

Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e da produtividade de soja em área de lavoura comercial

Spatial variability of soil chemical attributes and soybean productivity in commercial agriculture area

Pedro Henrique da Silva Monteiro¹, Alcir José Modolo¹, José Ricardo da Rocha Campos¹, Danielli Batistella², Larisse Medeiros Gonçalves⁵, Luana Santos dos Santos⁶

1. Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Pato Branco, Paraná, Brasil; 2. Departamento de Agrimensura, UTFPR – Pato Branco, Paraná, Brasil; 3. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional (PPGDR), UTFPR – Pato Branco, Paraná, Brasil.

Monteiro, P. H. da S.
<https://orcid.org/0000-0002-4951-4235>
phmonteiro7@gmail.com

Modolo, A. J.
<https://orcid.org/0000-0002-4796-8743>
alcir@utfpr.edu.br

Campos, J. R. da R.
<https://orcid.org/0000-0002-5162-3158>
jrcampos@utfpr.edu.br

Batistella, D.*
<https://orcid.org/0000-0002-4379-7537>
batistella@utfpr.edu.br

Gonçalves, L. M.
<https://orcid.org/0000-0002-8546-3244>
larisse@alunos.utfpr.edu.br

Santos, L. S. dos
<https://orcid.org/0000-0001-5771-9882>
lu-santosdosantos@hotmail.com

* Autora correspondente: Via do Conhecimento, 390 - 1, Bloco L, Sala 01 - Fraron, Pato Branco - PR, 85503-390.

Resumo: O conhecimento acerca da distribuição dos atributos químicos e produtivos da lavoura é fundamental para identificar as áreas com melhores e piores condições de fertilidade, tornando possível a aplicação de correções localizadas, e assim, aumentar a eficiência produtiva. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dos componentes de rendimento da soja em sistema plantio direto, durante o seu desenvolvimento. O estudo foi realizado em área de lavoura comercial, localizada no município Pato Branco – PR. Primeiramente, estabeleceu-se uma grade amostral de 50 x 50 m, com 59 pontos, na qual foram realizadas coletas de amostras de solo para análises químicas, bem como dos componentes de rendimento da soja para compreender a distribuição espacial dessas variáveis. Dos elementos analisados, a maioria apresentou dependência espacial, com exceção do P que demonstrou efeito pepita puro. A área em estudo apresentou boas condições químicas, especialmente na porção leste, onde ocorreram os maiores níveis de MO, K, Ca, pH, V% e menor teor de Al. Todos os componentes de rendimento da soja expressaram dependência espacial moderada. A maior fertilidade e produtividade na porção leste da paisagem pode estar associada ao processo de aggradação que, por sua vez, consiste em áreas de relevo concavo e que recebe produto da erosão de áreas mais elevadas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Fertilidade do solo; Geoestatística.

Abstract: Knowledge about the distribution of the chemical and productive attributes of the crop is essential to identify the areas with the best and worst fertility conditions, making it possible to apply localized corrections, and thus increase productive efficiency. In this sense, the objective of this work was to evaluate the spatial variability of soil chemical attributes and soybean yield components in a direct planting system, during its development. The study was carried out in a commercial farming area, located in the municipality of Pato Branco – PR. Firstly, a 50 x 50 m sampling grid was established, with 59 points, in which soil samples were collected for chemical analysis, as well as soybean yield components to understand the spatial distribution of these variables. Of the elements analyzed, the majority showed spatial dependence, with the exception of P, which demonstrated a pure nugget effect. The area under study presented good chemical conditions, especially in the eastern portion, where the highest levels of MO, K, Ca, pH, V% and lowest Al content occurred. All soybean yield components expressed moderate spatial dependence. The greater fertility and productivity in the eastern portion of the landscape may be associated with the aggradation process which, in turn, consists of areas of concave relief and which receives the product of erosion from higher areas.

Keywords: Precision agriculture; Soil fertility; Geostatistics.

INTRODUÇÃO

O mundo vem passando por mudanças sociais e econômicas intensas que têm impactado, especialmente, o setor agrícola na demanda por grãos, fibras e forragem. Neste cenário, é natural o aumento da pressão sobre os insumos agrícolas, o que eleva preço da safra e também os riscos de perda. Como alternativa para reduzir os riscos, adoção de metodologia que proporcionem maior eficiência ao sistema produtivo tem sido a melhor estratégia e, para se alcançar tal objetivo, um correto diagnóstico das condições de solo e planta é fundamental. Projeções demonstram que a produção agrícola atual deve aumentar em 70% até 2050, considerando a crescente demanda por alimentos de alta qualidade e ambientalmente corretos (MARTOS *et al.*, 2021; SAATH; FACHINELLO, 2018).

Diante disso, as ferramentas aplicadas a Agricultura de Precisão vêm sendo pesquisadas e aprimoradas de modo intensivo nas últimas décadas e seu objetivo principal é identificar variações no ambiente produtivo, auxiliando na tomada de decisão quanto o uso mais eficiente de insumos e equipamentos. Essas ferramentas se tornaram essenciais para o gerenciamento de propriedades, tendo em vista que promovem ganho em produtividade, em conservação ambiental e o uso mais racional de insumos (NOETZOLD *et al.*, 2019). Uma das características mais importantes da Agricultura de Precisão é o seu caráter multidisciplinar, apresentando ferramentas sofisticadas para análise da variabilidade espacial e temporal de parâmetros específicos da cultura, do clima e do solo, visando a máxima eficiência produtiva (REGHINI; CAVICHIOLO, 2020).

Ao pensar essa demanda, justaposta com a produção da soja (*Glycine max* L.), que é a espécie agrícola que mais expandiu nas últimas três décadas, ocupando aproximadamente 56% das áreas cultivadas com grão em todo território nacional e com grande contribuição no crescimento de atividades como avicultura e suinocultura, existem diversos fatores que podem ser limitantes ao seu desenvolvimento e produção, entre eles, a deficiência química e compactação do solo (TRINDADE *et al.*, 2019).

As expectativas nacionais sobre o cultivo são de continuidade do bom desempenho, sustentado pelas

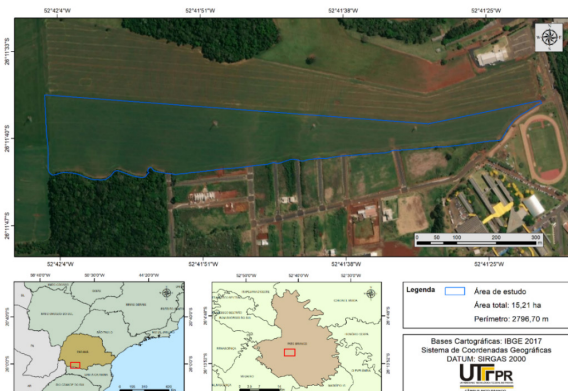
fortes demandas externas, câmbio favorável e bons preços da soja, formatando-se em um panorama propício para que os produtores possam investir mais no pacote tecnológico e nos cuidados no manejo das lavouras (CONAB, 2020). Em vista disso, considera-se que tecnologias e meios amparados pela Agricultura de Precisão possam incrementar e favorecer a produção de soja, otimizando a matéria-prima e reduzindo custos (HAMMERSCHMIDT *et al.*, 2021).

É nessa perspectiva que se consolida a justificativa deste trabalho, conciliando ciência, tecnologias e as demandas, a fim de construir pontes para buscar soluções. Dito isto, este estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dos componentes de rendimento da soja em sistema plantio direto, durante o ciclo fenológico da cultura da soja.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido durante a safra agrícola de 2019/2020 em área de lavoura comercial de 15,21 ha, localizada no município de Pato Branco, na região Sudoeste do Paraná, situada entre as latitudes 26°11'36.61"S e 26°11'40.73"S, longitudes 52°42'4.95"O e 52°41'23.84"O (Figura 1), com altitude média de 796,56 m.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



O clima do local é classificado como subtropical úmido do tipo Cfa de acordo com a classificação de

Köppen. No verão apresenta temperaturas superiores a 22 °C e inferiores a 18 °C no inverno (OLIGINI *et al.*, 2021).

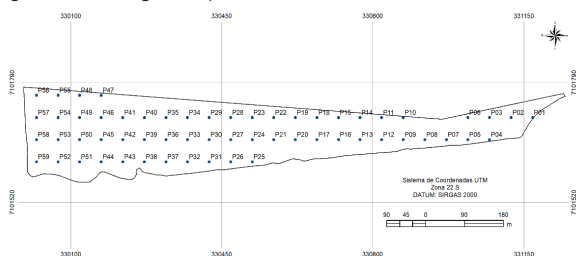
O solo da região é caracterizado como Latossolo Vermelho Distroférrico típico, com textura muito argilosa e relevo suave ondulado (PAULETTI; MOTTA, 2019). Na área foi utilizado o plantio direto como técnica de cultivo, sistema que é empregado há mais de 20 anos neste local. A aveia preta (*Avena strigosa Schieb*) foi utilizada como planta de cobertura no período de inverno.

Foi utilizado a cultivar PIONEER 95R51[®], semeada no dia 11 de outubro de 2019 e colhida em 6 de fevereiro de 2020. Empregou-se o espaçamento de 0,45 m entre linhas e 15,5 sementes por metro linear. No momento da semeadura foram aplicadas 145 kg ha⁻¹ de NPK (8-40-00), como adubação de base nas linhas de plantio, e 31 dias após a semeadura foi realizada a aplicação a lanço de 80 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl).

Na região edafoclimática que compreende o município de Pato Branco, o ciclo da cultivar PIONEER 95R51[®] varia de 115 a 120 dias. Quando o plantio é realizado entre setembro e outubro, recomenda-se a semeadura de 320.000 a 390.000 plantas por hectare. A cultivar é tolerante ao Glifosato, apresenta superprecocidade, elevado potencial produtivo, hábito de crescimento indeterminado, tolerante ao acamamento, além de apresentar resistência a chuva durante a colheita (PIONEER, 2019).

Para analisar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, primeiramente, com auxílio do receptor GNSS L1 Promark 3[®], foi realizado a delimitação e o georreferenciamento da lavoura. Posteriormente, no software ArcGIS 10.5[®], foi determinada uma malha amostral de 50 x 50 m, com 59 pontos amostrais (Figura 2).

Figura 2 – Malha regular de pontos amostrais.



As amostras de solo foram coletadas antes da semeadura da soja, onde cada ponto amostral foi rastreado com o receptor GNSS L1 Promark 3[®], que operou durante 5 minutos em cada ponto, alcançando uma precisão de aproximadamente 0,30 m. Em um raio de 5 m de cada ponto georreferenciado foram coletadas 5 amostras simples de solo na profundidade de 0 a 20 cm para formação de uma amostra composta.

As amostras foram encaminhadas para o laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Pato Branco, onde foram realizadas as análises do pH, K, Ca, Mg, Al, (H + Al) e P. A partir destes, foram calculados a SB, CTC e V% (SILVA *et al.*, 2017).

Para avaliar os componentes de rendimento da soja, foi realizada a contagem manual do número de vagem por planta (NV planta⁻¹) e do número de grão por planta (NG planta⁻¹) e, com esses valores, foi possível estimar o número de sementes por vagem (NS vagem⁻¹).

Após a debulha manual das vagens, foi determinada a massa de mil grãos por meio de oito amostras de 100 grãos tomadas ao acaso, de cada ponto amostral, as quais foram submetidas à pesagem e correção da umidade para 13%. Para estimar a produtividade, considerou-se os grãos correspondentes das 10 plantas coletadas de cada ponto amostral, os quais foram pesados com auxílio de balança de precisão e a umidade da amostra corrigida para 13%.

Os dados foram submetidos a hipótese de normalidade dos dados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. Para caracterizar a distribuição espacial dos atributos químicos do solo e da produtividade da soja, os dados obtidos foram submetidos a análise geoestatística, através da modelagem do semivariograma, como auxílio do software GS+ 7.0[®].

Os modelos foram definidos considerando o maior coeficiente de determinação (r^2), menor soma de quadrados de resíduos (SQR) e o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Foi utilizada a metodologia de Cambardella *et al.* (1994) para avaliar o índice de dependência espacial (IDE), através da relação entre o efeito pepita (C0) e o patamar (C0 + C), na qual a dependência espacial é classificada como forte ($\leq 25\%$), moderada (entre 25% e 75%) e fraca ($\geq 75\%$).

A partir da verificação de dependência espacial para os dados analisados, foi realizado o procedimento de krigagem ordinária para estimar valores em locais não amostrados, de forma não tendenciosa e com variância mínima (MACHADO *et al.*, 2022). Com base no processo de krigagem, foram gerados os mapas de distribuição espacial para cada variável estudada, com auxílio do software ArcGIS 10.5[®].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a classificação do coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), foi observado que apenas a variável pH apresentou baixo CV (<12%). As variáveis MO, Ca, Mg e V% apresentaram CV variando de 12 a 24%, enquanto que para o P, K e Al foi verificado um CV alto (>24%) (Tabela 1).

Tabela 1 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo em lavoura comercial de soja: MO (g dm⁻³), P (mg dm⁻³), K (cmol_c dm⁻³), pH (CaCl₂), Al (cmol_c dm⁻³), Ca (cmol_c dm⁻³), Mg (cmol_c dm⁻³) e V%.

Estatística	Variáveis químicas do solo							
	MO	P	K	pH	Al	Ca	Mg	V%
Média	50,68	12,99	0,46	4,95	0,11	5,47	1,76	60,94
Mediana	49,59	11,85	0,44	5,00	0,00	5,50	1,70	62,77
Mínimo	29,48	4,08	0,23	4,00	0,00	3,10	1,00	41,30
Máximo	67,01	34,45	0,80	5,70	0,50	7,90	2,80	76,39
DP	7,41	5,75	0,14	0,41	0,15	1,00	0,35	8,73
CV	14,61%	44,30%	30,38%	8,36%	133,61%	18,37%	19,85%	14,33%
Assimetria	0,07	1,18	0,59	-0,36	1,13	-0,02	0,39	-0,42
Curtose	0,41	2,13	-0,27	-0,81	-0,02	-0,20	0,55	-0,83
p-valor	0,15ns	0,01	0,01	0,01	0,01	0,15ns	0,05ns	0,04

^{ns} não significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Fonte: autores (2021).

Em relação aos coeficientes de assimetria e curtose, notou-se que as variáveis MO, K, pH, Ca, Mg e V% evidenciaram valores próximo de zero, mostrando que os dados tendem a distribuição normal (GREGO *et al.*, 2012; MION *et al.*, 2012). Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov, indicaram que apenas as variáveis MO, Ca e Mg apresentaram distribuição normal. Para os outros atributos químicos avaliados, notou-se que o p-valor foi inferior ao nível de significância adotado (5%), rejeitando-se assim a hipótese de normalidade.

A maioria dos atributos químicos do solo expressaram dependência espacial. A única exceção foi verificada para a variável P que apresentou Efeito Pepita Puro (EPP), indicando a ausência total de dependência espacial, deste modo, a distribuição espacial do P na área de estudo é aleatória e as amostras são independentes para a menor distância entre os pontos amostrados (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos do solo em lavoura comercial de soja em Pato Branco – PR.

Variáveis químicas do solo	Parâmetros	Parâmetros					
		C0	C0+C	a (m)	IDE	r ²	SQR
MO	Exponencial	28,70	61,75	432,00	Moderada	0,745	188,00
P	EPP	-	-	-	-	-	-
K	Exponencial	0,0040	0,0205	165,90	Forte	0,874	0,000051
pH	Esférico	0,0052	0,2684	668,00	Forte	0,961	0,003115
Al ³⁺	Esférico	0,0060	0,0304	720,00	Forte	0,972	0,000019
Ca	Esférico	0,3710	1,3340	668,00	Moderada	0,835	0,232
Mg	Exponencial	0,0316	0,1282	348,00	Forte	0,963	0,00011
V%	Esférico	10,30	112,40	737,00	Forte	0,966	408,00

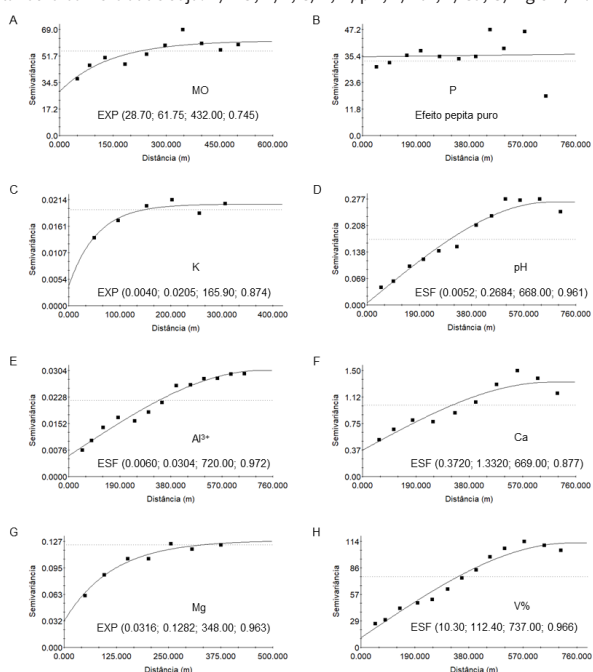
Efeito pepita (C0); Patamar (C0+C); Alcance (a); Índice de Dependência Espacial (IDE); Coeficiente de determinação (r²); Soma de quadrados do resíduo (SQR). Fonte: Autores (2021).

A elevada variabilidade espacial do P na área em questão ocorreu, provavelmente, em decorrência da adubação localizada na linha de plantio e da forte interação deste elemento com os colóides do solo, o que faz com que este tenha baixa mobilidade vertical. Esta peculiaridade da adubação fosfatada, faz com que o P se acumule nas camadas superficiais, formando “manchas” de P que são difíceis de serem detectadas e/ou mapeadas.

Deste modo, pode-se inferir que essa é a provável justificativa para a existência de manchas de P na lavoura e a grande variação em pequenas distâncias, o que impossibilitou modelar o semivariograma e encontrar dependência espacial para esse elemento. Corroborando com este fato, uma pesquisa sobre a variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo em áreas de plantio direto de soja e Latossolo Vermelho-Escuro com textura média a argilosa, verificou que o P expressou alto CV, apresentando também EPP (ALVES *et al.*, 2014).

Os semivariogramas ajustados mostraram patamar definido, demonstrando que a hipótese intrínseca foi satisfeita, com exceção para a variável P (Figura 3). Considerando a classificação de Cambardella *et al.* (1994), verificou-se que as variáveis K, pH, Al, Mg e V% apresentaram forte dependência espacial, enquanto, que a MO e o Ca expressaram dependência espacial moderada (Tabela 2).

Figura 3 – Semivariogramas ajustados para os atributos químicos do solo em lavoura comercial de soja: A) MO, B) P, C) K, D) pH, E) Al³⁺, F) Ca, G) Mg e H) V%.



Para as variáveis MO, K, Mg o melhor modelo de semivariograma ajustado foi o exponencial, cujos coeficientes de determinação (r^2) foram, respectivamente: 0,745, 0,874 e 0,963 (Figuras 3A, 3C e 3G). Quanto ao pH, Al, Ca e V% o modelo mais adequado ao ajuste foi o esférico, apresentando os seguintes r^2 : 0,961, 0,972, 0,877 e 0,966, respectivamente (Figuras 3D, 3E, 3F e 3H). Os modelos ajustados (esférico e exponencial) são coerentes, uma vez que, em muitos resultados de pesquisas relacionadas a variabilidade dos atributos químicos do solo, apresentam estes modelos com maior ocorrência (MATIAS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2017; DALCHIAVON *et al.*, 2017).

Em relação ao alcance da dependência espacial, notou-se que os menores valores ocorreram para as variáveis MO (432,00 m), K (165,90 m) e Mg (348,00 m) (Figuras 3A, 3C e 3G), respectivamente. Os maiores alcances foram verificados para os atributos pH (668,00 m), Al (720,00 m), Ca (669,00 m) e V% (737,00 m) (Figuras 3D, 3E, 3F e 3H), respectivamente. O alcance define a distância máxima ou o raio máximo em que os valores de um determinado atributo apresentam dependência espacial, e quando os limites são maiores que o alcance, a variável passa a apresentar comportamento espacial completamente aleatório (LOPES *et al.*, 2020; DALCHIAVON *et al.*, 2017).

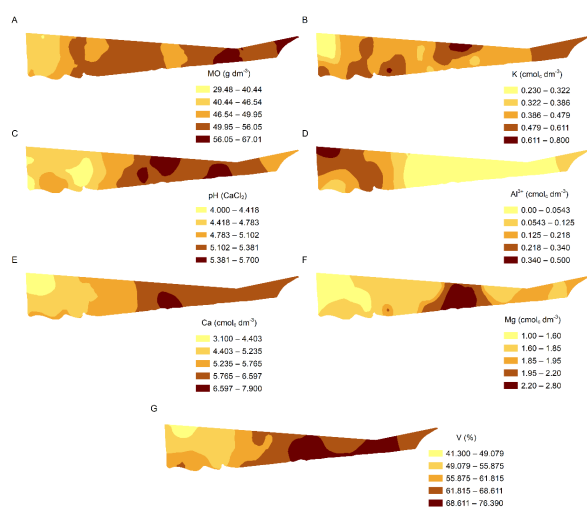
A MO apresentou média de $50,68 \text{ g dm}^{-3}$, com valor mínimo de $29,48 \text{ g dm}^{-3}$ e máximo de $67,01 \text{ g dm}^{-3}$. O maior perímetro da lavoura demonstrou teores de MO acima de $46,54 \text{ g dm}^{-3}$ (Figura 4A). Além da influência do clima ameno sobre a manutenção na MO no meio, o sistema plantio direto, utilizado como sistema de cultivo na área por mais de 20 anos, são os principais responsáveis pelos elevados teores de MO.

O P apresentou valor médio de $12,99 \text{ mg dm}^{-3}$, a qual é considerada alta para a cultura da soja (Pauletti; Motta, 2019), contudo, em razão da alta variabilidade desse nutriente na lavoura, foram detectadas amostras adjacentes com valores muito contrastantes, fato este que foi comprovado pela descontinuidade espacial desse nutriente, visto que sua distribuição ocorreu de forma aleatória, justificada pela própria característica deste nutriente.

O K apresentou média de $0,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com valor mínimo de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e máximo de $0,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 4B). Para esse nutriente, obteve-se o valor médio considerado alto para a cultura da soja (PAULETTI; MOTTA, 2019). Notou-se também que a maior parte da lavoura foi compreendida por teores mais elevados ($>0,386 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto os menores valores ($<0,386 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ocorrem em menor proporção na área de cultivo.

Para o pH em CaCl_2 foi verificado valor médio de 4,95, com valor mínimo de 4,0 e máximo de 5,7. Notou-se que na maior porção da lavoura foi evidenciado teores de pH entre 4,78 e 5,7 (Figura 4C). Percebeu-se também que a maior parte da lavoura apresentou valores de pH considerados médios e altos (PAULETTI; MOTTA, 2019). Para Nolla *et al.* (2020), o intervalo de pH (CaCl_2) que permite um melhor aproveitamento dos nutrientes no solo e a insolubilização do alumínio tóxico, está compreendido entre 5,4 e 5,8.

Figura 4 – Mapa de distribuição espacial dos atributos químicos do solo em lavoura comercial de soja: A) MO, B) K, C) pH, D) Al^{3+} , E) Ca, F) Mg G) V%.



O Al apresentou média de $0,11 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com valor mínimo de $0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e máximo de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, valores estes que não interfere significativo no desenvolvimento da cultura (PAULETTI; MOTTA, 2019). Para o alumínio trocável, verificou-se valores baixos (Pauletti; Motta, 2019), onde a maior parte da área de cultivo apresentou valores iguais ou próximos a zero (Figura 4D). Foi observado também que os menores teores

de Al coincidiram com as porções da paisagem onde foram observados os maiores valores de pH e maior saturação por base, visto que esses atributos tendem a apresentar relação inversa.

Em relação a saturação por base, foi verificado valor médio de 60,94%, com mínimo de 41,30% e máximo de 76,39%. Para esse atributo, observou-se que a maior porção da área expressou valores acima de 55,88% (Figura 4G), coincidindo com os perímetros de maior pH e menor teor de Al.

O Ca expressou média de $5,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com valor mínimo $3,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de máximo de $7,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os maiores teores de Ca foram constatados nos locais onde ocorreram os maiores níveis de MO, pH e V%, coincidindo também com os perímetros com menor nível de Al.

Para o Mg foi encontrado o valor médio de $1,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com mínimo $1,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de máximo de $2,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Para esse elemento, notou-se que na maior porção da lavoura foi evidenciado teores acima de $1,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Também foi constatado que os maiores valores de Mg ocorreram nas áreas que apresentaram maior MO, pH, V% e com menor nível de alumínio trocável.

De modo geral, foi possível constatar que a área da lavoura apresentou boas condições químicas para o cultivo da soja, especialmente na porção leste, mais baixa da paisagem e com feições de ambiente de agradação, onde foram observados os maiores níveis de MO, K, Ca, pH, V% e menor teor de Al. Também, é importante ressaltar a possibilidade de identificar os perímetros em que podem ser realizadas correções localizadas a fim de homogeneizar as condições de fertilidade do solo e permitir melhor resposta na produtividade da lavoura.

As variáveis número de vagem por planta (NV), número de grãos por planta (NG), número de sementes por vagem (NS) e peso de mil grãos (PMG) apresentaram baixo CV ($<12\%$), enquanto que para a produtividade foi registrado CV médio (12 a 24%) (WARRICK; NIELSEN, 1980). De forma geral, os valores de CV encontrados (baixo e médio) indicam que os componentes avaliados expressaram baixa e média variabilidade na área de cultivo (Tabela 3).

Tabela 3 – Estatística descritiva dos componentes de rendimento da soja em lavoura comercial: vagem por planta (NV Planta⁻¹), número de grãos por planta (NG Planta⁻¹), número de sementes por vagem (NS Vagem⁻¹) e peso de mil grãos (PMG) e produtividade (Prod).

Parâmetros	Componentes de rendimento da soja				
	NV Planta-1	NG Planta-1	NS Vagem-1	PMG	Prod (kg ha ⁻¹)
Média	35,65	92,46	2,59	180,90	5649,58
Mediana	35,20	91,30	2,59	180,14	5606,02
Mínimo	28,00	75,90	2,46	166,73	3385,82
Máximo	44,50	118,20	2,73	197,52	7769,95
DP	3,65	9,72	0,06	8,25	815,09
CV	10,24%	10,52%	2,34%	4,56%	14,43%
Assimetria	0,24	0,43	0,17	0,17	0,25
Curtose	-0,42	-0,23	-0,47	-0,81	0,76
p-valor	0,150ns	0,150ns	0,150ns	0,150ns	0,150ns

^{ns} não significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Fonte: autor (2021).

Para todas as variáveis analisadas foi constatado que os coeficientes de assimetria e curtose demonstraram valores próximos a zero, indicando que os dados tendem a distribuição normal (GREGO *et al.*, 2012; MION *et al.*, 2012). Estes resultados foram confirmados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância, onde foi constatado que todos os componentes apresentaram distribuição normal.

Os modelos de ajustes para os semivariogramas exibiram patamar bem definido, confirmando que a hipótese intrínseca foi satisfeita para todos as variáveis avaliadas (Figura 6). De acordo com Cambardella *et al.* (1994), notou-se que todos os componentes de rendimento apresentaram Índice de Dependência Espacial (IDE) moderado (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros dos semivariogramas para os componentes de rendimento da cultura da soja cultivada em lavoura comercial: Efeito pepita (C0); Patamar (C0+C); Alcance (a); Índice de Dependência Espacial (IDE); Coeficiente de determinação (r²); Soma de quadrados do resíduo (SQR).

Componentes de rendimento da soja	Parâmetros						
	Modelo	C0	C0+C	a (m)	IDE	r ²	SQR
NV Planta-1	Esférico	7,95	17,43	745,00	Moderada	0,909	11,40
NG Planta-1	Esférico	59,50	124,40	818,00	Moderada	0,899	584,00
NS Vagem-1	Esférico	0,00227	0,004554	625,00	Moderada	0,695	2,6E-06
PMG	Esférico	35,70	89,65	755,00	Moderada	0,874	574,00
Prod (kg ha ⁻¹)	Esférico	346000	846600	616,00	Moderada	0,934	2,091

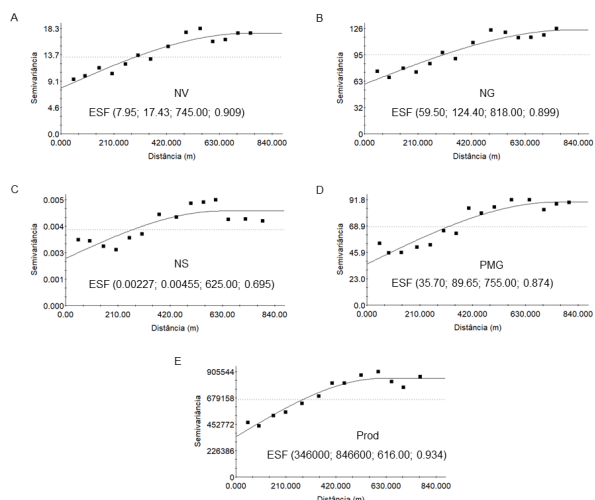
Para todas as variáveis, o melhor modelo de semivariograma ajustado foi o esférico, onde os maiores r² foram verificados para os componentes Prod (0,934), NV (0,909), NG (0,899) e PMG (0,874). O menor valor foi evidenciado para o NS (0,695). Resultados semelhantes foram verificados no trabalho realizado por Dalchiavon *et al.* (2011), onde a maioria dos componentes de rendimento da soja apresentaram o modelo esférico como melhor opção de ajuste e expressaram dependência espacial moderada.

Para o alcance, verificou-se que os menores valores ocorreram para as variáveis Prod (616,00 m) e NS (625,00m). Os componentes NG (818,00 m), PMG (755,00 m) e NV

(745,00 m) apresentaram os maiores alcances. O alcance apresenta grande importância no planejamento e avaliação da pesquisa, determinando o limite da dependência espacial e contribuindo na definição dos procedimentos amostrais (LONDERO *et al.*, 2020).

Neste âmbito, os valores de alcance podem influenciar na qualidade das estimativas realizadas por meio de interpolação por krigagem. Portanto, estimativas executadas com maiores alcances tentem a ser mais confiáveis para fins práticos, uma vez que resultam em mapas que melhor representam a realidade do perímetro estudado (DALCHIAVON *et al.*, 2017).

Figura 5 – Semivariogramas ajustados para os componentes de rendimento da cultura da soja: A) número de vagens por planta (NV Planta⁻¹), B) Número de grãos por planta (NG Planta⁻¹), C) Número de sementes por vagem (NS Vagem⁻¹), D) Peso de mil grãos (PMG) e E) Produtividade (Prod).

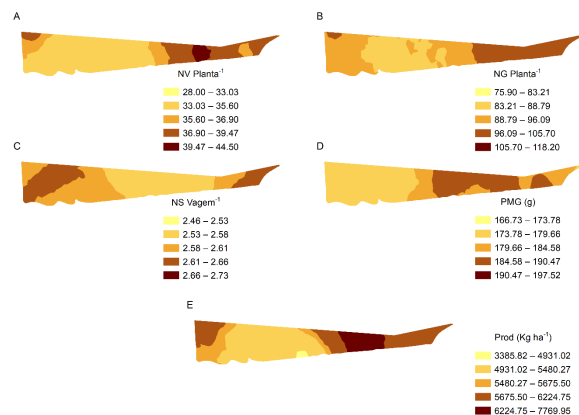


Para o componente NV por planta foi verificado valor médio de 35,65, com mínimo de 28,00 e máximo de 44,50. Notou-se que a maior parte da área apresentou valores acima de 33,03 (Figura 6A). Prestes Junior (2020) em um experimento realizado com a mesma cultivar de soja (PIONEER 95R51[®]) em um Latossolo Vermelho com condições de cultivo semelhantes, registrou média de 48,88 vagens por planta.

A variável NG por planta apresentou média de 92,46, com valor mínimo de 75,90 e máximo de 118,20. Observou-se ainda que na maior parte da lavoura foi verificado valores acima de 88,79, principalmente na porção leste, onde foi constatado as melhores condições de fertilidade do solo (Figura 6B).

O componente NS por vagem apresentou média de 2,59, valor mínimo de 2,46 e máximo de 2,73. Esta variável, apresentou a menor variabilidade na lavoura, quando comparado aos outros componentes de rendimento (Figura 6C). Este comportamento é evidenciado em muitas pesquisas, apresentando em média dois grãos por vagem, dependendo das propriedades genéticas de cada variedade associada as condições de cultivo (SILVA *et al.*, 2017).

Figura 6 – Mapa de distribuição espacial dos componentes de rendimento da soja cultivada em lavoura comercial: A) número de vagens por planta (NV Planta⁻¹), B) Número de grãos por planta (NG Planta⁻¹), C) Número de sementes por vagem (NS Vagem⁻¹), D) Peso de mil grãos (PMG) e E) Produtividade (Prod).



Para o componente PMG foi verificado o valor médio de 180,90 g, com mínimo de 166,73 g e máximo de 197,52 g. Observou-se que a maior porção da lavoura expressou valores acima de 179,66 g, especialmente nos perímetros leste, coincidindo com os componentes NV, NG e Prod. É importante destacar que na porção leste da paisagem, nas feições de agradação, tendem a acumular nutrientes em virtude da erosão laminar predominante nas partes elevadas da lavoura.

Para a variável Prod foi mensurado valor médio de 5.649,58 kg ha⁻¹, com mínimo de 3.385,82 kg ha⁻¹ e máximo de 7.769,95 kg ha⁻¹. Notou-se também que em maior parte da lavoura foi constatado valores acima da produtividade média da região (5.480,27 kg ha⁻¹) (Figura 6E). A produtividade apresentou a maior variação, quando comparado aos demais componentes de rendimento, com amplitude de 4.384,13 kg ha⁻¹.

O valor médio para esse componente está acima da produtividade média mensurada para o Estado do Paraná (3.925 kg ha⁻¹) na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020). Neste contexto, Oligini *et al.* (2021) em pesquisa executada em Dois Vizinhos, PR, com solos e clima semelhantes, empregando três cultivares de soja (P95R51[®], P95Y52[®] e P96Y90[®]) durante a safra de 2016/2017, registrou produtividade média de 5.881,09 kg ha⁻¹. Com isso, pode-se inferir que os resultados de produtividade estimados para esta pesquisa estão de acordo com os níveis obtidos para mesma região.

Cabe ressaltar que os resultados das interpolações demonstraram a relação dos componentes de rendimento da soja com as variáveis químicas do solo, onde foi verificado que na área leste da propriedade, que apresentou melhores condições de fertilidade, também foram evidenciados os maiores valores de NV, NG, PMG e Prod. A partir disso, deve-se considerar que mapear os perímetros com maior e menor produtividade são procedimentos essenciais, pois possibilita melhorias pontuais na lavoura, tornando o processo produtivo mais eficiente.

CONCLUSÃO

Os atributos químicos do solo, com exceção do P, apresentaram dependência espacial. O K, pH, Al, Mg e V% demonstraram forte dependência espacial, enquanto que a MO e o Ca expressaram dependência espacial moderada. De forma geral, a área em estudo apresentou boas condições de fertilidade, especialmente na porção leste, onde ocorreram os maiores níveis de MO, K, Ca, pH, V% e menor teor de Al. Os maiores teores destes elementos na porção leste podem estar associados ao processo de agradação, característico de ambientes mais baixos e com relevo concavo e que recebe sedimentos provenientes das partes mais elevadas da paisagem.

Todos os componentes de rendimento da soja (NV, NG, NS, PMG e Prod) apresentaram dependência espacial moderada. Os maiores valores de NV, NG, PMG e Prod ocorreram na porção leste da lavoura, coincidindo com os perímetros que evidenciaram melhores níveis de fertilidade do solo. A compreensão da distribuição dos atributos químicos e produtivos da lavoura é fundamental para identificar as áreas com melhores e piores condições de fertilidade, tornando possível a aplicação de correções localizadas, aumento a eficiência produtiva.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Alves SM de F, Queiroz DM de, Alcântara GR de, Reis EF dos (2014) Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. *Bioscience Journal* 30(supl. 1):22-30.
- Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal* 58(5):1501-1511. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x
- CONAB – Companhia Nacional De Abastecimento. (2020) Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília: Disponível: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/33690_71305588b650dfe376aa0011b986350b. Acessado em: 24 out. 2022.
- Dalchiavon FC, Carvalho M de P, Nogueira DC, Romano D, Abrantes FL, Assis JT de, Oliveira MS de (2011) Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 41(1):08-19. DOI: 10.5216/pat.v41i1.8351
- Dalchiavon FC, Rodrigues AR, Lima ES de, Lovera LH, Montanari R (2017) Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. *Revista de Ciências Agroveterinárias* 16(2):144-154. DOI: 10.5965/223811711622017144
- Grego CR, Rodrigues CAG, Nogueira SF, Gimenes FMA, Oliveira AD, Almeida CGFD, ... Demarchi JJADA (2012) Variabilidade espacial do solo e da biomassa epigea de pastagem, identificada por meio de geoestatística. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47(9):1404-1412. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900026
- Hammerschmidt JM, Calábria ZKP, Cremonesi MV (2021) Precision agriculture: soybean culture in South Brazil. *Scientia Agraria Paranaensis* 20(2):97-111. DOI: 10.18188/sap.v20i2.24946
- Londero R, Oliveira RB de, Nascimento JM do, Arcoverde SNS, Secretti ML (2020) Dependência espacial da fertilidade do solo sob plantio direto e suas relações com a produtividade da soja. *Caderno de Ciências Agrárias* 12(s/n):1-8. DOI: 10.35699/2447-6218.2020.25450
- Lopes KAL, Aguiar FIS, Oliveira IR de, Dantas JS (2020) Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo amarelo distrocoeso em diferentes densidades de amostragem. *Revista Científica Rural* 22(2):29-42. DOI: 10.30945/rcr-v22i2.3229
- Machado C, Gonçalves FV, Ribeiro A, Dalmas FB, Paranhos Filho A C (2022) Krigagem ordinária para predição de vazões em locais sem dados: proposta de nova metodologia. *Research, Society and Development*, 11(2), e54511225185-e54511225185. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25185
- Martos V, Ahmad A, Cartujo P, Ordoñez J (2021) Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences* 11(13):1-26. DOI: 10.3390/app11135911

- Matias SSR, Matos A, Landim J, Feitosa S, Alves MA, Silva R (2019) Recomendação de calagem com base na variabilidade espacial de atributos químicos do solo no Cerrado brasileiro. *Revista de Ciências Agrárias* 42(4):896-907. DOI: 10.19084/rca.17735
- Mion RL, Nascimento EMS, Lima Sales FA de, Silva SF da, Duarte JML, Sousa BM de (2012) Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. *Semina: Ciências Agrárias* 33(6):2057-2066. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n6p2057
- Noetzold R, Alves M de C, Júnior MMG, Goussain R de CS (2019) Variabilidade espacial da eficiência do uso de potássio e fósforo na cultura da soja 1. *Revista Engenharia na Agricultura* 27(6):529-541. DOI: 10.13083/reveng.v27i6.931
- Nolla, A, Alves EOS, Silva TG, Bordin AV (2020) Correção da acidez e disponibilização de fósforo e potássio em latossolo vermelho distrófico típico submetido à calagem incorporada e superficial. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(3), 2478-2487. DOI: 10.34188/bjaerv3n3-156
- Oligini KF, Batista WV, Lemes, ES, Silva EJD, Adami PF (2021) Sowing date and maturity groups on the economic feasibility of soybean-maize double summer crop system. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 59. DOI: 10.1590/1806-9479.2021.235472
- Pauletti V, Motta ACV (2019) Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. Viçosa, SBCS. 289p.
- PIONEER (2019) SOJA 95R51. Disponível em: <http://www.pioneersementes.com.br/soja/central-de-produtos/produtos/95r51>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- Prestes Junior JV (2020) Sucessão soja-milho safrinha em função do arranjo de épocas de semeadura e ciclos de maturação da soja (Tese Doutorado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- Reghini FL, Cavichioli FA (2020) Utilização de geoprocessamento na agricultura de precisão. *Revista Interface Tecnológica* 17(1):329-339. DOI: 10.31510/infav17i1.750
- Saath KCDO, Fachinello AL (2018) Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 56, 195-212. DOI: 10.1590/1234-56781806-94790560201
- Silva MCC, Andreotti M, Passos M de, Costa NR, Rocha Lima CG da (2017) Atributos químicos do solo e produtividade do feijoeiro de inverno sob plantio direto no cerrado de baixa altitude. *Revista Engenharia na Agricultura* 25(6):549-560. DOI: 10.13083/reveng.v25i6.724
- Trindade FS, Alves MC, Noetzold R, Andrade IC de, Pozza AAA (2019) Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. *Revista de Ciências Agrárias* 62(s/n):s/p. DOI: 10.22491/rca.2019.2928
- Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. *Applications of Soil Physics*, p.319-344. DOI: 10.1016/b978-0-12-348580-9.500