



GEOESTATÍSTICA E GEOPROCESSAMENTO NA TOMADA DE DECISÃO DO USO DE INSUMOS EM UMA PASTAGEM

K.E.L. Santos^{1*}, A.C.C. Bernardi², G.M. Bettiol³, S. Crestana⁴

¹ USP - Univ São Paulo, Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, SP, Brasil

² Embrapa Pecúária Sudeste, São Carlos, SP, Brasil

³ Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brasil

⁴ Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil

Article history: Received 09 August 2017; Received in revised form 20 September 2017; Accepted 25 September 2017; Available online 29 September 2017.

RESUMO

O presente trabalho objetivou aplicar os conceitos de geoestatística e geoprocessamento para a obtenção de zonas de manejo de uma área de pastagem de capim Tanzânia, em São Carlos - SP, e delimitação de unidades de manejo para aplicação de calagem e adubação, com base no melhor método de interpolação. Com os resultados de análise de solo foram realizadas análises geoestatísticas para avaliação da dependência espacial dos atributos químicos. Os mapas foram obtidos pelo método de interpolação por Krigagem Ordinária e a definição das zonas de manejo foi realizada por meio de lógica *fuzzy*. A partir dos mapas dos parâmetros químico do solo gerou-se o mapa de zonas de manejo resultando em cinco zonas sendo: 0,02ha (1,2% da área total) consideradas como “muito baixa” fertilidade; 0,3ha (18%) “baixa” fertilidade; 0,75ha (44%) como “média” fertilidade; 0,55ha (32%) como “alta” fertilidade e, 0,08ha (4,8%) como “muita alta” fertilidade. A comparação dos métodos de interpolação demonstrou que a Krigagem Ordinária foi a melhor metodologia para o estudo. A geoestatística e o geoprocessamento demonstraram ser técnicas que auxiliam nas decisões estratégicas e complexas em relação ao gerenciamento do sistema de produção agrícola.

Palavras-chave: agricultura de precisão, zonas de manejo, métodos de interpolação

GEOSTATISTICS AND GIS IN THE DECISION MAKING OF THE USE OF INPUTS IN A PASTURE

ABSTRACT

The present study aimed to apply the concepts of geostatistics and GIS to obtain management zones of a pasture Tanzania grass in São Carlos – SP/Brazil, and delimitation of management units for the application of liming and fertilization, based on the best interpolation method. Geostatistical analysis were performed based on results of soil analysis in order to evaluate the spatial dependence of the chemical attributes. The maps were obtained by Ordinary Kriging interpolation method and the definition of management zones was performed by *fuzzy* logic. From the maps of chemical parameters of the soil has resulted from the management zone map, resulting in five areas being: 0.02 ha (1.2% of total area) regarded as “very low” fertility; and 0.3 ha (18%) “low” fertility; 0.75 ha (44%) as “average” fertility; 0.55 ha (32%)

* karoline.eduarda@usp.br

as “high” fertility and, 0.08 ha (4.8%) as “very high” fertility. The comparison of the interpolation methods showed that Kriging Ordinary was the best methodology for the study. The geostatistics and GIS have proved to be techniques that help with strategic and complex decisions in relation to the management of the agricultural production system.

Keywords: Precision agriculture, management zone, interpolation methods

INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) pode ser entendida como um ciclo que se inicia na coleta dos dados, análises e interpretação dessas informações, geração das recomendações, aplicação no campo e avaliação dos resultados (GEBBERS e ADAMCHUK, 2010). E foi definida como o uso de práticas agrícolas com base nas tecnologias de informação para o tratamento da variabilidade espacial, como forma de aumentar a produtividade e qualidade dos produtos, aumentar o retorno econômico e reduzir os impactos ambientais negativos (INAMASU et al., 2011). Segundo Rabello et al. (2014) a variabilidade espacial é resultante da complexa interação de fatores biológico, edáfico, antrópico, topográfico e climático. Portanto, a AP é uma cadeia de conhecimentos, na qual máquinas, aplicativos e equipamentos são ferramentas que podem apoiar essa gestão (INAMASU & BERNARDI, 2014).

A AP tem sido utilizada com maior frequência nas culturas da soja, milho, algodão e cana-de-açúcar. O potencial, benefícios e limitações do uso da AP em sistemas de pastagens foi apresentado e discutido por Schellberg et al. (2008) e Bernardi & Perez (2014). O uso de geoprocessamento nas recomendações de manejo de pastagens foi descrito por Bernardi et al. (2016, 2017).

Entre as ferramentas da AP destacam-se o GPS (global position system) e os Sistemas de Informação Geográficas (SIG's), além da geoestatística. Para o processamento de dados georreferenciados utiliza-se o geoprocessamento, que incluem as tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação

com referência geográfica (Câmara et al., 2002). A modelagem via SIG possibilita a fusão dessas camadas de informações, ampliando a capacidade de interpretação dos dados e auxiliando na tomada de decisão para a gestão do sistema de produção (FILIPPINI ALBA, 2014). A geoestatística é o estudo de um fenômeno natural, que pode ser caracterizado pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis, chamadas de “variáveis regionalizadas” (OLIVEIRA et al., 2015). O estudo destas variáveis tem como objetivo resolver os problemas de estimativa para aqueles locais em que a amostragem não foi realizada. A interpolação é alcançada por meio dos métodos estimadores que podem ser divididos basicamente em duas categorias, os modelos determinísticos, aqueles que têm por base critérios apenas geométricos e não fornecem medidas de incerteza associadas (i.e. o inverso ponderado da distância – IDW); e os modelos estocásticos, nos quais os valores coletados são interpretados como resultados de processos aleatórios e são capazes de quantificar a incerteza presente ao estimador como os modelos geoestatísticos (i.e. krigagem) (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). A aplicação da geoestatística na AP tem por objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e estimar as inter-relações desses atributos no espaço e no tempo (BERNARDI et al., 2015). Bernardi et al. (2017) compararam a utilização das metodologias do IDW e da krigagem para a geração de mapas de recomendação de correção do solo e adubação em sistemas integrados.

A aplicação das tecnologias voltadas para o estudo ambiental auxilia na análise descomplicada e ágil da vulnerabilidade do local mediante ação humana ou até mesmo diante das mudanças naturais ocorridas no próprio ambiente, permitindo o planejamento adequado para áreas que serão manejadas (COSTA et al., 2006). Entre essas aplicações pode-se citar: Rodrigues Junior et al. (2011), que geraram zonas de manejo para a agricultura com base em determinações realizadas com sensor de clorofila e por análise foliar, e avaliaram as zonas de manejo obtidas usando-se dois métodos de agrupamento; Bazzi et al. (2013) que indicaram a lógica fuzzy como uma boa metodologia para definição de unidades de manejo utilizando as propriedades físicas e químicas do solo e de produtividade; Ramos et al. (2017), que com base na

interpolação de atributos químicos e físicos do solo e de plantas de soja produziram um mapa com dez zonas de manejo para a cultura; e, Santos et al. (2017), que utilizando a geoestatística classificaram os atributos químicos de uma área de produção da cacauzeiros para a concepção de um mapa de fertilidade do solo, possibilitando a avaliação da sua variabilidade espacial, a qual foi correlacionado com os mapas das estratificações da produtividade.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo a elaboração de zonas de manejo e comparação de métodos de interpolação do solo de um sistema de produção de leite a pasto intensivo da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos-SP, aplicando os conceitos de geoestatística e o geoprocessamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no sistema de produção de leite da Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (22°01' S e 47°54' W; 856 m acima do nível do mar), em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média (CALDERANO et al., 1998). A área esteve sob cultivo de capim Tanzânia (*Panicum maximum* cv. Tanzânia) irrigado e sob pastejo há 22 anos. As pastagens são manejadas em sistema rotacionado com 1 (um) dia de pastejo e 32 dias de repouso em épocas de chuvas e secas. Os piquetes são divididos com cercas elétricas em 32 subdivisões de 0,05 há (500m²) cada.

A estratégia de amostragem do solo foi baseada na coleta de 6 sub-amostras a 0-0,2m de profundidade para cada piquete. As propriedades químicas foram determinadas (PRIMAVESI et al., 2005) como segue: as medições de pH do solo foram feitas em CaCl₂, o carbono orgânico foi determinado por combustão úmida e o P disponível foi avaliado pelo método da resina. Também foram medidos K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e H⁺ trocáveis. A capacidade de troca de cátions (CTC) foi medida ao valor

de pH real do solo, e a saturação de base (% V) também foi determinada. As frações de partículas do solo (teor de argila) foram determinadas. Adotou-se, para cálculo da necessidade de calagem e adubação com P e K os cálculos realizados pelo programa Adubapasto (OLIVEIRA et al., 2010).

Utilizando o software ArcGIS® 10.2 (ESRI, 2009) realizou-se a interpolação através do método IDW dos parâmetros do solo que não apresentaram correlação espacial entre os pontos amostrados, para diferentes potências numa mesma distância entre os pontos. E por meio do software gS+ (GAMMA DESIGN, 2012) a Krigagem Ordinária. Para averiguação do melhor modelo de ajuste do semivariograma utilizou-se seguintes parâmetros: o coeficiente de determinação (R²), a soma dos quadrados dos erros (RSS) e o grau de dependência espacial representado pelo Índice de Dependência Espacial (IDE). O critério para averiguar se a interpolação realizada é satisfatória ou não foi a Validação Cruzada, as estatísticas de avaliação adotadas foram: Erro Médio Absoluto (média dos valores absolutos do

erro igual os valores estimados menos valores observados), Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RQME) e Coeficiente de Determinação (R²).

Para a concepção das zonas de fertilidade, a partir das interpolações, adotou-se como tabela de referência Raij et al. (1997) (Tabela 1).

Tabela 1. Limites de interpretação dos parâmetros químicos do solo

Classes	Parâmetros químicos							
	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CTC	V
	CaCl ₂	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³			mmol dm ⁻³		%
Muito Baixa	> 6	<7	0-5	0-7	<4	<1,5	<16	0-25
Baixa	5,5-6	7-20	5-12	7-15	4-12	1,5-4,5	16-43	25-50
Média	5-5,5	20-40	12-30	15-30	12-24	4,5-9	43-86	50-70
Alta	4,3-5	40-70	30-60	30-60	24-40	9-15	86-150	70-90
Muito Alta	<4,3	>70	>60	>60	>40	>15	>150	>90

Devido os valores de referência não serem uniformes, numa mesma unidade, foi necessária a padronização dos dados com uso da lógica *fuzzy*. Tal lógica é usada para evitar a análise tendenciosa, fruto da soma ponderada, e manter uma análise qualitativa dos dados (JUNIOR, 2011).

Reclassificou-se cada layer em valores que variam de 0 (zero) a 1 (um) por meio da ferramenta “Fuzzy Membership” do software de ArcGIS® 10.2 (ESRI, 2009). Agrupou-se as mesmas segundo classificação apontada na Tabela 2.

Tabela 2. Classes de interpretação das camadas fuzzy dos parâmetros químico

Classes de Interpretação	Fuzzy
Muito Baixa	Até 0,2
Baixa	Entre 0,2 e 0,4
Média	Entre 0,4 e 0,6
Alta	Entre 0,6 e 0,8
Muito Alta	Entre 0,8 até 1

Segundo a escala de Saaty (1980) os valores receberam peso 1, todos com mesma importância, e foram normalizados com função linear. Para junção das novas camadas de dados utilizou-se a função “Weighted Sum” do mesmo software de geoprocessamento. De tal processo, uma nova associação difusa (lógica fuzzy) foi realizada.

Foram elaborados mapas de recomendação de calagem e adubação

baseados em conhecimentos de pesquisadores da Embrapa Pecuária Sudeste, denominados posteriormente como “empíricos”, que serviram de suporte para comparação com os mapas de interpolação formulados por meio dos coeficientes de correlação já adotados nesta pesquisa. Por meio da observação dos resultados de tal comparação houve a delimitação de unidades de manejo, as quais derivam do método que apresentou

melhores resultados. Adotou-se como unidade de manejo o piquete, assim atribuiu-se como classe de interpretação

aquela que estava presente em maior área no piquete.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística descritiva dos dados (Tabela 3) indicou que todos podem ser considerados dentro da normalidade. Pois, um conjunto de dados é considerado

normal quando os valores teóricos de assimetria e curtose estão em um intervalo de 0 a 3 (GREGO & VIEIRA, 2005).

Tabela 3. Parâmetros estatísticos das variáveis químicas do solo de uma área de pastagem capim Tanzânia em São Carlos, SP.

Parâmetros estatísticos	Parâmetros Químicos										
	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CT C	V	Calagem	SS	KCl
	CaCl ₂	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		mmol dm ⁻³			%		kg ha ⁻¹	
Média	5,1	23,6	33,5	6,7	21,5	9,1	63,4	61,5	1158,9	703,8	143,2
Desvio Padrão	0,2	8,5	21,4	9,85	4,8	3,6	11,5	7,6	460	732,7	109,7
Min	4,3	13	1,9	1,8	13	1	49	37	464,2	0	0
Max	5,5	58	79	49	32	14	93	73	2670,5	2112,6	355
CV (%)	1,3	35,9	63,9	68	22,6	44,1	18,1	12,4	39,7	104,7	76,7
Curtose	0,8	0,8	0,8	2,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	-0,7	0,8
Assimetria	0,4	0,4	0,4	2,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,4
N	32	30	32	32	30	31	32	32	32	32	30

De acordo com a classificação sugerida por Pimentel-Gomes (1990), apenas a variável pH apresenta coeficiente de variação baixo ($CV < 10\%$), CTC e V% apresentaram coeficientes médio ($10 < CV < 20\%$), Ca do tipo alto ($20 < CV < 30\%$), e os demais (MO, P, K, Mg, Calagem, KCl e SS) coeficientes de variação muito alto ($CV > 30\%$). Resultados que fundamentam a aplicação de técnicas de AP, já que para o uso desta prática é preciso haver um mínimo de variabilidade na área em estudo. Estes resultados são semelhantes aos apresentados por Bernardi et al. (2016 e 2017).

A parti dos semivariogramas de cada variável do solo geraram-se as interpolações pelos métodos Krigagem Ordinária. Os casos nos quais não havia correlação espacial entre os pontos amostrados (pH, V% e Calagem), o que se

denomina “efeito pepita puro” (GREGO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015) para a escala de amostragem adotada, realizou-se as estimativas espaciais por meio do Inverso da Distância Ponderada (IDW).

A partir da análise do maior Coeficiente de Determinação dos parâmetros estudados, menor Soma de quadrados de resíduos (RSS) e Validações Cruzadas, pôde-se concluir que os variogramas do tipo esférico apresentaram o melhor se ajuste. Além disso, apresentaram ótima representação do comportamento dos dados, uma vez que seus valores de R^2 estão bem próximos a 1, indicando que a medida descritiva da qualidade do ajuste está satisfatória. Segundo Trangmar et al. (1985) o modelo esférico é o que melhor se ajusta para descrever o comportamento de semivariogramas de parâmetros do solo, o

que é ratificado pelos variogramas resultantes desta pesquisa e pelos resultados prévios apresentados em Bernardi et al. (2016).

O maior alcance foi observado para matéria orgânica (79 m), isso demonstra que este atributo é o que apresenta menor variabilidade e maior continuidade espacial, garantindo melhor precisão nas estimativas em locais não amostrados. O menor alcance (46 m) foi observado para a aplicação do Superfosfato Simples. A distância mínima entre os pontos amostrais foi de 20 metros; considerando que a metade do menor alcance observado é de 23 metros, é possível se considerar como distância entre pontos amostrais a metade do valor do alcance de forma a constatar a variabilidade espacial do atributo em estudo sem perder precisão nas estimativas, uma vez que continuidade espacial do atributo é mantida (CARVALHO et al., 2002).

O Índice de Dependência Espacial (IDE) foi determinado e classificado segundo Zimback (2001), em que a

dependência espacial é baixa para $IDE < 25\%$, moderada para $25\% < IDE < 75\%$ e forte para $IDE > 75\%$. Os resultados indicaram que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial forte, isto é, quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores.

As zonas de manejo são áreas de igual potencial de produção, eficiência no uso de insumos e risco de impacto ambiental no terreno (BAZZI et al., 2013). Do resultado da sobreposição dos planos de informação dos parâmetros químicos do solo, teve-se a definição das zonas de manejo, as quais indicam as áreas de melhor fertilidade, como já havia sido realizado em Bernardi et al. (2016). Foram obtidas na área de estudo cinco zonas sendo: 0,02ha (1,2% da área total) considerada como “muito baixa” fertilidade; 0,3ha (18%) “baixa” fertilidade; 0,75ha (44%) como “média” fertilidade; 0,55ha (32%) como “alta” fertilidade e, 0,08ha (4,8%) como “muita alta” fertilidade e apresentado na Figura 1.

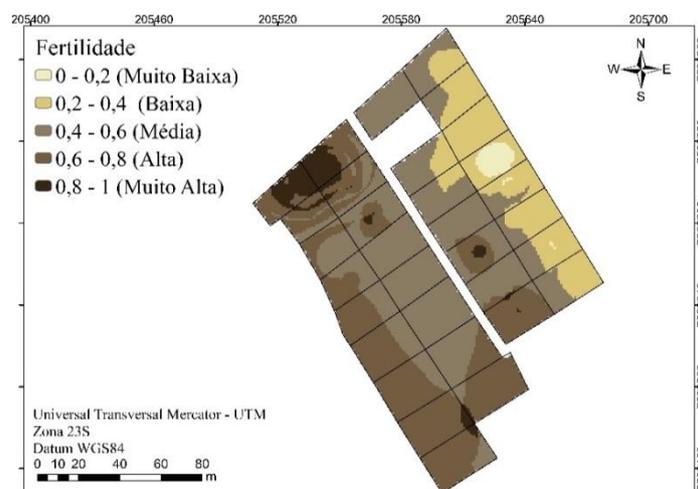


Figura 1. Mapa de interpretação da fertilidade do solo de uma área *Panicum maximum* cv. Tanzânia em São Carlos- SP

Outro resultado possível, a partir da análise química do solo são os mapas de recomendação para calagem e adubação a taxas variáveis (BERNARDI et al., 2015), que são apresentados na Figura 2. Por meio destes mapas é possível a aplicação dos

insumos a taxa variada nas unidades de aplicação definidas, de forma a possibilitar uma melhor exatidão na compensação realizada tanto pela calagem quanto na adubação (CORÁ & BERALDO, 2006; BERNARDI et al., 2015).

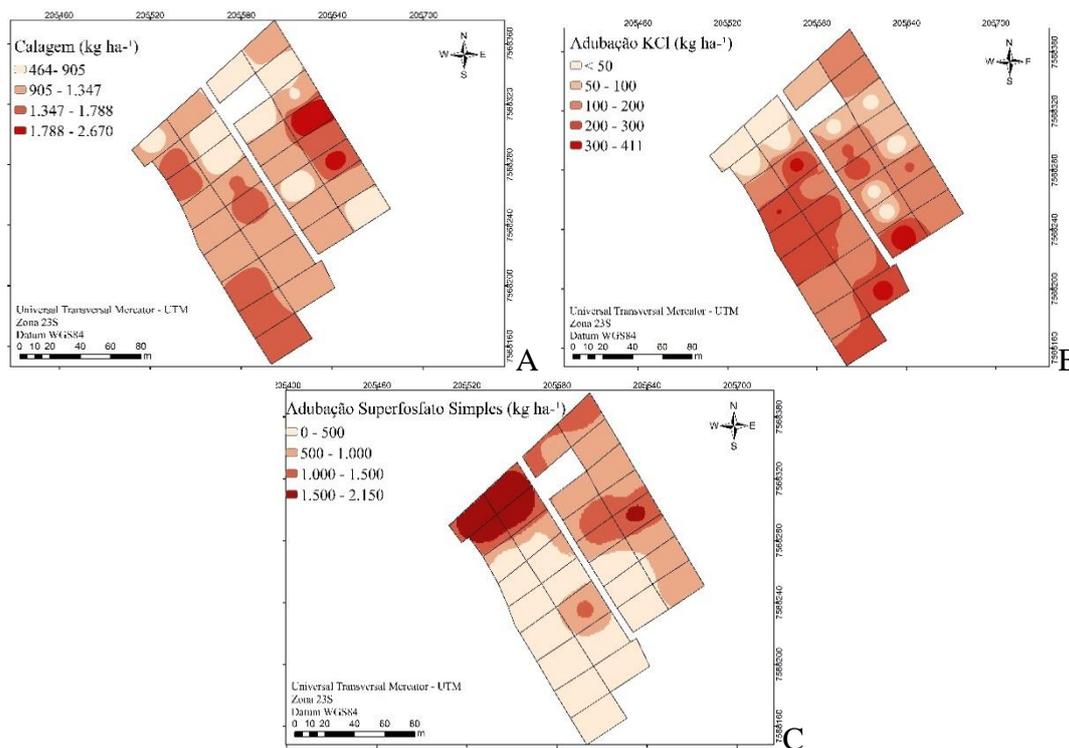


Figura 2. Mapas de recomendação de calagem (A) e adubação (B e C) de uma área *Panicum maximum* cv. Tanzânia em São Carlos- SP

Segundo Weirich Neto et al. (2006) a aplicação de calagem a taxa variável possibilita uma economia de 7,84 t de calcário em uma área de 9,6 ha em relação ao método convencional. Da mesma maneira, a recomendação de calagem em taxas variadas na área em estudo reduzirá a quantidade total de calcário em relação ao método convencional de recomendação. Conforme trabalho de Ragagnin et al. (2010), somente é benéfica tal aplicação utilizando-se o critério prático de não se aplicar doses inferiores a $0,5 \text{ t ha}^{-1}$. Na área de estudo, o menor intervalo vai de $0,464$ a $0,905 \text{ t ha}^{-1}$. Dessa forma, calculando a porcentagem da área encontrada em cada classe para o melhor direcionamento da intervenção, é possível constatar que apenas 3% da área toda necessita de grandes quantidades de aplicação de calcário.

A resposta da forrageira à adubação potássica dependerá da correção não apenas deste fator, mas de um conjunto de intervenções que visam o melhoramento de outras propriedades químicas do solo

(COUTINHO et al., 2014). Conforme mapa da figura 4C foram aplicados, aproximadamente, 70% do corretivo na área, seguindo recomendação de Ribeiro et al. (1999).

Sendo o fósforo o nutriente mais importante para a formação de pastagens em solos da região do Cerrado, uma das formas de adubação desse no solo é por meio dos fosfatos solúveis, como o superfosfato simples. Estudos feitos por Oliveira et al. (2000) e Belarmino et al. (2003), comprovam o incremento de produção do capim Tanzânia em virtude da aplicação de P. Tal importância é atestada por Mesquita et al. (2010), em que os autores afirmam que a adubação fosfatada proporciona grande influência no estabelecimento das pastagens sendo sua aplicação responsável por 80% do perfilhamento de espécies forrageiras. Com isso, apenas 10% de estudo necessita de grandes quantidades de aplicação do superfosfato simples.

Neste sentido, por meio da comparação dos métodos de interpolação

comumente utilizados em trabalhos que envolvem a AP, como a Krigagem Ordinária e o IDW, procurou-se otimizar os resultados de forma a facilitar a

utilização dos mapas pelo proprietário e pelos equipamentos responsáveis pela aplicação variada dos corretivos e fertilizantes (Figura 3).

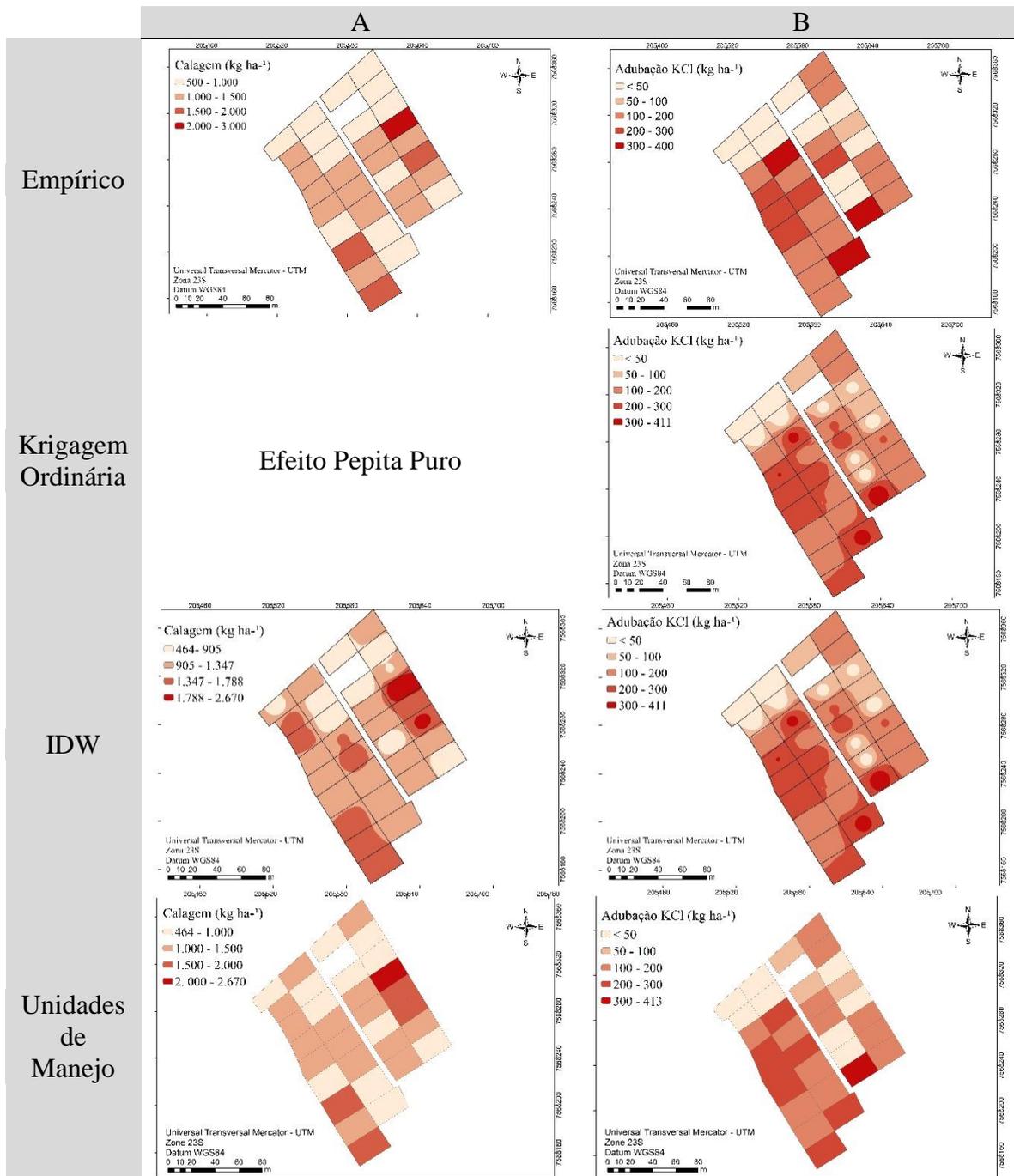


Figura 3. Comparação de métodos de interpolação e definição de unidades de manejo, referentes a Calagem (A), adubação KCl (B) e Superfosfato Simples (C)

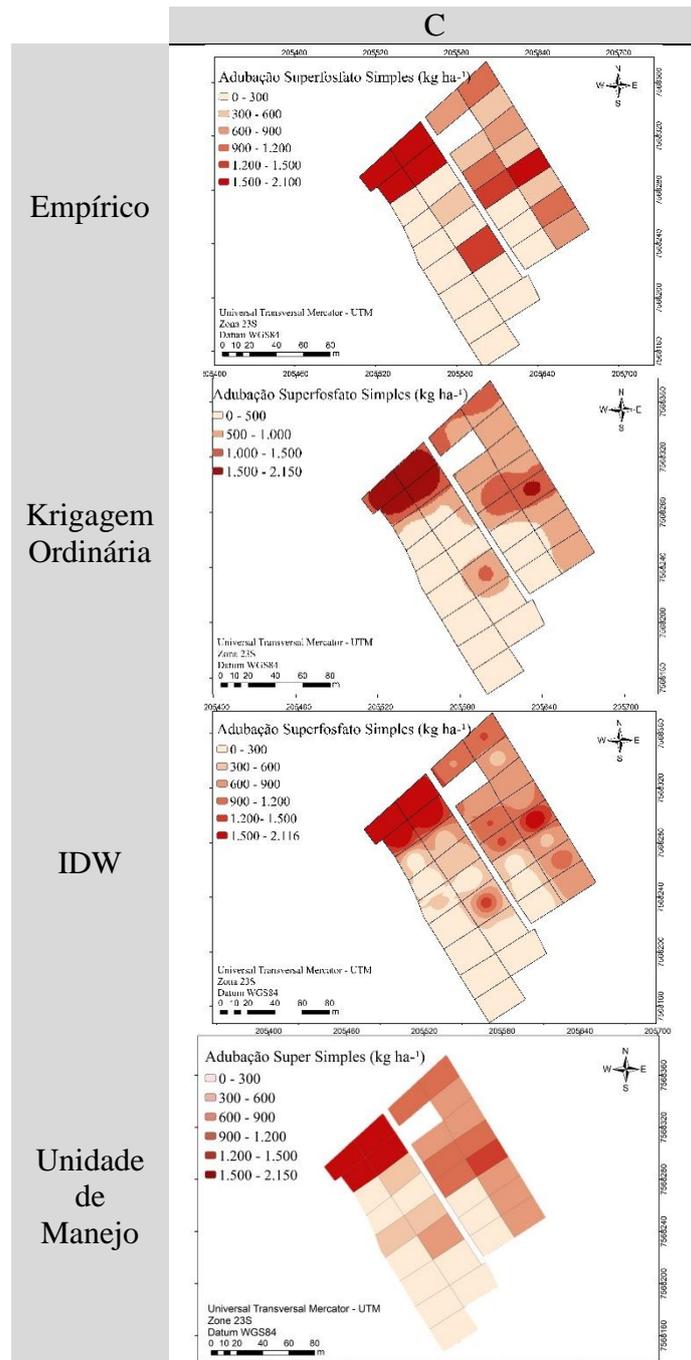


Figura 4. Comparação de métodos de interpolação e definição de unidades de manejo, referentes a Calagem (A), adubação KCl (B) e Superfosfato Simples (C) (*continuação*)

A veracidade dos modelos ajustados foi analisada através da validação simples dos dados, por meio dos seguintes parâmetros: erro médio absoluto, calculado por meio da média das diferenças entre o valor estimado e o valor real dos dados, e quanto mais próximo de zero seu resultado, melhor a análise (CAETANO, 2016); Coeficiente de Correlação de Pearson (r), que indica a intensidade da associação linear existente entre as variáveis, através

da divisão entre os valores reais sobre os preditos (ou estimados), seu índice varia de -1 (menos um) a 1 (um) (SOUZA, 2016); o Coeficiente de Determinação (R^2), que mensura a variação dos dados de acordo com o modelo ajustado em relação à variação total dos dados e quanto mais próximo de 1 (um) estiver o valor de R^2 melhor será o ajuste do modelo (BIASE & SANTANA, 2012); e a soma dos quadrado dos erros (RQME), a qual determina o

ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, sendo que quanto menor o valor de RSS, melhor o ajuste (MIRANDA et al., 2015).

Assim, as comparações entre os mapas interpolados e o empírico, em sua totalidade, apresentaram valores de Coeficiente de Correlação de Pearson entre 0,8 e 1, indicando que há uma correlação forte positiva entre os dados interpolados e os amostrados. O mesmo ocorreu em relação ao Coeficiente de Determinação e RQME (Tabela 4).

Qualquer um dos métodos apresentados poderia ser usado para interpolar valores, excetuando-se nos casos

em que houve efeito pepita puro, embora os dados possam ser “forçados” a se adaptarem a determinado método. Mas, se existe um desejo de uma análise mais precisa, de maximizar a potencialidade da análise com um maior embasamento estatístico da seleção do modelo final, deve-se fazer uma análise dos erros dos valores preditos. A Krigagem permite que se faça uma Validação Cruzada para checagem da qualidade do modelo de ajuste selecionado e da interpolação, ou, pelo menos, uma comparação entre valores preditos e observados (YAMAMOTO & LANDIM, 2013).

Tabela 4. Estatísticas de avaliação empregadas para comparação de métodos de interpolação de parâmetros de correção e adubação de uma área *Panicum maximum* cv. Tanzânia em São Carlos- SP

	Comparação	Estatísticas de Avaliação			
		Erro médio absoluto	r	R ²	RQME
Calagem	Empírico x Krigagem	-			
	Empírico x IDW	41,71	0,92	0,84	5,74
KCl	Empírico x Krigagem	8,53	0,97	0,94	0,59
	Empírico x IDW	8,53	0,97	0,94	0,59
Superfosfato Simples	Empírico x Krigagem	90,62	0,98	0,96	0,03
	Empírico x IDW	94,44	0,98	0,97	6,86 x10 ⁻⁵

Em que: R² = Coeficiente de Determinação; RQME = raiz quadrada do quadrado médio do erro; e, r = Coeficiente de Correlação de Pearson.

Como não foi possível realizar a interpolação de Calagem pelo método da krigagem, já que essa variável apresenta o efeito pepita puro e a interpolação baseada em seu semivariogramas apresentaria grande erro associado, houve a delimitação das unidades de manejo decorrente do método determinístico. Destas, 48% da área (15 piquetes) necessitam de uma aplicação de calagem entre 1000 e 1500 kg e apenas 1 (um) piquete necessita da maior dose, entre 2000 e 2670 kg.

Quando interpolados os valores de KCl pelos dois métodos abordados, notou-se a igualdade dos mapas, o que

comprovado pelos valores dos coeficientes de correlação. Tal fato pode ser consequência do número de amostragens realizadas na área. Dessa forma, 13 (treze) piquetes necessitam de uma aplicação entre 100 e 200 kg, 8 (oito) de quantias menores que 50kg e apenas 1 (um) da dose maior, entre 300 e 413 kg.

Os dados de Superfosfato Simples quando interpolados tiveram certa semelhança entre a Krigagem Ordinária e o IDW. Quando feito pelo método que leva e consideração a geoestatística, houve maior detalhamento das classes de interpretação, corroborando os trabalhos de Grego et al.

(2014), que afirmaram que a obtenção de mapas precisos da variabilidade espacial de fatores envolvidos em AP só é possível utilizando ferramentas como a geoestatística. Bernardi et al. (2017) verificou que o método IDW pode gerar um detalhamento excessivo do mapa de recomendação, ao contrário da krigagem

que possibilita uma suavização dos limites. Assim sendo, as unidades de manejo foram estabelecidas de acordo com o mapa de interpolação por Krigagem. Indicando que 12 (doze) piquetes necessitam de uma aplicação entre 0 e 300 kg da adubação e 4 (quatro) necessitam da maior dose, entre 1.500 e 2.150 kg.

CONCLUSÕES

1. A geoestatística auxilia nas decisões estratégicas e complexas em relação ao gerenciamento do sistema de produção agrícola e conseqüentemente nos seus efeitos ambientais.

2. O emprego da lógica Fuzzy para determinação das zonas de manejo mostrou-se eficiente. Colaborando para a gama de estudos de cunho ambiental existentes, promovendo a subtração de possíveis erros, difusão da técnica e melhoria no uso da mesma.

3. A definição das zonas de manejo, tanto para conhecimento da fertilidade quanto recomendação de corretivos, é uma estratégia válida para aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais, reduzir o impacto da agricultura no ambiente e

otimizar os custos econômicos para o sistema.

4. Os resultados dos métodos de interpolação são muito adequados, com alto grau de confiabilidade dos dados, uma vez que se têm os erros associados aos dados preditos. Foi possível concluir que o melhor método de interpolação para os parâmetros estudados foi a Krigagem Ordinária.

5. A Agricultura de Precisão proporciona a redução dos custos da produção e a tomada de decisão rápida e certa. Entre os benefícios também podemos citar a maior produtividade da lavoura e a melhoria do meio ambiente pelo menor uso de defensivos, além de prover registros da área produtiva mais detalhados e úteis.

REFERÊNCIAS

BAZZI, C. L.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; NÓBREGA, L. H. P.; ROCHA, D. M. Definição de unidades de manejo usando atributos químicos e físicos do solo em uma área de soja. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.33, p.952-964, 2013.

BELARMINO, M. C. J.; PINTO, J. C.; ROCHA, G. P.; FURTINI NETO, A. E.; MORAIS, A. R. de. Altura de perfilho e rendimento de matéria seca de capim Tanzânia em função de diferentes doses de superfosfato simples e sulfato de amônio. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v.27, p.879-885, 2003

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M. B.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 211-227, 2015.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; FERREIRA, R. P.; SANTOS, K. E. L.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. **Precision agriculture**, v. 17, p. 737-752, 2016.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.;

- OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 590-593, 2017.
- BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 492-499.
- BIASE, A. G.; SANTANA, T. V. F. Geostatística Análise de dados em outro software Gamma Design gS+. Pós-graduação em Estatística e Experimentação Agrônômica. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012
- CAETANO, M. A. L. Métodos Quantitativos. Insper Ibmecc São Paulo, 2016
- CALDERANO FILHO, B., SANTOS, H.G., FONSECA, O.O.M., SANTOS, R.D., PRIMAVERSI, O. E PRIMAVERSI, A.C. 1998. Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. **Embrapa-CPPSE**, São Carlos. Boletim de Pesquisa.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; DRUK, S.; CARVALHO, M. S. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. Análise espacial de dados geográficos. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2004, 209 p.
- CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.
- CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Engenharia Agrícola**, v.26, p.374-387, 2006.
- COSTA, F. H. S.; PETTA, R. A.; LIMA, R. F. DE S.; DE MEDEIROS, C. N. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia potiguar, região de Macau (RN), utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, p. 119-127, 2006.
- COUTINHO, E. L. M.; FRANCO, H. C. J.; ORIOLI JÚNIOR, V.; PASQUETTO, J. V. G E PEREIRA, L.S. Calagem e adubação potássica para o capim-tifton 85. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 101-111, 2014.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) Inc., ArcGIS® 10.2: getting started with ArcGIS. Redlands, ESRI. 2009.
- FILIPPINI-ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 84-95.
- GAMMA DESIGN Software. gS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA, 2012.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v.327, p.828-31, 2010.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.169-177, 2005.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. **Agricultura de Precisão- Resultados de um Novo Olhar**. Brasília, DF: Embrapa, p. 74-83, 2014.
- INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI,

- A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33.
- INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; QUEIROS, L. R.; RESENDE, A. V.; VILELA, M. F.; JORGE, L. A. C.; BASSOI, L. H.; PEREZ, N. B.; FRAGALLE, E. P. Agricultura de Precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro. **Agricultura de Precisão- Um Novo Olhar**. Brasília, DF: Embrapa, p. 14-26, 2011
- JUNIOR, A.C. Análise de fragilidade ambiental com métodos multicritério – críticas e proposta metodológica, 2011. Tese (Doutorado) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos.
- MESQUITA, E. E.; NERES, M. A.; OLIVEIRA, P. S. R. DE; MESQUITA, L. P.; SCHNEIDER, F.; TEODORO JÚNIOR, J. R. Teores críticos de fósforo no solo e características morfogênicas de *Panicum maximum* cultivares Mombaça e Tanzânia-1 e Brachiaria híbrida Mulato sob aplicação de fósforo. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.11, p.292-302, 2010.
- MIRANDA, C. S.; FILHO, A. C. P.; LASTORIA, G. Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade espacial da piezometria. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, João Pessoa – PB. INPE, p. 1923- 1928, 2015
- OLIVEIRA, I. P. DE; CASTRO, F. G. F.; MOREIRA, F. P.; PAIXÃO, V. V. DA; CUSTÓDIO, D. P.; SANTOS, R. S. M. DOS; FARIA, C. D.; COSTA, K. A. de P. Efeitos qualitativo e quantitativo da aplicação de fósforo no capim Tanzânia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.30, p.37-41, 2000.
- OLIVEIRA, P.P.A.; BERNARDI, A.C.C.; SANTIAGO, R.R.; SILVA, R.F. Software adubapasto 1.0 para recomendação de calagem e adubação para sistemas de pastejo intensivo. São Carlos, SP: **Embrapa Pecuária Sudeste**, 2010.
- OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. Geoestatística aplicada na Agricultura de Precisão utilizando o Vesper. 23. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2015.
- PIMENTEL-GOMES, F. Curso de Estatística Experimental. 15. ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. 451 p.
- PRIMAVESI, A. C.; ANDRADE, A. G.; ALVES, B. J. R.; ROSSO, C.; BATISTA, E. M.; PRATES, H. T.; ORTIZ, F. R.; MELLO, J.; FERRAZ, M. R.; LINHARES, N. W.; MACHADO, P. L. O. A.; MOELLER, R.; ALVES, R. C. S.; SILVA, W. M. Métodos de análise de solo. In: NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. Manual de laboratórios: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos: **Embrapa Pecuária Sudeste**, 2005. p. 67-130
- RABELLO, L.M.; BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Condutividade elétrica aparente do solo. Agricultura de Precisão-Resultados de um Novo Olhar. Brasília, DF: **Embrapa**, p. 48-57, 2014
- RAGAGNIN, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G.; SILVEIRA NETO, A. N. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.600-607, 2010
- RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: **Instituto Agrônomo/Fundação IAC**, 1997.
- RAMOS, F. T.; SANTOS, R. T.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; MAIA, J. C. S. Defining management zones based on soil attributes and soybean productivity. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, p. 427-436, 2017

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V. H. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999. p.359.

RODRIGUES JUNIOR, F. A.; VIEIRA, L. B.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, p. 778–787, 2011.

SANTOS, R. O.; FRANCO, L. B.; SILVA, S. A.; SODRÉ, G. A.; MENEZES, A. A. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 21, p. 88-93, 2017

SCHELLBERG, J.; HILL, M.J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. **European Journal of Agronomy**, v.29, p.59-71, 2008.

SOUZA, A. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson. Departamento de Matemática, Universidade dos Açores, 2016

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 45-94, 1985.

WEIRICH NETO, P. H.; SVERZUT, C. B.; SCHIMANDEIRO, A. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.338-343, 2006.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P.B. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215p.

ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2001. 114 p. Tese de Livre-Docência.