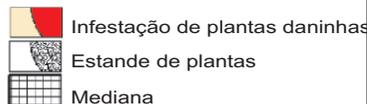
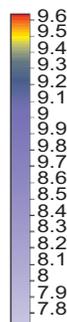
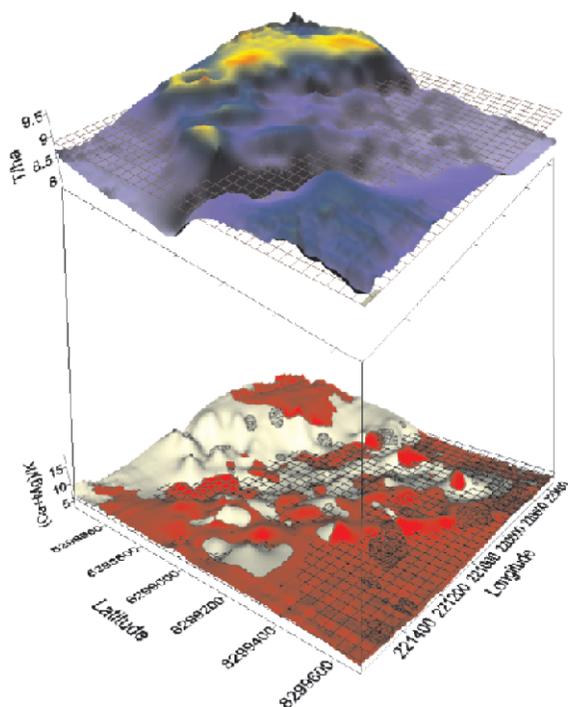


Geração de Mapas Multitemáticos em Agricultura de Precisão



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 181

Geração de Mapas Multitemáticos em Agricultura de Precisão

Luciano Shozo Shiratsuchi

Robélio Leandro Marchão

Caroline Jerke

Álvaro Vilela Resende

José Roberto Antoniol Fontes

Charles Martins de Oliveira

Marina de Fátima Vilela

Marcos Aurélio Carolino de Sá

João de Deus Gomes dos Santos Júnior

Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretário-Executivo: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Revisão de texto: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Normalização bibliográfica: *Rosângela Lacerda de Castro*

Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*

Capa: *Jussara Flores de Oliveira*

Tratamento das ilustrações: *Jussara Flores de Oliveira*

Ilustração da capa: *Autores*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Sousa*
Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2007): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

G354 Geração de mapas multitemáticos em agricultura de precisão / Luciano Shozo Shiratsuchi ... [et al.]. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2007.
22 p. — (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X; 181)

1. Mapa. 2. Produtividade. 3. Tomada de decisão. I. Shiratsuchi, Luciano Shozo. II. Série.

631.3 - CDD 21

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	7
Material e Métodos	8
Resultados e Discussão	10
Estatística descritiva	10
Análise de componentes principais	12
Mapa multitemático	15
Análise de semivariogramas, modelagem e krigagem Indicatriz	15
Conclusões	21
Referências	21

Geração de Mapas Multitemáticos em Agricultura de Precisão

*Luciano S. Shiratsuchi¹; Robélio L. Marchão²; Caroline Jerke³;
Álvaro V. Resende V.⁴; José R. A. Fontes⁵; Charles M. Oliveira⁶;
Marina F. Vilela⁷; Marcos A. C. Sá⁸; João D. G. S. Júnior⁹;
Sandro M. C. Hurtado¹⁰*

Resumo

O objetivo deste trabalho foi delinear uma metodologia de geração de mapas multitemáticos para o apoio à tomada de decisão nas culturas de grãos, considerando a abordagem integrada e hierarquizada dos fatores que interferem na produtividade. A área foi mapeada para os atributos da fertilidade do solo, nutrição de plantas, plantas daninhas e estande de plantas, sendo colhida com colhedora equipada com sensores de produtividade, umidade e GPS para a geração de mapas de produtividade. Utilizou-se a análise de componentes principais (ACP) com o intuito de correlacionar a produtividade das culturas com a disponibilidade dos nutrientes do solo e planta, infestação de plantas daninhas e estande. Os três maiores fatores que interferiram na produtividade, segundo o Diagrama de Fatores gerados pela ACP, foram selecionados para a geração dos mapas multitemáticos interpolados por krigagem indicatriz. O excesso de K no solo foi o atributo de maior peso, desbalanceando as relações Ca:Mg; $Ca + Mg / K$ e Mg / K ; sendo que as zonas com melhores relações foram as mais produtivas. Contribuiu também para a diminuição da produtividade a falta de boro e a maior infestação do banco de sementes de plantas daninhas.

Termos para indexação: manejo sítio-específico, análise de componentes principais, tomada de decisão.

¹ Eng. Agrôn., M.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, shozo@cpac.embrapa.br

² Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, robelio.leandro@cpac.embrapa.br

³ Estudante de graduação, UPIS, bolsista da Embrapa Cerrados

⁴ Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, alvaro@cpac.embrapa.br

⁵ Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, zeroberto@cpac.embrapa.br

⁶ Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, charles@cpac.embrapa.br

⁷ Eng. Flor., D.Sc., Pesquisadora da Embrapa Cerrados, marina@cpac.embrapa.br

⁸ Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, carolino@cpac.embrapa.br

⁹ Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, jdsantos@cpac.embrapa.br

¹⁰ Eng. Agrôn., M.Sc., UFLA, Estagiário da Embrapa Cerrados, sandroelbat@yahoo.com.br

Multi-thematic Maps Generation in Precision Agricultural

Abstract

The objective of this research was to delineate a methodology for generating multi-thematic maps to support the decision making in agricultural production systems. This approach considered the major factors that affect the grain yield. The experimental area was sampled at 50 by 50 meters grid to the variables of soil fertility, plant nutrition, weeds and stand, being harvested with yield sensor, moisture sensor and GPS for yield maps generation. The Principal Component Analysis (PCA) was used with the objective of correlating the grain yield with soil fertility, plant nutrition, weeds and stand. After the three major factors were ranked according to the Scatter Class Diagram generated by PCA, those variables were selected for the generation of multi-thematic maps interpolated by indicator kriging. The high values of potassium in the soil was the variable that most interfered in the adequate balancing of Ca:Mg; Ca + Mg / K and Mg / K conditioning better yields. Other variables that contributed to the low yield were lack of B, the largest weed seed bank infestation and low soil organic matter content.

Index terms: site specific management, principal component analysis, decision making.

Introdução

Com a adoção da Agricultura de Precisão ou Manejo Sítio-Específico, muitos mapas vêm sendo produzidos, armazenados e utilizados, principalmente por produtores pioneiros e receptivos às tecnologias de ponta na agricultura. Porém, em virtude da sua complexidade, a interpretação desses mapas nem sempre gera informações coerentes e claramente relacionadas às características do sistema de manejo do solo. Observa-se ainda que, por vezes, é necessária uma abordagem multidisciplinar que necessita da participação de especialistas em diversas áreas para a correta interpretação dos diversos tipos de mapas ([BUCHLEITER et al., 1997](#)).

É comum observar, em talhões de grandes propriedades agrícolas comerciais, zonas de baixa produtividade onde estão os níveis mais altos de fertilidade do solo. Frequentemente, observam-se áreas com alta infestação de pragas e plantas daninhas com maior rendimento que áreas menos infestadas. Porém, quando são feitas algumas perguntas, tais como: por que a produtividade em áreas de alto teor de potássio e baixa infestação de plantas daninhas é menor que em áreas com baixos teores e altas infestações? Qual(is) nutriente(s) mais limitante(s) se todos teores e relações estão aparentemente adequados em uma grande zona de produtividades abaixo da média do talhão? É comum não se ter respostas embasadas cientificamente.

No monitoramento da fertilidade do solo, por meio da confecção de mapas resultantes de amostragem georreferenciada, é freqüente observar teores de nutrientes muito acima dos observados nas tabelas de recomendações geradas pela pesquisa. Na prática, muitos produtores relatam e comprovam empiricamente que alguns teores ainda devem ser mais elevados e algumas relações entre nutrientes devem ser revistas, pois existem talhões onde quanto maior o nível dos nutrientes no solo, maiores produtividades são percebidas, e muitas relações entre nutrientes não conseguem explicar os níveis de produtividade atingidos na prática.

Observa-se maior dificuldade na interpretação desses mapas quando são observados altos níveis de fertilidade do solo combinados com altas infestações de plantas daninhas, baixo estande de plantas, presença de pragas e outros fatores que interferem na produtividade. Quando várias variáveis interferem na produtividade, é sempre recomendável utilizar algum ferramental estatístico que considere muitas variáveis ao mesmo tempo ([MALLARINO et al., 1996](#)).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi delinear um protocolo de geração de mapas multitemáticos para o apoio à tomada de decisão nas culturas de milho e soja, considerando a abordagem integrada e hierarquizada dos fatores que interferem na produtividade dessas culturas. Espera-se que, com os mapas gerados, seja possível a hierarquização dos fatores que mais interferem na produtividade e, com apenas poucos mapas e tabelas, o técnico possa interpretar, de forma resumida, o grande número de informações geradas em cada um dos mapas temáticos.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido em área comercial da Fazenda Alto Alegre, localizada em Planaltina de Goiás, GO (Longitude 47°35'53" – Latitude 15°22'11"; altitude média de 1.035 m), em talhão conduzido sob sistema de plantio direto. A área tem um histórico de altas produtividades e pode ser considerada como representativa da maioria dos produtores do Cerrado que adotam Agricultura de Precisão.

Durante a safra de 2004/2005, onde foi cultivado milho com espaçamento entre plantas de 0,7 m, a área foi mapeada para levantamento dos atributos envolvidos na fertilidade do solo (pH em água, Matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Mn, B e textura), nutrientes nas folhas (N, P, K, Ca, Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Mn, S, B), presença de plantas daninhas (banco de sementes do solo e/ou flora emergente) e estande de plantas (número de plantas por metro e desvio-padrão entre plantas). O milho foi colhido com colhedora equipada com sensores de produtividade, umidade e GPS para a geração do mapa de produtividade.

A área de 107 ha foi amostrada em grades regulares de 50 m x 50 m, totalizando 350 pontos amostrais. Para cada ponto georreferenciado, foram coletadas amostras de solo e planta, e foram também quantificados a infestação de plantas daninhas e o estande final de plantas de milho.

Os dados foram submetidos à análise geoestatística utilizando semivariogramas, a partir dos quais foram ajustados modelos para a interpolação das variáveis por krigagem pontual e geração de mapas em pixels de grades de 5 m x 5 m. Esse procedimento foi adotado, pois permite que seja realizada uma comparação de mapas de diversas variáveis em diversas escalas de amostragem.

O mapa de produtividade gerado pela colhedora instrumentada foi submetido à filtragem de dados, com o intuito de melhorar a qualidade dos dados gravados pelos sensores, considerando que inúmeros dados discrepantes (outliers) são gravados no arquivo de registro da máquina. A filtragem foi realizada pela fusão das metodologias de [Menegatti e Molin \(2003\)](#) e [Gimenez \(2004\)](#). Os dados de produtividade foram relativizados em função do maior valor de produtividade, sendo considerada como zona de baixa produtividade as sub-regiões com produtividades abaixo da média na safra colhida e, como zona de alta produtividade as sub-regiões com produtividades acima da média.

Os dados de cada variável medida nos pontos georreferenciados foram submetidos às análises estatísticas descritivas previamente à análise de semivariogramas e modelagem para interpolação por krigagem. Para cada ponto georreferenciado, foram calculadas as médias de produtividade num raio igual à metade da grade amostral durante a safra.

Com o objetivo de comparar e relacionar a produtividade com todos as demais variáveis medidas, foi realizada uma análise de componentes principais (ACP) com auxílio do programa ADE-4 ([THIOULOUSE et al., 1997](#)). A partir do círculo de correlações obtido da ACP, as variáveis foram hierarquizadas ou ranqueadas em ordem decrescente de interferência na produtividade, da maior para a menor. Após a hierarquização, as três

primeiras variáveis que interferiram na produtividade foram selecionadas para a confecção do mapa multitemático.

Na geração desses mapas, foram adotados os seguintes critérios: as três variáveis que mais interferiram na produtividade foram divididas em duas classes, onde a nota 0 foi atribuída a valores menores que a mediana, e a nota 1 foi atribuída a valores acima da mediana da variável. As notas (0 e 1) recebidas pelas variáveis foram submetidas à análise de semivariogramas e, em seguida, interpolados por krigagem indicatriz ([ISAACS; SRIVASTAVA, 1989](#)).

Os mapas multitemáticos foram padronizados para que a imagem em três dimensões (3D) sempre se referisse aos atributos ligados à fertilidade do solo e à produtividade; as hachuras se referissem ao estande final de plantas; o mapa de contorno à infestação de plantas daninhas e o plano fixo ao valor da mediana do atributo referente à fertilidade do solo e à produtividade.

De acordo com o histórico da área, em nenhuma safra anterior foi realizada aplicação de insumos em taxas variáveis, no sentido de se diagnosticar com precisão quais seriam os principais fatores que interferiram na produtividade.

Resultados e Discussão

Estatística descritiva

Os resultados das médias, mediana, mínimo, máximo e desvio-padrão dos atributos medidos durante a safra estão descritos na Tabela 1.

Características semelhantes quanto a atributos do solo em áreas de plantio direto foram obtidas por [Montezano \(2006\)](#).

A produtividade média de milho, cultivado com espaçamento de 0,70 m entre linhas, não teve uma grande amplitude de variação nos valores de produtividade nesta safra, porém observou-se que existem zonas no talhão onde a produtividade foi de 7.600 kg ha⁻¹ e outras com produtividade de 9.600 kg ha⁻¹, mostrando que existe variabilidade espacial significativa da produção no talhão estudado.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos da fertilidade do solo, nutrientes nas folhas, estande de plantas e plantas daninhas na safra 2004/2005.

Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Amplitude	DP	CV (%)
MILHO (ton/ha)	8.9	8.8	7.6	9.6	2.0	0.4	4.4
PH Água	5.9	5.9	5.2	6.5	1.3	0.3	4.4
P (mg/dm ³)	9.9	8.6	1.3	55.5	54.2	5.6	57.1
K (mg/dm ³)	239.8	240.0	110.0	480.0	370.0	58.6	24.4
CA (cmolc/dm ³)	2.9	2.8	1.4	5.4	3.9	0.6	19.5
MG (cmolc/dm ³)	0.8	0.8	0.5	1.8	1.3	0.2	20.3
AL (cmolc/dm ³)	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	242.4
H + AL (cmolc/dm ³)	3.2	3.1	0.0	4.8	4.8	0.6	18.8
T (cmolc/dm ³)	4.4	4.3	2.6	6.8	4.3	0.7	15.4
m%	0.2	0.0	0.0	3.8	3.8	0.5	239.8
V%	58.0	57.4	36.1	100.0	63.9	6.5	11.1
Matéria Orgânica (%)	2.3	2.2	1.4	3.3	1.8	0.3	13.5
Cu (mg/dm ³)	2.3	2.0	0.7	11.6	10.9	1.3	54.3
Fe (mg/dm ³)	34.5	32.8	16.5	57.2	40.7	7.8	22.6
Mn (mg/dm ³)	10.1	9.3	3.3	36.1	32.8	4.2	41.7
Zn (mg/dm ³)	5.3	4.4	1.8	49.0	47.2	4.1	77.0
Ca:Mg	3.6	3.3	2.2	5.8	3.6	0.7	19.1
Ca / K	5.1	4.6	2.1	14.9	12.8	2.1	40.8
Mg / K	1.4	1.4	0.6	3.1	2.4	0.4	29.8
Ca + Mg / K	6.5	6.0	2.8	17.9	15.1	2.5	37.6
Areia (%)	31.4	32.0	16.6	43.1	26.6	5.2	16.4
Silte (%)	14.5	13.9	0.0	49.0	49.0	5.4	37.4
Argila (%)	54.1	54.0	0.0	151.0	151.0	8.0	14.9
Nf	30.0	30.0	25.1	36.1	11.0	1.8	5.9
Pf	2.6	2.6	2.1	3.7	1.6	0.2	9.3
Kf	22.0	21.7	14.2	32.1	17.9	2.8	12.9
Caf	4.5	4.5	3.6	5.7	2.1	0.4	9.2
Mgf	1.6	1.6	0.9	2.8	1.9	0.2	15.2
Sf	1.5	1.4	0.8	4.8	4.0	0.3	17.2
Bf	8.8	7.7	0.5	23.4	22.9	5.0	56.7
Cuf	15.3	15.0	11.0	33.4	22.4	2.2	14.4
Fef	215.9	193.8	96.3	1219.0	1122.7	108.3	50.2
Mnf	29.4	28.2	13.3	129.8	116.5	10.5	35.6
Znf	36.3	36.0	24.3	58.4	34.1	4.8	13.3
Alf	140.2	112.8	16.8	1223.8	1207.0	112.2	80.0
Naf	78.8	79.4	11.3	218.8	207.5	34.3	43.5
DIST (cm)	24.9	23.0	3.5	50.0	46.5	7.0	28.0
DesvSTD (cm)	12.1	9.6	0.7	64.4	63.6	10.1	83.4
POP (plantas / ha)	61986	62111	28571	408163	379591	23633	38.1
STAND (plantas / m)	4.5	5.0	1.0	7.0	6.0	1.0	21.5
PDTOTAL (plantas / m ²)	64.2	24.0	0.0	1468.0	1468.0	123.2	191.8
BSTOTAL (sementes / m ²)	1075.6	880.0	0.0	9064.0	9064.0	998.3	92.8

* DP – Desvio-padrão da média; CV(%) – Coeficiente de Variação; f – teor do nutriente na folha; DIST – distância entre plantas; DesvSTD – desvio-padrão da distância entre plantas; POP – população de plantas por hectare; PDTOTAL – flora emergente daninha total emergida por m² durante o período crítico de prevenção da interferência; BSTOTAL – banco de sementes total por m² das plantas daninhas na profundidade de 0 – 20 cm.

De modo geral, os teores da fertilidade ou as concentrações de nutrientes no solo foram adequados para o alcance de altas produtividades, não sendo observados níveis críticos na área.

O estande final de plantas de milho foi relativamente baixo e apresentou grande variabilidade, com alto coeficiente de variação (CV) tanto para plantas por metro, quanto para a distância entre plantas.

Observou-se também alta infestação por plantas invasoras, tanto para a flora emergente quanto para o banco de sementes.

Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (ACP) revelou que os dois primeiros fatores ou componentes contribuíram com aproximadamente 26 % (Fig. 1). Para confecção do círculo de correlação entre os autovetores, foram selecionadas as duas primeiras componentes representadas pelos dois eixos do plano fatorial (Fig. 2).

Analisando o círculo de correlações entre os autovetores, verifica-se claramente que os atributos do solo que mais influenciaram na produtividade do milho foram K, Ca e Mg, assim como as relações entre esses nutrientes, tanto no solo quanto na folha. Analisando o mapa de produtividade e os resultados das análises químicas, observou-se que em áreas de produtividades mais elevadas também foram observados maiores níveis de Ca e Mg. Em relação ao K, analisando as relações com as demais bases do solo, observou-se que, nas áreas com deficiência de Ca e Mg, ocorreu um desbalanço entre estes nutrientes, principalmente pelos altos níveis de K no solo que pode ter provocado um desbalanço das relações Ca:Mg; Ca + Mg / K e Mg / K.

O banco de sementes de plantas invasoras no solo também influenciou na produtividade do milho. Contudo, ao analisar o círculo de correlações, observa-se que não há uma relação clara entre a presença da flora emergente e uma possível redução na produtividade. Esse resultado pode estar relacionado à época de amostragem das plântulas, onde o banco de sementes não havia emergido de forma representativa. Isso demonstra a importância da época de amostragem em relação ao estágio fenológico das plantas invasoras no momento de amostragem para a confecção de mapas de infestação, pois a emergência gradual e em fluxos do banco de sementes pode comprometer a confecção dos mapas de aplicação onde o alvo é a flora invasora emergente.

Num.	Eigenval.	R.Iner.	R.Sum	Num.	Eigenval.	R.Iner.	R.Sum
01	+6.3098E+00	+01502	+0.1502	02	+4.7406E+00	+0.1129	+0.2631
03	+3.1985E+00	+0.0762	+0.3393	04	+2.5531E+00	+0.0608	+0.4000
05	+2.0990E+00	+0.0500	+0.4500	06	+1.9028E+00	+0.0453	+0.4953
07	+1.7214E+00	+0.041.0	+0.5363	08	+1.6706E+00	+0.0398	+0.5761
09	+1.5939E+00	+0.0380	+0.6140	10	+1.4704E+00	+0.0350	+0.6490
11	+1.3173E+00	+0.031.4	+0.6804	12	+1.1225E+00	+0.0267	+0.7071
13	+1.0591E+00	+0.0252	+0.7324	14	+1.0293E+00	+0.0245	+0.7569
15	+9.2829E-01	+0.0221	+0.7790	16	+8.4493E-01	+0.0201	+0.7991
17	+7.9207E-01	+0.0189	+0.8179	18	+7.7609E-01	+0.0185	+0.8364
19	+7.2051E-01	+0.0172	+0.8536	20	+6.8338E-01	+0.0163	+0.8698
21	+6.2076E-01	+0.0148	+0.8846	22	+5.8823E-01	+0.0140	+0.8986
23	+5.4890E-01	+0.0131	+0.9117	24	+4.9931E-01	+0.0119	+0.9236
25	+4.6503E-01	+0.0111	+0.9347	26	+4.0850E-01	+0.0097	+0.9445
27	+3.9181E-01	+0.0093	+0.9538	28	+3.6341E-01	+0.0087	+0.9624
29	+3.1084E-01	+0.0074	+0.9698	30	+2.9755E-01	+0.0071	+0.9769
31	+2.6445E-01	+0.0063	+0.9832	32	+2.0911E-01	+0.0050	+0.9882
33	+1.9858E-01	+0.0047	+0.9929	34	+1.7216E-01	+0.0041	+0.9970
35	+8.1060E-02	+0.0019	+0.9990	36	+2.1166E-02	+0.0005	+0.9995
37	+1.3484E-02	+0.0003	+0.9998	38	+5.9852E-03	+0.0001	+0.9999
39	+3.2307E-03	+0.0001	+1.0000	40	+0.0000E+00	+0.0000	+1.0000

Fig. 1. Eigen Values e inércia para as variáveis estudadas na safra de milho.

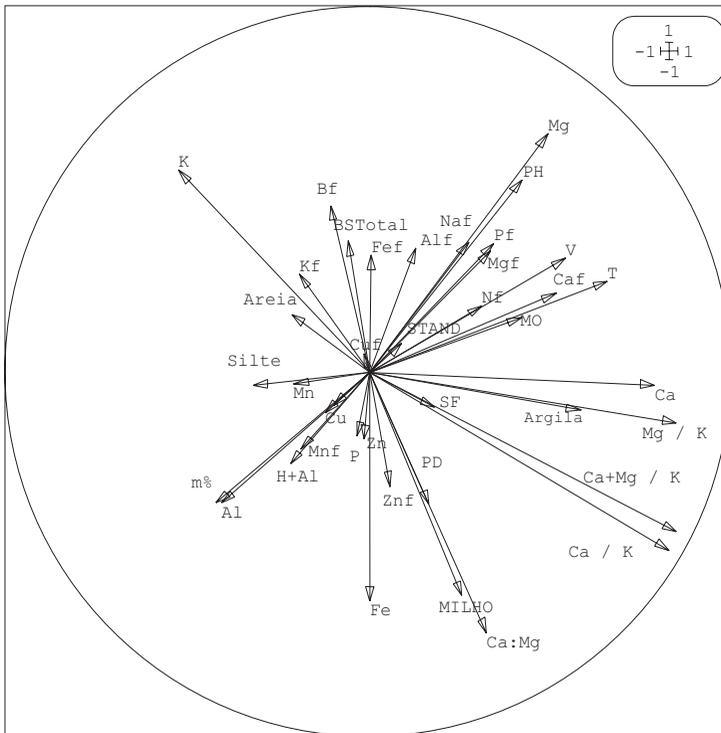


Fig. 2. Círculo de correlações entre as variáveis medidas na safra de milho 2004/2005.

O estande final de plantas, apesar de apresentar valor médio relativamente baixo e variável, não teve relação com a produtividade do milho. Esse resultado foi também observado quando foi obtido o coeficiente de correlação linear de Pearson da produtividade com o estande final de plantas medido (dados não mostrados). No plano de dispersão dos pontos de amostragem (Fig. 3), observa-se claramente a separação entre as zonas de baixa produtividade, abaixo da média (b), com as zonas de altas produtividades, acima da média (a). A análise discriminante revelou que a separação das duas zonas foi significativa ($p > 0.01$), o que demonstra que há de fato um gradiente de produtividade no talhão amostrado.

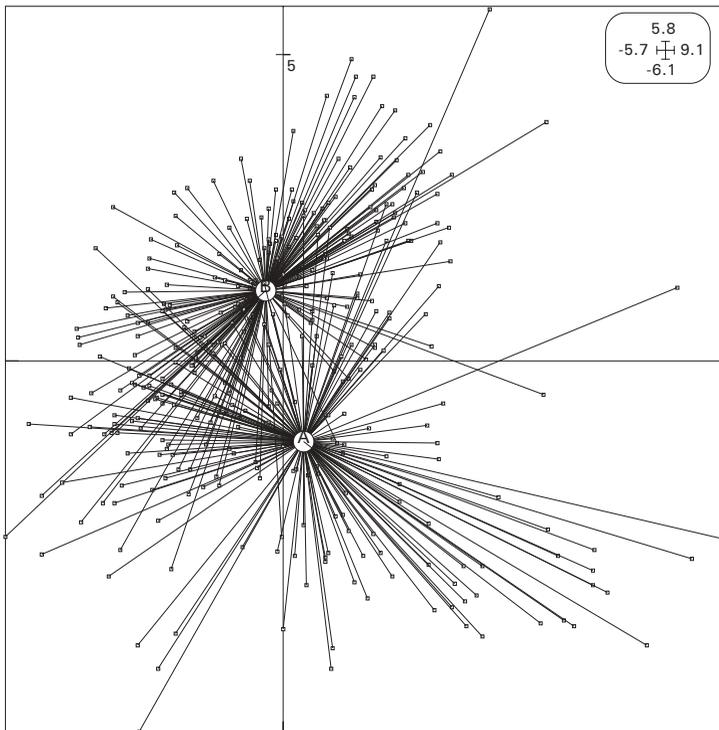


Fig. 3. Plano de dispersão dos pontos oriundos do grid de amostragem comparativo de zonas de alta produtividade (a) com zonas de baixa produtividade (b).

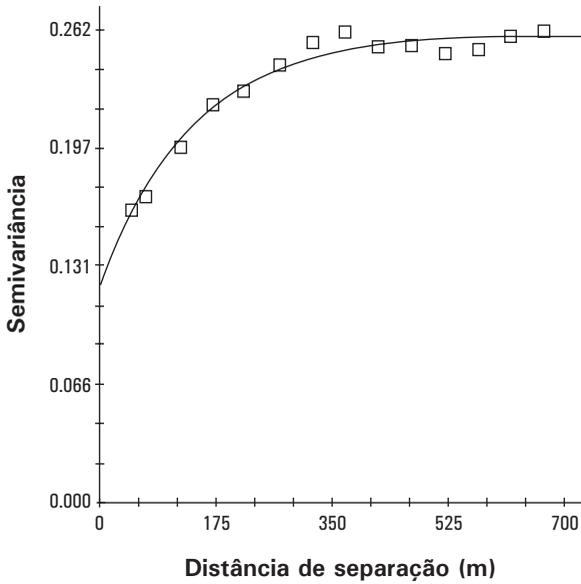
Mapa multitemático

Após a hierarquização das variáveis, foram escolhidas para a geração do mapa multitemático as seguintes variáveis que mais contribuíram para a redução da produtividade: (i) dentre os atributos da fertilidade do solo: a relação de $Ca + Mg / K$; (ii) do atributo infestação de plantas daninhas: o banco de sementes de plantas daninhas; e (iii) estande de plantas. Porém, antes da geração do mapa multitemático, foram realizadas as análises geoestatísticas por meio do ajuste de modelos aos semivariogramas de cada um dos três fatores para a geração dos mapas por krigagem indicatriz.

Análise de semivariogramas, modelagem e krigagem Indicatriz

Para as variáveis $Ca + Mg / K$ e banco de sementes de plantas daninhas, os semivariogramas indicaram agregação dos dados, quando se utilizou os valores de 0 (valores abaixo da mediana) e 1 (valores acima da mediana) (Fig. 4 e 5). Para o estande de plantas, não houve um padrão espacial definido (efeito pepita puro), resultando em um mapa com nenhum padrão de agregação bem definido. Pode ser percebido que, nos dois casos ($Ca + Mg / K$ e Banco de sementes), os semivariogramas possuíam estrutura espacial agregadas, demonstrando dependência espacial e modelos ajustados, gerando mapas com tendências de agregação espacial bem definida. O mesmo não ocorreu com o estande de plantas (Fig. 6). Analisando o mapa de produtividade (Fig. 7), ficou claro que existem duas zonas de produtividade distintas. Isso coincide com o teste de análise discriminante realizado anteriormente pela ACP. Pode-se atentar que as áreas de maiores produtividades coincidiram com as áreas onde as relações $Ca + Mg / K$ estavam melhores.

Os mapas gerados por krigagem indicatriz foram capazes de demonstrar tendências coerentes das diversas variáveis que interferem na produtividade, como no caso da relação entre $Ca + Mg / K$ e a produtividade de milho (Fig. 4 e 7). Resultados semelhantes do potencial da técnica foram obtidos por Halvorson et al. (1995), estudando a distribuição espacial de atributos do solo como indicativo de qualidade do solo.



Exponential model (Co = 0.1194; Co + C = 0.2598; Ao = 136.00; r2 = 0.975; RSS = 3.742E-04)

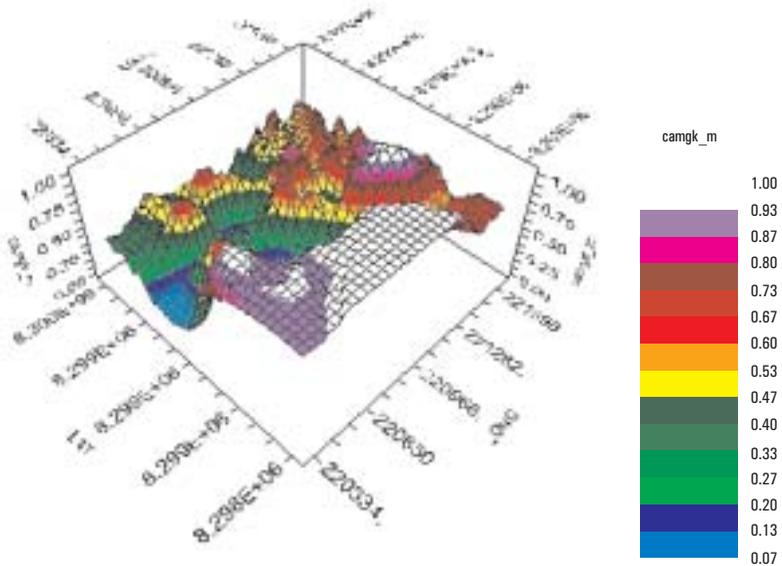


Fig. 4. Semivariograma e mapa da relação Ca+Mg / K gerado por krigagem indicatriz.

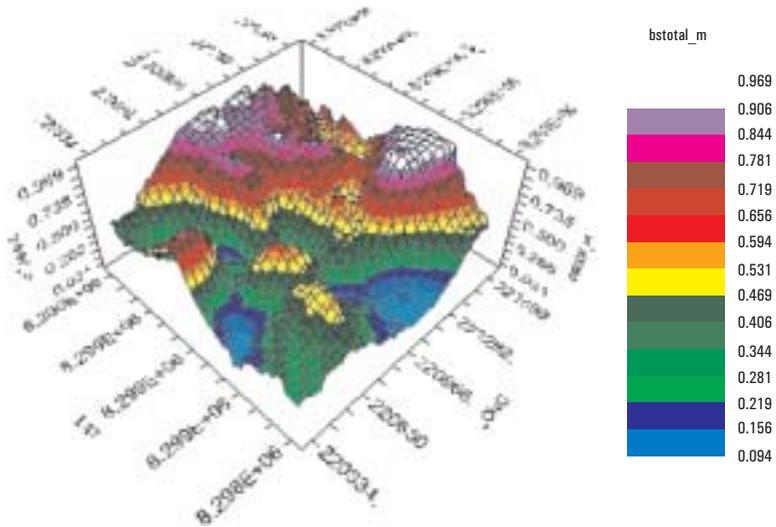
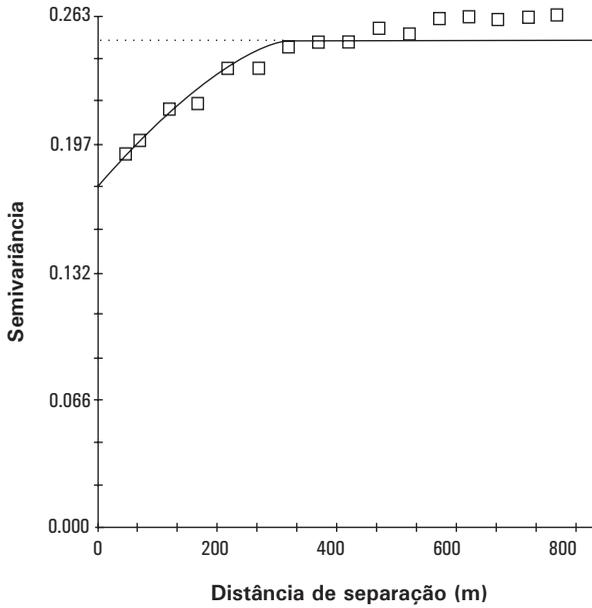
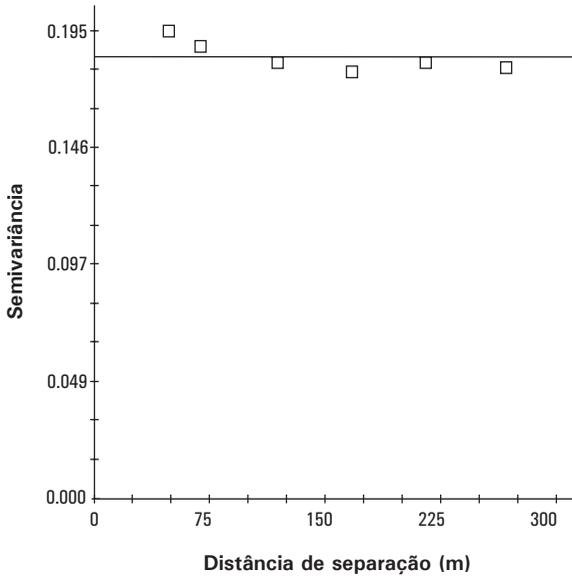


Fig. 5. Semivariograma e mapa do banco de sementes de plantas daninhas gerado por krigagem indicatriz.



Linear model (Co = 0.1837; Co + C = 0.1837; Ao = 269.80; r2 = 0.617; RSS = 0.076E-04)

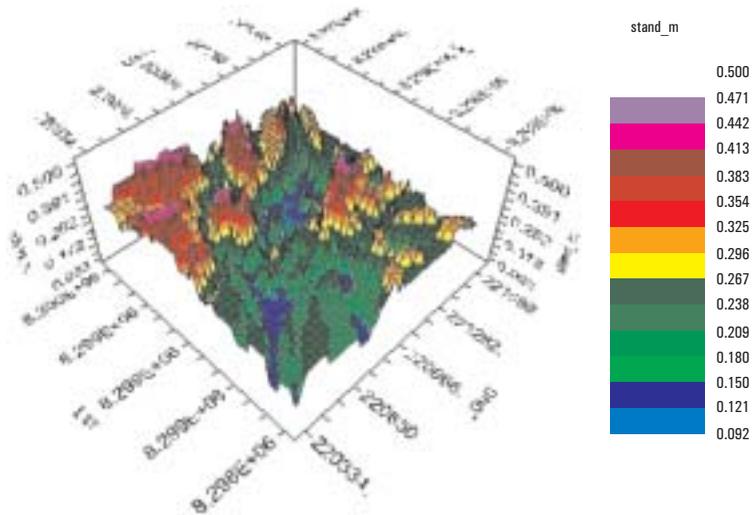
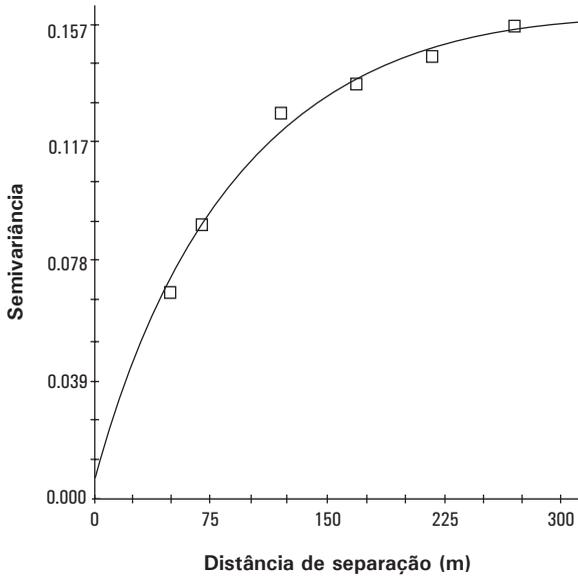


Fig. 6. Semivariograma e mapa do estado de plantas de milho gerado por krigagem indicatriz.



Experimental model (Co = 0.0069; Co + C = 0.1618; Ao = 88.80; r2 = 0.991; RSS = 5.941E-05)

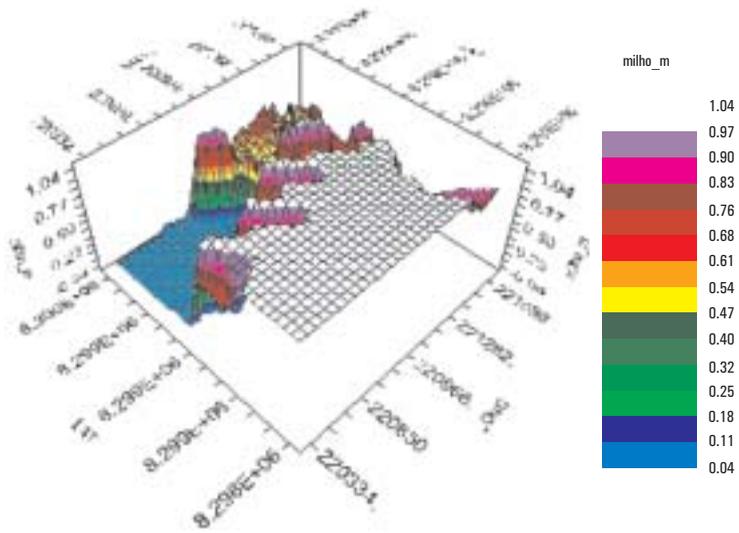


Fig. 7. Semivariograma e mapa de produtividade gerado por krigagem indicatriz.

Após a análise dos semivariogramas e realização da krigagem indicatriz, os mapas de teores de nutrientes, plantas daninhas e estande de plantas foram combinados em um só mapa, no intuito de facilitar a visualização dos fatores que interferem na produtividade e de facilitar a tomada de decisão (Fig. 8). Foi possível incluir quatro variáveis em um único mapa multitemático.

No mapa multitemático, foi possível verificar que a maioria do talhão está muito acima ou abaixo do valor da mediana da relação de $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{K}$ (valor 8, abaixo do ideal teórico). Em locais na área com menores valores dessa relação, foram onde ocorreram as menores produtividades e maiores infestações de plantas daninhas.

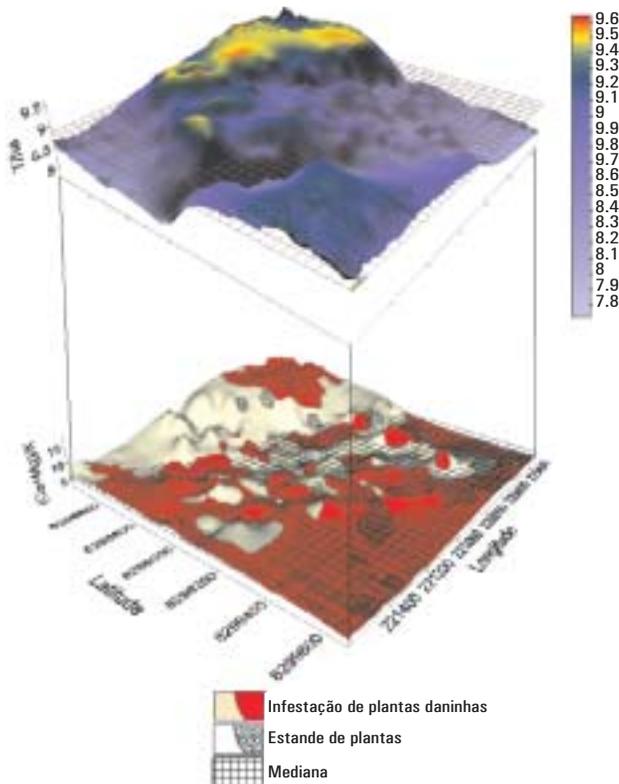


Fig. 8. Mapa multitemático dos fatores que interferiram na produtividade do milho, em que: o relevo do mapa refere-se aos teores de $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{K}$; as cores em vermelho são os valores acima da mediana para a infestação do banco de sementes de plantas daninhas; as áreas hachuradas são as medidas do estande de plantas acima da mediana e o plano quadriculado é a mediana dos teores de $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{K}$.

Conclusões

Foi possível delinear uma metodologia de geração de mapas multitemáticos para o apoio à tomada de decisão, considerando a abordagem integrada e hierarquizada dos fatores que interferem na produtividade dessas culturas.

A análise de componentes principais possibilitou a hierarquização dos fatores que interferiram na produtividade e, com apenas poucos mapas e tabelas, foi possível resumir o grande número de informações geradas em cada um dos mapas temáticos (fertilidade do solo, plantas daninhas e estande de plantas), facilitando a tomada de decisão.

Zonas do talhão com melhores/maiores relações Ca, Mg e K foram as mais produtivas. Contribuiu para a diminuição da produtividade a falta de boro e a maior infestação do banco de sementes de plantas daninhas.

A análise discriminante foi capaz de diferenciar zonas contrastantes de produtividade dentro do talhão.

Referências

- BUCHLEITER, G. W.; BAUSCH, W. C.; DUKE, H. R.; HEERMANN, D. F. Multidisciplinary approach for precision farming research. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1997. Warwick. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 1997. p. 351-359.
- GIMENEZ, L. M.; MOLIN, J. P. Algoritmo para redução de erros em mapas de produtividade para agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v. 2, n. 1, p. 5-10, 2004.
- HALVORSON, J. J.; SMITH, J. L.; BOLTON JUNIOR, H.; ROSSI, R. Evaluating shrub-associated spatial patterns of soil properties in a shrub-steppe ecosystem using multiple-variable geostatistics. **Soil Science Society of American Journal**, v. 59, p.1476-1487, 1995.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

MALLARINO, A. P.; HINZ, P. N.; OYARZABEL, E. S. Multivariate analysis as a tool for interpreting relationships between site variables and crop yields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Minnesota. **Proceedings**. Madison: ASAE, 1996. p.151-158.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 367-374, 2003.

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

THIOULOUSE, J.; CHESSEL, D.; DOL ´EDEC, S.; OLIVIER, J. M. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. **Statistics Computing**, v. 7, p. 75-83, 1997.