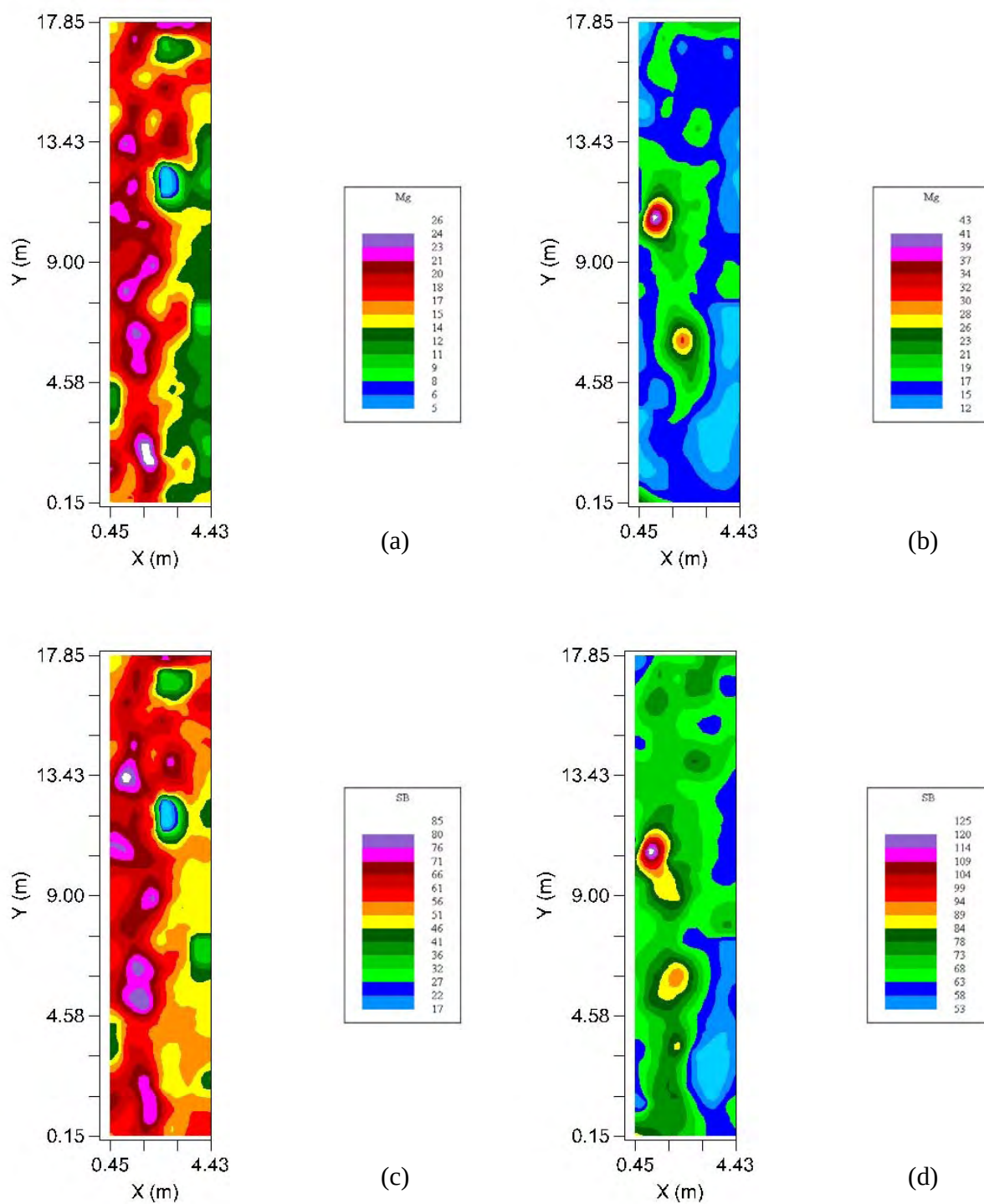


Figura 13. Representação bidimensional da krigagem do Mg e SB do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alfafa; (b) e (d) - após o plantio de alfafa.

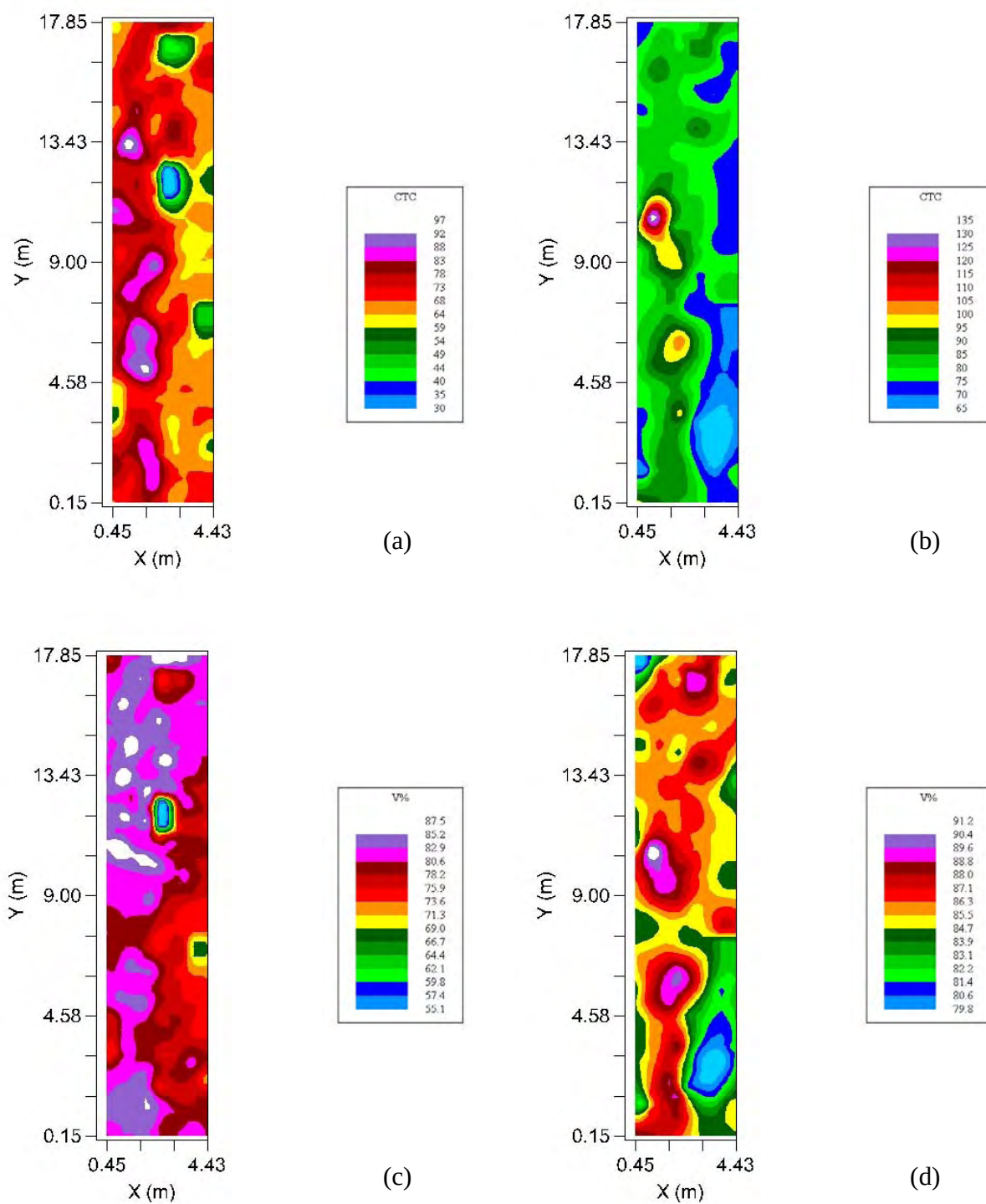


Figura 14. Representação bidimensional da krigagem da CTC e V% do solo; (a) e (c) - antes do plantio de alface; (b) e (d) - após o plantio de alface.

A escala utilizada na amostragem para a determinação da dependência espacial dos dados de fertilidade do solo antes do plantio mostrou-se adequada para todos os atributos, uma vez que a krigagem apresentou-se apropriada para a interpolação dos mesmos. Já para os dados de fertilidade do solo após o plantio, a krigagem mostrou-se adequada para todos os atributos, com exceção dos atributos Mg, SB e CTC. A explicação para o baixo desempenho da krigagem para estes atributos após o plantio talvez seja a necessidade de maior adensamento das amostras. Novamente, percebe-se que os tratos culturais alteram a variabilidade espacial dos atributos, mostrando a complexidade do sistema água-solo-planta, necessitando de tratamentos regionalizados. Para a caracterização da variabilidade espacial de todos os atributos químicos e físicos do solo estudados, os dados analisados permitiram consolidar a abordagem feita por Cataneo (1997), que relata a presença de variabilidade espacial nas parcelas em ambiente protegido.

Segundo Davis (1987), a validação cruzada foi utilizada para definir a exatidão da krigagem como interpolador para todos os atributos químicos do solo estudados, cujos parâmetros obtidos estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8. Validação cruzada da krigagem dos dados de fertilidade do solo.

Variável	Período	Coefficiente de regressão	Erro padrão	Erro padrão estimado	r ²
pH (CaCl ₂)	I	1,028	0,053	0,171	0,716
	II	0,970	0,066	0,101	0,587
M.O.	I	1,004	0,049	0,979	0,741
(g/dm ³)	II	0,786	0,082	0,914	0,381
P _{resina}	I	0,993	0,044	20,010	0,768
(mg/dm ³)	II	0,808	0,074	18,375	0,440
H + Al	I	1,011	0,044	0,876	0,782
(mmol _c /dm ³)	II	0,826	0,080	0,821	0,413
K	I	0,959	0,069	0,286	0,564
(mmol _c /dm ³)	II	0,841	0,090	0,274	0,367
Ca	I	0,967	0,058	6,067	0,649
(mmol _c /dm ³)	II	0,647	0,090	5,804	0,256
Mg	I	0,967	0,061	3,061	0,624
(mmol _c /dm ³)	II	0,446	0,099	3,772	0,120
SB	I	0,967	0,057	8,894	0,657
(mmol _c /dm ³)	II	0,511	0,097	8,844	0,156
CTC	I	0,968	0,056	8,592	0,668
mmol _c /dm ³	II	0,478	0,098	8,527	0,136
V%	I	1,002	0,056	4,186	0,682
mmol _c /dm ³	II	0,829	0,080	1,744	0,419

Os coeficientes de regressão obtidos nas validações cruzadas mostraram que os valores estimados e reais apresentaram pequena variação, excetuando o Ca II, Mg II, SB II e CTC II, esses parâmetros apresentariam valores similares quando realmente amostrados.

4.2.3 Análise dos parâmetros de produtividade de alface

4.2.3.1 Análise variográfica dos parâmetros de produtividade de alface

Os parâmetros de produtividade da cultura de alface foram obtidos após a colheita, que pode ser visualizada na Figura 15.



Figura 15. Canteiros de alface no ponto de colheita.
Fonte: Batista (2006).

As análises espaciais foram processadas pelo módulo “Análise da variância” do programa GS+.

Foram escolhidos 152 pontos para a determinação dos seguintes parâmetros de produtividade da cultura de alface: massa de matéria fresca da parte aérea total

(g) – MF, massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g) – MFC, massa de matéria seca da parte aérea comercial (g) – MSC e diâmetro de cabeça comercial (cm) – DCC.

Os parâmetros obtidos para a análise variográfica dos parâmetros de produtividade da cultura de alface encontram-se dispostos na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros variográficos da produtividade da cultura de alface.

Variável	Modelo	Efeito Pepita Co	Patamar Co + C	Alcance (m)	r^2	SQR ⁽¹⁾	C/ (C + Co)	Classe de dependência espacial
MF – (g)	esférico	2580,0000	15880,0000	0,41	0,066	2,312E + 07	0,838	forte
MFC – (g)	esférico	1360,0000	8650,0000	0,53	0,366	5,237E + 06	0,843	forte
MSC – (g)	linear	27,7305	27,7305	3,43	0,254	327,0	0,000	nula
DCC – (cm)	exponencial	0,5300	1,9330	0,72	0,571	0,145	0,726	moderada

⁽¹⁾ SQR – soma dos quadrados dos resíduos.

Pela análise dos dados da Tabela 9, observa-se que para o ajuste dos variogramas, o modelo esférico foi escolhido para as variáveis MF (g) e MFC (g), sendo o modelo exponencial escolhido apenas para DCC (cm) e o modelo linear apenas para MSC (g).

A soma dos quadrados dos resíduos (SQR) descreve melhor o ajuste do variograma do que o parâmetro r^2 . De acordo com os padrões estabelecidos por Zimmerman e Zimmerman (1991), foi verificado que os valores dos erros encontrados experimentalmente para os parâmetros de produtividade de alface neste trabalho foram os menores e mostraram o melhor ajuste.

A análise da variabilidade espacial detectada pelo índice de dependência espacial, proposto por Zimback (2001), mostrou que os parâmetros MF (g) e MFC (g) apresentaram forte dependência espacial e que o atributo DCC (cm) mostrou moderada dependência espacial e a variável MSC (g) não apresentou dependência espacial, caracterizando efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial.

A Figura 16 apresenta os variogramas isotrópicos para os parâmetros de produtividade da cultura de alface.

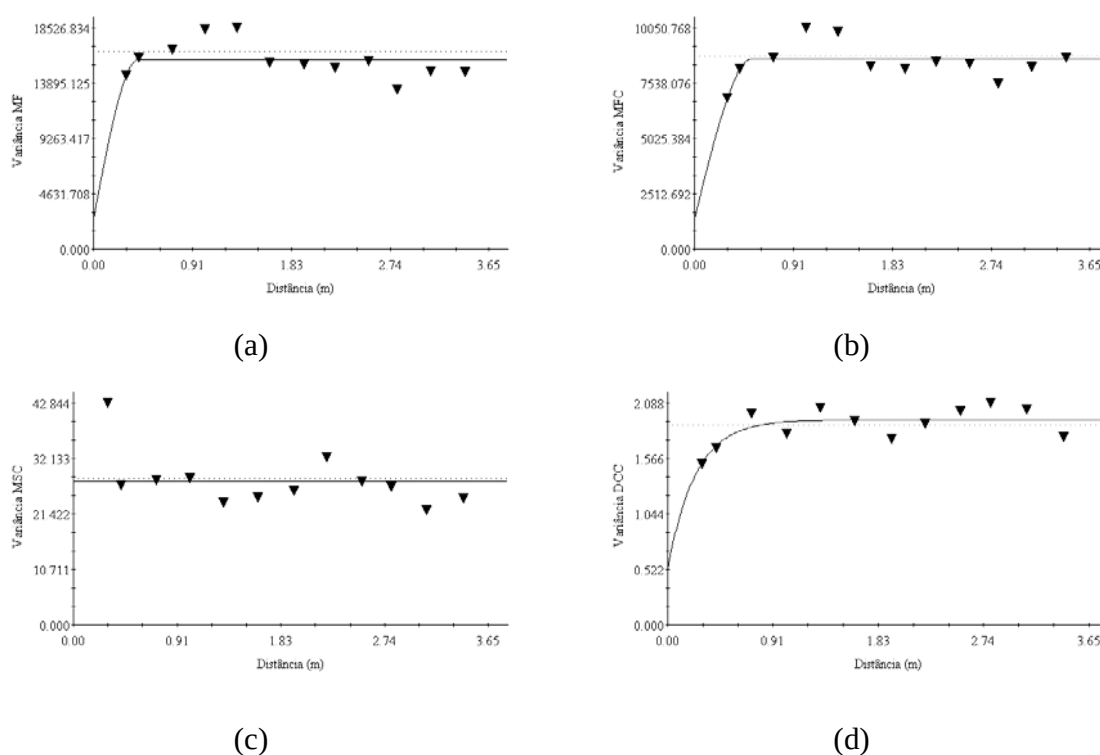


Figura 16. Variogramas isotrópicos da MF (a); MFC (b); MSC (c) e DCC (d).

As Figuras 16a, 16b, 16 c e 16d apresentam os variogramas dos parâmetros de produtividade da cultura de alface: massa de matéria fresca da parte aérea total (g) – MF, massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g) – MFC, massa de matéria seca da parte aérea comercial (g) – MSC e diâmetro de cabeça comercial (cm) – DCC.

O parâmetro alcance determina até qual distância os dados apresentam dependência espacial. Na análise espacial da Tabela 9, pode-se notar que o alcance variou desde 0,41 m (MF) até 0,72 m (DCC).

Para a variável MSC, embora tenha ocorrido o valor de alcance de 3,43 m, não foi possível visualizar onde a curva do variograma se estabilizou, não devendo portanto creditar este valor como correto ou real. Para a MSC, a escala de trabalho não foi suficiente, apresentando efeito pepita puro e mostrando que, provavelmente, a dependência espacial entre as amostras ocorra a distâncias inferiores a menor distância analisada neste trabalho, requerendo portanto, maior adensamento de amostragem ou, ainda, para o parâmetro MSC, é possível pressupor que em se tratando de plantas, devido à diferença dos teores dos elementos que as compõem, comportamentos inesperados podem ocorrer quando se obtém a matéria seca. Deste modo, é provável que a independência entre as observações exista, não sendo portanto aplicável a geoestatística para a análise dos dados para este atributo.

Os valores de MF (Figura 16a) e MFC (Figura 16b) mostraram comportamento dos variogramas semelhantes entre si, com variância espacial de 84% da variância total das amostras. A similaridade dos variogramas de MF e MFC mostra que as variáveis apresentam uma possível correlação entre si, o que é perfeitamente explicável, visto que os valores de MFC são obtidos através dos valores de MF, retirando-se apenas as folhas externas da alface. Os valores de MF e MSC, bem como MFC e MSC não apresentam similaridade, uma vez que para o atributo MSC não foi encontrado sequer dependência espacial, o que mostra que a massa de matéria seca da planta não apresenta correlação com a massa de matéria fresca da parte aérea e com a massa de matéria fresca da parte aérea comercial.

A variabilidade espacial dos parâmetros de produtividade da cultura de alface em ambiente protegido ressaltam a necessidade de estudos mais acurados de melhoramento genético, uma vez que uma determinada variedade pode comportar-se de

maneira diferenciada, dependendo da localização espacial das plantas, mesmo considerando que há homogeneidade genética.

4.2.3.2 Krigagem dos parâmetros de produtividade de alface

Considerando o exposto por Vieira et al. (1983), Zimmerman e Zimmerman (1991), Brooker e Winchester (1995) e Chien et al. (1997) que mencionaram a krigagem como um bom interpolador, foi gerado o mapa interpolado por krigagem de todos os parâmetros de produtividade de alface da área estudada.

Foram utilizados também, para o cálculo da krigagem, os parâmetros obtidos pela análise espacial, ou seja, o alcance, efeito pepita e patamar, uma vez que a krigagem é um método geoestatístico de interpolação, sendo necessário detectar a distância espacial entre as amostras, para cada atributo em estudo (YOST et al., 1982).

Na Figura 17 estão dispostos os mapas dos parâmetros de produtividade de alface.

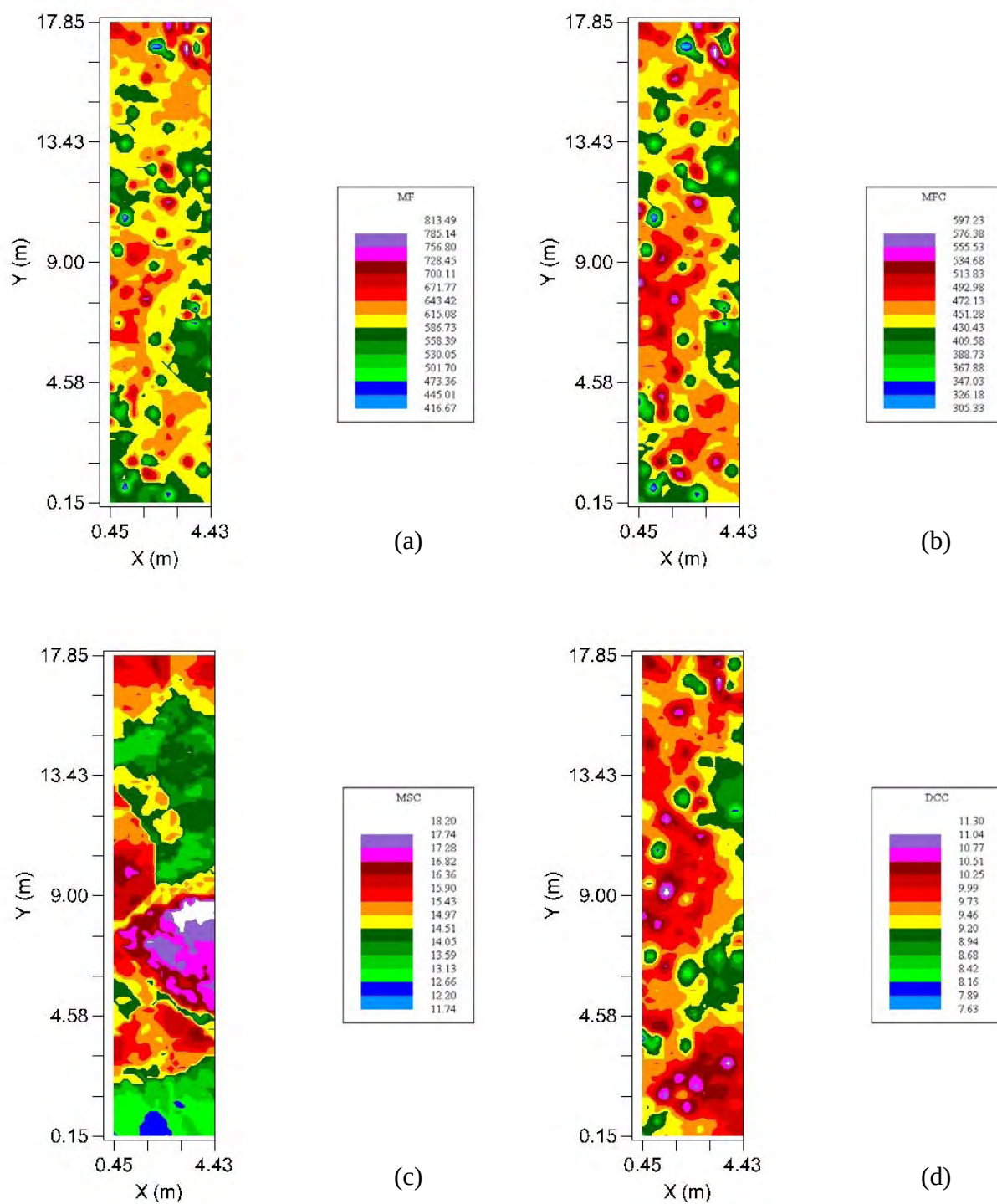


Figura 17. Representação bidimensional da krigagem da MF (a); MFC (b); MSC (c) e DCC (d).

As Figuras 17a e 17b apresentam, respectivamente, os mapas interpolados pela krigagem, para a MF e MFC. Pode-se notar que, pelos variogramas obtidos para os mesmos parâmetros (Figuras 16a e 16b), o componente espacial foi responsável por 84% da variância total. Vale notar que mesmo com dependência espacial forte, para a MF e MFC, os mapas interpolados pela krigagem mostraram uma certa descontinuidade com mudanças abruptas entre classes vizinhas, fato este comprovado pelos baixos coeficientes de regressão, com valores de -0,297 e 0,446, respectivamente, para MF e MFC, conforme apresentado na Tabela 10.

Já na Figura 17c, que apresenta o mapa krigado da MSC, pode-se notar também aparentes mudanças abruptas entre classes vizinhas. Isso ocorreu porque, no caso da MSC não foi detectada dependência espacial, para a escala em estudo e, conseqüentemente, não havendo embasamento teórico para o uso da krigagem.

Na Figura 17d, com moderada dependência espacial (73%) para o DCC, o mapa interpolado pela krigagem demonstrou esta dependência pela gradativa mudança entre uma classe de teor e a classe vizinha.

A escala utilizada no presente trabalho mostrou-se adequada para a detecção da dependência espacial para os parâmetros MF e MFC (Figuras 16a e 16b e Tabela 9). O DCC mostrou possuir moderada dependência espacial, com valor de 72% (Tabela 9).

Segundo Davis (1987), a validação cruzada foi utilizada para definir a exatidão da krigagem como interpolador para todos os parâmetros de produtividade de alface. Na Tabela 10 estão demonstrados os parâmetros obtidos quando os mapas krigados foram submetidos ao método de validação cruzada.

Tabela 10. Validação cruzada da krigagem dos dados de produtividade de alface.

Variável	Coefficiente de regressão	Erro padrão	Erro padrão estimado	r^2
MF – (g)	- 0,297	0,386	128,587	0,004
MFC – (g)	0,446	0,291	92,793	0,015
MSC – (g)	-0,056	0,308	5,313	0,000
DCC – (cm)	-0,037	0,298	1,373	0,000

Os coeficientes de regressão obtidos nas validações cruzadas, apresentados na Tabela 10, mostraram que para os parâmetros MF, MFC e DCC (Figuras 17a, 17b e 17d) a krigagem não foi um bom interpolador, tendo comportamento semelhante. As estimações mostraram baixa exatidão para os parâmetros, pois, os dados estimados apresentam certo desvio em relação aos dados reais.

Para o atributo MSC (Figura 17c), já era esperado o baixo desempenho da krigagem, visto este método ser essencialmente desenvolvido para dados espaciais, sendo que para MSC não foi detectada dependência espacial, devendo então ser adotado outro método para a interpolação dos dados.

4.2.4 Correlações entre atributos do solo antes e após o plantio e produtividade de alface.

Com a finalidade de determinar a correlação entre alguns dos atributos do solo obtidos antes e após o plantio e os parâmetros de produtividade de alface, inicialmente os dados foram processados pelo módulo “Regressão Estatística” do programa GS+. Para tal finalidade, foram determinados os coeficientes de correlação linear (r), cujos valores estão apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11. Coeficiente de correlação linear (r) entre atributos do solo antes do plantio e produtividade de alface.

[illegible]

Pela análise da Tabela 11 que apresenta os coeficientes de correlação linear (r) entre alguns atributos do solo antes do plantio e a produtividade de alface, pode-se notar uma ótima correlação entre as variáveis massa de matéria fresca da parte aérea total (g) x massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g), visto que o valor de r encontrado foi de 0,957. Isso indica que ao considerarmos a correlação entre massa de matéria fresca da parte aérea total (g) e massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g), pode-se estimar os valores de massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g) através da massa de matéria fresca da parte aérea total (g). Com isso, tem-se uma diminuição do número de amostras necessárias para a coleta dos dados de massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g), quando se coleta a massa de matéria fresca da parte aérea total (g), o que implica em economia de tempo e mão-de-obra.

Pela análise da Tabela 11, pode-se notar uma razoável correlação entre massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g) x diâmetro de cabeça comercial (cm) e massa de matéria fresca da parte aérea total (g) x diâmetro de cabeça comercial (cm), com valores de r de 0,745 e 0,720, respectivamente.

Entretanto, pela Tabela 11 que também apresenta os coeficientes de correlação linear (r) entre alguns atributos do solo antes do plantio entre si, encontrou-se razoáveis correlações apenas para as correlações K x V% ($r = 0,648$); V% x U% ($r = -0,538$); pH x V% ($r = 0,514$) e V% x argila ($r = 0,506$).

Tabela 12. Coeficiente de correlação linear (r) entre atributos do solo após o plantio e produtividade de alface.

[illegible]

Pela análise da Tabela 12 que apresenta os coeficientes de correlação linear (r) entre alguns atributos do solo após o plantio e a produtividade de alface e também apresenta os coeficientes de correlação linear (r) da correlação entre alguns atributos do solo após o plantio entre si, encontrou-se razoáveis correlações apenas para as correlações pH x V% ($r = 0,708$) e para P x V% ($r = 0,576$). Ao comparar o valor de r encontrado para a correlação pH x V% antes do plantio (Tabela 11), observou-se um aumento no valor de r encontrado para a correlação pH x V%.

No presente estudo, os dados de produtividade de alface foram obtidos de um único ciclo cultural, o que justifica a falta de correlação encontrada entre os atributos de solo e a produtividade. A ausência de correlação entre a atributos do solo e a produtividade, tem sido exibida com frequência em trabalhos correlatos. Assim, Shatar e McBratney (1999), trabalhando também com dados coletados após a colheita, confirmaram que a verdadeira relação entre fósforo do solo e a produtividade de sorgo não pode ser identificável. Os autores também utilizaram dados de produtividade de um único ano para identificar relações com vários atributos de solo e somente uma pequena fração da variação observada na produtividade pôde ser explicada por qualquer um dos fatores estudados. Também Stafford et al. (1996), analogamente, ao investigarem a variação dos teores de nutrientes do solo e a variação na produtividade de um determinado ano, não detectaram dependências significativas. Blackmore et al. (1999) ao analisarem dados oriundos de um levantamento em malha, também não encontraram evidências de qualquer nutriente ou mesmo o pH como fatores limitantes para o desenvolvimento da cultura.

4.2.5 Manejo da irrigação, adubação e produtividade de alface baseados na análise espacial

Utilizando-se a krigagem e estabelecendo-se apenas duas classes para cada atributo, foram confeccionados os mapas com zonas de manejo para a área estudada, procurando-se dividir a estufa em duas sub-áreas distintas, visando oferecer subsídios para a agricultura e a irrigação de precisão.

4.2.5.1 Mapa da aplicação de água

Considerando as fórmulas de cálculo do volume de água a ser aplicado, descritas por Bernardo (2002), em que se leva em consideração a umidade do solo na capacidade de campo, utilizou-se os valores de umidade do solo na capacidade de campo já descritos e avaliados no presente trabalho, para a confecção do mapa de aplicação de água.

A Figura 18 apresenta o mapa de aplicação de água no solo, obtido através da krigagem da umidade do solo.

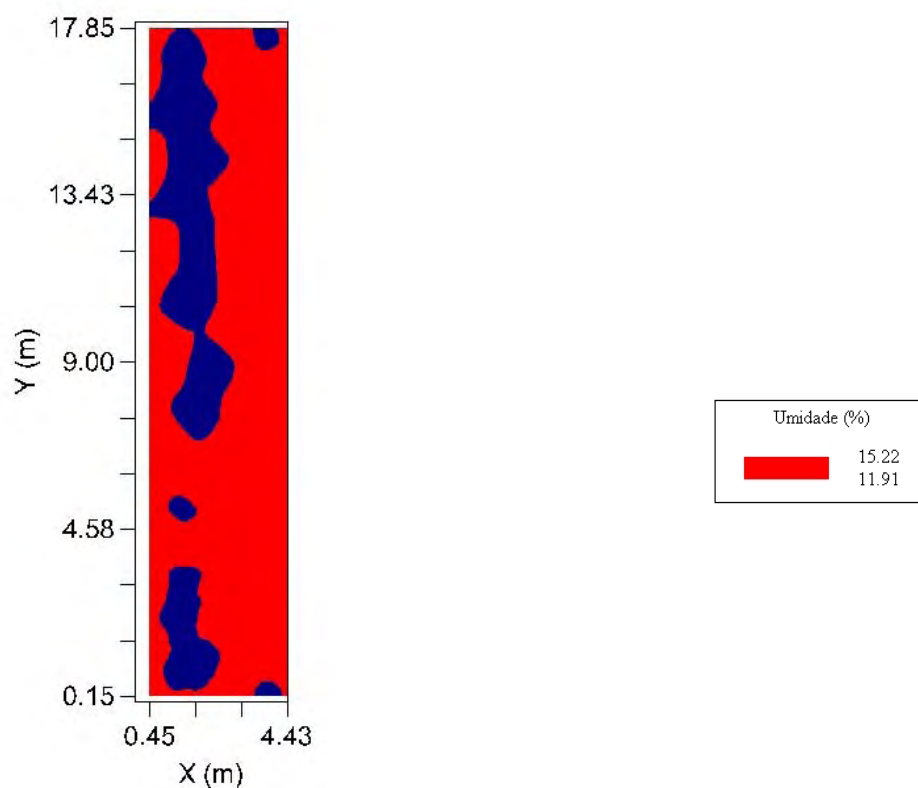


Figura 18. Mapa da aplicação de água.

Através do mapa da aplicação de água (Figura 18), é possível observar duas áreas distintas quanto à umidade do solo, uma região com umidade do solo abaixo de 11,91%, situada na maior parte do lado esquerdo da estufa e outra área, com umidade do solo compreendida entre 11,91 e 15,22%, situada na maior parte do lado direito da estufa. Utilizando-se a fórmula para o cálculo do volume de água, tem-se portanto duas lâminas de água distintas, uma para cada lado da estufa no sentido longitudinal. Isto indica que é possível estabelecer através do mapa obtido, duas áreas distintas de aplicação de água, sendo necessário para tal a instalação de registros e hidrômetros individuais para o controle da lâmina de irrigação. Através do estudo geoestatístico detectou-se a variabilidade espacial da

umidade e a influência desta no desenho do sistema de irrigação da área estudada, concordando com o exposto por Brooker e Winchester (1995) que, ao desenvolverem um estudo da variabilidade espacial da água prontamente disponível de um vinhedo irrigado, concluíram que isto serviu de auxílio para detectar áreas de abertura de válvulas de irrigação na cultura em questão.

4.2.5.2 Mapa dos teores de nutrientes

Em agricultura tradicional é cada vez mais comum o uso indiscriminado de determinados fertilizantes mistos por parte dos agricultores, em detrimento da utilização de fertilizantes simples. Com isso, problemas relacionados à deficiência e à toxidez de determinados elementos são cada vez mais freqüentes, implicando na redução de produtividade das culturas. Isto destaca a importância de estudos que envolvam a aplicação cada vez mais direcionada de nutrientes. Diante do exposto, procurou-se dividir a área em áreas de manejo quanto a aplicação de dois elementos classificados como macronutrientes às plantas; o fósforo e o potássio. Para tal, utilizou-se os valores de fósforo e potássio já descritos e avaliados no presente trabalho, para a confecção do mapa de aplicação de nutrientes.

A Figura 19 apresenta os mapas dos teores de fósforo e potássio obtidos através da krigagem dos elementos.

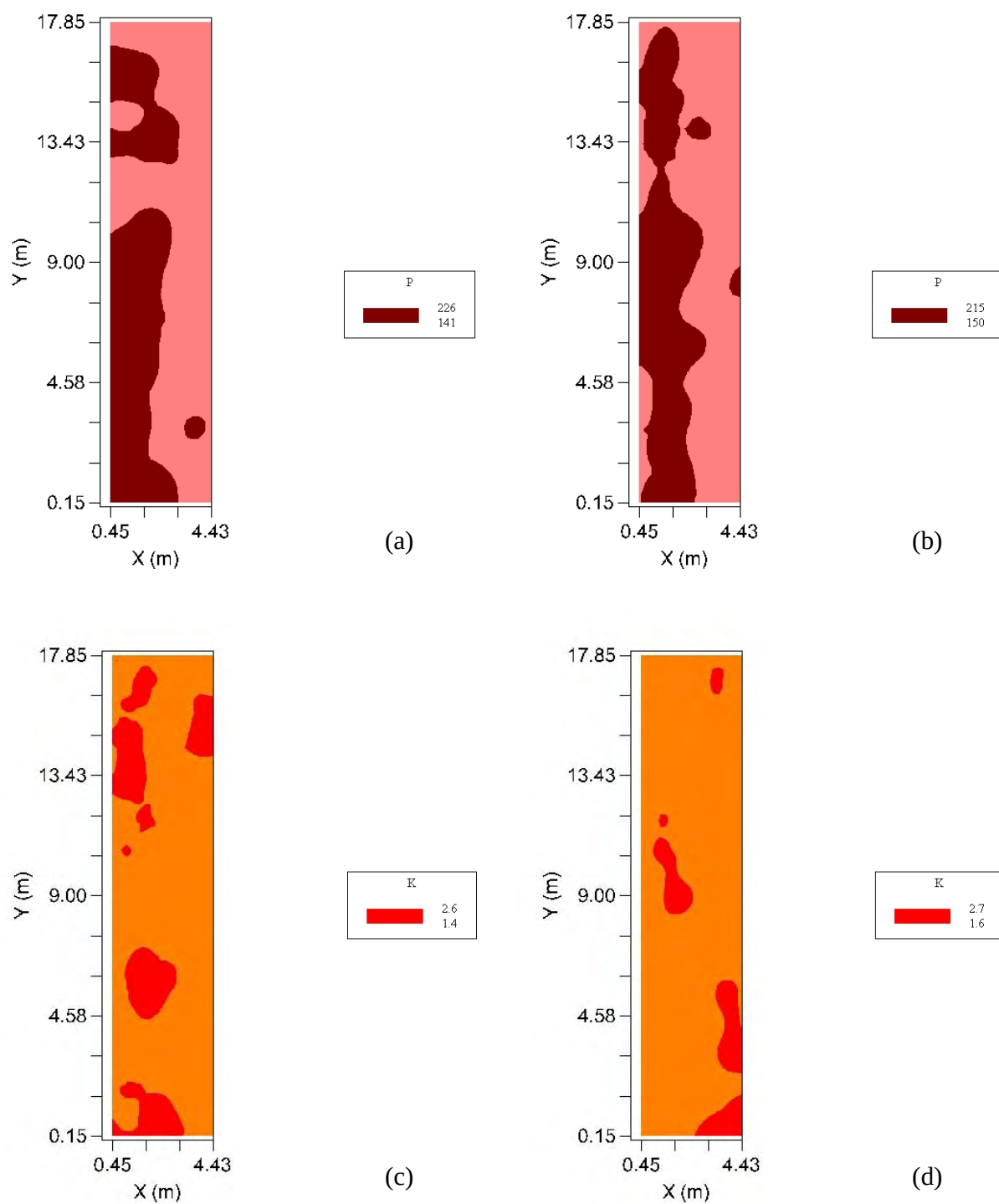


Figura 19. Mapa dos teores de P – período I (a); P- período II (b); K – período I (c) e K período II (d).

As Figuras 19a e 19b apresentam, respectivamente, os mapas dos teores do elemento P, obtido com os dados do período I (antes do plantio de alface) e período II (após o plantio de alface). Pela análise simultânea das duas figuras, pode-se notar duas áreas distintas quanto à concentração do nutriente fósforo em ambos os períodos, ou seja, uma região com concentrações de fósforo entre 141 mg dm⁻³ e 226 mg dm⁻³ e entre 150 mg dm⁻³ e 215 mg dm⁻³, respectivamente, e outra região com concentrações de fósforo abaixo de 141 mg dm⁻³ e abaixo de 150 mg dm⁻³. Isto indica que é possível estabelecer através do mapa obtido, duas áreas distintas de aplicação do elemento fósforo por ocasião da adubação de plantio da cultura de alface. Entretanto Raij et al. (1996) classificaram o teor do elemento P com valores compreendidos acima de 120 mg dm⁻³ como muito alto; desta forma, pelas tabelas convencionais de recomendação de adubação e calagem, ambas as áreas seriam consideradas homogêneas, com aplicação de 200 kg ha⁻¹ de P.

As Figuras 19c e 19d apresentam, respectivamente, os mapas dos teores do elemento K, obtido com os dados do período I e II. Pela análise simultânea das duas figuras, pode-se notar áreas irregularmente distribuídas pelas figuras, com concentrações de potássio entre 1,4 e 2,6 mmol_c dm⁻³ e entre 1,6 e 2,7 mmol_c dm⁻³, respectivamente, e outra área situada na maior parte das Figuras 19c e 19d; com concentrações de potássio abaixo de 1,4 mmol_c dm⁻³, e abaixo de 1,6 mmol_c dm⁻³. É possível observar uma predominância dos teores abaixo de 1,4 mmol_c dm⁻³, para a Figura 19c e teores abaixo de 1,6 mmol_c dm⁻³, para a Figura 19d, com uma relativa homogeneidade do elemento nos dois períodos observados, ficando difícil estabelecer áreas distintas de manejo para a aplicação do elemento. Raij et al. (1996) classificaram os teores abaixo de 1,4 mmol_c dm⁻³ e abaixo de 1,6 mmol_c dm⁻³, encontrados respectivamente nas Figuras 19c e 19d, como muito baixo para valores compreendidos entre 0,0 e 0,7 mmol_c dm⁻³ e como baixo para valores compreendidos entre 0,8 e 1,5 mmol_c dm⁻³; o que justificaria a divisão da área em sub-áreas de manejo. Entretanto, para se recomendar tal divisão, seria interessante a observação dos dados em mais de um ciclo cultural. Tal procedimento é perfeitamente aceitável quando o que se almeja é a agricultura de precisão, onde consegue-se uma melhoria das condições de fertilidade do solo à medida em que as observações vão sendo feitas e em que vai se efetuando as correções e adubações de maneira localizada na área de estudo. Em estudo similar com a cultura de alface, Panagopoulos et al.

(2006) obtiveram um mapa de fertilidade com duas áreas distintas de concentração do elemento potássio que justificaram a aplicação do elemento a taxas variadas.

Através dos dados analisados, por enquanto, pode-se sugerir que a adubação de plantio não seja feita através de fertilizantes mistos, como por exemplo, através de uma determinada formulação NPK pronta, e sim que se faça o fornecimento dos elementos fósforo e potássio através de fertilizantes simples.

4.2.5.3 Mapa da produtividade de alface

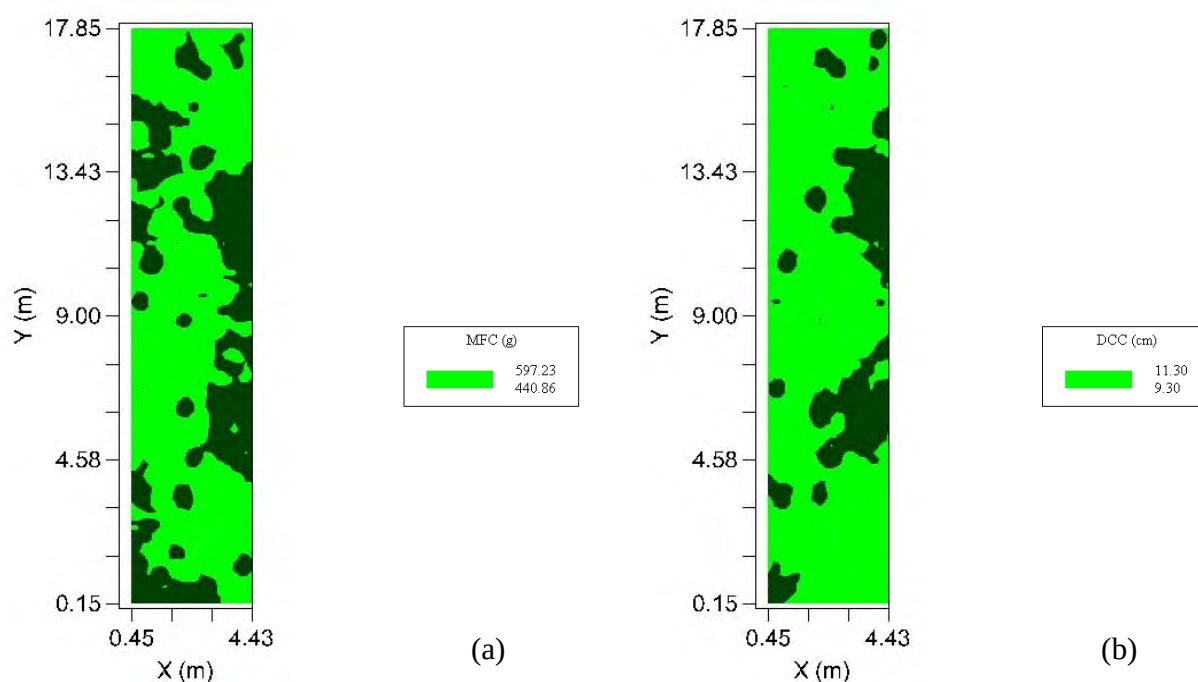


Figura 20. Mapa da produtividade de alface: MFC (a) e DCC (b).

As Figuras 20a e 20b apresentam, respectivamente, os mapas de produtividade de alface, obtidos através dos atributos MFC (g) e DCC (cm), respectivamente. Pela análise das duas figuras, pode-se notar áreas irregularmente distribuídas; com valores de MFC entre 440,86 e 597,23 g e com valores de DCC entre 9,30 e 11,30 cm, respectivamente; e outras áreas também irregularmente distribuídas; com valores de MFC abaixo de 440,86 g e com valores de DCC abaixo de 9,30 cm, respectivamente. É possível observar uma

predominância dos valores de MFC entre 440,86 e 597,23 g para a Figura 20a e dos valores de DCC entre 9,30 e 11,30 cm para a Figura 20b, com uma relativa homogeneidade para os dois atributos observados, ficando difícil estabelecer áreas distintas de manejo para a produtividade. Isto concordou com Panagopoulos et al. (2006) que ao desenvolverem um estudo geoestatístico com a finalidade de obter um mapa com áreas consideradas como ótimas para o desenvolvimento de alface, e ao avaliarem também o peso de alface (g) e o diâmetro de alface (cm), concluíram que não havia uma área considerada ótima para a produção de alface.

É importante salientar que no presente estudo, os dados de produtividade de alface foram obtidos de um único ciclo cultural. Em agricultura de precisão, seria interessante a observação dos parâmetros de produtividade em mais de um ciclo na tentativa de encontrar indicações dos atributos que determinem a presença de sub-regiões de produtividade.

4.2.6 Considerações finais

Pode-se resumir as principais considerações detalhadas nas discussões do trabalho:

- os atributos físicos AG (%), AM (%), AF (%), AMF (%), areia total (%), argila (%), silte (%) e umidade (%) apresentaram forte dependência espacial;
- os atributos químicos pH (CaCl_2), M.O. (g dm^{-3}), P (mg dm^{-3}), H + Al ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), K ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Ca ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Mg ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), SB ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e V% ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) apresentaram forte dependência espacial nos períodos I e II;
- no atributo de produtividade de alface MSC (g) não foi detectada dependência espacial;
- o atributo de produtividade de alface DCC (cm) apresentou moderada dependência espacial;
- os atributos de produtividade de alface MF (g) e MFC (g) apresentaram forte dependência espacial;
- os atributos físicos são dependentes espacialmente, para até 2,48 m (AG), 1,48 m (AM), 1,54 m (AF), 1,35 m (AMF), 4,12 m (areia total), 4,53 m (argila), 1,93 m (silte) e 1,15 m (umidade);

- os atributos químicos, no período I, são dependentes espacialmente, para até 10,52 m (H + Al), 9,88 m (pH), 4,29 m (P), 1,81 m (M.O.), 1,32 m (Mg), 1,30 m (K), 1,29 m (Ca, SB e CTC) e 0,93 m (V%);
- os atributos químicos, no período II, são dependentes espacialmente, para até 3,12 m (P), 2,58 m (CTC), 2,56m (SB), 2,52 m (V%), 2,40 m (Mg), 2,36 m (Ca), 2,32 m (pH), 2,22 m (H + Al e K) e 1,70 m (M.O.);
- os atributos de produtividade de alface, são dependentes espacialmente, para até 0,72 m (DCC), 0,53 m (MFC), 0,41 m (MF) e não dependente (MSC);
- a Krigagem Ordinária Pontual apresentou, de um modo geral, bons resultados para os atributos para os quais foi detectada a amplitude de dependência espacial;
- a validação cruzada mostrou-se eficiente como detector da adequação do uso da krigagem como interpolador;
- para a correlação entre MF x MFC o valor de r encontrado foi de 0,957, caracterizando uma ótima correlação, podendo-se estimar valores de MFC através de MF;
- para as correlações entre MFC x DCC e MF x DCC, os valores de r encontrados foram de 0,745 e 0,720, respectivamente, caracterizando razoáveis correlações;
- para as correlações entre alguns atributos químicos do período I entre si, apenas algumas correlações apresentaram-se razoáveis, com valores de r encontrados de 0,648 (K x V%), -0,538 (V% x U%), 0,514 (pH x V%) e 0,506 (V% x argila);
- para as correlações entre alguns atributos químicos do período II entre si, apenas algumas correlações apresentaram-se razoáveis, com valores de r encontrados de 0,708 (pH x V%) e 0,576 (P x V%);
- através do mapa de aplicação de água obtido, foi possível observar duas áreas distintas quanto à umidade do solo: uma região com umidade do solo abaixo de 11,91%, situada na maior parte do lado esquerdo da estufa e outra área, com umidade do solo compreendida entre 11,91 e 15,22%, situada na maior parte do lado direito da estufa;
- através dos mapas dos teores de P, obtidos com os dados do período I e II, observou-se duas áreas distintas quanto à concentração do nutriente fósforo em ambos os períodos, ou seja, uma região com concentrações de P entre 141 mg dm⁻³ e 226 mg dm⁻³ e entre 150 mg dm⁻³ e 215 mg dm⁻³, respectivamente, e outra região com concentrações de P abaixo de 141 mg dm⁻³ e abaixo de 150 mg dm⁻³, respectivamente;

- através dos mapas dos teores de K, obtidos com os dados do período I e II, observou-se duas áreas distintas quanto à concentração do nutriente K em ambos os períodos, ou seja, uma região com concentrações de K entre 1,4 e 2,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e entre 1,6 e 2,7 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, e outra região com concentrações de K abaixo de 1,4 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, e abaixo de 1,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, com predominância dos teores abaixo de 1,4 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e teores abaixo de 1,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, com uma relativa homogeneidade do elemento nos dois períodos observados;

- através dos mapas de produtividade de alface, obtidos através dos atributos MFC e DCC, observados, foram observadas duas áreas distintas: uma com valores de MFC (g) entre 440,86 e 597,23 g e valores de DCC (cm) entre 9,30 e 11,30 cm; e outra, com valores de MFC (g) abaixo de 440,86 g e com valores de DCC (cm) abaixo de 9,30 cm, com predominância da área com valores entre 440,86 e 597,23 g e valores entre 9,30 e 11,30 cm.

5 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir:

- os atributos físicos e químicos do solo apresentaram dependência espacial forte;
- os atributos de produtividade de alface apresentaram dependência espacial forte para a matéria fresca da parte aérea total e comercial; dependência moderada para o diâmetro de cabeça comercial e ausência de dependência espacial para a massa de matéria seca da parte aérea comercial;
- os valores de umidade até 1,15 m apresentaram dependência espacial e valores de granulometria apresentaram dependência espacial variando de 1,35 m a 4,53 m;
- os valores de atributos químicos do solo nos períodos I e II apresentaram dependência espacial variando de 0,93 m a 10,52 m;
- os valores de atributos de produtividade de alface apresentaram alcance de dependência espacial de 0,41 m a 0,72 m;
- a krigagem mostrou-se um bom interpolador para a estimação de valores não amostrados;
- dos dados obtidos, apenas MF x MFC, MF x DCC e MFC x DCC apresentaram correlação;
- o mapa da aplicação de água apresentou duas zonas distintas para o manejo da irrigação;

- a variabilidade espacial encontrada para a umidade influenciou no dimensionamento do sistema de irrigação para a área estudada, sendo necessário um novo desenho do sistema de irrigação;
- considerando-se a necessidade da cultura em macronutrientes NPK, para o P pode-se estabelecer duas regiões de teores e para o K não houve tal evidência, porém não foi possível estabelecer através do mapa obtido, duas áreas distintas de aplicação dos elementos por ocasião da adubação de plantio da cultura de alface; podendo-se apenas sugerir que a adubação de plantio com os elementos P e K seja feita através de fertilizantes simples;
- através dos mapas de produtividade de alface, obtidos com os atributos MFC e DCC, foi difícil estabelecer áreas distintas de manejo para a produtividade com dados observados de apenas um ciclo cultural.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUFIRASSI, M.; MARIÑO, M. A. Kriging of water levels in the Souss Aquifer, Morocco. **Mathematical Geology**, Dordrecht, v. 15, n. 4, p. 537-551, Aug. 1983.

AGRAWAL, O. P. et al. Geostatistical analysis of soil salinity improvement with subsurface drainage system. **Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)**, St. Joseph, v. 38, n. 5, p. 1427-1433, Sept./Oct. 1995.

ALFACE. Agrianual 2005: Anuário da Agricultura Brasileira, São Paulo, p. 178, 2004.

ALLI, M. M.; NOWATZKI, E. A.; MYERS, D. E. Probabilistic analysis of collapsing soil by indicator kriging. **Mathematical Geology**, Dordrecht, v. 22, n. 1, p. 15-38, Jan. 1990.

ALVARENGA, M. A. R. et al. Crescimento, teor e acúmulo de macronutrientes em alface americana sob doses de nitrogênio aplicados no solo e de níveis de cálcio aplicados via foliar. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 803-804, jul. 2000. Suplemento.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Manejo da irrigação na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) através do Tanque Classe A**. 1994. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu,

1994.

ANDRIOLO, J. L. Fisiologia da produção de hortaliças em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 26-33, jul. 2000. Suplemento.

ANTUNES, C. L. **Fertirrigação nitrogenada por gotejamento e época de aplicação foliar de ácido giberélico (GA₃) em alface americana (*Lactuca sativa* L.)**. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

BATISTA, I. F. **Variabilidade espacial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: Editora UFV, 2002. 656 p.

BLACKMORE, S. et al. Understanding variability in four fields in the United Kingdom. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p. 3-18.

BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 76-80, jan./abr. 2001.

BOYER, D. G. et al. Soil spatial variability relationships in a steeply sloping acid soil environment. **Soil Science**, Baltimore, v. 161, n. 5, p. 278-287, May 1996.

BRESLER, E. et al. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 16-25, Jan./Feb.1984.

- BROOKER, P. I. Irrigation equipment selection to match spatial variability of soils. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, v. 33, n. 6/7, p. 619-623, Mar./Apr. 2001.
- BROOKER, P. I.; WINCHESTER, J. P. A geostatistical study of soil data from an irrigated vineyard near Waikerie, South Australia. **Environment International**, Tarrytown, v. 21, n. 5, p. 699-704. 1995.
- BURDEN, D. S.; SELIM, H. M. Correlation of spatially variable soil water retention for a surface soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 148, n. 6, p. 436-447, Dec. 1989.
- BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, 1. The semi-variogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, n. 2, p. 315-331, June 1980.
- BURROUGH, P. A. Soil variability: a late 20th century view. **Soil and Fertilizers**, Oxon, v. 56, n. 5, p. 529-562, May 1993.
- CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUER, B. H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 1240-1248, July/Aug. 1994.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511. Sept./Oct. 1994.
- CARRIJO, O. A.; MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R. Manejo da água do solo na produção de hortaliças em cultivo protegido. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 45-51, set./dez. 1999.

CARVALHO, O. S. et al. Variabilidad temporal de algunas propiedades químicas en un suelo sometido a distintas sucesiones de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 12, p. 2299-2309, dez. 1999.

CARVALHO, O. S. et al. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 497-503, jul./set 1998.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado Estação Experimental “Presidente Médici”. **Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agronômicas UNESP**, Botucatu, n. 1, 1983.

CATANEO, A. Experimentação em ambiente protegido. In: FORO INTERNACIONAL DE CULTIVO PROTEGIDO, 1997, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Universidade Estadual Paulista/Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 1997. p. 129-153.

CAVALCANTE, E. G. S. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes condições de uso e manejo, em Selvíria (MS)**. 1999. 199 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1999.

CHIEN, Y. J. et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, n. 4, p. 291-298, Apr. 1997.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, n. 49, p. 8-13, 1º trimestre 2001.

CIOLLARO, G.; ROMANO, N. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 65, n. 3/4, p. 263-282, Mar. 1995.

COELHO FILHO, M. A.; COELHO, R. D.; GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 239-246, maio/ago. 2001.

COSTA, A. A. et al. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró – RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD-ROM.

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 12, p. 2321-2329, dez. 1999.

CREMERS, N. H. D. T. et al. Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modelling. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 10, n. 8, p. 1035-1047, Aug. 1996.

DAVIDOFF, B.; SELIM, H. M. Correlation between spatially variable soil moisture content and soil temperature. **Soil Science**, Baltimore, v. 145, n. 1, p. 1-10, Jan. 1988.

DAVIS, B. M. Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. **Mathematical Geology**, Dordrecht, v. 19, n. 3, p. 241-248, Apr. 1987.

DAVIS, J. G. et al. Variability of soil chemical properties in two sandy dunal soils of niger. **Soil Science**, Baltimore, v. 159, n. 5, p. 321-330, May 1995.

DELLA VECCHIA, P. T.; KOCH, P. S. História e perspectivas da produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 5-10, set./dez. 1999.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB**: geostatistical software library. New York: Oxford University Press, 1998. não paginado.

DOURADO NETO, D. et al. Programa para confecção da curva característica de retenção de água do solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. 92-102, dez. 1990.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 242-246, ago. 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de método de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ENGLUND E.; SPARKS, A. **Geo-EAS**: users's guide. Las Vegas: United States Environmental Monitoring Systems, 1988. não paginado.

ESTATÍSTICAS da produção vegetal, por produto, Estado de São Paulo, 2003. Série Informações Estatísticas da Agricultura, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 25, 2004.

ESTATÍSTICAS da produção vegetal, por produto, Estado de São Paulo, 2004. Série Informações Estatísticas da Agricultura, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 26, 2005.

FARIAS, L. N. et al. Variabilidade espacial de alguns atributos físico-hídricos de solos em sistema de produção agroecológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD-ROM.

FERNANDES, H. S.; MARTINS, S. R. Cultivo de alface em solo em ambiente protegido. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 56-63, set./dez. 1999.

FIETZ, C. R. et al. Efeito da variabilidade do armazenamento de água no solo na qualidade da irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 150-153, maio/ago.1999.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: Editora UFV, 2002. 402 p.

FOLEGATTI, M. V. **Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso**. 1996. 84 f. Tese (Livre-Docência). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

GERVÁSIO, E. S.; CARVALHO, J. A.; SANTANA, M. J. Efeito da salinidade da água de irrigação na produção da alface americana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 125-128, jan./abr. 2000.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 650 p.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n. 1/2, p. 1-45, Apr. 1999.

GOTO, R. A cultura de alface. In: GOTO R.; TIVELLI S. W. (Orgs.). **Produção de hortaliças em ambiente protegido**: condições subtropicais. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. p. 137-159.

GOTO, R. Plasticultura nos trópicos: uma avaliação técnico-econômica. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, p. 163-165, 1997. Suplemento.

GOTO, R. et al. Alface: novas técnicas, melhor qualidade. **Agrianual 97**: Anuário da Agricultura Brasileira, São Paulo, p. 76-78, 1997.

GREGO, C. R. et al. Variabilidade espacial do armazenamento de água do solo sob plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD-ROM.

GS+ - Geostatistics for the Environmental Sciences. Version 5.0.3 Beta. Michigan: Gamma Design Software, 2000. 1 CD-ROM.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia/Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, 1988. 145 p.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do Cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

GUPTA, R. P.; AGGARWAL, P.; CHAUHAN, A. S. Spatial variability analysis of bulk density as a guide for tillage. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v. 43, p. 549-557, 1995.

HOODA, P. S.; DAHIYA, I. S.; MALIK, R. S. Spatial variability of ground water salinity in a watershed. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v. 34, p. 372-378, 1986.

HORN, R. et al. Soil physical properties related to soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, n. 2/4, p. 187-216, June 1994.

IBGE. Produção de alface – tonelada Brasil – 1996 disponível em:
<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/horti/default.asp?t=2&z=t&o=16&u1=1&u2=1&u3=1>>.
Acesso em: 19 ago. 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 600 p.

JOHANN, J. A. et al. Variabilidade especial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 212-219, maio/dez. 2004.

JOURNEL, A. C.; HUIJBREGTS C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600 p.

JUNQUEIRA, A. M. R.; OLIVEIRA, A. T.; SILVA, A. C. B. Origem, volume e preço de alface comercializada na CEASA/DF nos últimos cinco anos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 862-863, jul. 2000. Suplemento.

KALIL, A. J. B. **Comparação entre adubação nitrogenada via fertirrigação por gotejamento e a aplicação convencional na produtividade da alface (*Lactuca sativa* L.)**. 1992. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

KANE, V. et al. Interpretation of regional geochemistry using optimal interpolation parameters. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 8, n. 2, p. 117-135, 1982.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P. Variabilidade espacial da granulometria do solo e da produtividade do feijão sob plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD-ROM.

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

LEENAERS, H.; OKX, J. P.; BURROUGH, P. A Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. **CATENA**, Amsterdam, v. 17, n. 6, p. 535-550, Dec. 1990.

LEITE JÚNIOR, J. B. **Dessalinização do solo provocada pelo excesso do íon potássio em latossolo vermelho amarelo cultivado com alface americana (*Lactuca sativa* L.) irrigada sob ambiente protegido**. 2000. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

LEY, G. J.; LARYEA, K. B. Spatial variability in penetration resistance of a hardsetting tropical alfisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 367-381, Apr. 1994.

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

MADEIRA, N. R. et al. Fornecimento de nitrogênio, potássio e cálcio para alface americana via fertirrigação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 841-842, jul. 2000. Suplemento.

MALLANTS, D. et al. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. **Soil Science**, Baltimore, v. 161, n. 3, p. 167-181, Mar. 1996.

MANFRINATO, H. A irrigação por gotejamento: influência sobre as relações solo-água. **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, n. 22, p. 21-25. set. 1985

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Seleção de Sistemas de Irrigação para Hortaliças, **Circular Técnica da Embrapa Hortaliças**, Brasília, DF, jun. 1998. 15p.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C; SILVA, H. R. **Manejo da Irrigação em Hortaliças**, 5. ed. Brasília: EMBRAPA Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, 1996. 71p.

MARX, D. B. et al. Effects of long-term water management in a humid region on spatial variability of soil chemical status. **Soil Science**, Baltimore, v. 145, n. 3, p. 188-193. Mar. 1988.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, Dec. 1963.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? **Soil Science**, Baltimore, v. 135, n. 3, p. 177-183, Mar. 1983.

MELLO, C. M. **Variabilidade espacial de atributos de um nitossolo vermelho distrófico de Botucatu/SP**. 2001. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

MERMUT, A. R.; ESWARAN, H. Some major developments in soil science since the mid-1960s. **Geoderma**, Amsterdam, v. 100, n. 3/4, p. 403-426, May 2001.

MOOLMAN, J. H.; VAN HUYSSTEEN, L. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 15, n. 1/2, p. 11-24, Dec. 1989.

MOURA, M. V. T.; MARQUES JÚNIOR, S.; LEOPOLDO, P. R. Simulação da distribuição espacial da água em irrigação localizada subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 158-164, maio-ago. 1998.

MYERS, D. E. Interpolation and estimation with spatially located data. **Chenometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Amsterdam, v. 11, n. 3, p. 209-228. Oct. 1991.

MYERS, D. E. Spatial interpolation: an overview. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1/3, p. 17-28, Mar. 1994.

MYERS, J.C. **Geostatistical error management**: qualifying uncertainty for environmental sampling and mapping. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997. 571 p.

NAKAGAWA, J. Manejo do solo e fertirrigação em plasticultura. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 167-172, jul. 2000. Suplemento.

NETTO, A. M.; PIERITZ, R. A.; GAUDET, J. P. Field study on the local variability of soil water content and solute concentration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 215, n. 1/4, p. 23-37, Feb. 1999.

OLIVEIRA, J. J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 783-789, out./dez. 1999.

PANAGOPOULOS, T. et al. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 24, n. 1, p. 1-10, Jan. 2006.

PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M. V. **Fertirrigação**: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 11-84.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF)**: Goteo, Microaspersión, Exudación. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

PLANA, V. et al. Spatial representativity of the possible sites for measurig the water balance of apricot trees. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 145-153, Oct. 2002.

PUNTES, R.; WILDING, L. P.; DREES, L. R. Microspatial variability and sampling concepts in soil porosity studies of vertisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 53, n. 3/4, p. 373-385, June 1992.

QUEIROZ, J. E. et al. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., SIMPÓSIO MANEJO E CONTROLE DA SALINIDADE NA AGRICULTURA IRRIGADA, 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. p. 69-111.

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

RAIJ, B. van et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim do IAC – Instituto Agronômico de Campinas**, Campinas, n. 100, p. 1-285, 1996.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, set./dez. 1988.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 1 p. 1-6, jan./abr. 1986.

REIS, N. V. B. Uma visão geral sobre as oportunidades com os cultivos protegidos diante das condições climáticas do Brasil. **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, n. 52/53, p. 13-17, 4º trimestre 2001/1º trimestre 2002.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

ROGOWSKI, A. S.; WOLF, J. K. Incorporating variability into soil map unit delineations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 163-174, Jan./Feb. 1994.

SALES, L. E. O. **Variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica associada a propriedades físicas das camadas superficial e subsuperficial de dois solos da Região de Lavras (MG)**. 1992. 104 f. Dissertação (Mestrado/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1992.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 115-122, jan./mar. 1998.

SAMRA, J. S. et al. Geostatistical evaluation of soil sodicity and growth of *Melia azedarach* Linn. as simultaneous stochastic processes. **Soil Science**, Baltimore, v. 148, n. 5, p. 361-369, Nov. 1989.

SANCHEZ, R. B. **Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de latossolos em diferentes superfícies geomórficas sob cultivo de café, em Patrocínio, MG**. 1999. 79 f. Dissertação (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1999.

SANTOS, C. R.; PINTO, J. M. Fertirrigação. **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, n. 51, 3º trimestre 2001, p. 39-41. 2001

SGANZERLA, E. **Nova Agricultura**: a fascinante arte de cultivar com os plásticos. 6. ed. Guaíba: Agropecuária, 1997. 342 p.

SHATAR, M. T.; McBRATNEY, A. B. Empirical modeling of relationships between sorghum yield and soil properties. **Precision Agriculture**, New York, v. 1, n. 3, p. 249-276, Nov. 1999.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 431-436, set./dez., 2001.

SOUSA, J. R.; QUEIROZ, J. E.; GHEYI, H. R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 140-144, maio-ago. 1999.

SOUSA, V.; PEREIRA, L. S. Regional analysis of irrigation water requirements using kriging: application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Trás-os-Montes. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 40, n. 2/3, p. 221-233, May 1999.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 367-372. jul./set. 1997.

SOUZA, L. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas cultivadas com abacaxi, banana e citros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD-ROM.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, jan./abr. 2004.

STAFFORD, J. V. et al. Mapping and interpreting yield variation in cereal crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 14, p. 101-109, 1996.

STANGHELLINI, C. Production of vegetables in protected cultivation: agrometeorological and physiological factors. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 35-41, jul. 2000. Suplemento.

STEIN, A.; BROUWER, J.; BOUMA, J. Methods for comparing spatial variability patterns of millet yield and soil data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 861-870, May/June 1997.

TABOR, J. A. et al. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 3, p. 602-607, May/June 1984.

TAKEDA, E. Y. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob a videira (*Vitis vinífera*, L.) em Vitória Brasil-SP**. 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistemas de Produção)- Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

TESTEZLAF, R. Uso da irrigação em ambientes protegidos: cuidados e atenções. **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, n. 52/53, p. 18-22, 4º trimestre 2001/1º trimestre 2002.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Orlando, v. 38, p. 45-94. 1985.

UTSET, A.; CASTELLANOS, A. Drainage effects on spatial variability of soil electrical conductivity in a vertisol. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 38, n. 3, p. 213-222, Jan. 1999.

VALENTE, J. M. G. P. **Geomatématica: lições de geoestatística**. Ouro Preto: Editora da Fundação Gorceix, 1989. 8v.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

VAN GROENIGEN, J. W. The influence of variogram parameters on optimal sampling schemes for mapping by kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 223-236, Sept. 2000.

VIANA, S. B. A. et al. Produção de alface em condições de salinidade a partir de mudas produzidas com e sem estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 60-66, jan./abr. 2001.

VIEIRA, S. R. **Curso de atualização em conservação do solo: uso de geoestatística**. Campinas: Seção de Conservação do Solo, Instituto Agronômico de Campinas, 1995. 2v.

VIEIRA, S. R.; CASTRO, O. M.; TOPP, G. C. Spatial variability of soil physical properties in three soils of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, n. 2, p. 333-341, Fev. 1992.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 51, n. 3, p. 1-75, June 1983.

VOLTZ, M.; GOULARD, M. Spatial interpolation of soil moisture retention curves. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1/3, p. 109-123, Mar. 1994.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Science**, New York, v. 3, p. 1-70, 1985.

WEBSTER, R.; OLIVER, A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43, n. 1, p. 177-192, Mar. 1992.

YOST, R. S.; UEHARA, G.; FOX, R. L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 5, p. 1033-1037, Sept./Oct. 1982.

YURI, J. E.; SOUZA, R. J. Avaliação de cultivares de alface americana em duas épocas de plantio em Santo Antônio do Amparo – MG. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, p. 586-587, jul. 2000. Suplemento.

YURI, J. E. et al. Comportamento de cultivares de alface tipo americana em Boa Esperança. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 2, p. 229-232, jun. 2002.

ZAMBOTI, J. L. **Mapas pluviométricos médios mensais no verão para o Estado do Paraná, utilizando métodos geoestatísticos**. 2001. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZHANG, R.; WARRICK, A. W.; MYERS, D. E. Heterogeneity, plot shape effect and optimum plot size. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1/3, p. 183-197, Mar. 1994.

ZHANG, R. et al. Geostatistical analyses of trace elements in soils and plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 159, n. 6, p. 383-390, June, 1995.

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

ZIMMERMAN, D.L. Another look at anisotropy in geostatistics. **Mathematical Geology**, Dordrecht, v. 25, n. 4, p. 453-470, May 1993.

ZIMMERMAN, D.L.; ZIMMERMAN, M. B. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors. **Technometrics**, Alexandria, v. 33, n. 1, p. 77-91, Feb. 1991.