

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA EFICIÊNCIA DO USO DE POTÁSSIO E FÓSFORO NA CULTURA DA SOJA¹**Rafael Noetzold², Marcelo de Carvalho Alves³, Marcio Marcos Goussain Júnior⁴ & Rita de Cássia Santos Goussain⁵

1 - Parte da tese de doutorado do primeiro autor

2 - Prof. Dr. da UNEMAT, Nova Mutum-MT, rafael_noetzold@hotmail.com

3 - Prof. Dr. da UFLA, Lavras-MG, marcelo.alves@ufla.br

4 - Dr. da Assist Consultoria e Experimentação Agronômica, Campo Verde-MT, marcio.goussain@assistconsult.com.br

5 - Profa. Dra. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Santo Antonio do Leverger-MT, rita.cassia@svc.ifmt.edu.br

Palavras-chave:

argila
Glycine max
macronutrientes
produtividade
sojicultura de precisão

RESUMO

Na agricultura de precisão, o tratamento diferenciado, dentro de uma mesma área, contribui para a racionalização dos insumos agrícolas. Objetivou-se nesta pesquisa avaliar a dependência espacial e o mapeamento da eficiência de cloreto de potássio e superfosfato simples em áreas de cultivo de soja. Coletaram-se amostras de solo em pontos georreferenciados em quatro talhões pertencentes ao município de Campo Verde-MT. Em seguida, foram determinados os atributos químicos do solo e sua textura, para posteriormente efetuar recomendação de adubação em taxa para produzir 50 sacas/ha de grãos de soja. Após a coleta de plantas nos mesmos locais georreferenciados para solo, obteve-se a produtividade de grãos de soja. Posteriormente, calculou-se a eficiência do uso de cloreto de potássio e superfosfato simples, e em seguida foram realizadas análises descritiva e geoestatística para todos os atributos estudados. Os níveis de pH, teores de argila, matéria orgânica, potássio, fósforo, a produtividade de grãos e a eficiência do uso de cloreto de potássio e superfosfato simples apresentaram variabilidade, com distribuições espaciais definidas nos quatro talhões. Ocorreu dependência espacial e foi possível mapear a eficiência do uso de superfosfato simples e cloreto de potássio na cultura da soja. O teor de matéria orgânica do solo influenciou positivamente na eficiência de cloreto de potássio. Áreas com menor variabilidade espacial dos atributos do solo resultam em maior produtividade de grãos de soja e maior eficiência de superfosfato simples e cloreto de potássio.

Keywords:

clay
Glycine max
macronutrients
yield
precision soybean production

SPATIAL VARIABILITY OF POTASSIUM AND PHOSPHORUS EFFICIENCY USE IN SOYBEAN CROP**ABSTRACT**

In precision agriculture, the differential treatment, within the same area, contributes to agricultural input rationalization. The aim of this research was to evaluate the spatial dependence and mapping superphosphate and potassium chloride efficiency in soybean growing areas. Soil samples were collected at georeferenced points in four plots belonging to the municipality of Campo Verde – Mato Grosso. Then soil chemical properties and texture were determined to further perform descriptive analysis, geostatistics of these attributes and fertilizer recommendation in charge to produce 3000 kg ha⁻¹ of soybeans. After collecting plants in the same locations for georeferenced soil, soybean grain yield was obtained, and the superphosphate and potassium chloride use efficiency were calculated, having geostatistical analysis also been held. The pH, clay, organic matter, potassium, phosphorus contents and yield, superphosphate and potassium chloride efficiency use showed variability with spatial patterns defined in the four areas. Spatial dependence was found and it was possible to map the superphosphate and potassium chloride use efficiency in soybeans. The organic matter content of the soil had a positive influence on the potassium chloride efficiency. Areas with lower spatial variability of soil attributes result in higher soybean yield and higher efficiency of superphosphate and potassium chloride.

INTRODUÇÃO

O Estado de Mato Grosso é o maior produtor de soja do Brasil. Estima-se que foram colhidas, na safra 2018/2019, 32.306,1 mil toneladas (CONAB, 2019), cultivadas principalmente no bioma Cerrado.

Conforme Melo & Alleoni (2009), a baixa fertilidade dos solos do Cerrado é atribuída ao material de origem, aos processos de intemperismo e às práticas utilizadas pelo agricultor, resultando em baixa produtividade em determinadas áreas. Assim, é fundamental o uso de práticas de manejo com o intuito de aumentar a fertilidade e minimizar a variabilidade do solo, sendo que as ferramentas de agricultura de precisão estão sendo utilizadas com êxito.

Para Carvalho *et al.* (2018), o conhecimento da variabilidade espacial de atributos químicos do solo permite a aplicação de insumos de forma eficiente. Assim, as práticas de manejo precisas, utilizadas para locais específicos, empregadas nas decisões acerca do manejo dos fertilizantes, tornam possível conciliar os interesses dos investidores com os fatores agronômicos (REETZ JR., 2010). Dessa forma, essas práticas podem contribuir para diminuição da variabilidade espacial da fertilidade do solo e da produtividade das culturas, para redução e racionalização da quantidade de insumos aplicada e, conseqüentemente, aumento da lucratividade.

Para Dalchiavon *et al.* (2017), o conhecimento da espacialização dos atributos químicos do solo contribui para o estabelecimento de práticas sustentáveis de manejo do solo e das culturas; e, para Bottega *et al.* (2013), a interação entre os atributos do solo, do genótipo e as demais características do ambiente interfere no potencial produtivo das culturas e, na maioria das vezes, é possível verificar variabilidade da produtividade de grãos.

Dessa forma, o mapeamento da fertilidade do solo permite estabelecer zonas de manejo que podem ser tratadas de maneira específica (ZONTA *et al.*, 2014), sendo que as informações contidas nesses mapas contribuem para tomadas de decisões. Destaca-se também que o mapeamento da eficiência do uso de fertilizantes contribui para

o melhor entendimento das interações que ocorrem durante o ciclo da soja.

O conhecimento da variabilidade espacial da eficiência do uso de fertilizantes é essencial para obter informações referentes à localização das áreas com menor e maior amplitude da aplicação de fertilizantes e da produtividade das culturas, visando à sustentabilidade do sistema produtivo. Nesse sentido, a hipótese deste trabalho foi de que ocorre dependência espacial da eficiência de fósforo e potássio na cultura da soja. Assim, objetivou-se avaliar a dependência espacial e o mapeamento da eficiência do uso de fósforo e potássio em áreas de cultivo de soja.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no município de Campo Verde, no sul de Mato Grosso. O clima na região é do tipo tropical quente e subúmido (Aw), segundo a classificação de Köppen. Conforme dados da Estação Meteorológica Vantage PRO2 Davis da Assist Consultoria e Experimentação Agronômica, instalada em Campo Verde, MT, a precipitação pluviométrica total foi de 1517,0 mm, temperaturas diárias: mínima de 17,8 °C; máxima de 35,7 °C e média de 24,9 °C entre a semeadura e a colheita da soja.

A coleta de dados dos atributos do solo e da produtividade de soja, safra 2012/2013, ocorreu em quatro áreas comerciais de produção de soja grão, nomeadas de talhões 1, 2, 3 e 4, com áreas de 93,14 ha, 107,44 ha, 157,73 ha e 154,55 ha, respectivamente (Figura 1), ambas com o solo pertencente à classe dos Latossolos (SANTOS *et al.*, 2013).

Essas áreas são manejadas mecanicamente no sistema de produção de sucessão soja-milho em três talhões. No talhão 2, ocorre a rotação entre soja, milho e algodão, sendo que desde 2010 foi adotado o sistema de cultivo mínimo e a adubação em taxa variável para os quatro talhões.

Cada ponto foi representado por uma quadrícula de aproximadamente quatro hectares, sendo coletados 22, 24, 39 e 43 pontos, respectivamente, para os talhões 1, 2, 3 e 4 (Figura 1). Em cada um dos pontos, por meio de caminhamento em zigue-zague, foi retirada uma amostra composta por cinco

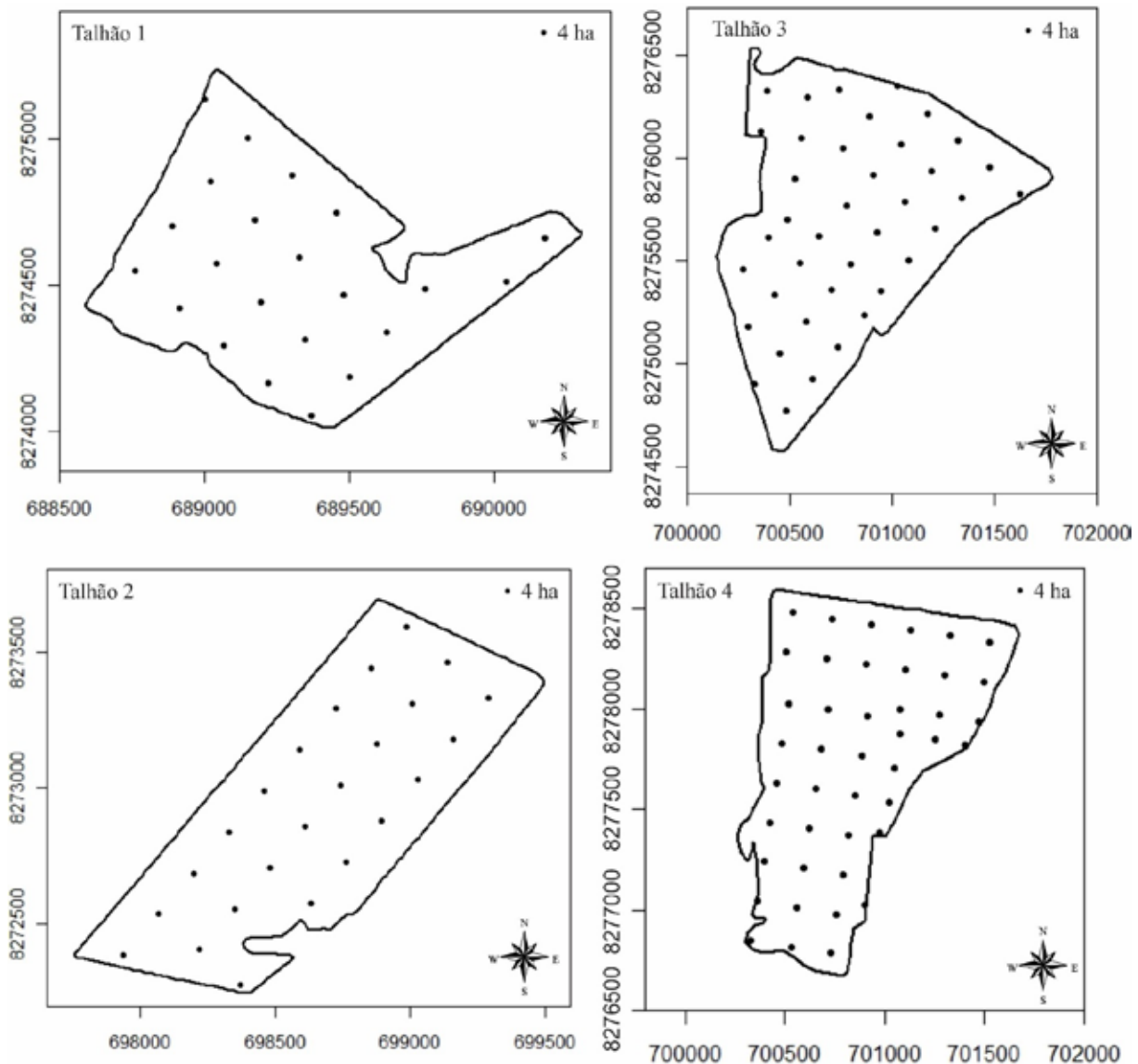


Figura 1. Malhas amostrais da coleta de solo nos talhões 1 a 4 na profundidade de 0,0-0,20m.

subamostras, sendo cada subamostra composta por duas repetições e o par de coordenadas usadas nas análises geoestatísticas foi o ponto central de cada quadrícula (Figura 2), as quais foram obtidas por GPS Mio P 350 configurado em datum WGS 84 e fuso 21, acoplado ao guidão de uma motocicleta. A coleta do solo foi realizada nas entrelinhas das culturas agrícolas anteriores (algodão no talhão 2 e milho nos demais talhões), na profundidade de 0,0 a 0,20 m. Para isso, utilizou-se uma parafusadeira com broca de uma polegada de diâmetro, acoplada em uma motocicleta.

As amostras de solo coletadas foram encaminhadas ao laboratório para se efetuarem as seguintes análises: análise textural (areia, argila e

silte), potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio (H), matéria orgânica (MO), foi utilizada a extração por Mehlich I e os resultados foram apresentados em mg/dm^3 . Foi empregada a extração por cloreto de potássio 0,1M para Ca, Mg e Al ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) e a MO (mg/dm^3) foi obtida pela extração em dicromato de sódio 4N e H_2SO_4 10N. A leitura do pH foi efetuada em cloreto de cálcio (CaCl_2).

Com base na análise de fertilidade dos respectivos talhões, efetuou-se a recomendação em taxa variável de K e P, conforme recomendações de adubação da Embrapa Soja (2011), visando produzir 50 sacas/ha. Para a recomendação de P em

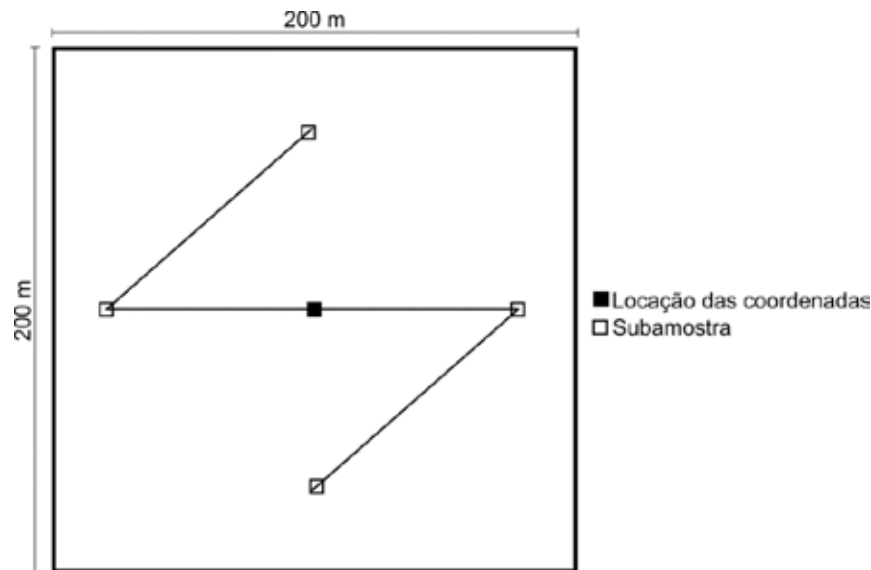


Figura 2. Esquema de amostragem de solo na profundidade de 0,0 a 0,20m em cada ponto amostral.

taxa variável, foi considerado o teor desse nutriente presente no solo e a porcentagem da argila em cada ponto amostral. Com relação ao K, foi considerado o teor do nutriente no solo em cada ponto amostral e o aproveitamento pelas plantas. Foram utilizados 60 kg de P_2O_5 /ha (superfosfato simples) e 60 kg de K_2O /ha (cloreto de potássio).

Para gerar os mapas de adubação em taxa variável, utilizou-se o critério de álgebra de mapas, em sistema de informação geográfica. As fontes de P e K foram aplicadas a lanço aos 30 e 20 dias antes da semeadura da soja, respectivamente. A aplicação em taxa variável de fertilizantes foi a lanço na superfície do solo, sem incorporação, com a utilização de um lancer Jam multiuso 12 ton, tracionado por um trator, com 140 CV, conforme as doses recomendadas.

A semeadura do cultivar 7639 RR foi realizada no mês outubro de 2012, com espaçamento de 0,45 m entre linhas. Os talhões foram submetidos à prática de manejo do cultivo mínimo, com semeadura sob a palhada de milho, nos talhões 1, 3 e 4; e sob palhada de algodoeiro no talhão 2.

A coleta de plantas de soja (estádio R9), para a obtenção da produtividade de grãos em cada ponto georreferenciado (Figura 1), foi realizada nos meses de janeiro e fevereiro de 2013. Cada amostra foi composta por todas as plantas de soja contidas em duas linhas, com três metros de comprimento cada, correspondendo a 2,7m².

As plantas foram arrancadas manualmente,

amarradas com identificação do ponto amostral e respectivo talhão e encaminhadas para dois barracões arejados, onde permaneceram até estarem secas. As amostras úmidas foram expostas ao sol.

Posteriormente, a trilha foi realizada com um batedor SB, e as amostras foram acondicionadas em sacos de papel. Após a retirada das impurezas de cada amostra, utilizando-se peneira e ventilador, a produtividade final de grãos de soja foi obtida por meio da pesagem das amostras, com padronização do teor de água a 14%.

Para estimar a eficiência de uso de superfosfato simples e cloreto de potássio e o efeito da dose de adubação sob a produtividade de grãos da soja, fez-se uso da Equação 1 (adaptada de CRUSCIOL & SORATTO, 2010).

$$Ef = \text{produtividade}/\text{dose} \quad (1)$$

em que,

Ef = eficiência do uso de fertilizante;

Produtividade = grãos de soja em kg/ha; e

dose = fertilizante aplicado (kg/ha).

Nos casos em que houve mais de uma dose na mesma quadrícula, utilizou-se a dose que representou maior área na quadrícula.

Na análise de dados, efetuou-se: a estatística descritiva (média, valor máximo, valor mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação); a

interpretação dos resultados de análise de solo conforme a classificação proposta por Sousa & Lobato (2004); e a análise geoestatística por meio do modelo de semivariograma esférico, ajustado ao método Restricted Maximum Likelihood (REML). Em seguida, efetuou-se interpolação por krigagem ordinária e o erro da krigagem (R Core Team, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da estatística descritiva, observou-se que a maioria dos atributos do solo, nos quatro talhões, apresentou baixa variação. Os menores valores de coeficiente de variação (CV) foram observados no pH e o maiores no P, e, segundo

Warrick & Nielsen (1980), a variabilidade dos atributos estudados foi classificada entre baixa e média, exceto para P dos talhões 1 e 3, que apresentou alta variabilidade (Tabela 1).

Resultado semelhante foi obtido por Mattioni et al. (2013), em Latossolo cultivado com soja em sistema de plantio direto em Não-Me-Toque, RS, em que o pH e o P apresentaram o menor e o maior CV entre os atributos analisados, respectivamente.

Salienta-se a importância do conhecimento do pH, pois este é considerado como um indicador da fertilidade do solo e pode contribuir para a melhor compreensão do efeito da interferência antrópica no solo (VICENTE & ARAUJO, 2013).

O CV da produtividade da soja, conforme Warrick & Nielsen (1980), foi baixo e variou

Tabela 1. Análise descritiva dos talhões 1, 2, 3 e 4 referente ao pH (CaCl₂), à produtividade de grãos de soja (kg/2,7m²), argila (%), matéria orgânica (MO, g/dm³), potássio (K, mg/dm³), fósforo (P, mg/dm³), eficiência de uso do cloreto de K (EfKCl) e eficiência de uso de superfosfato simples (EfSS)

	pH	Produtividade	Argila	MO	K	P	EfKCl	EfSS
Talhão 1								
Mínimo	5,200	0,729	18,400	16,800	20,000	5,500	10,806	6,507
Máximo	5,700	1,122	59,700	35,800	70,000	49,400	40,113	20,782
Média	5,423	0,962	37,9318	26,673	37,591	24,145	23,383	13,073
DP	0,154	0,090	16,717	6,369	12,938	16,186	10,575	5,207
CV	2,842	9,398	44,072	23,877	34,418	67,036	45,223	39,834
Talhão 2								
Mínimo	5,300	0,999	39,000	28,700	53,000	14,000	37,008	17,648
Máximo	5,700	1,224	52,000	41,000	108,000	30,300	45,328	22,664
Média	5,496	1,133	45,263	33,900	79,917	22,017	41,943	20,788
DP	0,120	0,054	4,147	3,436	12,649	4,228	2,006	1,183
CV	2,178	4,783	9,163	10,135	15,828	19,202	4,783	5,691
Talhão 3								
Mínimo	5,200	0,765	20,100	20,600	24,00	3,300	15,353	5,240
Máximo	5,800	1,092	50,600	33,000	38,00	41,900	40,444	19,367
Média	5,508	0,945	30,818	26,087	31,564	19,423	22,619	11,474
DP	0,146	0,066	9,466	3,183	3,378	13,401	7,6135	5,151
CV	2,647	9,939	30,715	12,201	10,702	68,994	33,660	44,891
Talhão 4								
Mínimo	5,100	0,598	16,000	14,500	22,000	6,100	10,069	5,337
Máximo	5,700	1,110	34,60	30,40	53,000	51,200	37,150	20,549
Média	5,402	0,913	22,858	21,558	29,512	30,293	17,944	14,325
DP	0,165	0,103	3,996	3,492	4,527	13,357	4,742	4,209
CV	3,063	11,245	17,480	16,199	15,340	44,093	26,428	29,380

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%).

de 4,78% a 11,25% (Tabela 1). Diversas pesquisas obtiveram valores de CV próximos aos encontrados neste trabalho (MATTIONI *et al.* (2013); DALCHIAVON *et al.* (2017); ACOSTA *et al.* (2018).

Por meio da avaliação da fertilidade dos talhões estudados, verificou-se que os níveis de pH variam de adequado a alto, os níveis de MO e K de baixo a alto, e P de muito baixo a alto (Tabela 2); essas informações indicam a existência de variabilidade espacial desses atributos do solo, sendo necessário o uso de técnicas geoestatísticas para melhor compreensão do padrão espacial.

Observou-se que a diferença entre as produtividades máxima e mínima de grãos foi de 18,38% para o talhão 2; 29,95% para o talhão 3; 35,03% para o talhão 1; e 46,13% para o talhão 4 (Tabela 1). Isso pode ser atribuído tanto à heterogeneidade natural dos atributos do solo quanto às práticas de manejo adotadas pelo produtor.

Observou-se dependência espacial para todos

os atributos estudados, os quais foram ajustados ao modelo de semivariograma esférico (Tabela 3).

Verificou-se que, nos talhões 1, 3 e 4, os alcances para P e MO foram semelhantes, pois variaram de 1035 a 1203 m e de 820 a 936 m, respectivamente (Tabela 3). Para Carneiro *et al.* (2016a), os valores de alcance são influenciados pelas práticas agronômicas, principalmente pela aplicação de corretivos e fertilizantes, uma vez que o objetivo é realizar a homogeneização da área de cultivo, sendo que o valor do alcance pode contribuir para o planejamento das futuras malhas amostrais, auxiliando para a otimização do tamanho do grid.

Todos os atributos estudados nos quatro talhões apresentaram variabilidade com padrões espaciais definidos, sendo que os mapas com maiores teores de argila apresentaram área de correspondência com MO, produtividade e eficiência de SS e KCl (Figuras 3 e 4). Em pesquisa realizada por Richart *et al.* (2016), também foi verificado que os mapas temáticos foram essenciais para entendimento e avaliações da variabilidade espacial e temporal dos

Tabela 2. Distribuição dos pontos amostrados com seu nível de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K) e potencial hidrogeniônico (pH) em cada talhão avaliado, conforme classificação de Sousa & Lobato (2004)

Talhão	Atributo	Quantidade de pontos amostrais com seu respectivo nível				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
1	MO	0	0	10	12	0
1	P	0	0	5	5	12
1	K	0	2	17	3	0
1	pH	0	0	0	17	5
2	MO	0	0	5	19	0
2	P	0	0	0	0	24
2	K	0	0	0	14	10
2	pH	0	0	0	15	9
3	MO	0	0	10	28	1
3	P	5	4	6	5	19
3	K	0	1	38	0	0
3	pH	0	0	0	22	17
4	MO	0	2	16	24	1
4	P	0	6	3	1	33
4	K	0	3	39	1	0
4	pH	0	0	0	35	8

Tabela 3. Parâmetros de ajuste do semivariograma para a argila (%), matéria orgânica (MO, g/dm³), potássio (K, mg/dm³), fósforo (P, mg/dm³), produtividade de grãos de soja (kg/2,7m²), eficiência de uso do cloreto de K (EfKCl) e eficiência de uso de superfosfato simples (EfSS)

	Efeito pepita	Patamar	Alcance
	Talhão 1		
Argila	0,375	241,000	1135,000
pH	0,015	0,024	802,726
MO	0,000	30,340	820,144
K	31,340	171,940	665,218
P	0,000	221,10	1202,726
Produtividade	0,006	0,008	501,722
EfKCl	1,982	7,140	387,466
EfSS	3,657	63,837	1213,500
	Talhão 2		
Argila	1,632	20,712	812,362
pH	0,003	0,021	1065,620
MO	0,000	12,080	284,713
K	76,110	161,870	279,942
P	15,030	17,868	199,739
Produtividade	0,000	0,003	296,880
EfKCl	2,923	4,279	1127,605
EfSS	0,000	23,570	227,835
	Talhão 3		
Argila	0,000	92,220	1557,233
pH	0,010	0,023	724,040
MO	3,968	11,118	935,675
K	7,189	11,683	447,701
P	15,361	164,961	1035,454
Produtividade	0,002	0,004	337,004
EfKCl	2,148	7,157	616,780
EfSS	1,595	31,955	1266,935
	Talhão 4		
Argila	0,800	24,760	1013,014
pH	0,014	0,029	620,239
MO	3,778	16,298	900,001
K	3,708	30,900	732,163
P	11,26	210,861	1068,558
Produtividade	0,000	0,010	366,968
EfKCl	2,215	8,552	1483,927
EfSS	4,623	47,313	1617,563

atributos do solo.

A disponibilidade e a variabilidade espacial dos elementos no solo são influenciadas pelas práticas do agricultor, por fatores edafoclimáticos e suas

interações. Roger et al. (2014) ressaltaram que é necessária melhor compreensão desses fatores para obtenção do gerenciamento racional dos nutrientes nos sistemas de cultivos agrícolas.

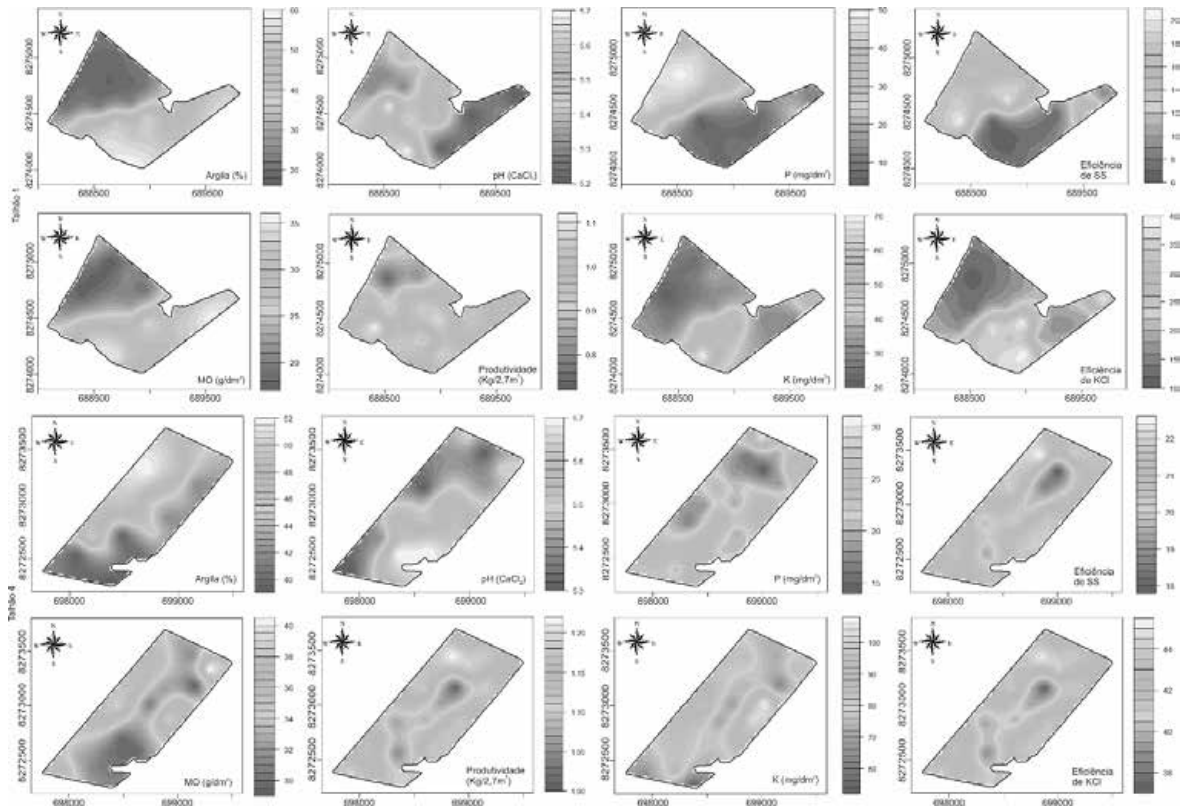


Figura 3. Mapas de krigagem dos talhões 1 e 2 referente aos atributos do solo (argila, MO, pH, P e K), à produtividade de grãos de soja, à eficiência de uso de superfosfato simples (SS) e de cloreto de potássio (KCl).

Por meio das informações obtidas pelos mapas de krigagem, observou-se que o talhão 2 foi o que apresentou a menor amplitude para a maioria dos atributos. Em contrapartida, foi observada, no talhão 4, maior amplitude para a maioria dos atributos (Tabela 3 e Figuras 3 e 4). Como consequência, a produtividade de soja do talhão 4 também apresentou maior variabilidade espacial, comprovando que plantas equilibradas nutricionalmente apresentam maior estabilidade produtiva.

A área de correspondência entre os teores de K e MO (Figuras 3 e 4) provavelmente ocorreu em função da variação da MO, pois esta disponibiliza nutrientes, age na complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes e afeta os agregados e as características biológicas do solo (BAYER & MIELNICZUK, 2008).

Por meio dos mapas de krigagem, foi possível verificar o potencial de uso de adubação em taxa variável para diminuir a variabilidade espacial dos atributos do solo. Estudo realizado por Carneiro *et al.* (2016b) verificou que a variabilidade

espacial dos atributos químicos de solos também possibilitou recomendar doses de calcário, P e K com taxas variadas, proporcionando economia e maior eficiência na aplicação.

Com base nos resultados dos atributos químicos do solo, foi possível constatar também a necessidade de futuras pesquisas, com intuito de obter tabelas de recomendações especialmente para K e P na cultura da soja na região do Cerrado, principalmente para solos com nível médio a alto de P, e considerar o balanço dos nutrientes do sistema de produção, e não apenas de uma cultura específica. Conforme Oliveira Junior *et al.* (2013), o balanço dos nutrientes nas culturas que compõem o sistema de produção evita o esgotamento gradual de determinado nutriente de forma a atender não apenas as necessidades das culturas, mas também o balanço do sistema de produção.

A resposta da aplicação em taxa variável de SS e KCl foi satisfatória, pois a produtividade de grãos obtida foi superior à esperada (50 sacas/ha), sendo colhidas em média 56,36, 58,33, 59,38 e 69,94 sacas/ha para os talhões 4, 3, 1 e 2, respectivamente

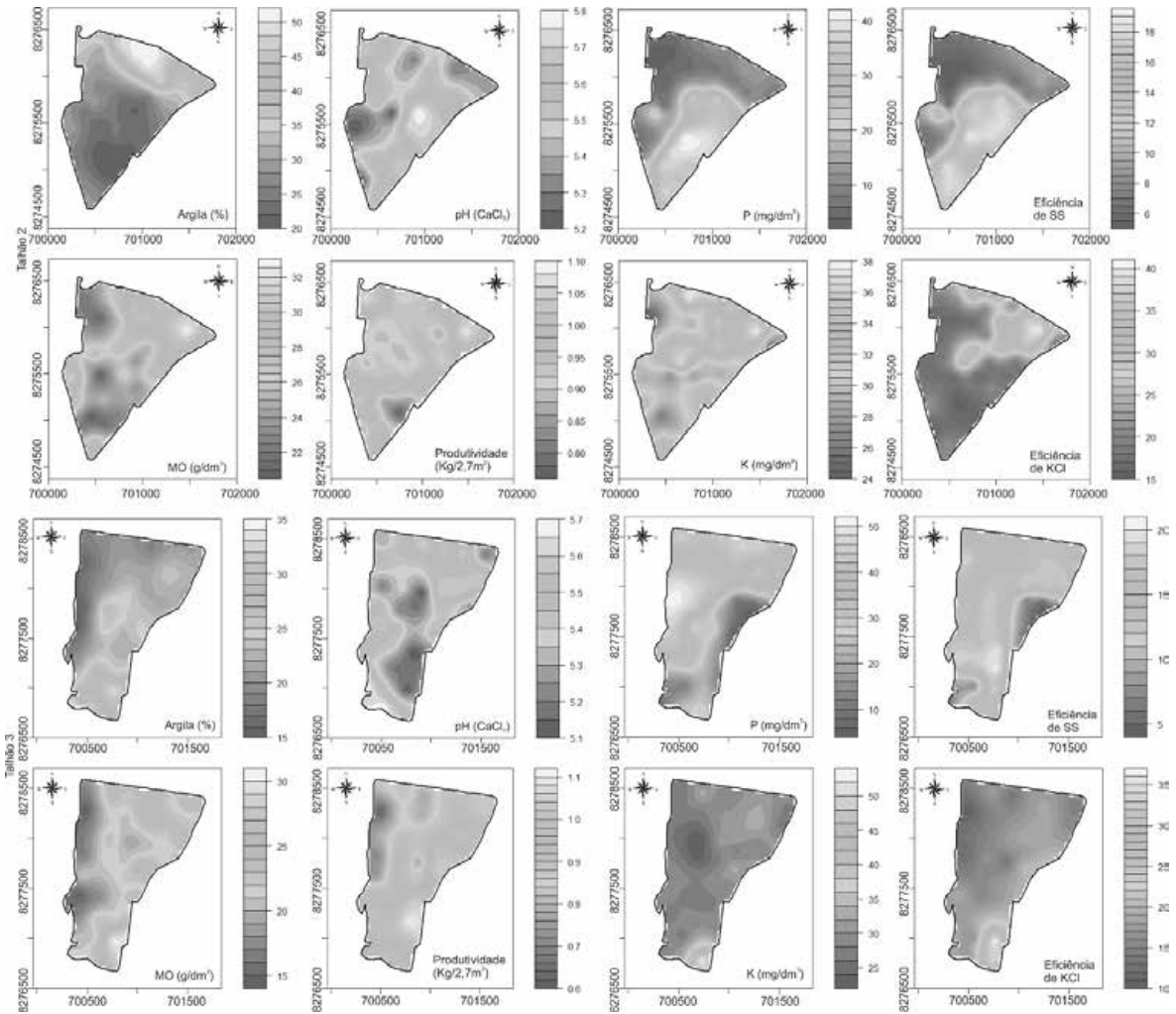


Figura 4. Mapas de krigagem dos talhões 3 e 4 referente aos atributos do solo (argila, MO, pH, P e K), à produtividade de grãos de soja, à eficiência de uso de superfosfato simples (SS) e de cloreto de potássio (KCl).

(Figuras 3 e 4).

Importante destacar que essas médias foram maiores que a produtividade estadual e nacional; segundo a Conab (2019), estas foram de 50,17 e 48,97 sacas/ha, respectivamente. Salienta-se também que, por esses talhões estarem localizados próximos uns dos outros (Figura 1), dificilmente ocorreu diferença significativa na distribuição das chuvas, haja vista que a estação meteorológica que registrou a distribuição pluviométrica também se localiza próxima aos talhões avaliados.

Observou-se que houve correspondência de áreas principalmente nos talhões 1 e 2 entre a argila e a produtividade, sendo que, nos locais com maior teor de argila, obteve-se maior produtividade (Figuras 3 e 4).

Para Bittar et al. (2013), a proporção relativa de

areia, silte e argila modifica o potencial de estoque de nutrientes, carbono e a capacidade de retenção de água nos solos. Conforme Bayer et al. (2006), em solo argiloso há mais estoque de carbono no solo, sugerindo uma maior estabilidade física da MO associada aos minerais argila.

No tocante à eficiência dos fertilizantes, observou-se maior variabilidade para SS e KCl nos talhões 4 e 1, respectivamente (Figuras 3 e 4), nesses talhões também ocorreu a maior amplitude de P no solo. No talhão 1, observou-se o maior gradiente textural e, no talhão 4, menores teores de MO, haja vista que, em locais com mais argila, normalmente se encontram maiores teores de MO, que, além de disponibilizarem nutrientes, armazenam água e contribuem para a melhoria das condições físicas do solo (Figuras 3 e 4).

Os resultados permitem inferir que nas áreas dos talhões com os maiores teores de MO ocorreram também a maior eficiência do uso de KCl, devido principalmente à MO aumentar o potencial de retenção dos nutrientes no solo, pelo aumento da capacidade de troca de cátions (BAYER & MIELNICZUK, 2008). No entanto, novos estudos são necessários para elucidar melhor essa relação entre a MO e a eficiência de nutrientes.

As informações obtidas por meio dos mapas referentes à eficiência do uso de fertilizantes também contribuem para as tomadas de decisões futuras, além de verificarem, de maneira espacializada, quantos quilogramas de grãos de soja são produzidos por cada kg de fertilizante aplicado. Crusciol & Soratto (2010) ressaltaram a importância da eficiência do uso de fertilizantes, devido à elevação dos custos de produção e à necessidade de redução do impacto ambiental da produção agrícola, sendo que há tendência de aumentarem os estudos dessa temática.

A compreensão dos padrões espaciais do P e do K no solo é fundamental para o manejo eficiente

de nutrientes e para o planejamento de amostragem futuras, além de contribuir para separar zonas de manejo dentro do mesmo talhão.

Ressalta-se também a importância da qualidade dos mapas espacializados, pois a sua precisão e acurácia, além de minimizarem o efeito negativo ao meio ambiente, contribuem para maximizar o retorno econômico.

Verificou-se que os maiores erros ocorreram nos locais mais distantes dos pontos amostrais e os menores, nos locais mais próximos destes (Figuras 5 e 6), resultado semelhante foi verificado por Montebeller *et al.* (2007).

Em pesquisas de campo, dificilmente é possível isolar ou mensurar os fatores (bióticos e abióticos) que interferem direta ou indiretamente na produtividade da soja. Entretanto, verificou-se que o conhecimento da variabilidade da fertilidade e da produtividade da soja forneceu valiosas informações para a racionalização do uso de insumos em safras futuras, desde que haja monitoramento.

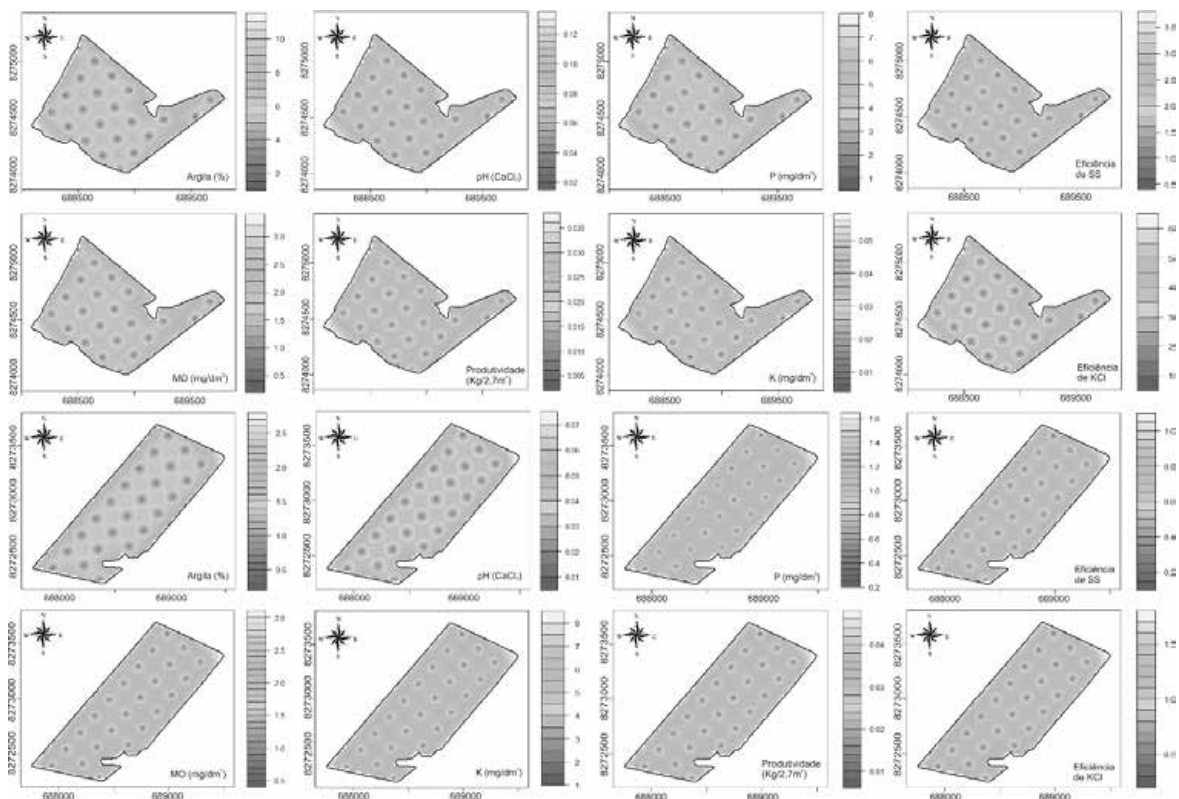


Figura 5. Mapas de erro da krigagem dos talhões 1 e 2 referente aos atributos do solo (argila, MO, pH, P e K), à produtividade de grãos de soja, à eficiência de uso de superfosfato simples (SS) e de cloreto de potássio (KCl).

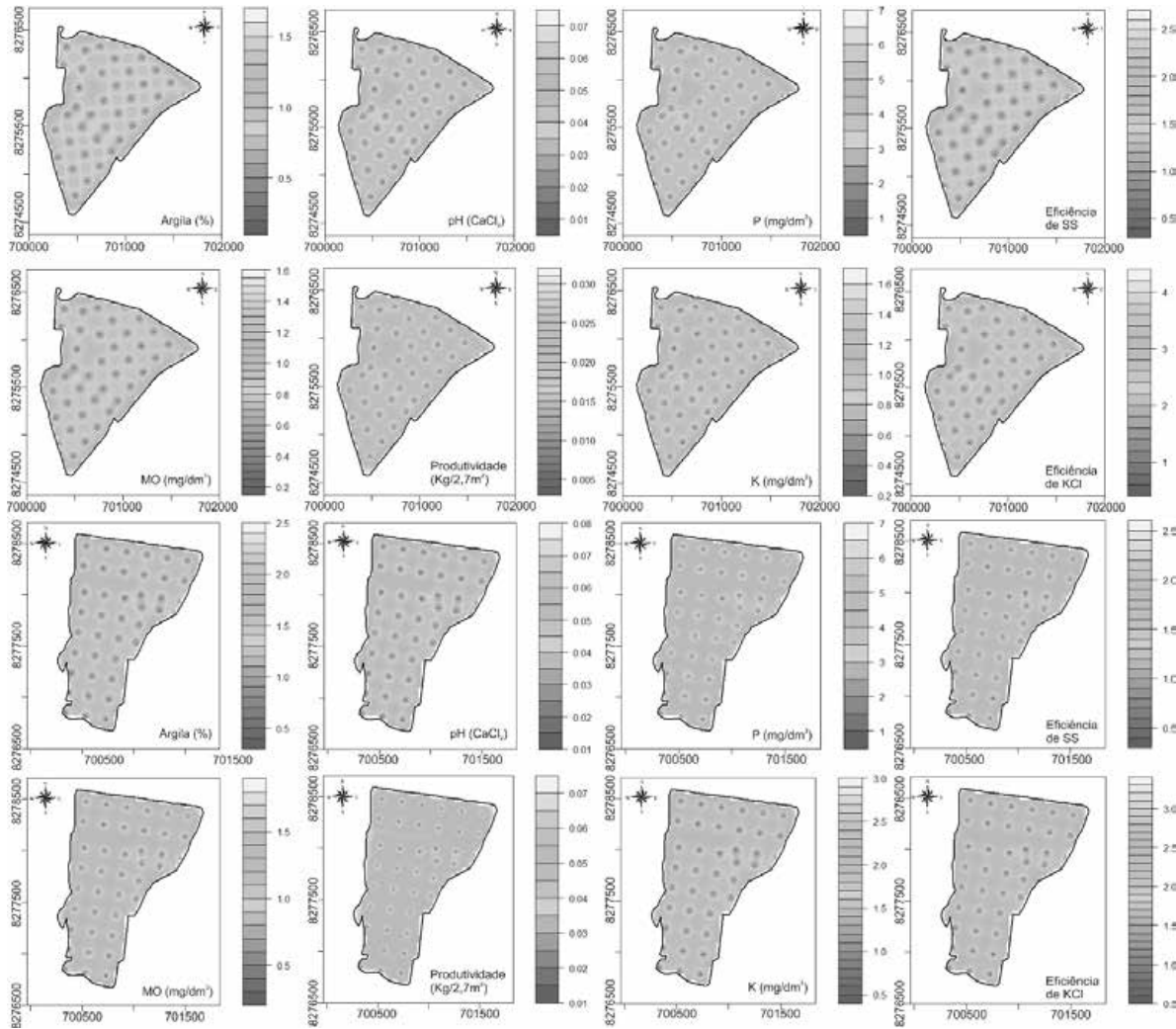


Figura 6. Mapas de erro da krigagem dos talhões 3 e 4 referente aos atributos do solo (argila, MO, pH, P e K), à produtividade de grãos de soja, à eficiência de uso de superfosfato simples (SS) e de cloreto de potássio (KCl).

CONCLUSÕES

- Ocorreu dependência espacial para todos os atributos avaliados e foi possível mapear a eficiência de superfosfato simples e cloreto de potássio na cultura da soja.
- O teor de matéria orgânica do solo influenciou positivamente na eficiência de cloreto de potássio.
- Áreas com menor variabilidade espacial dos atributos do solo resultam em maior produtividade de grãos de soja e maior eficiência de superfosfato simples e cloreto de potássio.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, J.J.B.; CABRERA, M.G.; IBRAS, R.F.; GONZÁLEZ, J.D.; CHAMORRO, S.M.; ESCOBAR, J. Variabilidade espacial da produtividade, perdas na colheita e lucratividade da cultura de soja. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v.10, n.1, p.27-46, 2018.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK,

J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v.86, p.237-245, 2006.

BAYER, C., MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A., SILVA, L.S., CANELLAS, L.P., CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ed. revisada e atualizada, Porto Alegre: Metropole, p.7-18, 2008.

BITTAR, I.M.B.; FERREIRA, A.S.; CORRÊA, G.F. Influência da textura do solo na atividade microbiana, decomposição e mineralização do carbono de serapilheira de sítios do bioma cerrado sob condições de incubação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.29, n.6, p.1952-1960, 2013.

BOTTEGA, E.L.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M.; SANTOS, N.T.; SOUZA, C.M.A. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja no cerrado brasileiro. **Revista Agrarian**, Dourados, v.6, n.20, p.167-177. 2013.

CARNEIRO, J.S.S.; FARIA, A.J.G.; FIDELIS, R.R.; SILVA NETO, S.P.; SANTOS, A.C.; SILVA, R.R. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no cerrado. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v.17, n.3, p.38-49, 2016a.

CARNEIRO, J.S.S.; SANTOS, A.C.M.; FIDELIS, R.R.; SILVA NETO, S.P.; SANTOS, A.C.; SILVA, R.R. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v.14, n.2, p.10-21, 2016b.

CARVALHO, P.S.M.; SILVA, S.A.; PAIVA, A.Q.; SODRÉ, G.A.; LIMA, J.S.S. **Revista Engenharia na Agricultura**; Viçosa, v.26, n.2, p.178-189, 2018.

CONAB. Séries Históricas: Soja.
Disponível em: <http://www.conab.gov>.

br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos. Acesso em: 16 abr2019.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P. Sistema de produção e eficiência agrônoma de fertilizantes. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Eds.). Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: contexto mundial e práticas de suporte. Piracicaba: **International Plant Nutrition Institute**, v.1, p.229-279, 2010.

DALCHIAVON, F.C.; RODRIGUES, A.R.; LIMA, E.S. de; LOVERA, L.H.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.16, n.2, p.144-154, 2017.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja – região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261p. (Sistemas de Produção / Embrapa Soja, ISSN 2176- 2902; n.15).

MATTIONI, N.M.; SCHUCH, L.O.B.; VILLELA, F.A. Variabilidade espacial e efeito de atributos químicos de um Latossolo na população de plantas e produtividade da cultura da soja. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.19, n.1, p.20-32, 2013.

MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. Química e Mineralogia do solo: Parte I- Conceitos Básicos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 695p. 2009.

MONTEBELLER, C.; CEDDIAS, M.B.; CARVALHO, D.F.; VIEIRA, S.R.; FRANCO, E.L.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, p.426-435, 2007.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; JORDÃO, L.T. Adubação potássica na soja: cuidados no balanço de nutrientes. Informações Agrônomicas, Piracicaba: **International Plant Nutrition Institute**, n.143, p.1-10. 2013.

- R Core Team. R: language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Viena, Austria, 2013.
- REETZ JR. H.F. Precision farming as an instrument for fertilizer Best management practices. In: PROCHNOW, L.I., CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Eds.). Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: culturas. Piracicaba: **International Plant Nutrition Institute**, v.3, p.199-214, 2010.
- ROGER, A.; LIBOHOVA, Z.; ROSSIER, N.; JOOST, S.; MALTAS, A.; FROSSARD, E.; SINAJ, S. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. **Geoderma**, v.217-218, p.26-36, 2014.
- RICHART, A.; PICCIN, A.L.; KONOPATZKI, M.R.S.; KAEFER, K.A.C.; MORATELLI, G.; KAEFER, J.E.; ECCO, M. Análise espaço-temporal de atributos químicos do solo influenciados pela aplicação de calcário de cloreto de potássio em taxa variável. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v.15, n.4, p.391-400, 2016.
- SANTOS, H.G. DOS; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. DOS; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. revisada e ampliada. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.il.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- VICENTE, G.C.P.; ARAUJO, F.F. Uso de indicadores microbiológicos e de fertilidade do solo em áreas de pastagens. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.1, p.137-146, 2013.
- ZONTA, J.H.; BRANDÃO, Z.N.; MEDEIROS, J.C.; SANA, R.S.; SOFITTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.6, p.595-602, 2014.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of some physical properties of the soil. In: Hillel, D. ed. *Applications of soil physics*, New York: Academic Press, p.319-344, 1980.