

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO DE INVERNO SOB PLANTIO DIRETO NO CERRADO DE BAIXA ALTITUDE**

Maria Cecília Cavallini da Silva¹, Marcelo Andreotti², Morel de Passos e Carvalho³, Nídia Raquel Costa⁴ & César Gustavo da Rocha Lima⁵

1 - Engenheira Agrônoma, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, cecicavallini@gmail.com

2 - Engenheiro Agrônomo, Professor Doutor, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, dreotti@agr.feis.unesp.br

3 - Engenheiro Agrônomo, Professor Doutor, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, morel@agr.feis.unesp.br

4 - Engenheira Agrônoma, Pós-Doutoranda, Faculdade de Ciência Agronômicas de Botucatu, UNESP, nidiarcosta@gmail.com

5 - Geógrafo, Professor Doutor, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, cesarlima@dec.feis.unesp.br

Palavras-chave:

fertilidade do solo
geoestatística
Phaseolus vulgaris
manejo do solo

RESUMO

O conhecimento da variabilidade dos atributos químicos do solo é de suma importância para um manejo eficiente com vistas ao melhor desempenho produtivo das culturas. A presente pesquisa objetivou avaliar a variabilidade e as correlações lineares e espaciais entre os atributos da produtividade do feijoeiro de inverno com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de plantio direto, na região do Cerrado sul-mato-grossense. Para tanto instalou-se uma rede amostral para a coleta de dados do solo e da planta, com 124 pontos, em uma área de 4.000 m². Os atributos do solo foram: teor de fósforo (P), matéria orgânica (MO), e o pH (pH), determinados nas profundidades de 0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m. Avaliou-se as correlações simples e múltiplas entre os atributos das plantas com os atributos do solo e posteriormente foi realizada a análise de dependência e correlação espacial. A produtividade de feijão apresentou correlação linear direta com a matéria orgânica (0,10 - 0,20 m), e com o pH do solo (na camada de 0 - 0,10 m). Especialmente, com exceção da MO e do pH na camada de 0 - 0,10 m, os demais atributos apresentaram dependência espacial. Do ponto de vista prático do manejo de solo, o pH (0,10 - 0,20 m) destacou-se como um apreciável indicador da qualidade química, evidenciando áreas específicas de manejo diretamente correlacionada com a produtividade do feijoeiro.

Keywords:

geostatistics
Phaseolus vulgaris
soil fertility
soil management

SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND WINTER COMMON BEAN PRODUCTIVITY UNDER NO TILL-SYSTEM IN THE LOW CERRADO REGION**ABSTRACT**

Soil chemical variability knowledge is very important to assure efficient management and better crop production. This study aimed to evaluate the variability and the linear and spatial correlations between winter bean yield attributes and chemical attributes of a typic Oxisol Haplorthox in a no-tillage system from the Cerrado region in Mato Grosso do Sul. A sampling grid was installed to collect soil and plant data, with 124 points, in an area of 4,000 m². Soil attributes assessed were: phosphorus (P), organic matter (OM), and pH (pH), at the different depths of 0 - 0.10 m and 0.10 - 0.20 m. Data provided simple and multiple correlations between plant attributes and soil attributes. Subsequently, spatial dependence and correlation were analyzed for each attribute. Bean yield presented a direct linear correlation with organic matter (0.10 - 0.20 m) and soil pH (0 - 0.10 m). The other attributes presented spatial dependence, with the exception of organic matter and pH between the 0 - 0.10 m layer. From the practical point of view in soil management, the pH (0.10 - 0.20 m) stood out as an appreciable indicator for chemical quality, evidencing specific areas directly correlated with bean productivity.

INTRODUÇÃO

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) é uma cultura agrícola de destaque na alimentação dos brasileiros, sendo constituinte de sua dieta básica e, conseqüentemente, uma importante fonte de proteína na alimentação da população. De acordo com Leite et al., (2013) a produtividade desta cultura pode chegar a valores acima de 3.000 kg ha⁻¹, no entanto, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2015), a produtividade média para o feijoeiro de inverno nas principais regiões produtoras do Brasil tem chegado a aproximadamente 1.284 kg ha⁻¹.

Diante da grande importância dessa cultura no cenário agrícola nacional, os estudos relacionados aos diferentes sistemas de produção e a adoção de novas tecnologias para elevação da produtividade do feijoeiro tem sido muito relevantes (FREDDI et al., 2005; LEITE et al., 2012; MONTANARI et al., 2013a,b). Com a ampliação de cultivos em sistema de plantio direto (SPD) nas regiões do Cerrado brasileiro, o estudo sobre a dinâmica desse sistema de cultivo, assim como a determinação dos teores nutricionais do solo e suas interações com as culturas (CARVALHO et al., 2002), torna-se também de grande importância técnica e científica.

A modernização da agricultura busca, principalmente, o desenvolvimento sustentável, suscitando a otimização dos recursos de produção e o aumento da produtividade. Por outro lado, ainda muito comumente, a aplicação de insumos é baseada em teores médios dos nutrientes do solo, podendo-se assim subestimar ou superestimar esses teores, ocasionando excessos ou déficits nutricionais na área cultivada. Logo, torna-se essencial o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo, a fim de melhor gerenciar o manejo e a produção agrícola (DALCHIAVON et al., 2011).

A variabilidade dos atributos químicos do solo é um das grandes responsáveis pelo rendimento das culturas. Assim, a geoestatística aparece como a uma adequada ferramenta na avaliação dessa variabilidade, sendo essencial para a análise dos atributos que diferem de um local para outro com algum grau de organização e continuidade, expresso pela dependência espacial (VIEIRA, 2000; MOLIN,

2015). Deste modo, conforme aponta Montanari et al. (2013a,b) o estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e suas interações com a produtividade da planta pode possibilitar tanto o aperfeiçoamento da aplicação de corretivos e fertilizantes, como auxiliar no aprimoramento de estratégias de manejo.

No Brasil, a aplicação da geoestatística na análise dos atributos químicos do solo relacionados a produtividade do feijoeiro, tem aumentado com o advento e expansão da agricultura de precisão e apresentando importantes resultados técnicos (AMADO et al., 2009; DALCHIAVON et al., 2011; MONTANARI et al., 2013a,b; SILVA et al., 2015).

Segundo Pereira et al. (2012), no Brasil, as principais regiões produtora de feijão-comum tem-se situado em altitudes superiores a 600 m cujas temperaturas são mais amenas. Entretanto, nos últimos anos, em algumas regiões de Cerrado de baixa altitude (abaixo de 600 m), onde as temperaturas são mais elevadas, a produção de feijão vem aumentando.

Assim, diante do contexto apresentado e, pressupondo que a variabilidade dos atributos químicos do solo exerça influência no desenvolvimento da cultura do feijão, objetivou-se avaliar as correlações lineares e espaciais entre a produtividade do feijoeiro de inverno com alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico do Cerrado de baixa altitude em sistema de plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado na safra agrícola de 2007 na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - Setor de Produção Vegetal, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FE/UNESP), localizada no município de Selvíria-MS, na latitude de 20°18'S e a longitude de 52°39'W. O clima da região foi classificado como C1dAa' pelo sistema de Thornthwaite (ROLIM et al., 2007), indicando uma região sub-úmida seca, sem excedentes hídricos, megatérmico com evapotranspiração no verão menor que 48% da anual, temperatura média

anual de 23,5 °C e precipitação pluvial média anual de 1.400 mm, com período de maior concentração entre os meses de setembro a junho, invernos secos de junho a agosto. Os dados climáticos do período de condução experimental estão na Figura 1.

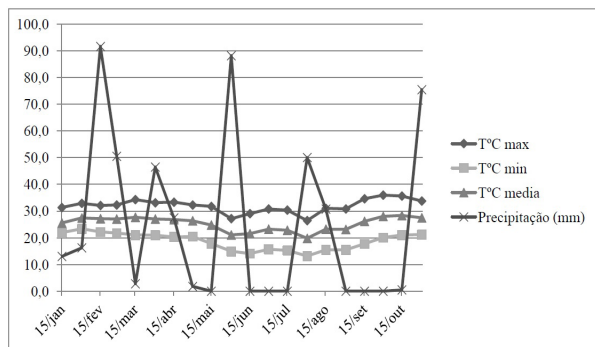


Figura 1. Dados climático durante a condução do experimento (janeiro a outubro de 2007).

O solo no qual a malha experimental foi instalada, foi classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), como um Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso, com declive homogêneo de 0,025 m m⁻¹.

A área de implantação do experimento estava sendo utilizada com de rotação de culturas em sistema de plantio direto (SPD), a qual foi ocupada por milho safrinha (*Zea mays*) (2004), com posterior semeadura de soja (*Glycine max*)

(2004/2005), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) (2005), soja (2005/2006) e guandu anão (*Cajanus cajan*) (2006), e *Urochloa brizantha* cv. Marandu (2007), sendo que esta última foi utilizada como palhada para a semeadura direta do feijão de inverno (*Phaseolus vulgaris*) cv. IAC Carioca.

Com o objetivo de caracterizar as condições iniciais do solo, foi realizado a análise exploratória dos atributos químicos e físicos (RAIJ et al., 2001; EMBRAPA, 1997) nas camadas de 0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, antes da semeadura da *Urochloa brizantha* e após sua dessecação, antecedendo a semeadura do feijoeiro (Tabela 1). O pH do solo foi determinado potenciometricamente, determinando-se a atividade do H⁺ em uma suspensão de solo com CaCl₂ 0,01mol L⁻¹, estabelecida na proporção de 1:2,5. Os teores de P (mg dm⁻³), Ca, Mg e K (mmol_c dm⁻³) foram extraídas utilizando-se a resina trocadora de íons, em seguida quantificados por espectrofotometria de absorção atômica. Os valores de saturação por bases foram calculados a partir do conteúdo de bases trocáveis, e os resultados totais de acidez foram obtidos em solução tamponada de acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 (H + Al). O teor de matéria orgânica (MO) (g dm⁻³) do solo foi determinada por meio do teor de carbono orgânico, sendo este avaliado pelo método colorimétrico da combustão úmida.

Tabela 1. Análise exploratória dos atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso do Cerrado brasileiro antes da semeadura e após a dessecação da *Urochloa brizantha*

Profundidade	Atributos Químicos ^(a)										Atributos Físicos ^(b)				
	P	MO	pH	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	H+Al	SB	CTC	V	DS	MA	MI	PT	
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmol _c dm ⁻³							%	kg dm ⁻³	m ³ m ⁻³		
Antes	0-0,10 m	12,5	18,0	5,1	3,2	19	11	22,2	33,3	55,5	60	1,314	0,147	0,334	0,481
	0,10-0,20 m	6,7	14,1	4,6	1,9	10	6	25,5	17,9	43,4	41	1,487	0,078	0,345	0,425
Depois	0-0,10 m	23,5	29,5	5,2	3,2	39	17	30,1	59,6	89,8	66	1,432	0,099	0,343	0,442
	0,10-0,20 m	12,2	22,2	4,7	1,3	21	10	42,1	32,3	75,1	44	1,484	0,080	0,346	0,426

^(a)atributos químicos onde: P = fósforo disponível, MO = matéria orgânica, pH = pH do solo, K⁺ = potássio, Ca⁺² = cálcio, Mg⁺² = magnésio, H⁺Al = acidez potencial, SB = soma de bases, CTC = capacidade de troca catiônica, V = saturação por bases; ^(b)atributos físicos onde: DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PT = porosidade total.

A *U. brizantha* cv. Marandu foi semeada em 26/01/2007 como o auxílio de uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador do tipo disco duplo desencontrado para SPD em área irrigada (pivô central). As sementes foram depositadas na profundidade de aproximadamente 0,04 m, no espaçamento de 0,34 m, utilizando-se cerca de 7 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis com VC = 76 %, e com densidade de semeadura de 532 pontos de valor cultural (VC) por hectare. As plantas foram conduzidas por 46 dias e ceifadas com o auxílio de uma roçadora horizontal de resíduos vegetais (Triton), a uma altura de 0,25 m para o nivelamento da área. Após 52 dias desta ceifa de manejo inicial, as plantas foram dessecadas com o herbicida glyphosate, na dose de 1.440 g ha⁻¹ (i.a.).

Posteriormente, a cultura do feijoeiro de inverno cv. IAC Carioca, foi semeada em 30/05/2007, com uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador do tipo haste (facão) para SPD, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e aproximadamente 15 sementes por metro linear de sulco. Como adubação de semeadura utilizou-se 250 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16. No dia 04/07/2007 foi realizada a adubação de cobertura aplicando-se 70 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia (45 % de N), sendo em seguida aplicada uma lâmina d'água de 14 mm para minimizar as perdas de NH₃ por volatilização. Ressalta-se que não foi necessário aplicar herbicidas, fungicidas ou inseticidas durante o desenvolvimento do feijoeiro de inverno.

Para a implantação e caracterização da malha experimental utilizada para a coleta dos atributos pesquisados foram definidas as direções *x* e *y* do sistema de coordenadas cartesianas, num lançante da cultura de feijão de inverno, estabelecido entre dois terraços agrícolas. A grande malha experimental ficou constituída de 5 linhas e 10 colunas, de formato retangular e contendo 44 pontos amostrais, com espaçamento entre pontos de 10 x 10 m, numa área total de 4.000 m² (100 x 40 m). Tais eixos, que foram as maiores transeções e contendo 11 pontos cada, tiveram 100 m, cuja hipotenusa foi de 107,7 m. Entretanto, foram alocadas por sorteio, dentro da grande malha, sub-malhas de refinamento da distância entre os pontos, visando detalhar o estudo da dependência espacial

dos resultados, para condições do espaçamento entre pontos menores do que 10 m. Cada sub-malha ficou posicionada entre quatro pontos da grande malha, constituindo-se de um ponto no seu centro e mais quatro estabelecidos no sentido dos eixos cartesianos e na metade entre cada par, com espaçamentos de 5,0 e 1,67 m entre eles, totalizando 124 pontos.

Os atributos pesquisados foram do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral (delimitado por estacas) da malha experimental. Os atributos do solo foram: a) teor de fósforo (P), b) teor de matéria orgânica (MO) e, c) pH em CaCl₂ (pH). Os atributos do feijoeiro de inverno foram: a) produtividade de grãos (PRO) e b) população de plantas (PP). Também foi avaliado a produtividade de matéria seca da *Urochloa brizantha* (PMS) coletada anteriormente à semeadura do feijoeiro.

A PMS, dada em kg ha⁻¹, foi avaliada em 02/05/2007. As amostras foram originadas da coleta de todas as plantas no ponto amostral, utilizando-se para demarcação de área, um quadrado metálico de 1,0 x 1,0 m. As plantas foram ceifadas manualmente (à altura de 0,05 m em relação à superfície do solo), pesadas para determinação da matéria fresca e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingir massa constante.

Ao final do ciclo da cultura do feijão de inverno (13/09/2007), foram coletadas todas as plantas no entorno de cada ponto amostral para determinação da produtividade de grãos, que foi corrigida para 13 % de umidade. Tais amostras foram originadas da coleta de todas as plantas, quando considerado que todo ponto amostral continha quatro linhas de semeadura, as quais numa largura de 1,0 m. Uma vez que foi considerada a mesma distância para o comprimento, a área de coleta de plantas de cada ponto amostral foi de 1,80 m². A produtividade de grãos foi calculada e extrapolada para kg ha⁻¹. Na determinação da população de plantas, no momento da colheita foram contadas todas as plantas na mesma área de 1,80 m², referentes ao ponto amostral, e a partir destes dados, calculou-se a população de plantas por hectare.

Os atributos do solo foram calculados em função das coletas no entorno de cada ponto amostral, nos dias 15 e 16/05/2007. Tais amostras de solo foram

originadas de monólitos com estrutura deformada para P, MO e pH, com auxílio de um trado de caneca. Elas foram coletadas em duas profundidades do solo (0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m) e analisadas conforme as metodologias dispostas em Raij et al. (2001). Considerando que o solo estudado foi estratificado em duas profundidades, a relação final dos seus 6 atributos foram as seguintes: a) camada de 0-0,10 m: P1, MO1 e pH1; e b) camada de 0,10-0,20 m: P2, MO2 e pH2.

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva inicial dos dados pelo emprego da estatística clássica, utilizando-se o SAS (SCHLOTZHAVER & LITTEL, 1997), onde foram obtidos os valores de média, mediana, moda, erro padrão da média, valores mínimo e máximo, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Posteriormente, realizou-se a análise da distribuição de frequência desses atributos. Dessa forma, para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos resultados, foi utilizado o teste de Shapiro & Wilk (1965) a 1%.

Foi montada a matriz de correlação de Pearson, objetivando efetuar as correlações simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados (solo e planta). Conjuntamente para todas as camadas estudadas do solo, foi efetuada a análise de regressão linear entre as variáveis dependentes (planta) e as independentes (solo), objetivando selecionar aquelas que proporcionariam as maiores relações entre causa e efeito. Por outro lado, também foi testado a regressão múltipla entre as variáveis dependentes em função dos atributos do solo. Para tanto foram utilizados os pacotes computacionais Excel e SAS.

Posteriormente, para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma simples, utilizando o pacote computacional Gamma Design Software GS+ 7.0 (ROBERTSON, 2004). Para avaliar a dependência espacial entre os atributos, foram testados os ajustes semivariográficos cruzados entre os atributos da planta versus os do solo.

Os ajustes semivariográficos foram efetuados pela seleção inicial de: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) o maior

coeficiente de determinação espacial (r^2) e c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE), onde a proposta de análise foi: a) $ADE \leq 25\%$ = variável espacial fracamente dependente; b) $25\% < ADE \leq 75\%$ = variável espacial moderadamente dependente e; c) $ADE > 75\%$ = variável espacial altamente dependente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade (PRO) e a população de plantas do feijão de inverno (PP) apresentaram CV de 22,2 % e 20,7% respectivamente (Tabela 2), sendo essa variabilidade classificada como alta (PIMENTEL-GOMES & GARCIA, 2002). Os resultados observados foram semelhantes aos obtidos por Dalchiavon et al. (2011), que apresentaram um CV de 20,3 % para produtividade do feijoeiro de inverno, ambos em um Latossolo Vermelho distrófico sob SPD e em condições de cultivo semelhantes à da presente pesquisa. Já a variabilidade da PMS da *Urochloa brizantha* foi muito alta, pois apresentou um CV superior a 32%

As variabilidades dos teores de fósforo (P), matéria orgânica (MO) e do pH em CaCl_2 (pH) no solo apresentaram-se muito distintas (Tabela 2). Para o teor de P, a variabilidade ficou entre alta para P1 (26,9 %) e muito alta para P2 (45,9 %) de acordo com a classificação de Pimentel-Gomes & Garcia (2002). Já para MO, a variabilidade foi média, tanto para MO1 (11,6 %) quanto para MO2 (12,1 %). Todavia, para o pH, a variabilidade foi baixa para pH1 (8 %) e pH2 (4,4 %).

Em trabalho realizado por Dalchiavon et al. (2011), os autores também verificaram variabilidade muito alta para P (64,5%), média para MO (13,9%) e baixa para pH (7,3%), na camada de 0-0,20 m. Nos municípios de Trindade do Sul e Palmeira das Missões, no Rio Grande do Sul. Amado et al. (2009) analisando dois Latossolos Vermelhos Distróficos em SPD com o cultivo de milho e feijão irrigados por pivô central, também verificaram maior variabilidade nos dados de P, e menor nos de pH do solo.

A alta variabilidade para os teores de fósforo pode ser conferida à aplicação de fertilizantes em linha, ao efeito residual da adubação, à imobilidade do elemento no solo e à exposição de camadas

mais pobres desse nutriente pelo processo de erosão superficial. Entretanto, o teor de MO e o pH, normalmente pelo maior tempo no SPD, tendem a ficar com valores mais homogêneos nas camadas superficiais do solo, por efeito principal da decomposição dos resíduos orgânicos.

Na Tabela 2 observa-se que a produtividade média de grãos do feijoeiro de inverno (PRO) foi de 3.293 kg ha⁻¹, sendo superior aos 2.594 kg ha⁻¹ obtidos por Freddi *et al.* (2005) ao trabalhar com a cultivar de feijoeiro IAC Carioca Eté e aos 3.044 kg ha⁻¹ obtidos por Dalchiavon *et al.* (2011) utilizando o cultivar Pérola. Cabe salientar que ambos os estudos foram realizados em condições de cultivo semelhantes às constatadas na presente pesquisa, num Latossolo Vermelho Distroférico em SPD sob irrigação (pivô central) na região de Selvíria-MS, e que devido ao histórico da área (SPD) e condições adequadas de cultivo (clima e solo), proporcionaram produtividades muito satisfatórias quando comparadas à média nacional de 1.284 kg ha⁻¹ para o feijão de 3ª safra (CONAB, 2015).

Já o valor médio da PMS da *U. brizantha*

(12.485 kg ha⁻¹) revelou uma boa produtividade de palhada para manutenção do SPD, uma vez que Amado *et al.* (2009) sugerem uma adição anual em torno de 10.000 a 12.000 kg ha⁻¹ de massa seca para o bom manejo da palha em condições de Cerrado.

Em relação ao teor de P no solo (Tabela 2), o valor médio de P1 foi de 23,1 mg dm⁻³. Já o P2 por não ter uma distribuição de frequência do tipo normal, pode ser melhor representado pela sua mediana (ROSA FILHO *et al.*, 2009) que foi de 10,0 mg dm⁻³, demonstrando assim, um decréscimo do teor com o aprofundamento das camadas de solo, uma vez que o elemento é pouco móvel, mesmo em condições de plantio direto. Considerando a característica argilosa do solo pesquisado, o teor de P classificou-se com média disponibilidade na camada superficial e baixa na camada subsuperficial (RAIJ *et al.*, 2001).

Contudo, é necessário lembrar que tais dados foram amostrados no momento da coleta dos dados da planta, ou seja, esses valores correspondem aos teores remanescentes à cultura. Logo, tendo como parâmetro os dados iniciais (Tabela 1),

Tabela 2. Análise descritiva inicial da produtividade do feijão de inverno e alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico do Cerrado brasileiro

Atributos ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Probabilidade do teste ^(b)	
			Mín.	Máx.			Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Atributos da planta										
PRO (kg ha ⁻¹)	3293	3219	1547	5599	730	22,2	0,164	0,426	0,112	NO
PP (pl ha ⁻¹)	166280	164609	89506	235940	34414	20,7	-0,557	-0,155	0,121	NO
PMS (kg ha ⁻¹)	12485	12400	3760	22400	4068	32,6	-0,532	0,293	0,097	NO
Atributos Químicos do Solo										
P1 (mg dm ⁻³)	23,1	22,5	5,0	41,0	6,197	26,9	0,675	0,259	0,119	NO
P2 (mg dm ⁻³)	12,2	10,0	4,0	30,0	5,604	45,9	-0,282	0,258	0,057	LN
MO1 (g dm ⁻³)	29,7	30,0	19,0	40,0	3,449	11,6	0,917	0,095	0,066	NO
MO2 (g dm ⁻³)	23,0	23,0	18,0	31,0	2,784	12,1	-	-	-	IN
pH1	5,3	5,3	4,4	6,3	0,421	8,0	-0,501	0,151	0,152	NO
pH2	4,6	4,6	4,1	5,1	0,203	4,4	-	-	-	IN

^(a)Atributos avaliados, onde: PRO e PP são respectivamente, a produtividade e população de plantas do feijoeiro de inverno; PMS = produtividade de matéria seca da *Urochloa brizantha*; P, MO, e pH, são respectivamente o teor de fósforo, o teor de matéria orgânica e o pH do solo de 0 - 0,10 m (1) e 0,10 - 0,20 m (2); ^(b)DF= Distribuição de frequência, sendo NO, LN, e IN, respectivamente do tipo normal, lognormal e indeterminada.

observou-se um incremento nos teores de P e MO após a dessecação da *U. brizantha*, com valores remanescentes de 23,5 mg dm⁻³ (P1) e 12,2 mg dm⁻³ (P2). De acordo com Raphael et al. (2016) a prática adequada de culturas e manejo do solo podem proporcionar melhorias na qualidade do solo. Nascente et al. (2015) por exemplo, observaram melhorias nas qualidades químicas do solo quando culturas de cobertura foram cultivadas, proporcionando incremento nos teores dos atributos químicos do solo, bem como da matéria orgânica.

Assim, considerando ainda o manejo da adubação com a aplicação do formulado 08-28-16 e avaliando os valores apresentados na Tabela 2, pode-se afirmar que o teor de fósforo no solo durante o desenvolvimento da cultura não representou limitações diretas ao desenvolvimento do feijoeiro. Por outro lado, o fósforo é um elemento que apresenta grande resposta nos solos e sua adubação pesada se deve principalmente ao seu potencial de fixação no solo em virtude de condições de acidez (RAIJ, 2001). Portanto é importante, para os dados observados, considerar o papel do pH do solo como possível limitador de sua disponibilidade.

A matéria orgânica do solo (Tabela 2) apresentou valor médio de 29,7 g dm⁻³ (MO1). Já a MO2 por ter apresentado uma distribuição de frequência não normal é melhor representado pela sua mediana (ROSA FILHO et al., 2009) que foi de 23,0 g dm⁻³. Os solos do cerrado em condições naturais, geralmente não apresentam estas características, o que mostra a importância do sistema SPD e de culturas de cobertura (NASCENTE et al., 2015) na incorporação de matéria orgânica, tanto na camada superficial como na subsuperficial.

O pH do solo apresentou comportamento de distribuição de frequência semelhante à matéria orgânica (Tabela 2). Assim, verificou-se o valor médio para pH1 de 5,3 e valor mediano para pH2 de 4,6; ou seja, com redução em profundidade, concordando com pesquisas realizadas por Carvalho et al. (2002) em um latossolo vermelho-escuro distrófico em SPD, com feijão de inverno, sob irrigação por aspersão em pivô central, onde os valores foram de 6,37 (pH1) e 5,40 (pH2). Também Dalchiavon et al. (2011), num latossolo vermelho distroférrico sob SPD com a cultura do

feijão verificaram valores de pH1 de 4,8 e pH2 de 4,6, confirmando a tendência de redução em profundidade.

Os valores de pH1 (5,3) e pH2 (4,6) apresentados na Tabela 2 foram classificados como sendo respectivamente de acidez média e alta (Raij et al., 2001). Assim, tais valores (abaixo de 5,5), principalmente na camada de 0,10 - 0,20 m, podem ser limitantes da absorção de nutrientes, como por exemplo do fósforo.

As correlações lineares entre PRO vs PMS ($r = -0,236^{**}$) e PP vs PMS ($r = -0,330^{**}$) foram observadas de modo inverso, indicando que onde foi obtido maior PMS os valores de PRO e PP foram menores (Tabela 3). Tal fato pode ser explicado pela grande quantidade de palhada remanescente da *Urochloa brizantha* no solo o que pode ter dificultado o processo de semeadura, impedindo uma maior germinação da cultura do feijão, o que com menor estande de plantas, proporcionou menores PRO em áreas de maior quantidade de palha (Tabela 2).

As correlações entre a PRO e os atributos químicos do solo (Tabela 3) mostraram significância para o par na camada de 0 a 0,10 m, PRO vs pH1 ($r = 0,261^{**}$). Pode-se observar que a correlação do pH1 com a PRO foi diretamente proporcional, demonstrando que com o aumento do pH haverá incremento da PRO, por ser a cultura do feijão muito sensível à acidez do solo (SOUSA et al., 2007). Na segunda camada (0,10 a 0,20 m), a produtividade do feijoeiro apresentou correlação positiva com a matéria orgânica, dado pelo par PRO vs MO2 ($r = 0,178^{*}$). Assim o aumento da MO2 também contribuirá para o aumento da PRO.

A população de plantas (Tabela 3) apresentou interações significativas com o teor de fósforo (PP vs P1, $r = 0,227^{*}$), com a matéria orgânica (PP vs MO1, $r = 0,229^{**}$) e com o pH do solo (PP vs pH1, $r = 0,309^{**}$; PP vs pH2, $r = 0,269^{**}$).

Assim, do ponto de vista prático agrônomo, trabalhou-se nos melhores ajustes de regressão apenas para as interações entre a produtividade do feijoeiro com os atributos do solo (MO e pH). Deste modo, a PRO apresentou variação linear direta com a MO2, portanto, quando ocorrer o máximo valor de MO2 (31 g dm⁻³) implicará, também, numa máxima estimada da PRO de 3.664

Tabela 3. Matriz de correlação entre a produtividade do feijão de inverno e alguns atributos químicos de um latossolo vermelho distroférico do cerrado brasileiro

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação ^(b)						
	PRO	PP	PMS	P1	P2	MO1	MO2
PP	0,229*						
PMS	-0,236**	-0,330**					
P1	0,126 ^{ns}	0,227*	-0,075 ^{ns}				
P2	-0,055 ^{ns}	-0,135 ^{ns}	0,143 ^{ns}				
MO1	-0,004 ^{ns}	-0,229*	0,046 ^{ns}	0,034 ^{ns}			
MO2	0,178*	-0,088 ^{ns}	0,104 ^{ns}		0,276**		
pH1	0,261**	0,309**	-0,115 ^{ns}	0,169 ^{ns}		0,077 ^{ns}	
pH2	0,076 ^{ns}	0,269**	-0,083 ^{ns}		-0,152 ^{ns}		0,026 ^{ns}

^(a)Atributos avaliados, onde: PRO e PP são respectivamente, a produtividade e população de plantas do feijoeiro de inverno; PMS = produtividade de matéria seca da *Urochloa brizantha*; P, MO, e pH, são respectivamente o teor de fósforo, o teor de matéria orgânica e o pH do solo de 0 - 0,10 m (1) e 0,10 - 0,20 m (2); ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%, ^{ns} não significativo.

kg ha⁻¹, com coeficiente de correlação $r = 0,178^*$. Por outro lado, a PRO apresentou uma variação potencial direta com o pH1, assim sendo, quando o pH1 for máximo (6,3), a PRO estimada será de 3.678 kg ha⁻¹, com coeficiente de correlação $r = 0,267^{**}$. Dalchiavon et al. (2011), verificaram variação linear direta entre PRO e pH (camada de 0 a 0,20 m), sendo que quando o pH foi máximo (6,2) a PRO estimada também foi máxima (3.600 kg ha⁻¹). Reichert et al. (2008) também verificaram significativa correlação direta entre a produtividade do feijoeiro e o pH (camada de 0 - 0,15 m), demonstrando, conforme observado nesse trabalho, que o feijoeiro é sensível à acidez do solo (SOUSA et al., 2007).

Com base nessas inferências realizadas, os ajustes aos modelos de regressões que representaram tais interações entre o atributo da planta com os do solo foram:

$$PRO = 2,219 \cdot 10^3 + 4,662 \cdot 10^1 \cdot MO2 \quad (n=124; r=0,178^*) \quad (1)$$

$$PRO = 9,206 \cdot 10^2 \cdot pH1^{7,526 \cdot 10^1} \quad (n = 124; r = 0,267^{**}) \quad (2)$$

em que

PRO = produtividade do feijoeiro de inverno (kg ha⁻¹), MO2 = teor de matéria orgânica na camada de 0,10 - 0,20 m (g dm⁻³), e o pH1 = pH do solo (CaCl₂) na camada de 0 - 0,10 m.

Por outro lado, a análise de regressão múltipla entre o atributo da planta (dependente) vs todos os atributos do solo conjuntos (independentes), não revelou resultados significativos.

Os parâmetros semivariográficos simples ajustados para os atributos da planta e do solo (Tabela 4) demonstraram que, com exceção da MO1 e pH1, que apresentaram efeito pepita puro (epp), os demais atributos apresentaram dependência espacial.

A maioria dos ajustes semivariográficos apresentaram modelos esféricos (PRO, PP, PMS, P1, MO2 e pH2), e somente o P2 apresentou modelo gaussiano (Tabela 4). Em relação ao desempenho dos atributos do solo, analisado pelos coeficientes de determinação espacial (r^2), a relação decrescente foi: pH2 (0,870) > P1 (0,736) > MO2 (0,691) > P2 (0,185). Em relação aos valores dos alcances dos atributos pesquisados foram classificados na seguinte ordem decrescente: pH2 (51,5 m) > P1 (30,0 m) > MO2 (29,5 m) > P2 (9,5 m).

A análise da dependência espacial entre os atributos da planta com os do solo (Tabela 4) revelou ajuste semivariográfico cruzado unicamente entre a PRO vs pH2. Assim, a cokrigagem $PRO=f(pH2)$ apresentou ajuste do tipo esférico, de forma positiva entre causa e efeito, com alcance da dependência espacial de 23,7 m e um alto ADE (83,7 %). Portanto, do ponto de vista

Tabela 4. Parâmetros semivariográficos simples e cruzado ajustados para a produtividade do feijão de inverno e alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico do Cerrado brasileiro

Parâmetros Semivariográficos							
Atributos ^(a)	Modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)
γ(h) simples dos atributos da planta							
PRO (kg ha ⁻¹)	esf	1,88.10 ⁵	3,80.10 ⁵	17,6	0,596	1,01.10 ¹⁰	50,6
PP (pl ha ⁻¹)	esf	2,33.10 ⁸	1,51.10 ⁹	40,6	0,758	4,12.10 ¹⁷	84,5
PMS (kg ha ⁻¹)	esf	8,24.10 ⁶	1,65.10 ⁷	49,4	0,865	7,93.10 ¹²	50,0
γ(h) simples dos atributos do solo							
P1 (mg dm ⁻³)	esf	3,15.10 ¹	4,05.10 ¹	30,0	0,736	1,84.10 ¹	22,2
P2 (mg dm ⁻³)	gau	3,30.10 ¹	3,08.10 ¹	9,5	0,185	4,43.10	25,3
MO1 (g dm ⁻³)	epp	1,13.10 ¹	1,13.10 ¹	-	-	-	-
MO2 (g dm ⁻³)	esf	1,64	8,01	29,5	0,691	9,77	79,5
pH1	epp	1,73.10 ⁻¹	1,73.10 ⁻¹	-	-	-	-
pH2	esf	2,91.10 ⁻²	4,07.10 ⁻²	51,5	0,870	6,77.10 ⁻⁵	28,6
γ(h) cruzado entre PRO e pH do solo							
PRO=f(pH2)	esf	2,29	1,41.10 ¹	23,7	0,443	7,15.10 ¹	83,7

^(a)Atributos avaliados, onde: PRO, PP são respectivamente, a produtividade e população de plantas do feijoeiro de inverno; PMS = produtividade de matéria seca da *Urochloa brizantha*; P, MO, e pH, são respectivamente o teor de fósforo, o teor de matéria orgânica e o pH do solo de 0 - 0,10 m (1) e 0,10 - 0,20 m (2); ^(b)Modelo de ajuste sendo: esf = esférico, gau = gaussiano e, epp = efeito pepita puro; ^(c)SQR = Soma dos quadrados dos resíduos; ^(d)ADE = avaliador da dependência espacial.

espacial, também houve correlação, direta, entre a produtividade e o pH do solo, agora para a camada de 0,10 - 0,20 m, corroborando para o fato de que a qualidade química da segunda camada (pH2) tem influência na produtividade do feijoeiro de inverno.

Com base nas inferências realizadas (Tabela 4), são apresentados na Figura 2 a e b, os mapas de krigagens dos atributos de maior destaque agrônômico observados no presente estudo (PRO e pH2). Nota-se que para a produtividade do feijoeiro (Figura 2a), os maiores valores (3.301 a 3.900 kg ha⁻¹) estão nas bordas do mapa, no sentido sul - sudeste, sudeste - noroeste e norte-nordeste. No entanto, nas demais regiões, principalmente as que abrangem a região central do mapa, ocorreram os mais baixos valores da PRO (2.503 a 3.101 kg ha⁻¹). Do ponto de vista prático, a observação do mapa de krigagem do atributo pH2 (Figura 2b), evidencia semelhanças espaciais com o mapa da PRO (Figura 2a), indicando que na região da borda inferior, sul - sudoeste do mapa, onde foram verificados maiores

valores de pH2, também observou-se um melhor desempenho da produtividade do feijoeiro.

Da mesma forma que o observado (Figura 2 a e b), Dalchiavon et al. (2011) constataram semelhanças entre mapas de PRO e pH (na camada de 0 - 0,20 m), sendo que as regiões onde ocorreram os maiores valores de PRO observou-se os maiores valores de pH (5,1 a 5,5). Portanto, o mapeamento do pH2 sugere zonas específicas de manejo com parâmetros geostatísticos significativos intimamente correlacionada com a produtividade do feijoeiro.

A correlação entre o pH e a produtividade das culturas é extremamente importante, pois segundo Sousa et al. (2007), tanto a matéria orgânica quanto o pH do solo influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que estão diretamente ligados à disponibilidade de nutrientes. O SPD tende a melhorar a disponibilidade de MO pois proporciona o seu aporte contínuo, aumentando a ciclagem de nutrientes e a qualidade

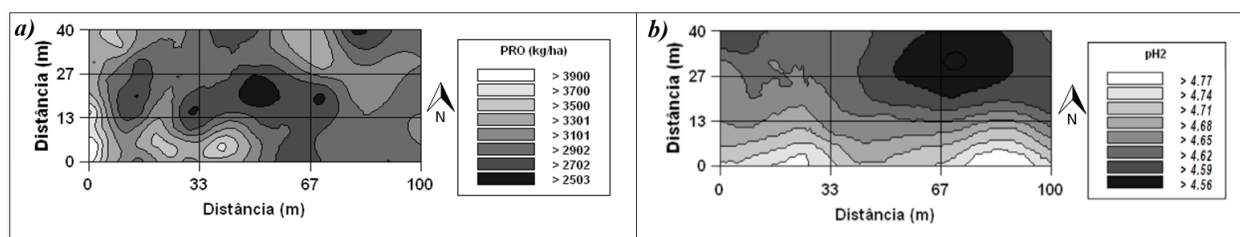


Figura 2. Mapas de krigagem dos atributos do feijoeiro de inverno e o pH de um Latossolo Vermelho Distroférico do Cerrado de baixa altitude.

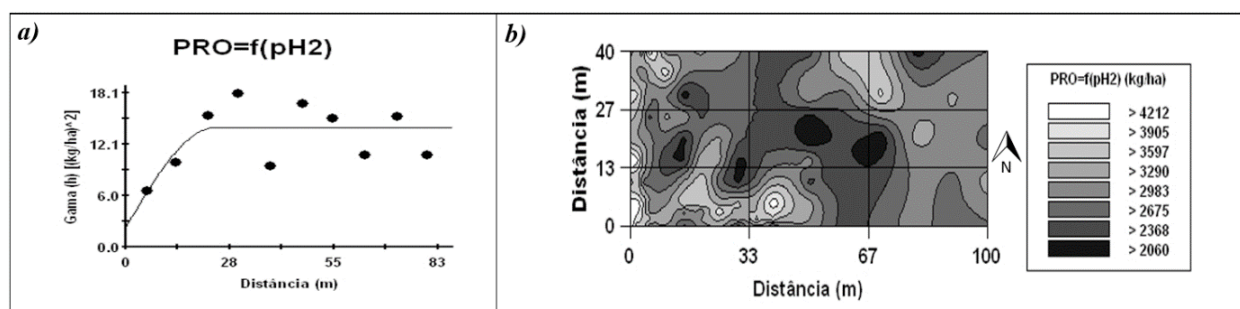


Figura 3. Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da produtividade do feijão de inverno em função do pH do solo na camada de 0,10 - 0,20 m, num Latossolo Vermelho Distroférico do Cerrado brasileiro.

química do solo (NICOLODI et al., 2008), além do melhor armazenamento de água, o que garante consequentemente, condições satisfatórias ao desenvolvimento vegetal. Os resultados observados na presente pesquisa sugerem que tal fato ocorra na área de estudo, uma vez que o histórico da área, aliado ao fornecimento adequado de água proporcionou bons valores de produtividade do feijoeiro de inverno mesmo em região de cerrado de baixa altitude. Por outro lado, a variabilidade espacial dos atributos do solo foi fator de variação na produtividade desta cultura agrícola dentro da área experimental.

Por fim, em relação ao ajuste semivariográfico cruzado (Tabela 4), é apresentado na Figura 3 a e b o respectivo semivariograma e mapa de cokrigagem da produtividade do feijoeiro [PRO=f(pH2)], produto final e atestado da correlação espacial direta existente entre a PRO e o pH2 do solo.

CONCLUSÕES

- A produtividade de feijão de inverno no cerrado apresenta correlação linear direta com a matéria orgânica na camada de 0,10 a 0,20 m, e com o pH do solo na camada de 0 a 0,10 m.

- Do ponto de vista geoestatístico, à exceção da MO e do pH na camada de 0 - 0,10 m, todos os demais atributos (solo e planta) apresentam dependência espacial.
- O pH do solo na camada de 0,10 - 0,20 m destaca-se como um apreciável indicador da qualidade química, evidenciando áreas específicas de manejo diretamente correlacionadas com a produtividade do feijoeiro para as condições do cerrado de baixa altitude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T.J.C.; PES, L.Z.; LEMAINSKI, C.L.; SCHENATO, R.B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.831-843, 2009.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1151-1159, 2002.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE

ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos da Safra 2014/15**. v.2, n.4, Quarto Levantamento: janeiro/2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br >. Acessado em: 05 de março de 2015.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v.70, p.908-916, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; CENTURION, J.F.; BARBOSA, G.F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho Distroférico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.27, p.61-67, 2005.

LEITE, D.M.; VIEIRA, L.B.; FERNANDES, H.C.; CARNEIRO, J.E.S.; RISSO, L.F.C. Desempenho da cultura do feijão em função de diferentes sistemas de cultivo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.21, p.539-546, 2013.

MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A.F. **Agricultura de Precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 233p.

MONTANARI R.; CARVALHO, M.P.; SILVA JÚNIOR, C.A.; RODRIGUES CORRÊA, A.; DALCHIAVON, F.C. GONZÁLEZ, A.P. Relations between the yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and chemical attributes of an Acrustox under no-tillage. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v.13, p.367-379, 2013a.

MONTANARI R.; RODRIGUES, G.G.; CARVALHO, M.P.; DALCHIAVON, F.C.; MACHADO, F.C.; GONZALEZ, A.P. Atributos

químicos de um Latossolo espacialmente relacionados com a produtividade e componentes de produção do feijão em Selvíria (MS). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.12, p.1-10, 2013b.

NASCENTE, A.S.; STONE, L.F.; CRUSCIOL, C.A.C. Soil chemical properties affected by cover crops under no-tillage system. **Revista Ceres**, Viçosa, v.62, p.401-409, 2015.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.237-247, 2008.

PEREIRA, H.S.; ALMEIDA, V.M.; MELO, L.C.; WENDLAND, A.; FARIA, L.C.; DEL PELOSO, M.J.; MAGALDI, M.C.S. Influência do ambiente em cultivares de feijoeiro-comum em cerrado com baixa altitude. **Bragantia**, Campinas, v.71, n.2, p.165-172, 2012.

PIMENTEL-GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAPHAEL, J.P.A.; CALONEGO, J.C.; MILORI, D.M.B.P.; ROSOLEM, C.A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.155, p.45-53, 2016.

REICHERT, J.M.; DARIVA, T.A.; REINERT, D.J.; SILVA, V.R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.981-988, 2008.

ROBERTSON, G.P. **GS+**: geostatistics for environmental sciences. Version 9. Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 169p.

- ROLIM, G.S.; CAMARGO, M.B.P.; LANIA, D.G.; MORAES, J.F.L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.66, p.711-720, 2007.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.283-293, 2009.
- SANTOS, H.G.; ALMEIDA, J.A.; OLIVEIRA, J.B.; LUMBRERAS, J.F.; DOS ANJOS, L.H.C.; COELHO, M.R.; JACOMINE, P.K.T.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, V.A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.
- SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS system for elementary statistical analysis**. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, Oxford, v.52, p.591-611, 1965.
- SILVA, E.N.S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A.R.; CORREA, A.R.; TOMAZ, P.K.; FERRAUDO, A.S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.598-607, 2015.
- L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correlação. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.A.V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p.205-274.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.1, p.1-55.