

ANÁLISE ESPACIAL DE NUTRIENTES E PRODUÇÃO DE ALFACE CULTIVADA EM AMBIENTE PROTEGIDO

Ivana Furio Batista¹; Célia Regina Lopes Zimback²

¹Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas(GEPAG), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, ivanafb@ig.com.br

²Departamento de Recursos Naturais, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

1 RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade espacial de alguns atributos químicos do solo e de produção 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 do ambiente protegido em zonas de manejo de nutrientes na cultura da alface, almejando uma maior produtividade com a aplicação localizada de fertilizantes. O experimento foi conduzido em ambiente protegido com alface irrigada por gotejamento e malha de amostragem com 152 pontos. A análise da dependência espacial, determinada pelo variograma, foi obtida com o auxílio do Programa Geoestatístico GS+. Considerando-se a necessidade da cultura em nutrientes, através do mapa obtido para o P, foi possível estabelecer duas áreas distintas de manejo para o elemento na adubação mineral de plantio da cultura de alface. Através dos mapas de produção de alface, obtidos com os atributos MFC e DCC, foi difícil estabelecer

¹- “O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/CT-Hidro – Brasil.”

- Trabalho desenvolvido junto ao Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas – GEPAG. Extraído da Tese de Doutorado da primeira autora, apresentada à FCA/UNESP.

áreas distintas de manejo para a produção com dados observados de apenas um ciclo cultural. A krigagem mostrou-se útil para o mapeamento dos atributos estudados.

UNITERMOS: geoestatística, variabilidade espacial, agricultura de precisão, irrigação por gotejamento.

BATISTA, I.F.; ZIMBACK, C.R.L. SPATIAL ANALYSIS OF NUTRIENTS AND LETTUCE YIELD CULTIVATED IN GREENHOUSE

2 ABSTRACT

The objective of this work was to study spatial variability of some chemical soil attributes and lettuce production (total shoot fresh matter mass – MF; commercial shoot fresh matter mass – MFC; commercial shoot dry matter mass – MCS; and head commercial diameter – DCC) offering subsidies to the protected environment mapping in nutrients management areas in lettuce culture aiming for a higher productivity with application of fertilizers. The experiment was conducted in a protective environment (greenhouse) with

lettuce irrigated by drip irrigation and sampling grid with 152 points. The special dependence analysis, determined by the variogram, was obtained with the aid of the GS+ Program. Considering the need for crop nutrients through the map obtained for element P (phosphorus) it was possible to establish two distinct areas for the application of this element in plantation fertilization. Through the lettuce yield maps obtained with MFC and DCC attributes was difficult to establish distinct areas for its management with data observed in only one crop cycle. Krigagem has proved useful for mapping the attributes studied.

KEYWORDS: geostatistics, spatial variability, precision agriculture, drip irrigation.

3 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.), 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.

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 de água e de nutrientes.

O cultivo protegido é um sistema de cultivo no qual o manejo de atributos químicos do solo, bem como o manejo de 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 um ambiente protegido, 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.

Portanto, diante deste novo contexto, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos no sentido de associar a variabilidade espacial de atributos do solo, procurando oferecer subsídios, à agricultura de precisão. Vários trabalhos têm utilizado a função variograma para verificar a dependência espacial de atributos químicos dos solos, como: Cahn et al. (1994), Davis et al. (1995) e Oliveira et al. (1999).

O incremento da agricultura de precisão impõe novos métodos e técnicas que devem ser incorporados ao processo produtivo, onde um grande conjunto de práticas agrícolas altamente adaptadas às condições do local de cultivo e à variabilidade das propriedades do solo devem ser aplicadas, 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.

O presente trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade de algumas propriedades químicas do solo em ambiente protegido e seus efeitos nos parâmetros de produção de alface; oferecendo desta forma subsídios ao mapeamento da área em diferentes zonas de manejo de nutrientes,

detectando possíveis áreas consideradas ótimas ao desenvolvimento de alface, almejando uma maior produtividade de alface, com a otimização do uso de nutrientes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental São Manuel, da Faculdade de Ciências Agrônomicas, 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 740m de altitude.

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.

Para a condução do experimento foi utilizada um ambiente protegido de dimensão de 5,0 x 20,0m (100m²) e altura na parte central de 2,65m.

No ambiente protegido 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. Nos pontos foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20cm para a determinação dos atributos químicos (antes e depois do plantio da cultura), além dos parâmetros de produção da cultura de alface.

A Figura 1 apresenta a malha experimental que 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 0,30m, tanto no sentido vertical, como no sentido horizontal.

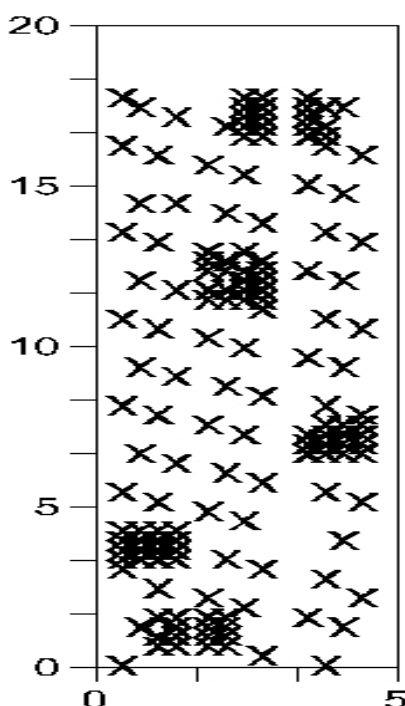


Figura 1. Esquema da malha experimental demarcada no ambiente protegido com os pontos de amostragem.

4.2 Manejo da irrigação para a condução cultura

O suprimento de água do sistema foi feito por meio de um reservatório de 20m³, cuja água é proveniente de uma mina, com uma condutividade elétrica igual a 162,5µS cm⁻¹ e pH igual a 7,5 a 25 °C.

Para a determinação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) do sistema de irrigação por gotejamento utilizado para a condução da cultura de alface, utilizou-se um método proposto por Keller & Karmeli (1975), conforme descrito por Bernardo (2002), cujo valor encontrado foi de 96,76%.

Com os valores dos teores de água no solo, para a camada de 0-20cm, obteve-se a curva de retenção de água no solo, com a finalidade de se efetuar o manejo da irrigação para a condução da cultura.

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).

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.

Para o manejo da irrigação da cultura foram instalados 9 tensiômetros de mercúrio, dispostos aleatoriamente no interior do ambiente protegido 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 mátrico da água no solo.

As leituras da coluna de mercúrio e cálculo do volume de água a ser aplicado foram efetuados diariamente. Quando necessário, procedeu-se as irrigações, utilizando-se a Fita Gotejadora Chapin; com emissores espaçados de 10cm e pressão média de 7,0mca, com vazão média de 7,24L h⁻¹ por gotejador.

A profundidade efetiva do sistema radicular 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 15-30cm. Na irrigação, elevou-se o teor de água no solo à capacidade de campo, com a frequência de um dia.

Os cálculos do volume de água a ser aplicado foram feitos utilizando-se as fórmulas descritas por Pizarro Cabello (1996). O volume de água aplicado foi controlado por hidrômetro.

4.3 Determinação dos e atributos químicos do solo

Os atributos químicos do solo foram: pH_{CaCl2}; M.O.(g dm⁻³); P_{resina} (mg dm⁻³); H + Al, K, Ca, Mg, SB, CTC e V (mmol_c dm⁻³) determinados segundo a metodologia descrita em Raij et al. (2001).

4.4 Características e condução da cultura

Foi utilizado um híbrido de alface americana (*Lactuca sativa* L.), com denominação comercial de “Lucy Brown”. A produção das mudas foi realizada em ambiente protegido, com semeadura em bandejas de isopor, utilizando sementes peletizadas. O transplante para os canteiros definitivos foi realizado no dia 23 de setembro de 2003.

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

A calagem e a adubação, baseadas na análise do solo, foram de acordo com Raij et al. (1996), utilizando-se a proporção de 40kg ha⁻¹ de N, 200kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 100kg ha⁻¹ de K₂O para a adubação mineral de plantio. Foi realizada a adubação orgânica, com o esterco de galinha humificado, na proporção de 6-8kg m⁻².

Foi utilizada a dose de 90kg ha⁻¹ (Raij et al., 1996) e como foi utilizada a fertirrigação, tal dose

foi subdividida e distribuída em intervalos de aplicação a cada 2 dias.

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 1000L, com potência de 750W para pressurização das soluções.

As soluções foram preparadas em baldes. Para a condução da cultura foram realizados tratamentos culturais, como capinas, com a finalidade de manter a cultura livre de plantas daninhas.

As plantas foram colhidas quando 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), sendo a colheita realizada com 85 dias após a semeadura.

Foram avaliados os seguintes parâmetros: massa de matéria fresca da parte aérea total (g planta^{-1}) – MF, massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g planta^{-1}) – MFC, massa de matéria seca da parte aérea comercial (g planta^{-1}) – 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 produção comerciais, as plantas foram desfolhadas até obter-se a parte comercial (cabeças de alface), que foram pesadas para a obtenção da massa de matéria fresca da parte aérea comercial (g planta^{-1}) e medidos os diâmetros das cabeças (cm) através de um paquímetro. As cabeças de alface foram embaladas e colocadas em estufa para pesagem após a secagem das plantas, obtendo-se a massa de matéria seca da parte aérea comercial (g planta^{-1}).

4.5 Análise espacial dos dados

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 & Srivastava (1989).

A análise da dependência espacial, determinada pelo variograma foi obtida com o auxílio do Programa Geoestatístico GS+ “Geostatistical for Environmental Sciences”, (GS+, 2000).

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 & Journel, 1998) e, posteriormente, definidos os modelos teóricos de variogramas.

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 (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.

A krigagem ordinária dos valores obtidos dos atributos estudados, que consiste numa interpolação desses valores entre os pontos amostrados, foi efetuada pelo Programa GS+, 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 & Webster (1980).

A validação cruzada foi empregada para avaliar os resultados obtidos, de acordo com o método descrito por Kane et al. (1982) e Goovaerts (1997).

A exatidão da seleção do modelo do variograma foi medida através do erro entre os valores observados e os 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).

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 associando os atributos

químicos do solo estudado com os parâmetros de produção de alface e através de técnicas de geoestatística e interpolação por krigagem ordinária, foram confeccionados os mapas de distribuição de nutrientes (P e K) em zonas de manejo e mapas de parâmetros de produção de alface (MFC e DCC).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise espacial dos dados

A análise espacial foi efetuada por meio da análise dos variogramas, conforme descrito por Journel & Huijbregts (1978) e Isaaks & Srivastava (1989), onde os dados apresentaram distribuição normal.

5.1.1 Análise variográfica dos atributos químicos do solo

Pela análise da superfície de tendência fornecida pelo Programa GS+, não foi observada evidência de anisotropia para os atributos químicos do solo, 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 & Zimmerman (1991), como a melhor medida de avaliação.

Os parâmetros obtidos para a análise variográfica dos atributos químicos do solo antes e após a implantação da cultura de alface encontram-se dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros variográficos dos atributos químicos do solo antes e após a implantação da cultura de alface.

Variável	Período ⁽¹⁾	Modelo	Efeito Pepita Co	Patamar Co + C	Alcan ce (m)	SQR ⁽²⁾	C/ (C + Co)	Classe de dependência espacial
pH	I	esférico	0,027	0,132	10,02	0,0153	0,792	forte
	II	esférico	0,001	0,024	2,00	1,065E-04	0,959	forte
M.O.	I	gaussiano	0,001	2,873	1,31	1,88	1,000	forte
	II	gaussiano	0,027	1,562	1,31	0,219	0,983	forte
P _{resina}	I	gaussiano	59,000	1979,000	3,25	266795,0	0,970	forte
	II	esférico	1,000	655,800	3,02	85351,0	0,998	forte
H + Al	I	esférico	0,060	5,571	10,45	6,47	0,989	forte
	II	esférico	0,003	1,115	1,95	0,173	0,997	forte
K	I	gaussiano	0,027	0,199	1,02	2,456E-3	0,866	forte
	II	gaussiano	0,006	0,123	1,77	1,342E-03	0,950	forte
Ca	I	gaussiano	5,200	108,900	0,93	1203,0	0,952	forte
	II	gaussiano	0,600	54,810	1,98	121,0	0,989	forte
Mg	I	gaussiano	0,010	25,540	0,94	36,0	1,000	forte
	II	gaussiano	0,010	18,450	1,90	114,0	0,999	forte
SB	I	gaussiano	3,100	240,300	0,91	5350,0	0,987	forte
	II	gaussiano	0,100	114,600	1,99	1546,0	0,999	forte
CTC	I	gaussiano	1,100	228,700	0,91	4804,0	0,995	forte
	II	gaussiano	0,100	104,900	2,01	1364,0	0,999	forte
V	I	esférico	0,100	54,650	0,78	938,0	0,998	forte
	II	gaussiano	0,240	5,980	1,99	1,83	0,960	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 1, observou-se que o modelo esférico foi o escolhido apenas para os atributos pH (períodos I e II); P_{resina} e H+Al (período II) e V (período I), sendo o modelo gaussiano escolhido para os demais.

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.

Através da Tabela 1, pode-se observar que, ao considerar os atributos MO e V do solo, o efeito pepita é maior no período II do que o período I. Como o efeito pepita mostra outras influências para a variação da MO e V 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 nestes atributos, tornando a aleatoriedade das variações maiores.

Já uma resposta inversa pode ser observada para os atributos pH, P_{resina} , H + Al, K, Ca, SB e CTC, 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.

Para o atributo Mg 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 1.

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

O patamar visualiza a grandeza da variabilidade total da amostragem, sendo que, a maior variação ocorreu entre P_{resina} no período I e P_{resina} no período II e a menor variação ocorreu entre K no período I e K no período II.

O parâmetro alcance determina até qual distância os dados apresentam dependência espacial. Nos dados da Tabela 1, pode-se notar que o alcance variou desde 0,78m (V no período I) até 10,45m (H + Al no período I).

Pela Tabela 1 pode-se notar que, para os teores de cátions (Ca, Mg e 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 à cultura influenciaram na variabilidade espacial.

Pela Tabela 1 pode-se notar que para os valores de V no solo, a amplitude de dependência espacial é sempre maior no período II, ou seja, após o plantio da cultura de alface, obteve-se um valor de alcance maior. É interessante observar que tal resposta seria esperada se no solo estudado tivesse sido feita a operação de calagem antes do plantio da cultura de alface, visando a correção de acidez do solo e à elevação do valor de V.

Entretanto, mesmo não tendo sido feita a correção, 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 para a agricultura de precisão.

De modo generalizado, notou-se a existência de variabilidade espacial ao se tratar de atributos químicos do solo em ambiente protegido, necessitando mais 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, respostas em relação a um manejo do solo específico, ou ainda, visando o melhoramento genético, mais estudos podem ser interessantes.

É importante considerar também que, devido ao cultivo protegido apresentar certas particularidades, 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 respostas 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 da fertirrigação, quando se almeja a irrigação de precisão, através da racionalização do uso da água e nutrientes.

5.1.2 Análise variográfica dos parâmetros de produção de alface

Os parâmetros obtidos para a análise variográfica dos parâmetros de produção da cultura de alface encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros variográficos da produção da cultura de alface.

Variável	Modelo	Efeito Pepita Co	Patamar Co + C	Alcance (m)	SQR ⁽¹⁾	C/ (C + Co)	Classe de dependência espacial
MF	esférico	10,000	20190,000	0,44	6,052E + 07	1,000	forte
MFC	esférico	70,000	10940,000	0,48	1,78E + 07	0,994	forte
MSC	linear	29,232	29,232	-	273,0	0,000	nula
DCC	esférico	0,186	2,592	0,36	1,34	0,928	forte

⁽¹⁾ SQR – soma dos quadrados dos resíduos.

Pela análise dos dados da Tabela 2, observa-se que para o ajuste dos variogramas, o modelo esférico foi escolhido para as variáveis MF, MFC e DCC, sendo o modelo linear apenas para MSC.

Pelo índice da dependência espacial, proposto por Zimback (2001), mostrou que os parâmetros MF, MFC e DCC apresentaram forte dependência espacial e que o atributo MSC não apresentou dependência espacial, caracterizando efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial.

Na análise espacial da Tabela 2, pode-se notar que o alcance variou desde 0,36m (DCC) até 0,48m (MFC).

Para a variável 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 o atributo.

A variabilidade espacial dos parâmetros de produção da cultura de alface em ambiente protegido ressalta a necessidade de estudos mais acurados de melhoramento genético, uma vez que uma determinada variedade pode responder de maneira diferenciada, dependendo da localização espacial das plantas, mesmo considerando que há homogeneidade genética.

5.1.3 Manejo da adubação e produção de alface baseados na análise espacial

5.1.3.1 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 produção das culturas, o que destaca a importância de estudos que envolvam a aplicação cada vez mais direcionada de nutrientes.

Diante do exposto, dividiu-se em áreas de manejo quanto à aplicação de dois elementos classificados como macronutrientes às plantas; o fósforo e o potássio. As Figuras 2a e 2b apresentam, respectivamente, os mapas dos teores do elemento P, obtido com os dados do período I (antes do plantio da cultura de alface) e período II (após o plantio da cultura 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 136mg dm^{-3} e 221mg dm^{-3} (período I) e entre 150mg dm^{-3} e 215mg dm^{-3} (período II) e outra região com concentrações de fósforo entre 51mg dm^{-3} e 136mg dm^{-3} (período I) e entre 84 e 150mg dm^{-3} (período II). Isto indica que é possível estabelecer através do mapa obtido, duas áreas distintas de aplicação do elemento fósforo por ocasião da adubação mineral de plantio da cultura de alface.

Tal variabilidade talvez pôde ser notada devido ao elemento P apresentar baixa mobilidade no solo. As Figuras 2c e 2d 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 $1,3$ e $2,5\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e entre $1,5$ e $2,7\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, e outra área situada na maior parte das Figuras 2c e 2d; com predominância de concentrações de potássio entre $0,1$ e $1,3\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para a Figura 2c e entre $0,4$ e $1,5\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para a Figura 2d, com uma relativa homogeneidade do elemento nos dois períodos observados, ficando difícil estabelecer áreas distintas de manejo para a aplicação do elemento.

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, pode-se sugerir que a adubação mineral de plantio não se faça através de fertilizantes mistos, como por exemplo, através de uma determinada formulação NPK pronta, e sim através do fornecimento dos elementos fósforo e potássio como fertilizantes simples.

As Figuras 3a e 3b apresentam os mapas de produção de alface, obtidos através dos atributos MFC (g planta^{-1}) e DCC (cm), respectivamente.

Pela análise da Figura 3a, podem-se notar áreas irregularmente distribuídas; com valores de MFC entre $471,64$ e $798,99\text{g planta}^{-1}$ e com o predomínio de valores de MFC entre $144,29$ e $471,64\text{g planta}^{-1}$, ficando difícil estabelecer áreas distintas de manejo para a produção. Na Figura 3b, pode-se notar áreas irregularmente distribuídas; com valores de DCC entre $4,50$ e $8,20\text{cm}$ e com o predomínio de valores de DCC entre $8,20$ e $11,80\text{cm}$, observando-se através do mapa uma relativa homogeneidade para o atributo DCC, o que pode ser atribuído ao valor do alcance de $0,36\text{m}$ (Tabela 2) ser muito próximo ao valor do espaçamento da cultura ($0,30\text{m}$) utilizado para o adensamento das amostras.

De modo concernente a estes resultados, 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 a massa de alface (g planta^{-1}) e o diâmetro de alface (cm), concluíram que não havia uma região dentro do ambiente protegido que pudesse ser considerada ótima para a produção de alface.

É importante salientar que no presente estudo, os dados de produção alface foram obtidos de um único ciclo cultural. Em agricultura de precisão, seria interessante a observação dos parâmetros de

produção em mais de um ciclo, na tentativa de detectar sub-regiões com diferenças significativas de produção.

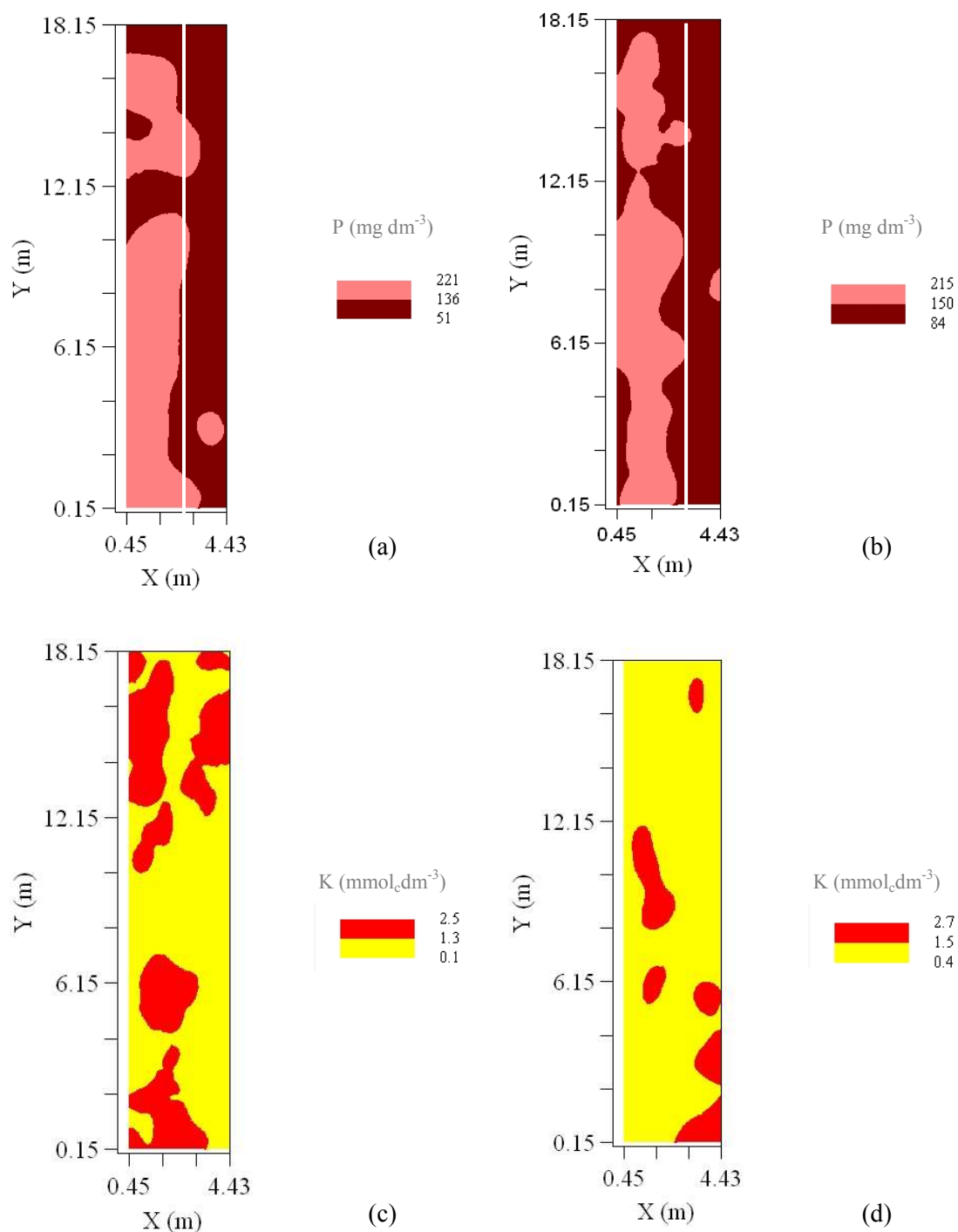


Figura 2. Mapa dos teores de: P no período I – antes da implantação da cultura de alface (a); P no período II – após a implantação da cultura de alface (b); K no período I – antes da

implantação da cultura de alface (c) e K no período II – após a implantação da cultura de alface (d).

5.1.3.2 Mapa da produção de alface

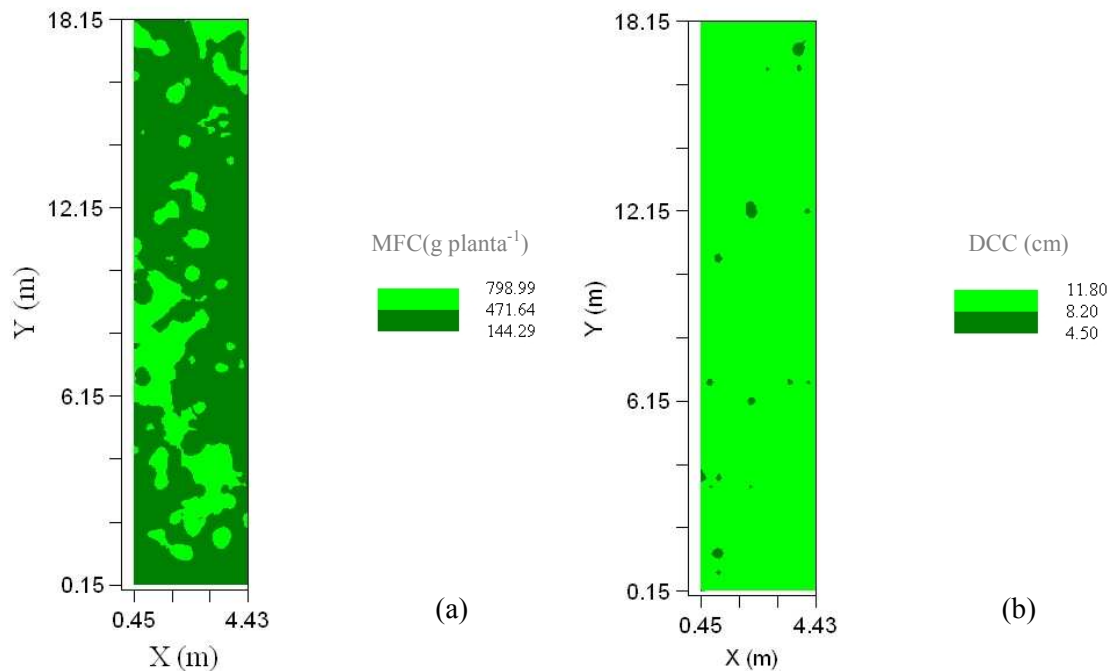


Figura 3. Mapa da produção de alface: massa de matéria fresca da parte aérea comercial – MFC (a) e diâmetro de cabeça comercial – DCC (b).

O presente trabalho de descrição da variabilidade espacial dos nutrientes fósforo e potássio e da produção de alface em cultivo protegido contribui para a caracterização inicial da área para a aplicação posterior da agricultura de precisão, conseguindo-se uma melhoria das condições de fertilidade do solo à medida que as observações vão sendo feitas e à medida que vão se efetuando as correções e adubações de maneira localizada na área de estudo. O manejo localizado em cultivo protegido é interessante, uma vez que ao ser utilizado para a condução de experimentos e também em cultivos sucessivos, permite economia no uso de insumos, a diminuição dos custos de produção, o aumento da produtividade e do retorno econômico, além da redução dos impactos ambientais.

6 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que: - através dos mapas dos atributos químicos P e K obtidos, apenas para o P foi possível estabelecer duas áreas distintas de manejo na adubação mineral de plantio da cultura da alface em ambiente protegido; considerando-se apenas os atributos de produção de alface (MFC e DCC) não foram detectadas diferentes zonas de manejo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: Editora UFV, 2002. 656 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: Editora UFV, 2002. 402 p.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 650 p.
- GS+: Geostatistics for the environmental sciences. Version 5.0.3 Beta. Michigan: Gamma Design Software, 2000. 1 CD-ROM.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 600 p.
- JOURNEL, A. C.; HUIJBREGTS C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600 p.
- KANE, V. et al. Interpretation of regional geochemistry using optimal interpolation parameters. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 8, n. 2, p. 117-135, 1982.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, 1996. 71 p.
- MYERS, D. E. Interpolation and estimation with spatially located data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Amsterdam, v. 11, n. 3, p. 209-228, Oct. 1991.
- 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.
- PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación**. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

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

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

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.

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

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.