

VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS POR MEIO DE ANÁLISE MULTIVARIADA E GEOESTATÍSTICA SOB CULTIVO MÍNIMO

Pamela Kerlyane Tomaz¹, Rafael Montanari², Evelize Nayara Santana da Silva³, Danilo Silva Texeira¹, Rhuane Gustavo Duran Miron¹

¹Alunos de Graduação, UNESP-FEIS-Universidade Estadual Paulista-Campus de Ilha Solteira (Passeio Monção, 226), Cep: 15385-000, (18) 37431943, Ilha Solteira, SP, email:pamelazootecnia@agr.feis.unesp.br, danilo.silva.t@gmail.com, rhuane.miron@hotmail.com

²Professor Doutor, UNESP-FEIS-Universidade Estadual Paulista-Campus de Ilha Solteira (Passeio Monção, 226), Cep: 15385-000, (18) 37431943, Ilha Solteira, SP, email:montanari@agr.feis.unesp.br

³Mestre em Agronomia, UEMS - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (Rod. Aquidauana-UEMS, km12), Cep: 79200-000, Aquidauana, MS, email: lize_santana@hotmail.com

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

RESUMO: As análises multivariadas identificam as variáveis com maior poder de explicação da variabilidade dos dados no espaço e a geoestatística faz o mapeamento destas variáveis possibilitando assim definir e quantificar o comportamento destas variáveis de maneira localizada com um número reduzido de variáveis. O objetivo do presente trabalho foi identificar por meio de análises multivariadas os atributos do solo que melhor explicam a variabilidade espacial da cultura do feijão. No ano agrícola de 2006/2007, no município de Selvíria (MS), foi analisada a produtividade do feijão em função de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distroférrico, cultivado nas condições de elevado nível tecnológico de manejo pelo sistema de cultivo mínimo irrigado com pivô central. Foi demarcada a malha geoestatística, para a coleta de dados do solo e da planta, com 117 pontos amostrais, numa área de 2025 m² e declive homogêneo de 0,055 m m⁻¹. A classificação em grupos foi feita por três métodos: método de agrupamentos hierárquico, método não-hierárquico k-means e análise de componentes principais. E permitiram identificar três grupos que explicam 86,3% da variabilidade total dos dados, onde estes grupos são constituídos pelos atributos físicos densidade do solo, porosidade total e umidade gravimétrica e volumétrica.

PALAVRAS-CHAVE: manejo do solo, sistema cultivo mínimo, qualidade do solo.

ABSTRACT: Multivariate analysis identified the variables with greater explanatory power of data variability in space and geostatistical mapping makes these variables thus enabling to define and quantify the behavior of these variables so located with a small number of variables. The objective of this study was to identify by means of multivariate analyzes soil attributes that best explain the spatial variability of the bean. In the agricultural year 2006/2007, in Selvíria (MS), we analyzed the bean yield due to some physical and chemical properties of an Oxisol cultivated under conditions of high technological level management by minimum tillage system irrigated with center pivot. A geostatistical grid was demarcated for the data collection of soil and plant, with 117 sampling points in an area of 2025 m² and a homogeneous slope of 0.055 m⁻¹. The classification into groups was made by three methods: method of hierarchical groupings, non-hierarchical k-means method and principal component analysis. And allowed to identify three groups that explain 86.3 % of the total variability of the data, where these groups are constituted by the physical attributes of density, porosity and gravimetric and volumetric moisture.

KEYWORDS: soil management, minimum tillage, soil of quality.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o líder mundial na produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), considerando as três safras, estima-se que a área total de feijão deverá chegar a 3,1 milhões de hectares e a produção nacional de feijão deverá alcançar 2,83 milhões de toneladas na safra 2013/2014 (Conab, 2013).

Estudos sobre o sistema radicular do feijoeiro mostraram que o maior percentual de raízes, 74,5 a 87,4% do total, está localizado bem próximo à superfície do solo, até 0,10 m de profundidade. E a quase totalidade das mesmas, 97,4%, encontra-se nos primeiros 0,20 m do solo (Vilhordo et al., 1988).

O solo é um sistema complexo, resultante da interação de fatores geológicos, topográficos e climáticos, entre outros, que juntos formam indicadores (variáveis) que o caracterizam. Com as técnicas da análise multivariada é possível explicar o máximo de intercorrelação entre as variáveis e descobrir quais delas contribuem mais para a caracterização e, ou, alteração do solo (Pragana et al., 2012).

A análise multivariada é um conjunto de procedimentos que visam agrupar e discriminar grupos de indivíduos. E serve ainda como um instrumento de seleção de variáveis, na medida em que aquelas com maior peso na construção dos primeiros componentes principais são as possíveis que melhor representam o conjunto de dados estudados. Sendo assim, o objetivo do trabalho foi identificar por meio de análises multivariadas os atributos do solo que melhor explicam a variabilidade espacial da cultura do feijão.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental esta localizada na Fazenda da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, localizada no município de Selvíria (MS). O tipo climático é caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (DEMATTE, 1980). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico típico muito argiloso (EMBRAPA, 2006).

Nos anos de 1998 e 2003, o solo foi preparado com o arado de aivecas. Na instalação do experimento foi feita a escarificação na profundidade de 0,30 m. E para a semeadura do feijão, foi utilizado o cultivar Pérola, no espaçamento de 0,45 m entrelinhas, com a densidade de 300000 plantas por hectare.

Foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas num lançante estabelecido entre dois terraços agrícolas, no qual estava semeada a cultura estudada. A malha geoestatística apresentou área de 2025 m², constituída de nove transeções de 40 m × 40 m. As transeções foram espaçadas de 5,00 m, com pontos amostrais esquadrejados em 5 m × 5 m, e com alguns pontos adensados de 1,67 m em alguns pontos de amostragem, visando detalhar o estudo da dependência espacial, totalizando 117 pontos amostrais (Figura 1).

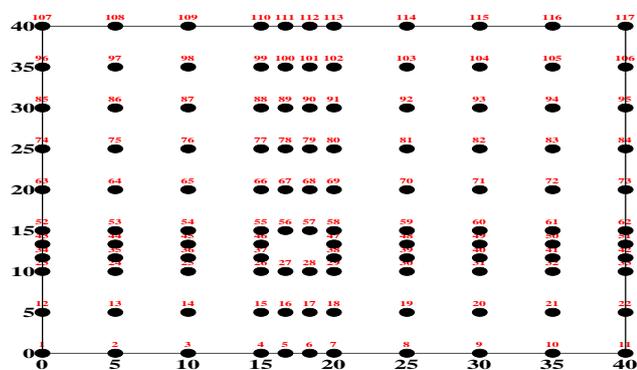


Figura 1. Representação da malha geoestatística contendo os 117 pontos amostrais.

As variáveis estudadas (solo e planta) foram individualmente coletadas no entorno de cada ponto amostral coletados na profundidade de 0,0-0,10 m. A densidade do solo (DS) foi determinada pelo método do anel volumétrico, a densidade da partícula (DP), pelo método do balão volumétrico e a porosidade total do solo (PT) foi calculada de acordo com EMBRAPA (1997). A resistência à penetração (RP) foi avaliada com o penetrômetro de impactos (Stolf, 1991) e calculada segundo expressão contida em Rosa Filho et al. (2009). A amostra deformada do solo para determinação da umidade gravimétrica (UG) foi coletada no mesmo momento que o da resistência à penetração, com um trado de caneca e a umidade volumétrica (UV) foi determinada segundo Kiehl (1979).

O carbono orgânico foi determinado pelo método da combustão úmida, via colorimétrica, resultando no teor de matéria orgânica do solo (MO) que foi calculado de acordo com Raij et al. (1987). Já teor de fósforo (P) foi determinado pelo método de extração (Raij et al., 1987) e o pH foi determinado potenciométricamente em solução de CaCl_2 0,01M (Embrapa,1997). Os atributos avaliados da cultura do feijoeiro foram: a) produtividade de grãos (PRG), número de vagens por planta (NVP), c) número de grãos por vagem (NGV), d) número de grãos por planta (NGP), e massa de cem grãos (MCG).

Coletaram-se todas as plantas aos 100 dias após a semeadura. A área representativa dessa coleta foi de $3,20 \text{ m}^2$, com 4 linhas de plantas ($1,80 \text{ m} \times 1,80 \text{ m}$). Após a secagem, a trilha/debulha foi efetuada com o pisoteio por rodado de trator e peneirados para separar a palhada da planta e os grãos do feijão. Foram aplicados três métodos estatísticos multivariados, (cada um dos 117 pontos amostrais) em grupos: análise de agrupamentos hierárquica, análise de agrupamentos não-hierárquica (k-means) e análise de componentes principais (ACP).

Os dados foram submetidos ao processamento da análise de agrupamento por método hierárquico, adotando uma quantidade de grupos. Após adotar uma quantidade de grupos que melhor caracterizou a estrutura de grupos contida nos dados originais foi feita a análise de agrupamento por método não-hierárquico utilizando o algoritmo k-means (Hair, 2005) que permitiu caracterizar o padrão das variáveis por grupo considerado. Posteriormente, fez-se a ACP de todas as variáveis de solo e planta estudadas. A geoestatística foi utilizada para quantificar a dependência espacial dos dados gerados por meio da aplicação da ACP, pelo cálculo do semivariograma experimental, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS⁺, 2004).

A técnica de krigagem ordinária foi utilizada para estimar valores nos locais não amostrados por ser um estimador linear não enviesado. Uma vez determinados os valores para os locais não amostrados com a ajuda da técnica de krigagem, foram construídos mapas de padrões espaciais, que emprega os mesmos valores estimados por meio da técnica de krigagem para determinação e localização das isolinhas, desta maneira, os mapas representam linhas bem definidas e embasadas em um algoritmo de regressão linear, conforme descrito por Siqueira et al. (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados confirmaram a ordenação e, ainda, conforme análise de variância, todas as variáveis foram importantes para essa ordenação ($p < 0,01$) (Quadro 1). Em relação às médias dos atributos físicos, verificou-se que o solo apresentou nos agrupamentos 2 e 3 valores de densidade do solo de respectivamente de $1,22 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,23 \text{ kg dm}^{-3}$, valores estes abaixo do nível crítico para solos argilosos (Arshad et al., 1996), que afirma que o nível crítico situa-se em torno de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$, valor este semelhante ao encontrado no agrupamento 1 ($1,40 \text{ kg dm}^{-3}$) que poderiam dificultar o desenvolvimento radicular. Nos agrupamentos 2 e 3 a porosidade total encontrava-se próxima ao ideal, onde o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar porosidade total próxima a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Kiehl, 1979), já no agrupamento 1 esta se encontra com valores inferiores ($0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Quadro 1: Médias dos atributos (*planta ou solo*) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means.

Grupos	Variáveis ^(a)						
	NVP	NGV	NGP	DS (kg dm ⁻³)	PT (m ³ m ⁻³)	UG (kg kg ⁻¹)	UV (m ³ m ⁻³)
1	10,26	5,93	48,33	1,40	0,37	0,23	0,32
2	8,50	5,33	40,89	1,22	0,45	0,20	0,25
3	11,65	6,42	58,22	1,23	0,45	0,20	0,24
Média geral	10,14	5,89	49,44	1,26	0,43	0,21	0,26
F	47,58 **	44,07 **	40,82 **	25,74 **	29,76 **	24,60 **	75,64 **

(a) NVP: número de vagens por planta; NGV: número de grãos por vagem; NGP: número de grãos por planta; DS, PT, UG e UV, são respectivamente a densidade do solo, porosidade do solo, umidade do solo e umidade gravimétrica, coletados nas camadas do solo.

Essa divisão em grupos mostrou um resultado muito importante que foi a ordenação dos acessos segundo os componentes produtivos do feijão. Onde, no agrupamento 1 ficaram os acessos que possuíam os valores intermediários dos componentes produtivos do feijão (NVP, NGV e NGP), no agrupamento 2 os com menores valores dos componentes produtivos e no agrupamento 3 os com maiores valores dos componentes produtivos, segundo os atributos físicos do solo (DS, PT, UG e UV) para a profundidade de 0,00-0,10 m (Figura 3).

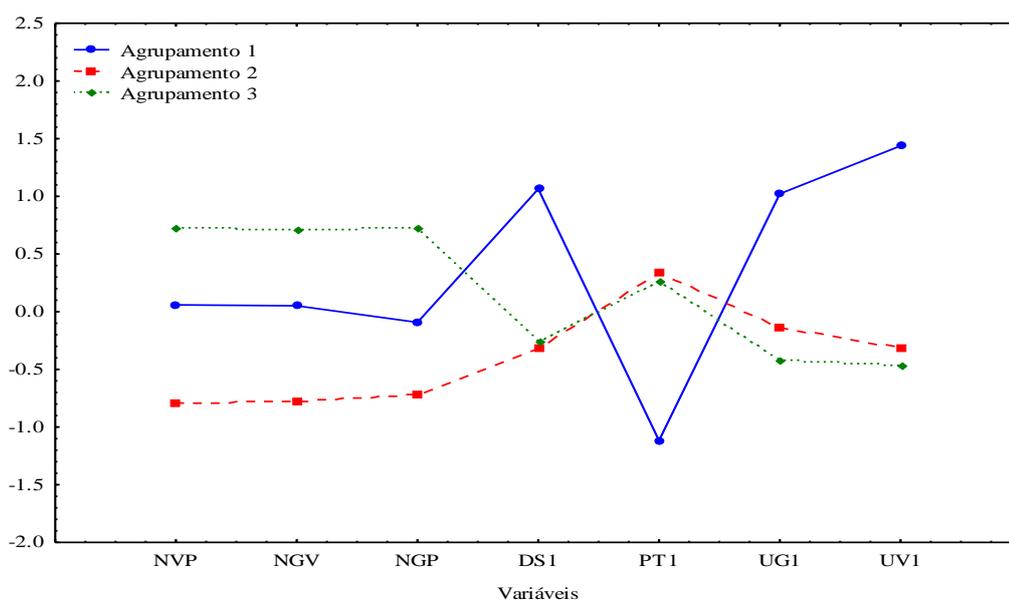


Figura 3. Médias padronizadas dos caracteres produtivos do feijão e alguns atributos físicos do solo para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means.

A Figura 3 apresenta as médias padronizadas dos componentes produtivos do feijão e dos atributos físicos do solo para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means. Observou-se que, na condição de alta densidade do solo, ocorreram os menores valores de porosidade total e os maiores valores de umidade gravimétrica e umidade volumétrica em relação às outras condições. Dados estes que corroboram com Schaffrath et al (2008), que trabalhando também com um Latossolo Vermelho distroférrico, sob plantio convencional encontrou uma correlação negativa entre a densidade do solo e porosidade total. De Maria et al. (1999), também encontraram uma correlação positiva entre a densidade do solo e a umidade do solo trabalhando em um Latossolo Vermelho. Já para as condições de menores densidades do solo (Agrupamento 2 e 3), observa-se um comportamento oposto, onde houve um aumento da porosidade total e uma redução da umidade volumétrica e volumétrica em relação à outra condição.

Na presente pesquisa os atributos de fertilidade apresentaram correlações baixas na ACP, isto

significa que estes atributos não puderam explicar a sua influência na variabilidade (Quadro 2), resultados estes também encontrados por Santi et al. (2012), trabalhando com produtividade de grãos em um Latossolo Vermelho distrófico, onde verificou que em escala de campo que as correlações lineares dos atributos de fertilidade com produtividade geralmente encontram-se baixas (menores que 0,50), o que impede a sua seleção para a explicação da variabilidade de produção da cultura.

Quadro 2. Resumo dos componentes principais da análise multivariada entre todos os atributos avaliados de um Latossolo Vermelho distrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m, sob **cultivo mínimo**

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Autovalor	2,89	2,49	1,57	1,31	1,16	1,05
VE (%)	20,65	17,77	11,20	9,38	8,30	7,51
Variável	Correlação					
PRG	-0,41	-0,38	-0,16	0,03	-0,20	-0,24
MCG	0,10	0,02	-0,15	0,49	0,48	-0,37
NVP	-0,16	-0,87*	-0,08	-0,14	-0,09	-0,05
NGV	-0,10	-0,80*	-0,19	-0,12	0,03	0,02
NGP	-0,28	-0,76*	-0,02	-0,11	0,09	-0,17
DS	-0,81*	-0,27	-0,21	0,33	-0,10	-0,07
PT	0,80*	0,28	0,02	-0,21	-0,22	-0,22
UG	0,56*	0,01	-0,51*	-0,48	0,01	-0,20
UV	0,91*	-0,18	0,22	-0,10	-0,07	-0,18
MO	0,11	0,12	-0,48	-0,10	0,03	0,15
P	0,25	-0,18	-0,46	-0,20	-0,29	0,38
pH	0,23	0,23	-0,26	-0,42	0,01	-0,31

VE = Variância explicada; * correlações consideradas na interpretação do componente principal.

Na análise de componentes principais com as variáveis de maiores escores, foram extraídos três componentes principais que, de forma acumulada, explicam 86,3% da variabilidade total dos dados, conforme Quadro 3. O primeiro componente explicou 38,61% da variabilidade total dos dados da área experimental. Este componente foi constituído pelos atributos densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica e volumétrica para a profundidade de 0,00-0,10 m, onde apenas a porosidade total se correlacionou de maneira positiva e os demais atributos se correlacionaram negativamente. A segunda componente principal explicou 32,56% da variabilidade dos dados, sendo constituída pelos atributos número de vagens por planta, número de grãos por vagem e número de grãos por planta, que também apresentaram correlações negativas. Já para a terceira componente explicou 15,13% da variabilidade, sendo o atributo umidade gravimétrica na profundidade de 0,00-0,10m responsável por esta variabilidade.

Quadro 3. Resumo dos componentes principais da análise multivariada de alguns caracteres produtivos do feijão e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m, sob **cultivo mínimo**

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3
Autovalor	2,70	2,28	1,06
VE (%)	38,61	32,56	15,13
Variável	Correlação		
NVP	-0,06	-0,92*	-0,07
NGV	-0,08	-0,85*	0,04
NGP	0,06	-0,80*	-0,22
DS	-0,85*	-0,06	0,44
PT	0,84*	0,06	-0,36
UG	-0,58*	0,18	-0,79*
UV	-0,95*	0,08	-0,25

VE = Variância explicada. * correlações consideradas na interpretação do componente principal.

A representação gráfica biplot (entre CP1 e CP2) (Figura 4a) permitiu caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação dos agrupamentos 1, 2 e 3. Os atributos umidade gravimétrica (-0,58), umidade volumétrica (-0,95) e densidade do solo (-0,85) permitiram discriminar o agrupamento 1, localizados à esquerda da CP1 (correlações negativas), enquanto o

agrupamento 2, o atributo responsável pela discriminação foi a porosidade total (0,84) e o agrupamento 3 foi caracterizado pelos atributos número de grãos por vagem (-0,85), número de vagens por planta (-0,92) e número de grãos por planta (-0,80). Assim, o agrupamento 1 apresentou os maiores valores de umidade gravimétrica, umidade volumétrica e densidade do solo. Enquanto o agrupamento 2, caracterizou-se pelos maiores valores de porosidade total. Já o agrupamento 3, foi caracterizado pelos maiores valores de número de grãos por vagem, número de vagens por planta e número de grãos por planta.

Na Figura 4b pode-se visualizar o posicionamento dos agrupamentos no campo experimental. Observa-se que o agrupamento 3 (correspondendo a 40% da área total) em sua grande maioria, situados na região Sul do mapa.

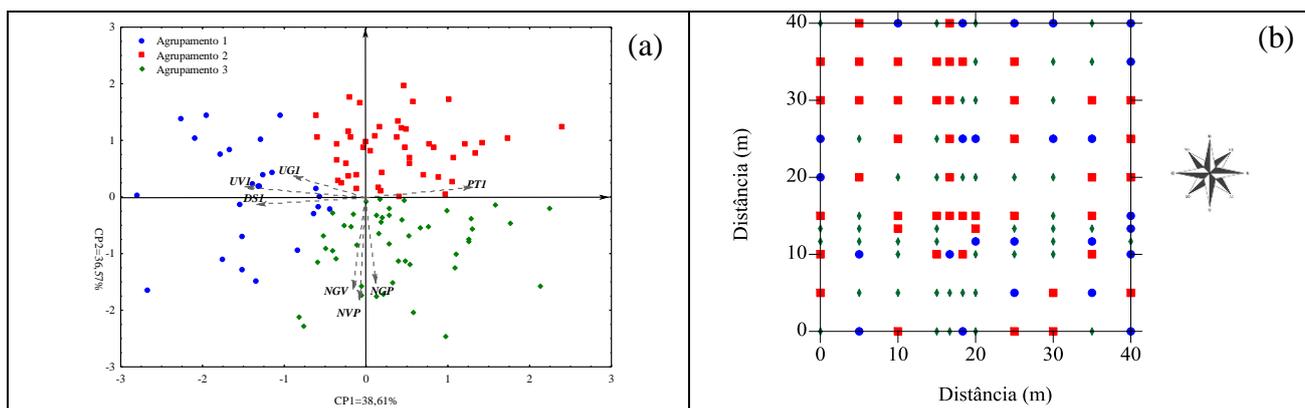


Figura 4. a) Dispersão (*gráfico biplot*) dos caracteres produtivos do feijão e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico para a profundidade de 0,00-0,10 m, sob **cultivo mínimo**. b) Distribuição espacial dos grupos gerados dos caracteres produtivos do feijão e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico para a profundidade de 0,00-0,10 m, sob **cultivo mínimo**.

A análise geoestatística foi realizada com o intuito de mapear os atributos do solo e os componentes de produção do feijão, dos valores do primeiro, segundo e terceiro componentes principais, e também valores da produtividade, sendo os valores apresentados no Quadro 4. No Quadro 4 e Figuras 5a e 5c, os atributos CP1 e PRG apresentaram dependência espacial entre média (PRG; ADE=54,1 %) e muito alta (CP1; ADE=96,0 %), cujos modelos de semivariogramas foram do tipo esférico e exponencial, respectivamente. Já aqueles restantes (CP2 e CP3) apresentaram efeito pepita puro. No tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) PRG (0,960) e 2) CP1 (0,808). Em relação aos coeficientes de determinação espacial (PRG e CP1), a PRG ($r^2 = 0,960$) ficou na mesma ordem de grandeza daquele de Santos et al. (2005), que foi de $r^2 = 0,968$ e pesquisado num Latossolo Vermelho distroférico sul-mato-grossense, com o ADE = 75,5 %. E a CP1 apresentou um r^2 de 0,808, ficando na mesma magnitude de valor que o de Silva & Lima (2012), pesquisado num Latossolo Vermelho-Amarelo, que foi de 0,880 e com o ADE de 89,0 %.

Quadro 4. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para as componentes principais 1, 2 e 3 e para a produtividade de grãos de feijão.

Atributos ^(a)	Parâmetros										
	Modelo ^(b)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples dos atributos do solo</i>											
CP1	exp. (58)	2,800 . 10 ⁻²	6,930 . 10 ⁻¹	7,70	0,808	2,470 . 10 ⁻²	96,0	MA	-0,010	0,524	0,187
CP2	epp.	1,022	1,022	-	-	-	-	-	-	-	-
CP3	epp.	9,974 . 10 ⁻¹	9,974 . 10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
PRG (kg ha ⁻¹)	esf. (71)	6,480.10 ⁴	1,412.10 ⁵	40,0	0,960	2,370.10 ⁸	54,1	ME	50,78	0,974	0,500

^(a)CP1,CP2, CP3 e PRG são respectivamente os componentes principais e a produtividade de grãos de feijão; ^(b)exp = exponencial, esf = esférico e epp = efeito pepita puro, número entre parênteses precedidos pelo modelo representam o número de pares no 1º lag; ^(c)SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d)ADE = avaliador da dependência espacial, sendo ME = média; MA = muito alta.

No Quadro 4, a relação decrescente dos alcances da dependência espacial foi a seguinte: 1) PRG (40,0 m) e 2) CP1 (7,7 m). Em relação ao primeiro (PRG), o alcance obtido no presente trabalho foi superior ao de Santos et al. (2005), que foi de 25,9 m. Para o segundo (CP1), foi menor que o de Silva & Lima (2012) que foi 73,0 m. Portanto, exclusivamente com base na presente pesquisa, assim como, visando auxiliar a pesquisa futura, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances da dependência espacial a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 7,7 m.

O mapa do primeiro componente principal, o qual representou densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica e volumétrica, foi responsável por aproximadamente 38,61% da variabilidade contida na área. É possível perceber que, entre o quarto e oitavo nônio (figura 5b), apresentaram-se os maiores valores, e esta região é também onde se encontram as produtividades de média a alta (Figura 5d).

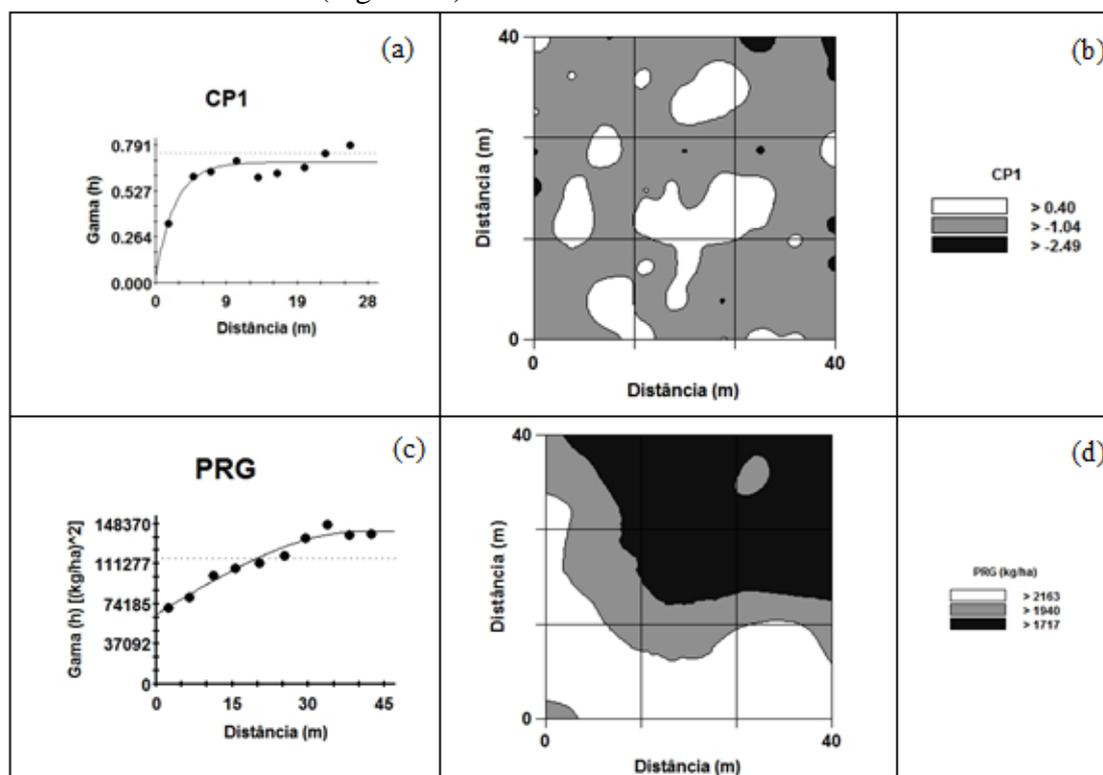


Figura 5. Semivariogramas e mapas de krigagem da componente principal 1 e da produtividade de grãos de feijão.

CONCLUSÕES

1. A análise de componentes principais indica que os atributos que melhor explicam a variabilidade espacial da cultura do feijão são os físicos do solo, como densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica e volumétrica;
2. A classificação multivariada da qualidade física do solo pode contribuir para melhorar o planejamento e controle da produtividade de feijão, bem como a execução das atividades de manejo do solo.

REFERÊNCIAS

- ARSHAD, M.A.; B. LOWERY & R. GROSSMAN. Physical tests for monitoring soil quality. p.1-43. In J. W. Doran & A.J. Jones (Ed.). Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America. Madison: (SSSA Special Publication 49). 1996. 410 p.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, safra 2012/2012, décimo primeiro levantamento, agosto 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_08_09_10_43_44_boletim_portuges_agos_2013_port.pdf Brasília>. Acesso em set. 2013.
- DEMATTÊ, J. L. I. Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 44p, 1980.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa. 2006. 306 p.
- GS+: Geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 159p, 2004.
- HAIR JUNIOR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. & BLACK, W.C. Análise multivariada de dados. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 597p.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.
- MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 23:703-709, 1999.
- PRAGANA, R.B.; RIBEIRO M.R.; NÓBREGA, J.C.A.; RIBEIRO FILHO, M.R. & DA COSTA, J.A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. R. Bras. Ci Solo, 36:1591-1600, 2012.
- RAIJ, B. van. et al. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F.F.S. & GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um

Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. R. Bras. Ci Solo, Viçosa, MG, 33:283-293, 2009.

SANTI, A.L.; AMADO, T.J.C.; CHERUBIN, M.R.; MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.; DELLA FLORA, L.P. & BASSO, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. Pesq. agropec. bras., Brasília, 47:1346-1357, 2012.

SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E. & VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica a penetração em um Latossolo Vermelho distrófico. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, MG, 28:287-295, 2005.

SILVA, S.A. & LIMA, J.S.S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. Rev. Ceres, Viçosa, 59:271-277, 2012.

SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 32:1369-1377, 2008.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R. & CEDDIA, M.B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. Bragantia, Campinas, 67:203-211, 2008.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, MG, 15:229-235, 1991.

VILHORDO, B.W.; BURIN, M.E. & GANDOLFI, V.H. Morfologia. In: ZIMMERMANN, M. J. de O. (ed.). Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade/ editado por Maria José de O. Zimmermann, Marcos Rocha e Tsuioshi Yamada. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1988. p.87-123.