
CORRELAÇÃO ENTRE COMPONENTES DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR COM pH DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DO NOROESTE PAULISTA

César Gustavo da Rocha Lima¹, Morel de Passos e Carvalho², Adriano Souza³, Nídia Raquel Costa⁴, Rafael Montanari⁵

RESUMO

A produtividade agrícola depende primordialmente da capacidade produtiva dos solos. Assim, as práticas de adequação química do solo objetivam modificações nas suas características, com vistas a proporcionar melhores condições ao desenvolvimento das culturas. O presente estudo avaliou as correlações lineares e espaciais entre os atributos da produtividade da planta com o pH do solo. Na Fazenda Valença-I, Suzanápolis-SP, instalou-se uma malha geostatística contendo 118 pontos amostrais, em uma área de 10,5 ha, onde foram analisados os atributos da cana-de-açúcar: produtividade de tonelada de colmos por hectare (TCH), população de plantas (POP) e açúcares totais recuperáveis (ATR); e como atributos químicos do solo: o pH (pH) e Delta pH (DpH), em diferentes profundidades no perfil (0-0,20; 0,20-0,40; 0,80-1,00 m). Os resultados indicaram que a correlação linear entre os atributos da planta com os do solo é significativa. A melhor correlação ocorre entre TCH com o pH na profundidade de 0,80-1,00 m. Espacialmente, há uma apreciável resposta entre a produtividade com o pH do solo na camada de 0,20-0,40 m. O DpH na camada de 0,80-1,00 m também apresenta importante interação com o ATR, o que permite inferir que melhor qualidade química na camada mais profunda proporciona melhor qualidade tecnológica do produto industrializável. Por fim, o estudo do solo nas camadas mais profundas (0,20-0,40 m e 0,80-1,00 m) aponta interação (linear e espacial) tanto com a produtividade quanto com o atributo tecnológico da cultura, apresentando-se como satisfatórios alvos de adequação química do solo.

Palavras-chave: agricultura de precisão, atributos químicos do solo, manejo do solo

ABSTRACT

CORRELATION BETWEEN THE SUGARCANE PRODUCTIVITY WITH THE pH OF A RED ULTISOL DYSTROPHIC OF NORTHWEST OF SÃO PAULO STATE, BRAZIL

Agricultural productivity depends primarily on the productive capacity of soils. Thus, practices of chemical suitability of the soil aim to changes in their characteristics to provide better conditions for the development of cultures. The present study aimed to evaluate the linear and spatial correlations between the attributes of plant productivity with soil pH. The aim of this study was to evaluate the linear and spatial correlations between the attributes of the plant with soil. In Farm Valencia-I, Suzanápolis-SP, Brazil, a geostatistical grid with 118 sampling points has been installed in an area of 10.5 ha. The attributes of sugarcane analyzed was: productivity of tons of stems per hectare (TSH), plant population (PP) and total recoverable sugars (TRS); and as soil chemical properties: pH (pH) and Delta pH (DpH) at different depths (0-0.20; 0.20-0.40; 0.80-1.00 m). The results indicate that the linear correlation between the attributes of the soil with the plant is significant. The best correlation is between TRS with the pH in the depth of 0.80-1.00 m. Spatially, there is a significant interaction between productivity with the pH of the soil at a depth of 0.20-0.40 m. The DpH depth of 0.80-1.00 m also correlates with the TRS, which allows inferring that best chemical quality in the deepest layer provides better technological quality of industrializable product. The soil study in the deeper layers (0.20-0.40 m and 0.80-1.00 m) indicates interaction (linear and spatial) both productivity and with the technological attribute of sugarcane, presenting as target satisfactory of soil chemical suitability.

Keywords: precision agriculture, soil chemical attributes, soil management

Recebido para publicação em 25/02/2015. Aprovado em 11/04/2016.

1 - Geógrafo, Professor da Faculdade de Engenharia/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, cesarlima@dec.unesp.br

2 - Engº. Agrônomo, Professor da Faculdade de Engenharia/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, mcarva@agr.feis.unesp.br

3 - Engº. Civil, Professor da Faculdade de Engenharia/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, adriano@dec.feis.unesp.br

4 - Engª. Agrônoma, PPG - Faculdade de Ciências Agrárias/UNESP, Botucatu, SP, Brasil, nidiar_costa@hotmail.com

5 - Engº. Agrônomo, Professor da Faculdade de Engenharia/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, montanari@agr.feis.unesp.br

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea de grande importância econômica para o Brasil e, apesar de sua múltipla utilidade, tem sido intensamente empregada como matéria prima pelo setor agroindustrial (FAHL *et al.*, 1998). O processo industrial canavieiro visa principalmente produtividade, qualidade do produto industrializável, e a longevidade do canavial. Assim, sob tais perspectivas, o setor sucroalcooleiro do Brasil tem se destacado como o maior produtor mundial da cana-de-açúcar, apresentando uma produtividade média em torno de 74,7 t ha⁻¹ (CONAB, 2014).

O pH do solo é um dos atributos de maior influência no desenvolvimento das plantas, uma vez que está diretamente ligado à solubilidade, concentração, disponibilidade e capacidade de retenção da maioria dos nutrientes essenciais às culturas. De acordo com Raij (1991), o pH isoladamente possibilita ampla inferência sobre possíveis problemas com a fertilidade do solo ou mesmo com toxicidade, tornando-o um eficiente indicador qualitativo, pois a literatura tem evidenciando grande interação, entre causa efeito, deste atributo do solo com o desenvolvimento das culturas (SOUZA *et al.*, 2007). Já o Delta pH indica o estado da carga elétrica no solo. Assim, quando o Delta pH é negativo indica que o solo possui uma maior CTC (VIEIRA, 1997), ao passo que o Delta pH positivo indicará maior CTA, retendo mais ânions.

A geoestatística tem sido amplamente utilizada e difundida como ferramenta na pesquisa agrônômica, contribuindo à estatística clássica para o entendimento das diferentes interações espaciais entre os atributos químicos do solo e o desenvolvimento das culturas (CORÁ; BERALDO, 2006). O uso desta técnica de análise tem possibilitado a adequação pontual de determinadas áreas agrícolas proporcionando economia de insumos, aumento de produtividade e melhor qualidade dos produtos agrícolas. Assim, no Brasil, tem-se observado crescente aplicação da geoestatística nos estudos de manejo do solo voltado à produção da cana-de-açúcar, conforme observado nos trabalhos de Corá *et al.* (2004),

Marques Júnior *et al.* (2008), Mello *et al.* (2006), Souza *et al.* (2004) e Souza *et al.* (2007).

Diante do exposto, pressupondo que a variabilidade do pH do solo em maiores profundidades no perfil também exerça influência no desenvolvimento das culturas, objetivou-se analisar as correlações lineares e espaciais entre os atributos da produtividade e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH e Delta pH do solo pesquisado sob diferentes metodologias de avaliação em três camadas no perfil.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Fazenda Valença I, no município de Suzanópolis, noroeste do Estado de São Paulo, Brasil, nas coordenadas 20°27'33"S e 51°08'05"W. O clima é o Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação e temperaturas médias anuais de 1400 mm e 24,5 °C, respectivamente. O solo, classificado de acordo com Embrapa (2013), foi um ARGISSOLO VERMELHO distrófico abrupto textura média/argilosa, A moderado, hiperdistrófico, meso-epieutrófico, endoálico, endodêmico, epicompactado, muito profundo, fortemente ácido.

A cultura estudada foi a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), variedade RB 855453, implantada sobre área de pastagem com *Brachiaria decumbens*. A dessecagem foi feita com glifosato (1,8 kg ia ha⁻¹). No preparo do solo, foram realizadas uma gradagem pesada (SGAC 18) e duas gradagens intermediárias (SIC 28) e a aplicação a lanço de 2,0 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, sendo utilizado para sua incorporação, a 0,35 m, um arado de aivecas.

O plantio foi realizado em abril de 2010, utilizando-se um sulcador de duas linhas (1,50 m). No momento da realização do sulco utilizou-se 500 kg ha⁻¹ da fórmula 6-30-24 e para cobertura dos toletes foi aplicado fipronil (200 g ia ha⁻¹). Após o primeiro corte (mecanizado), foi feita aplicação de 1 t ha⁻¹ de gesso e 500 kg ha⁻¹ da fórmula 18-00-27. Após o segundo corte, realizou-se adubação da soqueira com 400 kg ha⁻¹ da fórmula 18-00-27. Na ocasião da coleta de dados, a cultura encontrava-se no terceiro corte e bisada.

Para coleta dos dados, foi alocada uma malha geoestatística amostral constituída de 118 pontos, distribuídos aleatoriamente de forma a cobrir toda a área do talhão. O perímetro de abrangência dos pontos de coleta cobriu uma extensão de aproximadamente 10,5 ha. Na malha de coleta os pontos amostrais espaçavam-se, na grande malha, em aproximadamente 34 m, ao passo que na malha de refinamento em aproximadamente 17 m.

Foram determinados os atributos químicos do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral. Para a coleta dos atributos da planta, definiu-se uma área útil, compreendendo duas linhas de 3 m de cultivo (9 m²) ao redor de cada ponto amostral. Para determinação da produtividade da cana-de-açúcar (Tonelada de Colmos por Hectares -TCH), utilizou-se uma balança eletrônica portátil. Para obtenção do peso por ponto, os colmos da área útil foram cortados simulando a colheita manual sendo, posteriormente, organizados em feixes, pesados e somados. Os dados de pesagem de THC coletados em campo, foram transferidas para uma planilha do *Excel*, na qual foi realizada a extrapolação dos valores da área útil de 9 m² para 1 ha. Na obtenção da População de Plantas (POP), expresso em plantas m⁻², utilizou-se uma trena para marcar 3 m lineares e, assim, executou-se a contagem do número de plantas industrialmente viáveis por ponto. Na determinação dos Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), foram coletados em sequência na touceira 10 colmos industrializáveis. Os feixes identificados foram despontados e avaliados em laboratório, onde obteve-se o ATR, em kg t⁻¹ de colmos (CONSECANA, 2006).

Em amostras coletadas na entrelinha da semeadura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0 - 0,20 m; 0,20 - 0,40 m e 0,80 - 1,00 m, utilizando para tal um trado caneca, foram medidos o pH em água (pHa), pH em cloreto de cálcio (pHc) e o pH em cloreto de potássio (pHk). As amostras deformadas do solo foram secas ao ar (TFSA) e posteriormente passadas por uma peneira de 2,0 mm. O pHa foi determinado por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo/água (1:2,5). O pHc foi determinado em solução de CaCl₂ 0,025 mol L⁻¹ (1:2,5) ao passo que o pHk foi determinado em solução de KCl 1 mol L⁻¹ (1:2,5),

conforme Embrapa (2009). O Delta pH (DpH) foi calculado como sendo a diferença entre o valor do pH determinado em cloreto de potássio e o pH determinado em água.

Para cada atributo foi efetuada a análise descritiva clássica com o auxílio do software estatístico SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997). Na avaliação da normalidade, ou de lognormalidade, para cada atributo, realizou-se o teste de Shapiro e Wilk a 1% de probabilidade. Com o auxílio da planilha de cálculos *Excel*, montou-se a matriz de correlação objetivando efetuar as correlações lineares simples entre as combinações, duas a duas, de todos os atributos para posteriormente modelar as regressões de interesse agrônomo.

A análise espacial foi realizada pelo uso do pacote geoestatístico Gamma Design Software 7.0 - GS+ (ROBERTSON, 2004). Assim, isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial pelo cálculo do semivariograma simples. Aos atributos que apresentaram tendência em seus dados foi aplicada a técnica do refinamento polinomial (DALCHIAVON *et al.*, 2011). Seguidamente com o uso do software GS+, ajustaram-se os semivariogramas cruzados entre as combinações de atributos da planta vs. solo.

Os ajustes semivariográficos, simples e cruzados, foram efetuados pela seleção inicial de: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); b) o maior coeficiente de determinação (r²), e c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE). A análise do ADE foi efetuada conforme expressão contida em Robertson (2004):

$$ADE = [C/(C+C_0)] \cdot 100 \quad (1)$$

em que,

ADE = avaliador da dependência espacial;

C = variância estrutural; e

C+C₀ = o patamar.

A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a) ADE ≤ 25% indicando variável espacial fracamente dependente; b) 25% < ADE ≤ 75% moderadamente dependente, e c) ADE > 75% fortemente dependente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 está apresentado os resultados da análise estatística descritiva dos atributos da produtividade da cana-de-açúcar e dos atributos químicos do solo avaliados.

De acordo com Freddi *et al.* (2006), a variabilidade de um atributo pode ser classificada conforme a magnitude do seu coeficiente de variação. Assim, na análise descritiva (Quadro 1), para o atributo da planta (TCH) foi observado alta variabilidade dos dados (CV = 23,0%) similares ao trabalho de Souza *et al.* (2008) no qual apontaram CV da mesma magnitude. Do mesmo modo, a população de plantas (POP) também apresentou alta variabilidade (CV = 20,9%). Já o ATR

apresentou média variabilidade (CV = 11,9%).

O pH do solo (Quadro 1), nas camadas de 0 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m, apresentou baixa variabilidade dos dados indiferente da metodologia utilizada. Já na camada mais profunda (0,80 - 1,00 m) o pHa apresentou CV baixo, ao passo que o pHk e pHc apresentaram médio CV. Tal diferença entre suas variabilidades pode ter ocorrido devido à possível presença de sais solúveis na camada mais profunda do solo, influenciando a força iônica da solução na determinação do pH em água. Fato esse que não ocorre quando o pH é determinado em solução de KCl e CaCl₂ (NOVAIS *et al.*, 2007). Por outro lado, essa diferença observada entre os atributos do pH ficou em sintonia com os trabalhos de Campos *et al.* (2007) Corá *et al.* (2004), Mello *et al.* (2006)

Quadro 1. Análise descritiva dos atributos da produtividade da cana-de-açúcar e do pH de um Argissolo Vermelho distrófico.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								
	Média	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade ^(b)	
		Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
<i>Atributos da Planta</i>									
<i>TCH (t ha⁻¹)</i>	89,51	42,00	153,01	20,618	23,0	0,075	0,143	0,3860	NO
<i>ATR (kg t⁻¹)</i>	136,0	90,69	171,84	16,179	11,9	0,209	-0,466	0,0708	NO
<i>POP (pl m⁻²)</i>	6,55	2,44	10,67	1,374	20,9	0,763	0,047	0,4665	NO
<i>Atributos do Solo (0 - 0,20 m)</i>									
<i>pHa1</i>	5,87	5,30	6,60	0,247	4,2	-0,013	0,122	0,0313	TL
<i>pHk1</i>	4,83	4,30	5,50	0,257	5,3	-0,479	0,055	0,0402	TN
<i>pHc1</i>	4,64	4,00	5,20	0,233	5,0	-0,326	-0,016	0,0656	NO
<i>DpH1</i>	-1,05	-1,40	-0,70	0,160	15,3	-0,166	-0,353	0,0001	IN
<i>Atributos do Solo (0,20 - 0,40 m)</i>									
<i>pHa2</i>	6,01	5,40	6,70	0,240	4,0	-0,100	0,083	0,0561	NO
<i>pHk2</i>	4,97	4,40	5,70	0,282	5,7	-0,396	0,023	0,0441	TL
<i>pHc2</i>	4,75	4,30	5,40	0,249	5,2	-0,479	0,199	0,0204	TL
<i>DpH2</i>	-1,04	-1,50	-0,500	0,163	15,7	0,548	-0,205	0,0003	IN
<i>Atributos do Solo (0,80 - 1,00 m)</i>									
<i>pHa3</i>	5,99	5,20	6,80	0,364	6,1	-0,767	-0,107	0,0123	IN
<i>pHk3</i>	4,94	4,30	5,90	0,527	10,7	-1,456	0,310	0,0001	IN
<i>pHc3</i>	4,78	4,20	5,90	0,486	10,2	-1,072	0,523	0,0001	IN
<i>DpH3</i>	-1,06	-1,90	-0,40	0,292	27,5	0,301	-0,365	0,0507	LN

^(a) TCH refere-se à produtividade de colmos por hectare; POP refere-se à população de plantas por m²; ATR refere-se aos açúcares totais recuperáveis; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos da reação do solo nas respectivas camadas (1: 0 - 0,20 m; 2: 0,20 - 0,40 m; 3: 0,80 - 1,00 m); ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN, LN, TL e IN respectivamente do tipo normal, tendendo à normal, lognormal, tendendo à lognormal e indefinido.

e Souza *et al.* (2007; 2010), nos quais também foram encontrados dados apresentando ora baixa ora média variabilidade. Já o Delta pH apresentou média variabilidade nas camadas de 0 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m e alta variabilidade na camada de 0,80 - 1,00 m.

No Quadro 1, apresenta-se o valor médio para produtividade de colmos (TCH) (89,5 t ha⁻¹), que está acima da média brasileira na safra 2013/2014 (74,7 t ha⁻¹) (CONAB, 2014). Por outro lado, por se tratar de cana bisada, deduz-se que o rendimento não foi tão satisfatório, principalmente pelo fato de Fahl *et al.* (1998) ter apontado para o Estado de São Paulo produtividades em torno de 85 t ha⁻¹, no quinto corte. Sabe-se que a baixa população de plantas pode influenciar diretamente a produtividade das culturas. Assim, no presente trabalho, a POP apresentou valor médio de 6,5 plantas m⁻², considerado abaixo do ideal para o espaçamento utilizado (1,5 m), que seria um valor médio de 10,5 pl. m⁻². Deste modo, a baixa população de plantas observada (Quadro 1) deve ter corroborado para que a produção da cana estivesse abaixo do esperado, uma vez que, para cana bisada no terceiro corte, esperava-se um maior rendimento de fitomassa/área. Já com relação ao ATR, o seu valor médio (136 kg t⁻¹) está acima dos valores considerados como padrão (em torno de 122 kg t⁻¹) conforme apresentado por Segato *et al.* (2006).

Os dados observados aos atributos do solo (Quadro 1) indicaram que os valores de pH foram mais elevados para pH em água (pHa) em todas as camadas. Tal fato deve-se principalmente a influência de sais no solo (RAIJ, 1991; NOVAIS *et al.*, 2007). Ainda com base nos dados apresentados no Quadro 1, pode-se inferir que o pH do solo avaliado (KCl e CaCl₂), em todas as camadas do solo, apresentou valores abaixo da média (entre 5,5 e 6,5) considerada ideal para disponibilidade da maioria dos nutrientes, indicando assim, elevada acidez conforme Raij *et al.* (1997). Entre as camadas estudadas (0 - 0,20; 0,20 - 0,40 e 0,80 - 1,00 m) observou-se que a diferença nos valores de pH foi pequena, porém indicou um aumento gradual em profundidade no perfil, provavelmente devido a calagem e gessagem realizadas no momento do preparo do solo, associado ao processo natural de percolação em profundidade no perfil.

De modo geral, as operações de preparo do solo proporcionaram um ambiente mais homogêneo também em profundidade no perfil. Do mesmo modo, o DpH médio apresentou-se bem uniforme no perfil, com valores negativos indicando maior capacidade de retenção de cátions em todas as camadas.

Das correlações avaliadas entre os atributos da planta (Quadro 2), houve significância entre os pares TCH vs POP ($r = 0,388^{**}$) e ATR vs POP ($r = -0,178^{*}$). A primeira correlação de maior interesse prático agrônômico evidenciou correlação positiva e altamente significativa com TCH. Assim, em relação à TCH, a POP foi um atributo de incremento direto da produção, algo esperado, uma vez que o número de indivíduos tem sido fator determinante para definir a melhor produtividade da cultura.

Das correlações entre os atributos da planta vs. solo (Quadro 2), observou-se significância exclusiva entre os pares TCH vs. pHc2 ($r = 0,183^{*}$), TCH vs. DpH2 ($r = 0,228^{*}$), TCH vs. pHa3 ($r = 0,218^{*}$), TCH vs. pHk3 ($r = 0,299^{**}$), TCH vs. pHc3 ($r = 0,294^{**}$) e, TCH vs. DpH3 ($r = 0,268^{**}$), todos de forma direta. Deste modo, com o aumento do pH, principalmente na camada mais profunda, haverá o aumento na produtividade, seja pelo aumento da disponibilidade de nutrientes, ou pela redução de possíveis efeitos de toxicidade.

Conforme observado neste estudo (Quadro 2), algumas pesquisas têm indicado que, apesar de significativas, tem sido baixas as correlações lineares entre atributos químicos do solo com a produtividade das culturas (Souza *et al.*, 2008). Assim, em virtude de baixos coeficientes de correlação observado entre os atributos da planta vs. solo, Souza *et al.* (2008) com base em seu trabalho e demais referências (Souza *et al.*, 2004) relatou que o relevo tem sido um atributo de definição da distribuição de atributos químicos do solo, apresentando altas correlações com a produtividade de culturas. Porém, do ponto de vista prático, o relevo não é comumente passível de manejo agrícola como os demais atributos químicos, principalmente por ele (relevo) agregar a influência de um conjunto de fatores, diferentemente da observação de um exclusivo atributo passível de adequação como o pH (calagem, gessagem). Portanto, diferentemente do relevo, os atributos

Quadro 2. Matriz de correlação linear simples entre atributos da produtividade da cana-de-açúcar e do pH de um Argissolo Vermelho distrófico.

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)														
	TCH	POP	ATR	pHa1	pHk1	pHc1	DpH1	pHa2	pHk2	pHc2	DpH2	pHa3	pHk3	pHc3	
POP	0.388**														
ATR	-0.028 ^{ns}	-0.178*													
pHa1	-0.020 ^{ns}	0.124 ^{ns}	-0.093 ^{ns}												
pHk1	0.026 ^{ns}	0.075 ^{ns}	-0.124 ^{ns}	0.777**											
pHc1	0.073 ^{ns}	0.126 ^{ns}	-0.104 ^{ns}	0.718**	0.899**										
DpH1	0.057 ^{ns}	-0.083 ^{ns}	-0.067 ^{ns}	-0.255**	0.385**	0.326**									
pHa2	-0.005 ^{ns}	0.236*	-0.211*	0.750**	0.643**	0.686**	-0.102**								
pHk2	0.128 ^{ns}	0.229*	-0.217*	0.564**	0.702**	0.711**	0.252**	0.816**							
pHc2	0.183*	0.233*	-0.155 ^{ns}	0.524**	0.627**	0.688**	0.202*	0.791**	0.927**						
DpH2	0.228*	0.049 ^{ns}	-0.065 ^{ns}	-0.127 ^{ns}	0.269**	0.219*	0.585**	-0.060 ^{ns}	0.528**	0.438**					
pHa3	0.218*	0.223*	0.029 ^{ns}	0.323**	0.204*	0.289**	-0.185*	0.410**	0.336**	0.394**	-0.022 ^{ns}				
pHk3	0.299**	0.167 ^{ns}	0.070 ^{ns}	0.165 ^{ns}	0.077 ^{ns}	0.139 ^{ns}	-0.158*	0.258**	0.249**	0.302**	0.052 ^{ns}	0.848**			
pHc3	0.294**	0.205*	0.088 ^{ns}	0.218*	0.083 ^{ns}	0.155 ^{ns}	-0.225**	0.291**	0.242**	0.299**	-0.010 ^{ns}	0.845**	0.980**		
DpH3	0.268**	0.024 ^{ns}	0.091 ^{ns}	-0.106 ^{ns}	-0.115 ^{ns}	-0.109 ^{ns}	-0.054 ^{ns}	-0.046 ^{ns}	0.031 ^{ns}	0.054 ^{ns}	0.121 ^{ns}	0.285**	0.750**	0.717**	

(a) TCH refere-se à produtividade de colmos por hectare; POP refere-se à população de plantas por m²; ATR refere-se aos açúcares totais recuperáveis; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos da reação do solo nas respectivas camadas (1: 0 - 0,20 m; 2: 0,20 - 0,40 m; 3: 0,80 - 1,00 m); (b) * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

químicos e físicos do solo, mesmo apresentando baixas correlações, quando significativas, devem ser tecnicamente consideradas.

Assim, a TCH pode ser estimada em função dos atributos que apresentaram as melhores correlações, sendo por meio da POP (como atributo da planta), ou por meio do pH3 e do pHc3 (como atributos do solo), a partir das seguintes equações de regressão:

$$TCH = 5,518.10^1 \cdot \exp^{POP. 6,929.10^{-2}**} \quad (r = 0,393, p < 0,01) \quad (2)$$

$$TCH = 3,172.10^1 + 1,169.10^{1**}.pHk3 \quad (r = 0,299, p < 0,01) \quad (3)$$

$$TCH = 2,997.10^1 + 1,245.10^{1**}.pHc3 \quad (r = 0,294, p < 0,01) \quad (4)$$

Deste modo, a relação exponencial entre TCH vs POP, dada pelo modelo matemático descrito na equação 2, indicou que, onde a POP variou de 2,4-10,7 pl. m⁻², a TCH apresentou valores da ordem de 65,1-115,5 t ha⁻¹. Esse intervalo de dados infere que a população ideal, para uma produtividade máxima nas mesmas condições de campo, seria de 10,7 pl. m⁻², equivalente a aproximadamente 16 plantas por metro.

Já com relação às regressões modeladas entre planta vs solo [equações (3) e (4)], estas combinações apresentaram interação direta de causa e efeito entre o atributo da planta com o pH do solo na camada de 0,80-1,00 m. Indicando que a camada menos impactada pelo manejo agrícola possibilitou observar as melhores interações com o atributo da planta. Assim, a melhor relação linear dada entre TCH vs pHk3, [equação (3)], indicou que, o aumento de 1 décimo nos valores de pHk3 resultou, para a área estudada, um incremento de 1,17 t ha⁻¹ na produtividade de colmos da cana-de-açúcar. Portanto, do ponto de vista prático, a qualidade química do solo na camada mais profunda se mostrou, no presente estudo, como um dos fatores de incremento da produtividade da cana-de-açúcar.

A análise espacial (Quadro 3) evidenciou, à exceção da POP e #pHk3 que apresentaram efeito pepita puro (epp.), apreciáveis semivariogramas. Assim, a análise dos parâmetros semivariográficos simples revelou para produtividade da cana (#TCH) ajuste do tipo exponencial, com alcance

de 274,8 m, coeficiente de determinação espacial (r^2) de 0,882, e médio grau de dependência espacial (ADE). Outros estudos da dependência espacial da produtividade da cana-de-açúcar têm mostrado também apreciáveis ajustes semivariográficos como contido em Souza *et al.* (2010). O ATR apresentou ajuste do tipo esférico, com alcance de 243,4 m, coeficiente de determinação espacial (r^2) de 0,904, e médio ADE.

A análise dos parâmetros semivariográficos simples dos atributos químicos do solo (Quadro 3) revelou ajustes do tipo esférico (pHa1, pHk1), do tipo exponencial (pHc1, pHc2, pHa2, pHk2) e do tipo gaussiano (DpH1, DpH2, DpH3, #pHa3, #pHc3), com alcances variando de 75 m (pHc3) a 465,9 m (DpH1). No geral, observou-se apreciável desempenho dos atributos do solo dado pelo ADE que variou de 25,5% (#pHc3) a 75,52% (pHc1).

À exceção do Delta pH (DpH), para o qual ainda se nota alguma dificuldade em encontrar trabalhos de referência na sua avaliação, o pH do solo avaliado

apresentou, no geral, parâmetros semivariográficos em sintonia com os dados apresentados em diversos trabalhos (Berner *et al.*, 2007; Campos *et al.*, 2007; Corá *et al.*, 2004; Mello *et al.*, 2006) uma vez que neles, ora um ora outro modelo de ajuste (esférico, gaussiano e exponencial), foi observado, bem como alcances (de 8,5-783,0 m), e ADE (de moderado a alto). Assim, para a área em questão, nos trabalhos futuros de caráter semelhante, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos não deverão ser menores do que 75,0 m.

No Quadro 4, estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre os atributos da planta. Desta forma, a cokrigagem #TCH= f (ATR) apresentou dependência espacial indireta entre causa e efeito, com ajuste gaussiano e alcance de 248,2 m. Indicando uma relação antagônica entre produtividade e qualidade do produto industrializável. Assim, nas áreas de maiores valores de ATR, serão as áreas onde o TCH apresentará seus menores valores, e vice-versa.

Quadro 3. Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos da produtividade da cana-de-açúcar e do pH de um Argissolo Vermelho distrófico.

Atributos ^(a)	Parâmetros do ajuste	validação cruzada								
		Modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A ₀ (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d) %	a	B
<i>$\gamma(h)$ simples da planta</i>										
TCH (t ha ⁻¹)	exp	1,739.10 ²	3,479.10 ²	274,8	0,882	1,850.10 ³	50,0	-3,78	0,746	0,288
POP (pl m ⁻²)	epp	1,950	1,950	-	-	-	-	-	-	-
ATR (kg t ⁻¹)	esf	9,380.10 ¹	2,112.10 ²	243,4	0,904	1,160.10 ³	55,6	7,41	0,946	0,546
<i>$\gamma(h)$ simples do solo 0-0,20 m</i>										
pHa1	esf	3,410.10 ⁻²	6,510.10 ⁻²	184,2	0,860	7,521.10 ⁻⁵	47,6	3,90.10 ⁻¹	0,934	0,499
pHk1	esf	3,515.10 ⁻²	6,430.10 ⁻²	179,0	0,983	6,687.10 ⁻⁶	45,3	3,30.10 ⁻¹	0,934	0,438
pHc1	exp	1,060.10 ⁻²	4,330.10 ⁻²	100,5	0,959	5,657.10 ⁻⁶	75,5	1,30	0,721	0,311
DpH1	gau	1,805.10 ⁻²	3,553.10 ⁻²	416,5	0,981	6,880.10 ⁻⁶	49,2	-1,00.10 ⁻¹	0,903	0,366
<i>$\gamma(h)$ simples do solo 0,20-0,40 m</i>										
pHa2	exp	2,960.10 ⁻²	6,130.10 ⁻²	324,0	0,980	9,702.10 ⁻⁶	51,7	6,60.10 ⁻¹	0,890	0,444
pHk2	exp	3,460.10 ⁻²	7,210.10 ⁻²	107,0	0,784	4,005.10 ⁻⁵	52,0	2,02	0,595	0,210
pHc2	exp	2,791.10 ⁻²	5,772.10 ⁻²	123,6	0,971	3,928.10 ⁻⁶	51,6	6,90.10 ⁻¹	0,856	0,329
DpH2	gau	1,359.10 ⁻²	3,108.10 ⁻²	465,9	0,968	1,403.10 ⁻⁵	56,3	-6,00.10 ⁻¹	0,940	0,414
<i>$\gamma(h)$ simples do solo 0,80-1,00 m</i>										
#pHa3	gau	5,720.10 ⁻²	8,939.10 ⁻²	98,3	0,992	3,426.10 ⁻⁶	36,0	0,00	0,932	0,383
pHk3	epp	2,362.10 ⁻¹	2,362.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-
#pHc3	gau	1,300.10 ⁻¹	1,745.10 ⁻¹	75,0	0,898	8,206.10 ⁻⁵	25,5	0,235	1,00.10 ⁻²	0,879
DpH3	gau	4,710.10 ⁻²	7,900.10 ⁻²	93,1	0,939	2,092.10 ⁻⁵	40,4	0,409	0,000	0,999

^(a) TCH refere-se à produtividade de colmos por hectare; ATR refere-se aos açúcares totais recuperáveis; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos da reação do solo nas respectivas camadas (1: 0 - 0,20 m; 2: 0,20 - 0,40 m; 3: 0,80 - 1,00 m); # trabalhado com o resíduo do atributo; ^(b) gau = gaussiano, exp = exponencial, esf = esférico; epp = efeito pepita puro; ^(c) SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; ^(d) ADE = Avaliador da Dependência Espacial.

Quadro 4. Parâmetros dos semivariogramas cruzados, ajustados entre os atributos da produtividade da cana-de-açúcar e do pH de um Argissolo Vermelho distrófico.

Atributos ^(a)	Parâmetros do ajuste									
	Modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A ₀ (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d) %	validação cruzada		
								a	B	R
<i>γ(h) cruzado TCH vs ATR</i>										
#TCH=f(ATR)	gau	-1,000.10 ⁻¹	-5,970.10 ⁻¹	248,2	0,795	1,250.10 ¹	99,8	-8,02	0,500	0,322
<i>γ(h) cruzado TCH vs Atributos do solo</i>										
#TCH=f(pHk2)	esf	1,000.10 ⁻³	9,540.10 ⁻¹	268,2	0,673	3,490.10 ⁻¹	99,9	-8,62	0,458	0,291
#TCH=f(pHc2)	gau	1,000.10 ⁻³	6,310.10 ⁻¹	247,7	0,827	1,250.10 ⁻¹	99,8	-7,36	0,511	0,327
#TCH=f(DpH1)	gau	4,500.10 ⁻²	5,610.10 ⁻¹	244,5	0,615	1,590.10 ⁻¹	92,0	-7,62	0,508	0,321
#TCH=f(DpH2)	esf	2,040.10 ⁻¹	9,340.10 ⁻¹	280,0	0,492	3,700.10 ⁻¹	78,2	-6,46	0,585	0,369
#TCH=f(DpH3)	gau	6,000.10 ⁻³	1,177	148,2	0,799	2,280.10 ⁻¹	99,5	-6,99	0,573	0,369
<i>γ(h) cruzado ATR vs Atributo do solo</i>										
ATR=f(pHk2)	gau	-4,770.10 ⁻¹	-1,393	303,1	0,847	1,180.10 ⁻¹	65,8	5,44.10 ¹	0,605	0,460
ATR=f(pHc2)	esf	-3,610.10 ⁻¹	-8,690.10 ⁻¹	274,3	0,825	4,340.10 ⁻²	58,5	5,30.10 ¹	0,615	0,471
ATR=f(#pHc3)	esf	-9,600.10 ⁻²	-1,366	127,5	0,406	7,120.10 ⁻¹	93,0	4,89.10 ¹	0,646	0,493
ATR=f(pHa1)	esf	-8,000.10 ⁻²	-6,100.10 ⁻¹	177,1	0,842	2,590.10 ⁻²	86,9	5,11.10 ¹	0,629	0,480
ATR=f(pHa2)	gau	-2,000.10 ⁻¹	-6,910.10 ⁻¹	240,0	0,493	1,820.10 ⁻¹	71,1	5,04.10 ¹	0,636	0,496
ATR=f(#pHa3)	esf	-2,650.10 ⁻¹	-1,270	177,0	0,681	2,210.10 ⁻¹	79,1	4,78.10 ¹	0,655	0,506
ATR=f(DpH3)	gau	-1,000.10 ⁻⁴	-2,762.10 ⁻¹	102,5	0,854	7,642.10 ⁻³	85,4	5,35.10 ¹	0,612	0,469

^(a) TCH refere-se à produtividade de colmos por hectare; ATR refere-se aos açúcares totais recuperáveis; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos da reação do solo nas respectivas camadas (1: 0 - 0,20 m; 2: 0,20 - 0,40 m; 3: 0,80 - 1,00 m); # trabalhado com o resíduo do atributo; ^(b) gau = gaussiano, esf = esférico; ^(c) SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; ^(d) ADE = Avaliador da Dependência Espacial.

Já nos parâmetros semivariográficos cruzados entre os atributos da planta vs solo (Quadro 4), observou-se bons ajustes com alcances variando entre 102,5 m a 302,1 m. Assim, do ponto de vista prático agrônomo, o destaque, indicado pelo coeficiente de determinação (r²), foi para: 1) #TCH=f(pHc2) (0,827), que se deu de modo direto entre causa e efeito, com alcance de 168,2 m; 2) TCH=f(DpH3) também de modo direto, com ajuste gaussiano, alcance de 148,2 m e coeficiente de determinação (0,799); e, 3) para ATR=f(DpH3) que apresentou-se de modo indireto, com ajuste gaussiano, alcance de 102,5 m, com um (r²) de 0,854 e elevado ADE.

Nas Figuras 1 e 2, estão contidos os ajustes semivariográficos cruzados (a) e os mapas de cokrigagens (b) de maior interesse agrônomo e de melhor desempenho. Portanto, a cokrigagem #TCH=f(pHc2) (Figura 1a,b) permitiu constatar que no presente trabalho a variabilidade espacial da TCH pode ser determinada por meio do pH em CaCl₂ na camada de 0,20-0,40 m com uma precisão

estimativa de 82,7% (Quadro 4). Portanto, para área estudada, nos locais amostrados onde o pHc2 apresentar valores entre 4,5-4,7, a TCH esperada da cana-de-açúcar, RB 855453, será de 37-74 t ha⁻¹. Por outro lado, naqueles sítios onde o pHc2 estiver entre 4,8-5,0 a TCH estará entre 87-124 t ha⁻¹.

O DpH3 não denotou resposta favorável, do ponto de vista do manejo agrícola com TCH, porém em relação ao ATR (Quadro 4; Figura 2) os resultados indicaram que o incremento da CTC na camada de 0,80-1,00 m proporcionou melhor qualidade do produto industrializável, ou seja, nos sítios onde o Delta pH apresentou maiores valores negativos, os valores de ATR foram substancialmente maiores e vice versa. Sendo tal fato, de grande importância agrônoma uma vez que o ATR determina o preço da cana pago pela indústria.

A análise da dependência espacial simples e cruzada (Quadros 3 e 4; Figuras 1 e 2) permitiu concluir que, considerando a produtividade da cana-de-açúcar (TCH) tendo variado de 37-74 t ha⁻¹

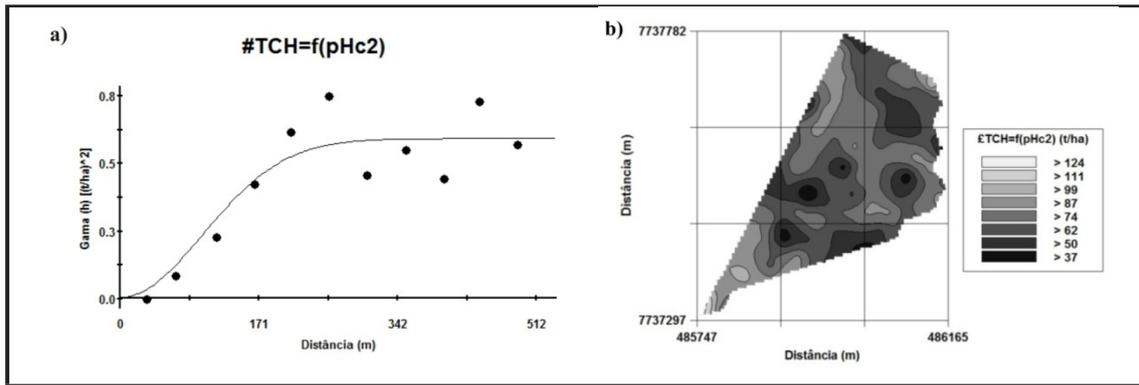


Figura 1. Semivariograma e mapa de cokrigagem entre a produtividade da cana-de-açúcar e o pH de um Argissolo Vermelho distrófico.

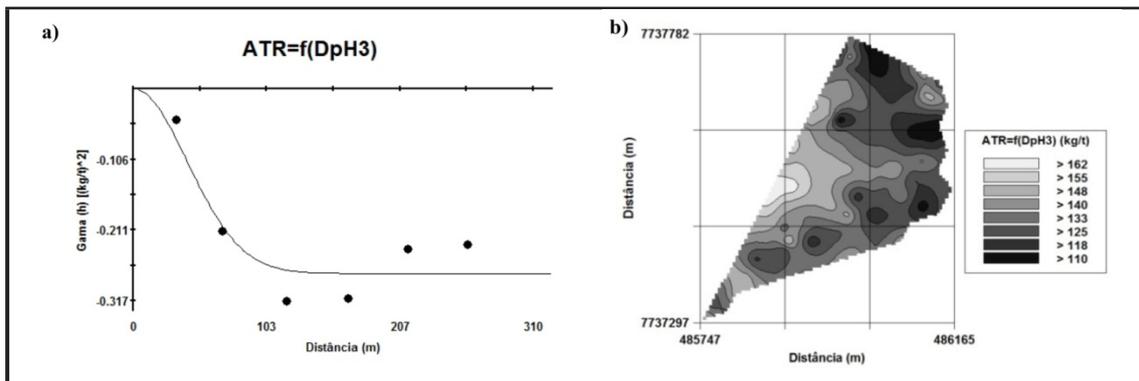


Figura 2. Semivariograma e mapa de cokrigagem entre o ATR da cana-de-açúcar e o DpH de um Argissolo Vermelho distrófico.

(menores valores) a 74-87 t ha^{-1} (maiores valores), do mesmo modo que o componente tecnológico (ATR) que variou de 110-133 kg t^{-1} (menores valores) a 140-162 kg t^{-1} (maiores valores), e ambos tendo se correlacionado espacialmente com os atributos do solo, variando segundo padrões apresentados pela heterogeneidade espacial dos atributos do pH, há uma real necessidade em trabalhar com áreas e perfis específicos de manejo a fim de reduzir a heterogeneidade dos sítios localizados de interação com os menores valores de TCH e/ou ATR, e otimizar assim a produção agrícola seja pelo incremento da produtividade ou pelo ganho em qualidade do produto industrializável final.

CONCLUSÕES

- A correlação linear entre a produtividade da cana-de-açúcar com o pH do solo é significativa na profundidade de 0,80-1,00 m (pHk3, pHc3);

- Do ponto de vista espacial, há apreciável resposta entre a produtividade da cana-de-açúcar com o pHc2 do solo, permitindo inferir que a adequação química das áreas específicas de maior acidez proporcionará incremento na produtividade da cultura;
- O Delta pH do solo na camada de 0,80-1,00 m apresenta interação espacial com o ATR, indicando que uma melhor qualidade química naquela camada melhorou a qualidade final do produto industrializável, com ATR mais elevado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNER, P.G.M.; VIEIRA, S.R.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.837-844, 2007.

- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2013/2014.** Quarto levantamento. Brasília: Conab, 2014. 19p.
- CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; FREITAS, E.V.S. Dependência espacial de atributos químicos em área cultivada com cana-de-açúcar em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agrônômica**, v.38, p.350-359, 2007.
- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CONSECANA). **Manual de instruções.** Piracicaba, 2006. 116p.
- CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERBALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1013-1021, 2004.
- CORÁ, J.E.; BERBALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.374-387, 2006.
- DALCHIAVON F.C.; CARVALHO, M.P.; NOGUEIRA, D.C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F.L.; ASSIS, J.T.; OLIVEIRA, M.S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, p.08-19, 2011.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas do solo, plantas e fertilizantes.** 2. ed. Brasília: 2009. 627p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3. ed. Rio de Janeiro: 2013. 353p.
- FAHL, J.I.; CAMARGO, M.B.P. de; PIZZINATTO, M.A.; BETTI, J.A.; MELO, A.M.T.; DeMARIA, I.C.; FURLANI, A.M.C. (Eds.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas.** 6.ed.rev.atual. Campinas: IAC, 1998. 393p. (IAC. Boletim, 200).
- FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.113-121, 2006.
- MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.8, p.143-152, 2008.
- MELLO, G.; BUENO, C.R.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.10, p.294–305, 2006.
- NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.) **Fertilidade do solo.** Viçosa: SBCS, 2007. 1017p.
- RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Ceres, 1991. 343p.
- RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p.
- ROBERTSON, G.P. **GS+: geostatistics for environmental sciences.** 7.ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.
- SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS system for elementary stational analysis.** 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.
- SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da

cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006. p.19-36.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysys of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v.52, n.3/4, p.591-611, 1965.

SOUZA, Z.M.; BARBIERI, D.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & CAMPOS, M.C.C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência Agrícola**, v.31, p.371-377, 2007.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; COLET, M.J.; RODRIGUES, L.H.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; MANDONI, R.J.A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com

o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.4, p.840-847, 2010.

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 Ciências da Terra**, Campina Grande, v.8, n.2, p.183-190, 2008.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.34, p.1763-1771, 2004.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, v.56, p.181-190, 1997 .