

RECYT

Año 18 / Nº 25 / 2016 / 62–69

Correlación y Dependencia Espacial de Atributos del Suelo, Índice de Clorofila y Productividad del Maíz

Correlation and Spatial Dependence of Soil Attributes, Index Chlorophyll and Corn Yield

Correlação e Dependência Espacial de Atributos do Solo, Índice de Clorofila e Produtividade do Milho

Davi M. Rocha^{1,*}, Eduardo G. Souza¹, Lúcia H. P. Nóbrega¹, Claudio L. Bazzi², Eloi Gasparin³

1 - Centro de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad del Oeste del Paraná, Campus Cascavel, Calle Universitaria 2096, Barrio Universitario, CP 85819-110, Cascavel-PR, Teléfono (+55 45)3220-3000

2 - Departamento de Computación, Universidad Tecnológica Federal del Paraná, Campus Medianeira, Calle Brasil 4232, Barrio Parque Independencia, CP85884-000, Medianeira-PR, Teléfono (+55 45) 3240-8000

3 - Instituto de Biodiversidad y Bosques, Universidad Federal del Oeste del Pará, Campus Tapajós, Calle Vera Paz s/n, Barrio Salé, CP 68035-110, Santarém-PA, Teléfono (+55 93)2101-4947

* E-mail: davimarcondesrocha@gmail.com

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo cuantificar la dependencia espacial de las propiedades químicas del suelo, índice de clorofila en las etapas V3, V6 y R1 y productividad de maíz, y analizar la correlación espacial entre ellas. Las propiedades del suelo fueron evaluadas en 2010 y 2011 y el índice de clorofila (con clorofilómetro) y la productividad en los años 2011 y 2012. Los atributos presentaron dependencia espacial, lo que permite la aplicación localizada. También se observó la existencia de correlación espacial entre atributos, demostrando la importancia de estudios en esta área, buscando identificar atributos que influyen en el desarrollo de la cultura.

Palabras clave: Agricultura de precisión; Clorofilómetro; Geoestadística; Interpolación; Mapas temáticos.

Abstract

This study aimed to quantify the spatial dependence of soil chemical properties, chlorophyll index in stages V3, V6 and R1 and corn yield, and analyze the spatial correlation between them. Soil properties were evaluated in 2010 and 2011 and the rate of chlorophyll (with chlorophyllometer) and productivity in the years 2011 and 2012. The studied attributes presented spatial dependence structure, allowing the site-specific management. It also observed the existence of spatial correlation between attributes, demonstrating the importance of studies in this area, identifying which attributes influence the development of culture.

Keywords: Precision agriculture; Chlorophyll meter; Geostatistics; Interpolation; Thematic maps.

Resumo

Este trabalho objetivou quantificar a dependência espacial de atributos químicos do solo, índice de clorofila em estádios V3, V6 e R1 e produtividade da cultura do milho, e analisar a correlação espacial entre estes. Foram avaliados atributos do solo nos anos 2010 e 2011 e índice de clorofila (com clorofilômetro) e produtividade nos anos de 2011 e 2012. Os atributos estudados apresentaram estrutura de dependência espacial, permitindo o manejo localizado. Também se observou a existência de correlação espacial entre os atributos, demonstrando a importância de estudos nesta área, identificando-se quais atributos exercem influência no desenvolvimento da cultura.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Clorofilômetro; Geoestatística; Interpolação; Mapas temáticos.

Introdução

A variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo exerce influência na qualidade e quantidade dos

produtos agrícolas, o que indica alta correlação entre eles. Fatores químicos interferem principalmente na disponibilidade de nutrientes e no fornecimento de condições ideais para o crescimento da cultura por meio do ganho de

eficiência de fertilizantes [1]. A caracterização da variabilidade espacial de atributos físicos químicos e do solo e da planta e a produtividade da cultura são essenciais para seu gerenciamento, uma vez que por meio dessas informações, é possível realizar o mapeamento destes atributos para posterior elaboração de mapas temáticos [2] e então se decidir por uma aplicação localizada de insumos.

Nutrientes como o nitrogênio (N) podem influenciar o crescimento das plantas por meio de efeitos no suprimento de assimilados e substâncias de crescimento. A influência deste na fotossíntese pode ocorrer de várias formas como o uso do N na formação dos cloroplastos, síntese proteica e síntese de clorofila. O N é necessário para que ocorra a síntese proteica e a ativação de uma série de enzimas e, conseqüentemente, a produção de biomassa vegetal [3].

Métodos usados em laboratórios para quantificar o teor de N nas plantas requerem destruição de amostras de tecido vegetal e muito trabalho nos processos de extração e quantificação. Assim, a determinação do teor relativo de clorofila por meio de clorofilômetros se apresenta como método alternativo aos procedimentos convencionais [4]. Estes aparelhos possuem diodos que emitem luz na faixa do vermelho e infravermelho. Durante a mensuração, a luz passa pela folha e é recebida por um fotodiodo, onde é convertida, primeiramente, em sinais analógicos e depois em sinais digitais. Após a leitura, o próprio aparelho utiliza equações matemáticas que convertem os valores de absorvância em um índice que é relacionado com os teores de pigmentos fotossintéticos [5].

A avaliação do índice de clorofila na folha, com uso de clorofilômetros, tem sido usada para prever a necessidade de adubação nitrogenada em culturas de alho [6], milho [7],[8] e feijão [9] e, avaliar o estado nutricional em culturas de alho [10], soja [11], batata [12],[13]; [14] e aveia [15].

Neste contexto, objetivou-se com este trabalho quantificar a dependência espacial de atributos químicos do solo, índice de clorofila em estádios fenológicos e produtividade da cultura do milho e analisar a correlação espacial entre estes.

Material e Métodos

A área experimental possui 17,6 ha e está localizada no município de Serranópolis do Iguazu – PR (Brasil), com coordenadas geográficas centrais aproximadas de 25° 26' 50" S e 54° 05' 05" O, elevação média de 279 m e solo classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico [16] (Oxisol Udic Dystrophic [17]). A delimitação da área foi realizada com aparelho GPS Trimble Geo Explorer XT 2005, gerando-se o mapa através do software Pathfinder.

O milho plantado foi o híbrido Pioneer 30k73. A área foi cultivada em sucessão de culturas soja/milho, durante três anos. Nos anos de 2010 e 2011 foram determinados

os atributos químicos do solo e nos anos de 2011 e 2012 foram realizadas as análises dos índices de clorofila e produtividade (Figura 1). A amostragem foi realizada por meio da construção de uma grade com 58 pontos amostrais com distância mínima de 40 m (Figura 2).

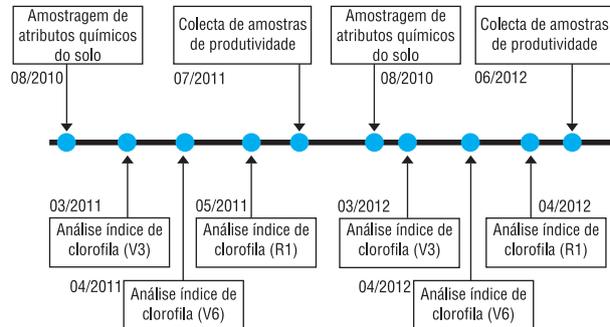


Figura 1: Cronograma do experimento

O procedimento seguido foi o adaptado de Wollenhaupt [18], sendo feito oito subamostras localizadas aleatoriamente no solo, num raio de 3 m, duas por quadrante, alocando-se a amostra de solo composta ao centro do círculo. Os atributos determinados foram C orgânico (Walkey and Black [19]), pH (cloreto de cálcio [20]), Ca, e Mg (cloreto de potássio [20]), P e K (Mehlich-1 [20]), Cu, Zn, Fe, e Mn (Mehlich-1 [21]), e H+Al (solução tampão (Pavan *et al.* [19]).

O índice de clorofila (IC) das folhas foi avaliado em estádios vegetativos (V3 e V6) e reprodutivo (R1), utilizando medidor de clorofila portátil Falker Clorofilog. Quatorze amostras foram coletadas por ponto amostral e calculada a média geral dos valores indicados para cada ponto. A Tabela 1, fornecida pelo fabricante do clorofilômetro, apresenta a produtividade da cultura em função do índice de clorofila (ICF) e do estádio da cultura.

Tabela 1: Produtividade do milho em função dos valores do índice de clorofila Falker (ICF)

Estádio	Valores das Medições (ICF)		
	V4	Abaixo de 45	Entre 45 e 57
V6	Abaixo de 50	Entre 50 e 60	Acima de 60
V8	Abaixo de 60	Entre 55 e 67	Acima de 67
Produtividade Esperada	Baixa Abaixo de 150 sc/ha	Intermediária Entre 150 e 200 sc/ha	Alta Acima de 200 sc/ha

sc/ha – Sacas de milho por hectare.

Fonte: Falker, nota de aplicação [22].

A colheita das amostras de grãos de milho, para determinar a produtividade, realizadas nos anos de 2011 e 2012, foi manual, sendo que em cada ponto amostral foram colhidas duas linhas centrais de semeadura de 1 m linear cada. Após a colheita, as plantas foram acondicionadas em sacos de polipropileno trançado e, posteriormente, trilhadas manualmente. Em seguida, os grãos foram pesados e uma amostra de 5 g de cada ponto amostral foi colocada em estufa a 105 °C por 24 h, visando posterior ajuste da produtividade a 12% de umidade.

Após as determinações, foram calculadas as medidas de

posição (média, mediana e moda), medidas de dispersão (variância, desvio-padrão, amplitude interquartil e coeficiente de variação) e medidas de forma da distribuição (coeficiente de assimetria e curtose), visando identificar e avaliar a homogeneidade e normalidade dos dados. O coeficiente de variação (CV) foi considerado baixo quando $CV \leq 10\%$, médio quando $10\% < CV \leq 20\%$, alto quando $20\% < CV \leq 30\%$, e muito alto quando $CV > 30\%$ [23]. A distribuição normal de probabilidade dos dados foi verificada utilizando os testes propostos por Anderson Darling e Kolmogorov-Smirnov [24], considerando-se com distribuição de probabilidade normal dos dados que apresentaram normalidade em pelo menos um dos testes.

Em sequência, os dados foram analisados por meio da geoestatística para identificar a estrutura da variabilidade espacial, usando-se o estimador clássico de Matheron [25]. Um modelo teórico (esférico, exponencial ou gaussiano) foi ajustado ao semivariograma experimental pelo método de mínimos quadrados ordinários. Obtido o modelo mais adequado, foram encontradas as estimativas dos parâmetros efeito pepita (C_0), alcance (a) e patamar ($C_0 + C_1$), e calculado o grau de dependência espacial dos semivariogramas. O índice de dependência espacial foi avaliado pelo coeficiente de efeito pepita ($E\%$), utilizado por Cambardella *et al.* [26] (Eq.1), em que $E\%$, até 25%, representa forte dependência espacial, entre 25 e 75%, moderada e acima de 75%, fraca dependência espacial.

$$E\% = \frac{C_0}{C_0 + C_1} * 100$$

Um modelo de regressão da variável dependente (produtividade) em função das variáveis independentes (índice de clorofila e atributos químicos do solo) não pode ser feito por violar a hipótese de independência das variáveis, visto que elas apresentam dependência espacial. Portanto optou-se pela matriz de correlação espacial, que calcula a estatística de autocorrelação espacial bivariada de Moran [27], calculada com o software para definição e avaliação de unidades de manejo em agricultura de precisão - SDUM [28], com nível de 5% de significância e com 999 iterações de cálculo.

$$I_{yz} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} * Y_i * Z_j}{W \sqrt{m_y^2 * m_z^2}}$$

Em que:

I_{yz} - Nível de associação entre a variável Y e Z, variando de -1 a 1, sendo: correlação positiva $I_{yz} > 0$ e correlação negativa; W_{ij} - Elemento ij matriz de associação espacial, calculado por $W_{ij} = (1/(1+D_{ij}))$, sendo D_{ij} a distância entre os pontos i e j; Y_i - Valor da variável Y transformada no ponto i. A transformação ocorre para se obter a média zero, pela

fórmula: $Y_i = (Y_i - \bar{Y})$, em que Y é a média amostral da variável Y; Z_j - Valor da variável Z transformada no ponto j. A transformação ocorre para se obter a média zero, pela equação: $Z_j = Z_j - \bar{Z}$, em que \bar{Z} é a média amostral da variável Z.

W - Soma dos graus de associação espacial, obtidos através da Matriz W_{ij} , para $i \neq j$; m_y^2 - Variância amostral da variável Y; m_z^2 - Variância amostral da variável Z.

Resultados e Discussão

Para o atributo C orgânico (ano 2010), 2% dos valores encontrados foram considerados baixos, 93% médios e 5% altos (Tabela 2). Em 2011, observou-se aumento nas concentrações de C orgânico, sendo 36% dos valores classificados como teor médio e 64% como teor alto. A acumulação de matéria orgânica está relacionada com a presença de vegetação sobre o solo.

Tabela 2: Classificação e porcentagem dos teores dos atributos químicos do solo encontrados na cultura de milho em cada faixa (2010 e 2011)

Teores Encontrados	Atributo	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
	C (g dm ⁻³)	< 9	9,0 - 14	14,1 - 20	21-35	> 35
2010			2%	93%	5%	
2011				36%	64%	
	Ca (cmolcdm ⁻³)	---	< 2,00	2,10 - 4,00	> 4,00	---
2010					100%	
2011					100%	
	Mg (cmolcdm ⁻³)	< 0,40	0,41 - 0,60	0,61 - 0,80	> 0,80	---
2010					100%	
2011					100%	
	Fe (mg dm ⁻³)	---	≤ 15,0	15,0 - 40,0	≥ 40,1	---
2010			2%	96%	2%	
2011			2%	95%	3%	
	Cu (mg dm ⁻³)	---	≤ 0,4	0,5 - 1,5	> 1,6	---
2010					100%	
2011					100%	
	Mn (mg dm ⁻³)	---	≤ 4,0	5,0 - 8,0	> 9,0	---
2010					100%	
2011					100%	
	Zn (mg dm ⁻³)	---	≤ 0,8	0,9 - 1,5	> 1,6	---
2010					100%	
2011				3%	97%	
	P (mg dm ⁻³)	---	≤ 2,0	2,1 - 4,5	4,6 - 11,0	> 11,0
2010					18%	82%
2011					12%	88%
	K (cmolcdm ⁻³)	---	< 0,10	0,11 - 0,30	> 0,30	---
2010				42%	58%	
2011				17%	83%	

Fonte: Classificação dos atributos [29].

Com a rotação/sequência de culturas, o solo quase sempre está coberto e ainda, dependendo da relação C/N do material vegetal, haverá formação de cobertura morta o que levará ao equilíbrio da matéria orgânica no solo. No manejo adotado na propriedade, a soja, de baixa relação C/N, tem seus resíduos decompostos mais rapidamente, já o milho, que produz maior quantidade de resíduos e de relação C/N alta, permanece bem mais tempo sobre o solo, possibilitando formação de cobertura morta e acúmulo de matéria orgânica. Como anteriormente à coleta das amostras de solo, a cultura instalada era o milho, isso pode explicar a melhora dos níveis de carbono.

Kiehl [30] já esclarecia, que em função do manejo adequado, o teor de matéria orgânica poderá se elevar. Ainda salientou que, se fertilizações orgânicas forem efetuadas eventualmente, o teor se elevará temporariamente, restabelecendo-se o nível anterior se as adubações forem suspensas e o manejo permanecer o mesmo.

Em 2010, 18% dos dados dos teores de P foram classificados como altos e 82% como muito altos. Em 2011, 12% dos dados foram classificados como altos e 88% como muito altos. Em relação aos teores de K, relativos ao ano de 2010, observou-se que 42% foram classificados como teor alto e 58% muito alto. Em 2011, observou-se 17% dos dados classificados como altos e 83% como muito altos.

Para os atributos Ca, Mg, Cu e Mn, em ambos os anos de estudo, 100% dos dados analisados foram classificados como teor alto. Pode-se observar, em relação ao conjunto de dados referente aos teores de Fe, que em 2010, 2% encontravam-se na faixa de teor baixo, 96% na faixa média e 2% na faixa alta. No ano de 2011, 2% dos dados encontravam-se na faixa de teor baixo, 95% foi na faixa média e 3% na faixa alta.

Em relação aos teores de Zn, pode-se observar que no ano de 2010, 100% dos dados foram classificados como alto teor do nutriente. No ano de 2011, 3% dos dados foram classificados como teor médio e 97% na classe teor alto. Os teores de nutrientes encontrados no solo para a cultura de milho estavam, em maioria, dentro das faixas média e alta, sendo adequados para a cultura. De um ano para outro, de forma geral, a concentração dos nutrientes no solo aumentou, com exceção do Zn.

O índice de clorofila (Tabela 3), nos estádios fenológicos V3, V6 e R1 apresentou baixo CV (< 10%) nos dois anos estudados (2011 e 2012), indicando homogeneidade dos dados. Hurtado [31], estudando a variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada, também encontraram baixo CV para o índice de clorofila, nos estádios fenológicos avaliados (V8 e R1).

Utilizando os parâmetros de índice de clorofila para a cultura de milho (Tabela 1), percebe-se no ano de 2011, nos estádios V3 e V6, que a cultura apresentou perspectiva de baixa produtividade e em estádio R1, perspectiva de produtividade intermediária. No ano de 2012, todos os

estádios apresentaram perspectiva de alta produtividade da cultura. Argenta [32], avaliando o nível de nitrogênio na planta de milho por meio de clorofilômetro, concluíram a eficiência do método para separar plantas com deficiência e com nível adequado do nutriente nos estádios vegetativos de desenvolvimento.

Tabela 3: Estatística descritiva dos índices de clorofila em estádios fenológicos da cultura de milho (2011 e 2012)

Estádio	Min.	Média	Mediana	Máx.	DP	CV(%)	Assim.	Curt.	Normal*
Índice de clorofila na folha do milho 2011									
V3	34,00	38,38	38,40	40,90	1,56	4,06 (b)	-0,39(a)	0,14(A)	Sim
V6	43,90	47,46	47,30	51,90	1,82	3,83 (b)	0,45(A)	-0,15(A)	Sim
R1	55,40	61,69	60,70	72,30	3,80	6,16 (b)	0,88(b)	0,47(A)	Não
Índice de clorofila na folha do milho 2012									
V3	51,10	57,28	57,00	69,40	2,42	4,23 (b)	1,98(b)	10,36(B)	Sim
V6	51,90	63,38	63,70	72,60	3,60	5,67 (b)	-0,27(a)	1,43(A)	Sim
R1	55,50	63,51	63,40	70,40	3,81	5,99 (b)	-0,05(a)	-1,02(C)	Sim

DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); Assimetria: Simétrica (a); Assimétrica positiva (b); Assimétrica negativa (c); Curtose: Mesocúrtica (A); Platicúrtica (B); Leptocúrtica (C); Normal – Normalidade; * Teste de normalidade Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

A produtividade média foi de 4,44 t ha⁻¹ (Tabela 4) em 2011, sendo esta superior à média nacional (3,64 t ha⁻¹) e à estadual (3,61 t ha⁻¹). Em 2012, a produtividade foi de 4,26 t ha⁻¹, sendo inferior à média nacional (5,09 t ha⁻¹) e à estadual (5,19 t ha⁻¹) [33]. A produtividade atingida atendeu às expectativas para a área (produtividade intermediária para ambos os anos), levando em conta que não haviam deficiências nutricionais para a planta, porém a menor produtividade em 2012 ocorreu, possivelmente, devido às condições climáticas adversas provocadas pelas geadas.

Tabela 4: Estatística descritiva para a produtividade da cultura de milho (2011 e 2012)

Atributo	Min.	Média	Mediana	Máx.	DP	CV(%)	Assim.	Curt.	Normal*
Milho 2011 (t ha ⁻¹)	2,91	4,44	4,20	6,97	0,92	20,69 (a)	0,77(b)	0,60(A)	Sim
Milho 2012 (t ha ⁻¹)	3,40	4,26	4,26	5,29	0,46	10,74 (m)	0,13(a)	-0,47(A)	Sim

DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); Assimetria: Simétrica (a); Assimétrica positiva (b); Assimétrica negativa (c); Curtose: Mesocúrtica (A); Platicúrtica (B); Leptocúrtica (C); Normal – Normalidade; * Teste de normalidade Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov

Os modelos ajustados para os semivariogramas (Tabela 5), para atributos químicos do solo, nos anos 2010 e 2011, foram o gaussiano (três ocorrências), o esférico (oito ocorrências) e o exponencial (11 ocorrências). Ressalta-se que os modelos gaussiano e exponencial são encontrados com frequência em pesquisas relacionadas a atributos do solo [34],[35].

De modo geral, os atributos químicos apresentaram dependência espacial moderada, com exceção do Fe e H+Al³, em 2010. Em 2011 o e C, P Mn e pH apresentaram dependência espacial forte. Machado *et al.*[36], estudando a variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional, encontraram dependência espacial moderada para Ca e H+Al³ e forte para

C e pH, concordando parcialmente com os resultados aqui levantados. Motomiya *et al.* [37], estudando a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e a produtividade do algodoeiro, encontraram forte dependência espacial para o P, o que está de acordo com o obtido neste experimento, no ano de 2011.

Tabela 5: Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas para os atributos químicos do solo (2010 e 2011)

Atributo	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	C ₁	a(m)	IDE (%)
Atributos químicos do solo 2010						
C (g dm ⁻³)	Gaussiano	2,130	3,366	1,236	77	37 Mo
P (g dm ⁻³)	Exponencial	63,711	123,313	59,602	409	48 Mo
K (cmolcdm ⁻³)	Esférico	0,009	0,020	0,011	409	55 Mo
Ca (cmolcdm ⁻³)	Exponencial	0,285	0,614	0,329	477	54 Mo
Mg (cmolcdm ⁻³)	Esférico	0,079	0,191	0,112	247	66 Mo
Cu (mg dm ⁻³)	Exponencial	1,129	1,944	0,815	182	42 Mo
Fe (mg dm ⁻³)	Gaussiano	34,740	39,360	4,623	409	12 Fo
Mn (mg dm ⁻³)	Gaussiano	317,900	434,940	117,040	200	27 Mo
Zn (mg dm ⁻³)	Exponencial	1,129	1,881	0,752	137	40Mo
H+Al ³	Exponencial	0,218	0,252	0,034	409	13 Fo
pH	Exponencial	0,052	0,086	0,034	409	39 Mo
Atributos químicos do solo 2011						
C (g dm ⁻³)	Esférico	8,659	9,712	1,053	391	11 Fo
P (g dm ⁻³)	Exponencial	140,070	148,516	8,446	109	6 Fo
K (cmolcdm ⁻³)	Esférico	0,028	0,048	0,020	380	45 Mo
Ca (cmolcdm ⁻³)	Exponencial	0,733	1,0600	0,327	243	31 Mo
Mg (cmolcdm ⁻³)	Exponencial	0,136	0,227	0,091	409	40 Mo
Cu (mg dm ⁻³)	Esférico	1,857	2,708	0,851	194	31 Mo
Fe (mg dm ⁻³)	Esférico	23,570	43,773	20,203	328	46 Mo
Mn (mg dm ⁻³)	Esférico	1089,500	1228,710	139,210	136	11 Fo
Zn (mg dm ⁻³)	Exponencial	18,901	30,778	11,887	409	39 Mo
H+Al ³	Esférico	0,317	0,523	0,206	267	39Mo
pH	Exponencial	0,063	0,083	0,020	259	24 Fo

C0 = Efeito pepita; C1 = Sill; C0 + C1 = Patamar; a = Alcance; IDE = Índice de dependência espacial: fraca (Fr), moderada (Mo) e forte (Fo)

Os modelos ajustados para os semivariogramas dos índices de clorofila, dos cultivos de milho (2011 e 2012) (Tabela 6), foram o exponencial (uma ocorrência), gaussiano (duas ocorrências) e esférico (três ocorrências).

Os índices de clorofila apresentaram moderada dependência espacial. Hurtado *et al.* [31], estudando a variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada, encontraram modelo gaussiano e esférico como o melhor ajuste dos dados e moderada dependência espacial para maioria destes dados.

Tabela 6: Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas para o índice de clorofila em estádios fenológicos da cultura de milho (2011 e 2012)

Estádio	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	C ₁	a(m)	IDE (%)
Índice de clorofila na folha do milho 2011						
V3	Esférico	1,357	2,055	0,698	271	34Mo
V6	Gaussiano	1,032	3,801	2,769	73	73Mo
R1	Exponencial	6,544	14,095	7,551	287	54Mo
Índice de clorofila na folha do milho 2012						
V3	Gaussiano	2,466	6,166	3,700	53	60Mo
V6	Esférico	7,556	13,979	6,423	97	46Mo
R1	Esférico	5,957	14,893	8,936	275	60Mo

C0 = Efeito pepita; C1 = Sill; C0 + C1 = Patamar; a = Alcance; IDE = Índice de dependência espacial: fraca (Fr), moderada (Mo) e forte (Fo)

A produtividade da cultura do milho também apresentou moderada dependência espacial (Tabela 7), nos anos 2011 e 2012, e o modelo esférico proporcionou melhor ajuste dos dados. Silva *et al.* [38], avaliando a variabilidade espacial da produtividade de milho, encontraram moderada dependência espacial, concordando com o obtido neste experimento.

Tabela 7: Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas para a produtividade dos cultivos de milho (2011 e 2012)

Cultura	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	C ₁	a(m)	IDE (%)
Milho 2011 (t ha ⁻¹)	Esférico	0,506	0,829	0,323	194	39Mo
Milho 2012 (t ha ⁻¹)	Esférico	0,134	0,234	0,100	194	43 Mo

C0 = Efeito pepita; C1 = Sill; C0 + C1 = Patamar; a = Alcance; IDE = Índice de dependência espacial: fraca (Fr), moderada (Mo) e forte (Fo)

Para o índice de clorofila e produtividade foram gerados mapas temáticos, a fim de representar a distribuição espacial dos dados. A amplitude dos dados após interpolação por krigagem menor que a dos dados originais deve ser ressaltada, uma vez que este interpolador suaviza a distribuição, ou seja, aumenta os valores mínimos e diminui os máximos [39]. O mapa temático dos índices de clorofila para a cultura de milho, em 2011, no estádio V3 (Figura 3A), apresenta maiores valores (entre 38,5 e 39,6) na região central e sudoeste do mapa. Ao norte observa-se concentração de menores valores, entre 36,8 e 37,9. No estádio V6 (Figura 3B), maiores valores (48,60 e 51,00) foram observados nas regiões central e sudeste. Observa-se predominância dos valores entre 45,0 e 48,6.

O mapa temático para o estádio R1 (Figura 3C) apresenta ao norte, a concentração dos maiores valores de índice de clorofila, sendo estes na faixa de 62,8 a 66,0. Ao sul, observa-se variação dos valores na faixa de 58,0 a 61,2, sendo estes os menores valores encontrados no mapa. Observando os mapas das diferenças entre índices de clorofila (Figuras 3D a 3F), pode-se perceber que, em toda a área, conforme a cultura se desenvolveu, os índices de clorofila também aumentaram, sendo que este aumento foi maior na parte norte do mapa, decrescendo progressivamente em direção ao sul. Essa não homogeneidade no aumento do IC pode ter implicado também na heterogeneidade da produtividade do talhão.

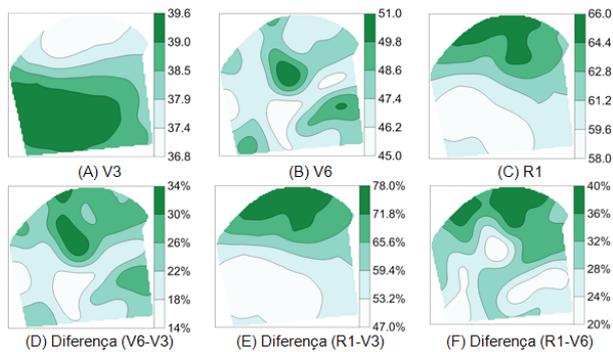


Figura 3: Distribuição espacial do índice de clorofila na cultura de milho em estádios fenológicos V3 (A), V6 (B) e R1 (C) no ano de 2011, bem como a diferença entre mapas (D, E, F)

De acordo com Milthorpe e Davidson [40], folhas individuais apresentam variação em sua capacidade fotossintética, a qual é determinada, principalmente, pelo seu estágio de desenvolvimento. Folhas completamente expandidas fazem fotossíntese com máxima intensidade, pois seus assimilados não servem apenas para sua própria manutenção, mas também, para atender às necessidades do meristema apical, do sistema radicular e das folhas em formação. Esta afirmação pode explicar o motivo no aumento dos índices de clorofila conforme a planta se desenvolveu.

No mapa da distribuição espacial do índice de clorofila, para a cultura de milho, no ano de 2012, o estágio V3 (Figura 4A) apresenta, na maior parte da área, valores entre 55,6 e 59,8.

Ao noroeste é observada uma pequena área com valores entre 59,8 e 64,0, que correspondem aos maiores valores encontrados. No estágio V6 (Figura 4B), observa-se, na maior parte da área, valores entre 62,4 e 64,1. Os maiores valores foram entre 65,8 e 67,5, encontrados na parte norte do mapa. O mapa temático do índice de clorofila em estágio R1 (Figura 4C) apresenta, ao norte, a concentração dos maiores valores, sendo estes compreendidos entre 64,4 e 68,0. Ao sul da área experimental, observa-se variação de 59,0 a 62,6 no índice de clorofila, sendo estes os menores valores encontrados no mapa.

Observando os mapas das diferenças entre índices de clorofila (Figuras 4D a 4F), com exceção da diferença do

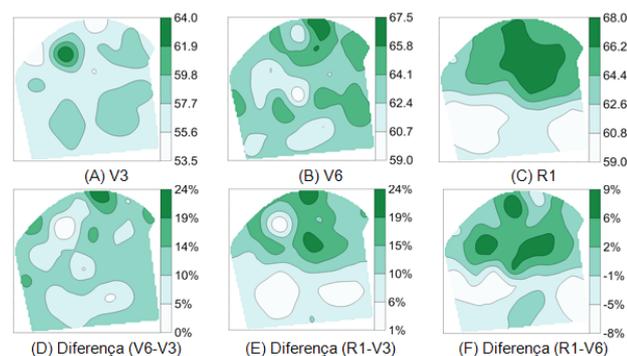


Figura 4: Distribuição espacial do índice de clorofila na cultura de milho em estádios fenológicos V3 (A), V6 (B) e R1 (C) no ano de 2012, bem como a diferença entre mapas (D, E, F)

estádio R1-V6 (Figura 3F), pode-se perceber que, em toda a área, conforme a cultura se desenvolveu, os índices de clorofila também aumentaram.

A produtividade da cultura de milho em 2011 (Figura 5A) variou, em sua maior parte (39%), na faixa entre 4,06 a 4,42 t ha⁻¹. Ao noroeste do mapa é possível observar a concentração dos menores valores (3,70 a 4,06 t ha⁻¹), perfazendo esta 16% do mapa. Ao sul, é observada a concentração (20% do mapa) dos valores de mais alta produtividade, compreendidos entre 4,78 e 5,50 t ha⁻¹.

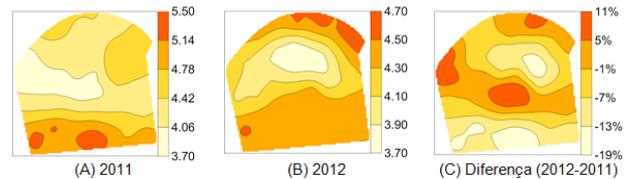


Figura 5: Distribuição espacial da produtividade (t ha⁻¹) da cultura de milho nos anos agrícola de 2011 (A) e 2012 (B) e diferença percentual entre os dois anos (C).

No mapa temático referente à produtividade do milho do ano de 2012 (Figura 5B), é possível observar maior predominância da classe de valores compreendida entre 4,30 e 4,50 t ha⁻¹, sendo este presente em 46% do mapa. Na região nordeste e sudoeste do mapa é observada pequena concentração dos valores entre 4,5 a 4,70 t ha⁻¹, e esta é classificada como zona de mais alta produtividade, presente em 5% do mapa. Na porção centro norte do mapa, observa-se a concentração da faixa de menor produtividade (3,70 a 3,90 t ha⁻¹), representando 8% do mapa.

Observando o mapa da diferença de produtividade entre os dois anos (Figura 5C), percebe-se que, em maior parte da área (67%), a produtividade em 2011 foi superior à de 2012. Nas porções central, noroeste e nordeste da área, observam-se regiões de maior produtividade, no ano de 2012. Observa-se ainda que, na parte central e sul da área, a produtividade foi menor.

Avaliando-se a correlação espacial (Tabela 8) entre os atributos estudados verifica-se que a produtividade da cultura de milho, em 2011, apresentou correlação significativa e positiva com o Mg, e significativa negativa com Cu e Zn. No estágio V3, observou-se correlação significativa e positiva com o Mg e a produtividade, e negativa com K e Cu. No estágio R1, observa-se correlação significativa e positiva para K, Cu e H+Al³, e negativa para Mg, Mn e produtividade.

Tabela 8: Correlação espacial para os atributos químicos do solo (2010 e 2011), índice de clorofila e produtividade das culturas de milho (2011 e 2012)

Atributos químicos do solo (2011), índice de clorofila e produtividade da cultura do milho (2011)												
	C	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	H+Al ³	pH	Prod.
Prod.	0	0	-0,02	0,01	0,05*	-0,05*	0,02	0,01	-0,03*	-0,01	0,01	-
IC V3	0	-0,01	-0,07*	0	0,07*	-0,12*	0,02	0,04	-0,01	-0,01	0,01	0,05*
IC V6	0	0	0	0,01	-0,01	0	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,01
IC R1	-0,01	0	0,05*	-0,03	-0,09*	0,13*	-0,01	-0,05*	0	0,04*	-0,03	-0,05*
Atributos químicos do solo (2011), índice de clorofila e produtividade da cultura do milho (2012)												
Prod.	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,03	-0,03	0,02	0,02	-0,02	-0,02	0,02	-
IC V3	0	-0,01	-0,07*	0	0,07*	-0,12*	0,02	0,03*	-0,02	-0,01	0,01	-0,16*
IC V6	0	0	0,01	0,01	-0,01	0	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,03
IC R1	-0,01	0	0,05*	-0,03	-0,09*	0,13*	-0,01	-0,04*	0	0,04*	-0,04*	-0,03

Prod. – Produtividade; IC – Índice de clorofila. *valores significativos para nível de significância de 0,05

Em 2012, observa-se correlação positiva entre índice de clorofila, no estágio V3, e Mg e Mn, e negativa com K, Cu e produtividade. No estágio R1, a correlação foi significativa positiva com K, Cu e H+Al³, e negativa para Mg, Mn e pH. Nos dois anos, não se verificou correlação entre índice de clorofila no estágio V6, e as variáveis analisadas. O índice de clorofila no estágio R1 foi o que mais se correlacionou com as variáveis analisadas.

Conclusões

A correlação espacial do índice de clorofila foi mais significativa com os atributos químicos do solo que com produtividade, mas demonstrando sua importância, uma vez que se pode identificar quais atributos exercem influência no desenvolvimento da cultura.

A produtividade apresentou correlação espacial com atributos químicos do solo, reforçando a necessidade de manejo destas variáveis para que as mesmas venham a interagir de forma positiva na nutrição das plantas e, conseqüentemente, aumentem a produtividade.

Todos os atributos avaliados apresentaram estrutura de dependência espacial de moderada a forte, permitindo o manejo localizado destes atributos.

Com o desenvolvimento da cultura, os índices de clorofila aumentaram, mas de forma desuniforme na área.

Referências

- Teixeira, L. A. J.; Quaggio, J. A.; Mellis, E. V. *Ganhos de eficiência fertilizante em bananeira sob irrigação e fertirrigação*. Revista Brasileira de Fruticultura, 33(1): 272-278, 2011.
- Souza, Z. M.; Cerri, D. G. P.; Magalhães, P. G.; Campos, M. C. C. *Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar*. Revista de Biologia e Ciência da Terra, 9(2): 183-190, 2008.

- Abreu, I. N.; Pinto, J. E. B. P.; Furtini Neto, A. E. *Influence of nitrogen and phosphorus in the biomass production and induction of mucilage in "insulina" plants*. Horticultura Brasileira, 20(4): 536-540, 2002.
- Salla, L.; Rodrigues, J. C.; Marenos, R. A. *Teores de clorofila em árvores tropicais determinados com o SPAD-502*. Revista Brasileira de Biociências, 5(2): 59-161, 2007.
- Sofiatti, V.; Brito, G. G.; Silva, F. M. O.; Brandão, Z. N.; Silva, D. M. A.; Silva, V. N. B. *Determinação da concentração de pigmentos da fotossíntese em folhas de algodoeiro por meio do clorofilômetro portátil CLOROFILOG-1030*. Foz do Iguaçu. In: Congresso Brasileiro do Algodão, 7, 2009, Foz do Iguaçu, PR. Anais. Foz do Iguaçu: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2009.
- Fernandes, L. J. C.; Bull, L. T.; Corrêa, J. C.; Pavan, M. A.; Imaizumi, I. *Resposta de plantas de alho livres de vírus ao nitrogênio em ambiente protegido*. Horticultura Brasileira, 28(1): 97-101, 2010.
- Rambo, L.; Silva, P. R. F. da.; Strieder, M. L.; Silva, A. A. da.; Sangoi, L.; Vieira, V. M. *Índices nutricionais de N e produtividade de milho em diferentes níveis de manejo de adubação nitrogenada*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 46(4): 390-397, 2011.
- Hurtado, S. M. C.; Resende, A. V. de.; Silva, C. A.; Corazza, E. J.; Shiratsuchi, L. S. *Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade*. Ciência Rural, 41(6): 1011-1017, 2011.
- Morel Filho, P. B.; Cobucci, T.; Fageria, N. K.; Mendes, P. N. *Determinação da necessidade de adubação nitrogenada de cobertura no feijoeiro irrigado com auxílio do clorofilômetro portátil*. Ciência Rural, 38(7): 1843-1848, 2008.
- Fernandes, L. J. C.; Villasbôas, R. L.; Backes, C. Lima, C. P.; Bull, L. T. *Contribuição das concentrações de nitrogênio em bulbos de alho tratados com doses de N em cobertura*. Horticultura Brasileira, v.29, p.26-31, 2011.
- Corrêa, M. J. P.; Alves, L. da. C. A. *Efeitos da aplicação de herbicidas sobre a eficiência fotoquímica em plantas de soja convencional e geneticamente modificada*. Ciência e Agrotecnologia, 34(5): 1136-1145, 2010.
- Silva, M. C. C.; Fontes, P. C. R.; Miranda, G. V. *Índice SPAD e produção de batata, em duas épocas de plantio, em função de doses de nitrogênio*. Horticultura Brasileira, 27(1): 17-22, 2009.
- Moreira, M. A.; Fontes, P. C. R.; Cecon, P. R.; Araújo, R. F. *Índices para avaliar o estado de nitrogênio da batata multiplicada por distintos materiais propagativos*. Revista Ceres, 58(3): 384-392, 2011.
- Silva, M. C. C.; Coelho, F. S.; Braun, H.; Fontes, P. C. R. *Índice SPAD em função de diferentes horários e posições no fíliolo da batata sob fertilização nitrogenada*. Revista Ciência Agrônômica, 42(4): 971-977, 2011.
- Wolff, W. M.; Floss, E. L. *Correlação entre teores de nitrogênio e de clorofila na folha com a produtividade de*

- grãos de aveia branca. *Ciência Rural*, 38(6): 1510-1515, 2008.
16. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *O Novo Mapa de Solos do Brasil - Legenda Atualizada*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
 17. USA. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. *Survey Staff. Keys to soil. Taxonomy*. 8 ed. Washington, USA. Department of Agriculture, 1998.
 18. Wollenhaupt, N. C.; Wolkowski, R. P. *Grid soil sampling*. Better Crops with Plant Food, Norcross, 78(4): 6-9. 1994.
 19. Pavan, M.A.; M.F. Bloch, H.C. Zempulski, M. Miyazawa; D.C. Zocoler. 1992. *Manual de análise química de solo e controle de qualidade*. Londrina: IAPAR. 40 p.
 20. EMBRAPA - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro.
 21. EMBRAPA - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. 2009. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. SILVA, F. C. da (Ed.). 2. ed. Revisada e ampliada. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.
 22. Falker, *Parâmetros de ICF na cultura do milho*. Nota de Aplicação - CFL1030 - N.004. 2009.
 23. Pimentel Gomes, F.; Garcia, G. H. *Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais*. Piracicaba: Biblioteca de Ciências Agrárias, Luiz de Queiroz, 2002.
 24. Thode, H. C. *Testing for Normality*. Marcel Dekker, New York, 2002. 368 p.
 25. Matheron, G. *Principles of geoestatics*. Economic Geology Journal, 58:p.1246-1266, 1963.
 26. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turvo, R. F.; Konopka, A. E. *Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils*. Soil Science Society of American Journal, 58(5): 1501-1511, 1994.
 27. Bonham C. D.; Reich R. M.; Leader K. K. *Spatial cross-correlation of Bouteloua gracilis with site factors*. Journal of Japanese Society of Grassland Science, 41(1): 196-201, 1995.
 28. Bazzi, C. L.; Souza, E. G.; Opazzo, M. O.; Nobrega, L. H.; Rocha, D. M. *Management Zones definition using soil chemical and physical attributes in a soybean area*. Engenharia Agrícola, 33(5) 1-14, 2013.
 29. Costa, J. M.; Oliveira, E. F. *Fertilidade do solo e nutrição das plantas*. COAMO/COODETEC. 2ª edição. Cascavel, 2001.
 30. Kiehl, E. J. *Fertilizantes Orgânicos*. Piracicaba, Editora Agronômica Ceres. 1985. 492 p.
 31. Hurtado, S. M. C.; Resende, a. V.; Silva, C. A.; Corazza, E. J.; Shiratsuchi, L. S. *Varição espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura no cerrado*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 44(3): 300-309, 2009.
 32. Argenta, G.; Silva, P. R. F.; Fosthofer, E. L.; Strieder, M. L.; Suhre, E.; Teichmann, L. L. *Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 27(1): 109-119, 2003.
 33. CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo primeiro levantamento*, agosto 2012. Brasília: CONAB, 2012.
 34. Cruz, J. S.; Assis Júnior, R. N.; Matias, S. S. R.; Tamayo, J. H. C.; Tavares, R. C. *Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar*. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, 34(2): 361-368, 2010.
 35. Carvalho, L. A.; Meurer, I.; Silva Júnior, C. A.; Cavalieri, K. M. V.; Santos, C. F. B. *Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15(9): 940-949, 2011.
 36. Machado, L. O.; Lana, A. M. Q.; Lana, R. M. Q.; Guimarães, E. C.; Ferreira, C. V. *Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31: 591-599, 2007.
 37. Motomiya, A. V. A.; Motomiya, W. R.; Molin, J. P.; Lira, A.; Oliveira, J. R. G.; Biscaro, G. A. *Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro*. Revista Agrarian, 4(11): 1-9, 2011.
 38. Silva, V. R.; Reichert, J. M.; Storck L.; Feijó S. *Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo Distrófico Arenico*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 27(6): 1013-1020, 2003.
 39. Konopatzki, M. R. S. *Variabilidade espacial e temporal da produtividade, atributos do solo, planta e características físico-químicas de frutos em um pomar de peras*. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2011. Tese Doutorado
 40. Milthorpe, F. L.; Davidson, J. L. *Physiological aspects of regrowth in grasses*. In: MILTHORPE, F. L.; IVINS (Eds.) *The growth of cereals and grasses*, 241-254, 1966.

Recibido: 16/06/2015.

Aprobado: 31/08/15.