

PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR: VARIABILIDADE LINEAR E ESPACIAL ENTRE COMPONENTES TECNOLÓGICOS E DA PRODUÇÃO

PRODUCTIVITY OF CANE SUGAR: LINEAR AND SPATIAL VARIABILITY BETWEEN COMPONENTS AND TECHNOLOGICAL PRODUCTION

Flávio Carlos DALCHIAVON¹; Morel de Passos e CARVALHO²; Rafael MONTANARI²; Marcelo ANDREOTTI²; Alan Rodrigo PANOSSO²

1. Professor Efetivo do Instituto Federal de Mato Grosso, Campus Campo Novo do Parecis, Departamento de Agronomia, Campo Novo do Parecis, MT, Brasil. flavio.dalchiavon@cnp.ifmt.edu.br; 2. Professore, Doutor, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Ilha Solteira, SP.

RESUMO: Na atualidade, a cultura da cana-de-açúcar desempenha frente à realidade brasileira, sobretudo no aspecto relacionado às fontes energéticas alternativas, importantíssimo papel. No ano de 2009, no município de Suzanópolis (SP), no Cerrado Brasileiro, foi instalado um experimento com a cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico, com o objetivo de selecionar, por meio de coeficientes de correlação de Pearson, da modelagem de regressões lineares simples e de múltiplas e da correlação espacial, os melhores componentes tecnológicos e os de produção, para explicar a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar. Foi instalada a malha geoestatística, para a coleta de dados, com 120 pontos amostrais, numa área de 14,53 ha. Para as regressões lineares simples, a população de plantas é o componente da produção que apresenta a melhor correlação quadrática com a produtividade da cana-de-açúcar, dada por: $PRO = -0,553 \times POP^2 + 16,14 \times POP - 15,77$. Entretanto, para as regressões lineares múltiplas, a equação $PRO = -21,11 + 4,92 \times POP^{**} + 0,76 \times PUR^{**}$ é a que melhor se apresenta para estimar a referida produtividade. Especialmente, a melhor correlação com a produtividade da cana-de-açúcar é determinada, também, pelo componente da produção da população de plantas.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável. Geoestatística. *Saccharum spp.* Regressões.

INTRODUÇÃO

A importância socioeconômica da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para o Brasil é inquestionável, sendo a principal matéria-prima para a produção do etanol utilizado pelos veículos automotores, além da sua destinação para a produção do açúcar, um dos principais produtos de exportação nacional. De acordo com estimativa da Conab (2012), na atual safra, o setor sucroalcooleiro nacional processará uma produção de 602,179 milhões de toneladas de colmos em 8,567 milhões de hectares, tendo o estado de São Paulo como o maior produtor, participando com 53,6% desta (323,131 milhões de toneladas), numa área de 4,426 milhões de hectares, e produtividade média em torno 73,0 t ha⁻¹.

O conhecimento da produtividade da cana-de-açúcar pode ser obtido pelos seus componentes tecnológicos e da produção, utilizando técnicas estatísticas que permitam estimá-la. Dewey e Lu (1959) foram os pesquisadores pioneiros a utilizar esta metodologia em plantas de trigo, destacando que os métodos de correlação linear e regressão múltipla foram os primeiros métodos a serem utilizados nas análises dos componentes da produção. Gioia (2011) e Lima (2012), mediante observações em seus trabalhos, afirmaram que a

utilização dos componentes tecnológicos (açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza e percentual de fibra) e da produção (volume de colmos por hectare e população de plantas por metro quadrado), enquanto variáveis independentes, tanto linear quanto espacialmente, para estimar a produtividade da cana-de-açúcar (variável dependente), são ferramentas extremamente importantes, das quais os agricultores dispõem, uma vez que alterações nesses componentes são responsáveis diretos pelo ajuste da produtividade. Entretanto, sabe-se que existe variabilidade em tais componentes entre indivíduos de uma população em função de vários fatores, que vão desde a implantação da cultura (influenciando o número de plantas por área), até a disponibilidade de assimilados (modificada pelo arranjo de plantas).

Assim, para avaliar o comportamento espacial desses componentes e da produtividade, pode-se utilizar de técnicas geoestatísticas, que, por meio de semivariogramas, permitem definir o alcance e o grau da dependência espacial, fornecendo parâmetros para a elaboração de mapas de variabilidade pela krigagem e/ou cokrigagem (MONTANARI et al., 2010; ZANÃO JÚNIOR et al., 2010). O semivariograma é um gráfico que caracteriza a estrutura da variância do atributo estudado como variável regionalizada em função da

distância no terreno, tendo o alcance da dependência espacial como principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si (DALCHIAVON et al., 2011a). Por outro lado, a cokrigagem pode ser mais precisa do que a krigagem de um atributo simples quando o semivariograma cruzado apresentar dependência entre dois atributos quaisquer (MONTANARI et al., 2012). Além do que, exclusivamente em relação à variável primária, que normalmente é sub-amostrada, essa técnica possibilita efetuar a estimativa dos seus valores não amostrados.

Neste contexto, é reconhecido o uso e contribuição destas técnicas na identificação e mapeamento da variabilidade intrínseca aos componentes de produção dos cultivos agrícolas. Segundo Pires (2002), estas técnicas podem permitir avaliar a variabilidade espacial para características como produtividade, bem como a ocorrência de padrões (manchas) de áreas de lavoura associadas, por exemplo, com os componentes da planta. Este tipo de estudo permite verificar, mesmo havendo diferenças entre plantas em determinados componentes relacionados à produtividade, se há possibilidade de se estabelecer áreas com comportamento similar, ou seja, se existe dependência espacial de outros componentes, que não a produtividade de colmos, comumente avaliada em nível de lavoura.

Contudo, a variabilidade linear e espacial dos componentes, tecnológicos e da produção, e sua

correlação com a produtividade da cana-de-açúcar têm sido pouco pesquisadas. Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo, através de coeficientes de correlação de Pearson, da modelagem de regressões lineares simples e múltiplas e da correlação espacial, selecionar os melhores componentes, tecnológicos e da produção, para explicar a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no ano de 2009, na Fazenda Caiçara, pertencente à Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, no município de Suzanópolis (SP) no noroeste do estado de São Paulo, cujas coordenadas são 20°28'10" S e 50°49'20" W. O solo no qual a malha experimental foi instalada foi classificado como Argissolo Vermelho eutrófico típico textura arenosa/média. Na Figura 1 estão apresentadas as precipitações e temperaturas médias durante o período experimental, cujos valores foram: precipitação acumulada de 2881 mm, temperatura máxima, média e mínima de 31,4; 25,1 e 19,9°C, respectivamente. Antes da instalação do experimento, foram coletadas 20 amostras simples de solo, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, das quais obteve uma amostra composta representativa para cada profundidade, para determinação da sua fertilidade, cujos resultados estão contidos na Tabela 1.

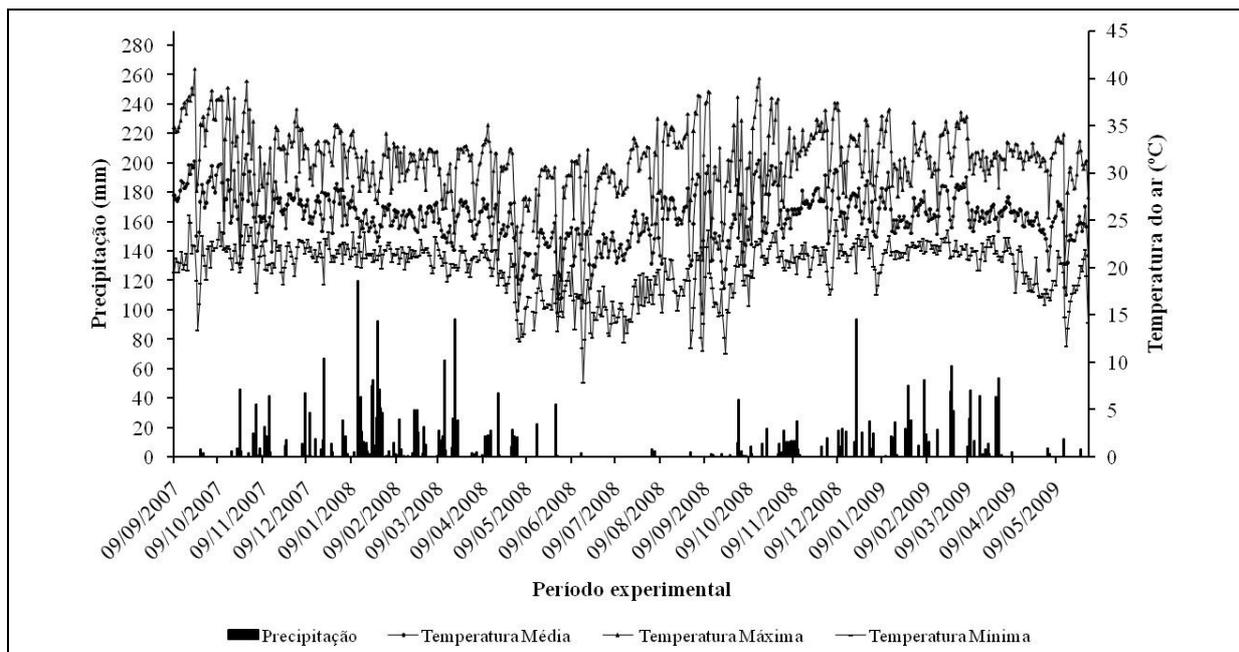


Figura 1. Precipitação pluvial e médias térmicas obtidas durante o período experimental (set/2007 a mai/2009).

Tabela 1. Caracterização inicial da fertilidade do solo nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Atributo químico ^(a)													
Prof.	pH		Complexo sortivo						SB	CTC	V%	m%	
	MO	CaCl ₂	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺					
m	g dm ⁻³		mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----								-----%-----	
0-0,20	16	5,1	4,3	1,4	13,9	7,3	16,6	0,7	22,6	39,2	57,6	3,0	
0,20-0,40	14	5,2	4,1	0,9	12,5	7,6	16,4	0,7	21,0	37,4	56,1	3,2	

^(a) MO = matéria orgânica, V% = índice de saturação por bases, m% = índice de saturação por alumínio.

Para a implantação da cana-de-açúcar (variedade SP 79 1011), em área sob pastagem há 10 anos, foi dessecada a braquiária com Roundup WG (glifosato), utilizando 2,5 kg ha⁻¹ p.c.. No preparo do solo foi realizada uma gradagem pesada e duas intermediárias. Aplicou-se a lanço 2,0 t ha⁻¹ de calcário, incorporando-o a 0,35 m de profundidade com um arado de aivecas. Para finalizá-lo, utilizou-se uma grade niveladora. O espaçamento de plantio (20/jun/2006) foi de 1,50 m entre sulcos, utilizando-se 500 kg ha⁻¹ da fórmula 06-30-24 (NPK). Após o primeiro corte da cultura (set/2007 - colheita mecanizada) foi aplicada 1 t ha⁻¹ de gesso agrícola e 500 kg ha⁻¹ da fórmula 18-00-27 na adubação da soqueira.

Na coleta de dados, a cultura encontrava-se no segundo corte e bisada (21 meses em campo), assim realizou-se a colheita manual após queima da cana-de-açúcar (mai/2009). Na alocação da malha experimental foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, sendo constituída de 120 pontos amostrais, distribuídos numa área de 14,53 ha (418,46 m x 349,00 m). O espaçamento utilizado entre os pontos na grande malha foi de 42 m x 43 m, enquanto que na malha de refinamento, construída com a finalidade de detectar alcances da dependência espacial para espaçamentos menores do que 40 m, composta por 3 pontos adjacentes ao ponto central, no espaçamento de 9 m (Figura 2).

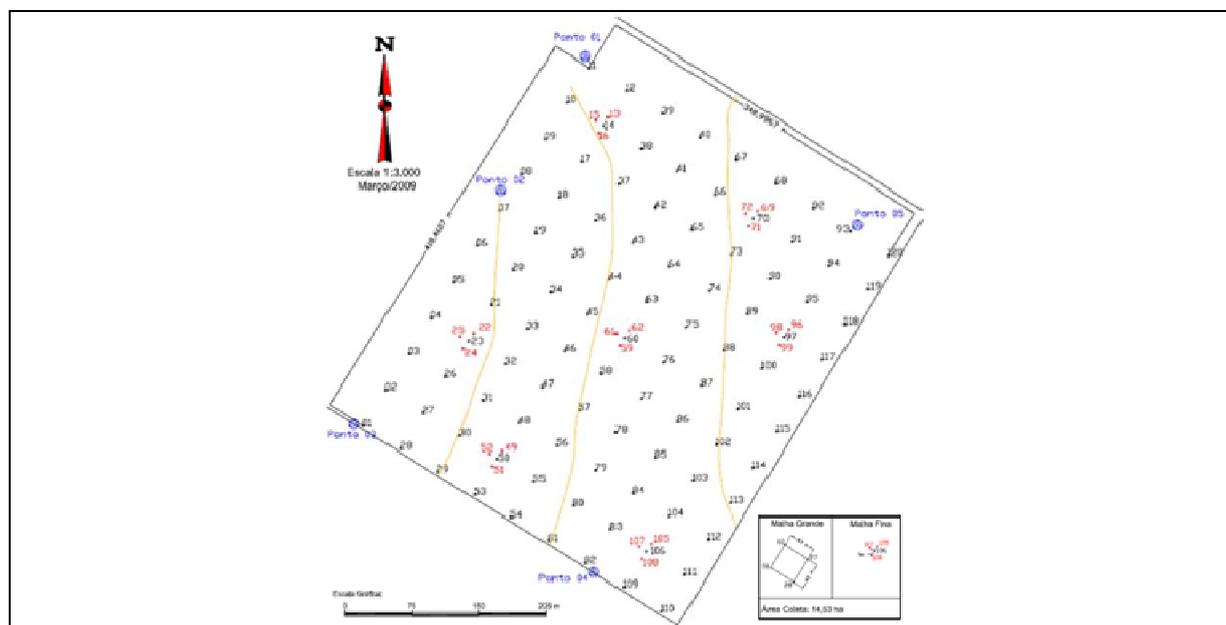


Figura 2. Croqui da malha experimental de amostragem.

Os atributos pesquisados foram: a) produtividade de colmos por hectare (**PRO**), b) volume de colmos por hectare (**VOL**), c) população de plantas por metro quadrado (**POP**), d) açúcares totais recuperáveis (**ATR**), e) percentual de sólidos solúveis totais (**BRI**), f) percentual de sacarose

(**POL**), g) pureza (**PUR**) e h) percentual de fibra (**FIB**). A PRO (t ha⁻¹) foi obtida pela pesagem dos colmos contidos numa área útil de 9 m², sendo duas linhas de 3 m (3m x 3m) por ponto amostral. Para o VOL (m³ ha⁻¹) foram coletados cinco colmos, sendo medidos o comprimento e os diâmetros (da base, do

meio e do ápice), obtendo o diâmetro médio utilizado no cálculo final do VOL, a partir da POP (pl. m²), obtida por contagem, do respectivo ponto amostral, com área útil de 9 m². Os atributos tecnológicos ATR (kg t⁻¹), BRI, POL, PUR e FIB (%), foram determinados no laboratório da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, conforme metodologia do Consecana (2006).

Para cada atributo foi efetuada a análise descritiva com o auxílio da estatística clássica, utilizando o *Software SAS*. Seguidamente, montou-se a matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações entre os atributos estudados, e modelaram-se as regressões lineares simples com a planilha de cálculos Excel, conforme Dalchiavon e Carvalho (2012). Por outro lado, utilizando-se o pacote computacional *SAS*, foram efetuadas as regressões lineares múltiplas da PRO (variável dependente) em função dos demais atributos pesquisados (variáveis independentes), no intuito de selecionar aqueles que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores equações para estimar a PRO, por intermédio do *stepwise*, a 10% de probabilidade. O desempenho das equações foi analisado pelo coeficiente de determinação (R²) e pela contribuição de cada componente no modelo, estimada pelo aumento observado na soma de quadrados devido à regressão, quando da adição de cada variável no modelo, conforme Maia et al. (2001).

Para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma simples, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca pelo uso

do pacote *Gamma Design Software 7.0* (Gs⁺, 2004). Os ajustes dos semivariogramas simples, em função de seus modelos, foram efetuados conforme Dalchiavon et al. (2012), retirando-se a tendência dos dados, por meio da técnica da regressão múltipla polinomial, para os atributos que não apresentaram dependência espacial. A decisão final do modelo que representou o ajuste foi atestada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou cokrigagem. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita (C₀), o patamar (C₀+C) e o alcance (A₀). A análise do ADE foi efetuada conforme a seguinte expressão (Gs⁺, 2004):

$$ADE = [C/(C+C_0)], 100 \dots \dots \dots (1)$$

onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C, a variância estrutural; e C+C₀, o patamar, adotando-se a interpretação proposta por Dalchiavon et al. (2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos pesquisados que apresentaram distribuição de frequência do tipo normal foram a PRO, VOL, POP, BRI e FIB (Tabela 2), sendo significativos pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk a 5%, uma vez que suas probabilidades oscilaram entre 0,066 (FIB) e 0,403 (VOL), indicando que as medidas de tendência central não refletem valores atípicos na distribuição. A PRO obtida (89,2 t ha⁻¹) está de acordo com a média brasileira (Unica, 2009), entretanto, esperava-se maior PRO, haja vista que se trata de cana com 21 meses de ciclo.

Tabela 2. Análise descritiva da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP).

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste ^(b)			
	Média	Mediana		Mínimo	Máximo	Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
PRO (t ha ⁻¹)	89,2	90,0	11,2	142,2	24,4	27,3	0,677	-0,401	0,108	NO
VOL (m ³ ha ⁻¹)	159,5	155,6	41,5	269,7	41,94	26,3	0,170	0,193	0,403	NO
POP (pl. m ⁻²)	10,5	10,5	5,0	15,9	2,10	19,9	0,486	-0,045	0,306	NO
ATR (kg t ⁻¹)	103,46	104,65	64,20	141,30	17,23	16,7	-0,691	-0,302	0,012	TN
BRI (%)	15,25	15,63	10,60	19,85	1,93	12,7	-0,527	-0,224	0,087	NO
POL (%)	10,1	10,2	5,3	14,4	1,99	19,8	-0,632	-0,339	0,018	TN
PUR (%)	78,7	79,3	60,4	91,8	6,96	8,9	-0,243	-0,608	0,002	ND
FIB (%)	12,6	12,6	10,3	15,8	1,00	7,9	0,834	0,378	0,066	NO

^(a) PRO, VOL, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são respectivamente a produtividade de colmos por hectare, volume de colmos por hectare, população de plantas por metro quadrado, açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza e percentual de fibra; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN e ND respectivamente do tipo normal, tendendo à normal e não determinada.

Todavia, a PRO foi 13,5% superior à obtida por Souza et al. (2008), com a variedade SP80-1816, num Latossolo Vermelho-Amarelo, e inferior a de Watanabe et al. (2004), que relataram valor médio de 100 t ha⁻¹ para cana de terceiro corte (RB 85-5536) num Latossolo Vermelho distroférrico. A baixa PRO deve-se em grande parte ao Argissolo apresentar textura arenosa no horizonte superficial e, conseqüentemente, baixa CTC (Tabela 1) e disponibilidade hídrica, o que resultou num baixo perfilhamento (média de 10,5 plantas m⁻², quando o esperado para a variedade em questão seria de pelo menos 14 plantas m⁻²) e baixo VOL (159,5 m³ ha⁻¹), Tabela 2, implicando na PRO, conforme já havia sido constatado por Landell e Silva (2004). Contudo, a POP ainda foi superior às 8,5 pl. m⁻² obtida por Silva (2008), quando trabalhou com a variedade SP80 1816, num Latossolo Vermelho.

Em relação aos atributos tecnológicos BRI, POL e PUR, observaram-se, respectivamente, valores médios de 15,25; 10,1 e 79,3% (Tabela 2), que são considerados baixos (Ripoli e Ripoli, 2003; Lavanholi, 2008; Rapassi et al., 2009). Provavelmente houve a inversão da sacarose e

consumo dos açúcares redutores para a retomada do crescimento vegetativo, refletindo nesses atributos tecnológicos essenciais à obtenção do ATR. Assim, pode-se observar que o ATR (103,46 kg t⁻¹) ficou abaixo do valor mínimo (121,97 kg t⁻¹) tido como referência pelo Consecana (2006), bem como do padrão verificado por Rapassi et al. (2009) na região Oeste paulista no ano de 2007 (144,56 kg t⁻¹). Já o FIB (12,6%) ficou adequado aos padrões mencionados por Scapari e Beuclair (2008) e Unica (2009).

Para as correlações de Pearson entre a PRO e componentes da produção (Tabela 3), foram significativos os pares PRO x VOL (r = 0,31**) e PRO x POP (r = 0,43**), ratificando a estreita relação positiva desta com seus componentes da produção, principalmente em relação à POP, que mais contribuiu para o aumento da PRO, como já havia sido constatado por Silva (2008) e Gioia (2011). Outra correlação importante foi do VOL x POP (r = 0,73**). Assim, conclui-se que a POP interferiu positivamente no VOL, que por sua vez refletiu na PRO obtida, evidenciando a interrelação entre esses três componentes.

Tabela 3. Matriz de correlação dos atributos da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP).

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)						
	PRO	VOL	POP	ATR	BRI	POL	PUR
VOL	0,31**						
POP	0,43**	0,73**					
ATR	0,15	-0,18**	-0,12				
BRI	0,12	-0,10	-0,07	0,92**			
POL	0,15	-0,19**	-0,13	0,99**	0,90**		
PUR	0,16	-0,24**	-0,16	0,84**	0,67**	0,86**	
FIB	-0,03	0,10	0,04	-0,02	0,06	-0,01	-0,01

^(a)Vide Tabela 2; ^(b) ** significativo a 1% de probabilidade.

Tendo em vista a importância agrônômica deste estudo, foram modeladas as principais regressões lineares simples, apresentadas nas equações de 2 a 4. Em relação às regressões PRO=f(VOL) e PRO=f(POP), foram modeladas equações quadráticas (Equações 2 e 3), cujos coeficientes de determinação (R²) foram, respectivamente, de 0,134** e 0,210**, significativos a 1%. Trabalhando-se na equação 2, é

$$\text{PRO} = -0,002^{**} \cdot \text{VOL}^2 + 0,723^{*} \cdot \text{VOL} + 21,50 \dots \dots \dots (\text{R}^2 = 0,134^{**}) \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{PRO} = -0,553^{**} \cdot \text{POP}^2 + 16,14^{*} \cdot \text{POP} - 15,77 \dots \dots \dots (\text{R}^2 = 0,210^{**}) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{VOL} = 14,55^{**} \cdot \text{POP} + 6,02 \dots \dots \dots (r = 0,728^{**}) \dots \dots \dots (4)$$

possível verificar que o ponto de máximo ficou estabelecido em 180,8 m³ ha⁻¹, ponto no qual a PRO foi de 86,8 t ha⁻¹. Por outro lado, quando se considerou o valor médio do VOL (159,5 m³ ha⁻¹; Tabela 2), a PRO foi estimada em 85,9 t ha⁻¹, ambas próximas à PRO real obtida neste estudo, confirmando a aplicabilidade prática da referida equação.

Analogamente, a relação quadrática contida na equação 3 estabeleceu ponto de máximo em 14,6 pl. m⁻², momento em que a PRO foi de 102,0 t ha⁻¹, representando a população de plantas ideal para a variedade SP 79 1011, o que para Gioia (2011) ficou em 10,7 pl. m⁻², entretanto, a variedade pesquisada foi distinta (RB 85 5453) bem como o ano agrícola. A determinação da população ideal é um fator de extrema importância fitotécnica por proporcionar estreita relação com a produção de colmos de cana-de-açúcar. Por outro lado, a equação 4 indicou comportamento linear direto entre causa (POP) e efeito (VOL). Desta forma, evidenciou que quando a POP variou entre 5,0 e 15,9 pl. m⁻² (Tabela 2), o VOL também variou entre 78,8 e 237,4 m³ ha⁻¹, assim como este foi de 158,8 m³ ha⁻¹ quando a POP média foi inserida no modelo matemático.

Na Tabela 4 estão apresentadas as regressões lineares múltiplas ajustadas para estimar a produtividade de colmos de cana-de-açúcar (variável dependente) em função dos componentes tecnológicos e da produção (variáveis independentes), o número de observações e seus respectivos coeficientes de determinação (R²). Assim, para a primeira variável (POP) adicionada no ajuste da regressão, houve uma explicação de 18,1% da PRO (R² = 0,181), confirmando maior participação da POP na PRO final, ficando de acordo com a Tabela 3, que evidencia a maior

correlação da PRO com o componente da produção POP. Por outro lado, a combinação da POP com a PUR explicou 23,6% da PRO, indicando um pequeno acréscimo (5,5%) quando o ajuste da regressão adicionou uma última variável. As demais influências na PRO ficaram por conta de outros fatores que não entraram nos modelos por não serem significativos a 10% de probabilidade.

A explicação proposta com base na regressão linear múltipla demonstrou a implicação de cada componente (variável independente) pesquisado na produtividade de colmos de cana-de-açúcar por hectare, levando em consideração seus valores, o que permitiu classificar qual foi a real contribuição de cada componente no modelo ajustado. Neste contexto, foi verificado que o maior peso equivalente da PRO no modelo ajustado foi devido à POP (76,8%), conforme a Tabela 5. Segundo Maia et al. (2001), o uso do peso em porcentagem leva a uma precisão maior no diagnóstico, pois todas as variáveis independentes incluídas nos modelos estão na mesma escala, no caso, expressos em valores relativos, fato corroborado pelos coeficientes de determinação apresentados na Tabela 4. Finalmente, a equação de regressão linear múltipla de melhor desempenho (R²), significativa a 1%, foi: PRO = -21,11+4,92.POP**+0,76.PUR**, que estimou uma PRO de 90,4 t ha⁻¹.

Tabela 4. Equações de regressão linear múltipla obtidas para estimar a produtividade da cana-de-açúcar pelo método *Stepwise*, número de observações (N) e coeficiente de determinação (R²).

Equação de Regressão	PRO Estimada/Real	N	R ²
PRO = 42,83+4,52.POP**	90,3/89,2	120	0,181**
PRO = -21,11+4,92.POP**+0,76.PUR**	90,4/89,2	120	0,236**

** Significativo à 1% de probabilidade.

Tabela 5. Peso na soma de quadrados e peso em porcentagem dos atributos da cana-de-açúcar em cada modelo ajustado pela regressão linear múltipla obtida pelo método *Stepwise*.

Atributo da cana-de-açúcar ^(a)	Peso na Soma de Quadrados	Peso em Porcentagem
POP	10.737	76,8
PUR	13.979	23,2

^(a) Vide Tabela 2.

Na análise geoestatística, com exceção da FIB, que apresentou efeito pepita puro -portanto aquela variância que não pôde ser detectada pelos semivariogramas - todos os demais atributos apresentaram dependência espacial (Tabela 6). Os coeficientes de correlação espacial (r²) dos semivariogramas simples ficaram entre alto e muito

alto (0,710-0,933), dependência espacial (ADE) entre baixa e média (38,5-59,4%) e coeficiente angular (b) da validação cruzada entre baixo e muito alto (0,281-0,897), segundo classificação apresentada em Dalchiavon e Carvalho (2012). Esses dados foram muito semelhantes àqueles obtidos por Chaves e Farias (2008), Souza et al.

(2010) e Gioia (2011), quando pesquisaram a cultura da cana-de-açúcar, bem como atributos do solo.

Tabela 6. Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados de atributos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

Atributo ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples</i>											
PRO	gau (57)	1,97.10 ⁻²	4,86.10 ⁻²	72,0	0,854	7,82.10 ³	59,4	ME	6,51.10	0,281	0,122
VOL	exp (50)	6,21.10 ²	1,24.10 ³	158,1	0,858	2,74.10 ⁴	50,0	ME	3,09.10	0,808	0,322
#POP	exp (155)	1,73	3,46	258,3	0,710	4,68.10 ⁻¹	50,0	ME	2,00.10 ⁻²	0,897	0,338
#ATR	gau (51)	9,35.10	2,05.10 ²	69,0	0,933	5,77.10 ²	54,4	ME	9,00.10 ⁻²	0,599	0,239
BRI	exp (222)	2,05	4,10	288,3	0,916	1,76.10 ⁻¹	50,0	ME	2,82	0,815	0,390
#POL	gau (59)	1,87	3,04	73,0	0,810	2,12.10 ⁻¹	38,5	BA	0,00	0,440	0,155
#PUR	exp (71)	1,26.10	3,03.10	100,0	0,917	5,95	58,3	ME	2,00.10 ⁻²	0,577	0,212
FIB	epp	9,92.10 ⁻¹	9,92.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>γ(h) cruzado</i>											
PRO=f(#POP)	exp (126)	1,26.10	2,51.10	357,3	0,781	2,34.10	50,0	ME	6,70.10	0,263	0,173
PRO=f(BRI)	gau (72)	1,79	4,92	73,0	0,234	1,29.10	63,6	AL	7,05.10	0,220	0,145

^(a) Vide Tabela2; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo significa o número de pares no primeiro lag; ^(b) gau = gaussiano, exp = exponencial, epp = efeito pepita puro; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo BA = baixa, ME = média e AL = alta.

Os alcances semivariográficos ficaram entre 69,3 (#ATR) e 258,3 m (#POP), como pode ser verificado na Tabela 6. O alcance geoestatístico é um parâmetro muito importante, haja vista que seu valor pode influenciar a qualidade da estimativa, uma vez que determina o número de valores usados na interpolação, além de ser a informação-base utilizada nos pacotes geoestatísticos que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão. Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando os maiores valores do alcance tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (Corá et al., 2004; Dalchiavon et al., 2011a).

Na Figura 3 estão evidenciados os principais semivariogramas e mapas de krigagem. Os semivariogramas aludidos apresentaram ajuste gaussiano (PRO) e exponencial (#POP e BRI). Os mapas de krigagem (PRO, £POP e BRI) apresentaram correlação espacial direta. Desta forma, de uma maneira geral, houve predominância, na área pesquisada, dos maiores valores, que variaram entre 83,1 a >110,4 t ha⁻¹ (PRO), 10,0 a > 112,0 pl. m⁻² (£POP) e 14,4 a >16,1% (BRI). Por outro lado, em pequenas áreas dos mapas foram observados os menores valores, que ficaram entre 55,8-83,1 t ha⁻¹ (PRO), 8,0-10,0 pl. m⁻² (£POP) e 12,7-14,4% (BRI). O mapa da PRO apresentou

manchas com produtividades extremamente variadas, fato que também fora notado por Molin et al. (2007), Dalchiavon et al. (2011b) e Dalchiavon e Carvalho (2012), ao pesquisarem a produtividade do milho safrinha, do feijoeiro invernal e da soja, respectivamente.

Na Tabela 6 podem ser averiguados ainda os parâmetros dos semivariogramas cruzados, bem como na Figura 4 seus respectivos semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem. Portanto, a melhor cokrigagem foi da PRO=f(#POP), pois explicou 78,1% da variabilidade da PRO. Assim, do ponto de vista espacial da área pesquisada, nos sítios em que a variedade de cana-de-açúcar SP 79 1011 apresentou £POP variando entre 10,0 e >12,0 pl. m⁻² (Figura 3d), a PRO esteve compreendida entre 77,0 e >120,0 t ha⁻¹ (Figura 4b). Em contrapartida, naqueles onde a £POP esteve entre 8,0 e 10,0 pl. m⁻², a PRO ficou compreendida entre 33,0 e 77,0 t ha⁻¹. Para a presente cokrigagem, o modelo ajustado foi o exponencial direto, com alcance de 357,3 m e ADE médio (50,0%).

Da mesma forma, as Figuras 4c,d evidenciam a cokrigagem da PRO=f(BRI), cujo modelo semivariográfico foi o gaussiano direto, com 73,0 m de alcance da dependência espacial e ADE alta (63,6%), explicando 23,4% da variabilidade espacial da PRO (Tabela 6), ficando plenamente de acordo com a cokrigagem

apresentada por Lima (2012). Portanto, nos sítios em que o BRI ficou entre 14,4 e > 16,1% (Figura 3f), a PRO esteve compreendida entre 78,0 e > 120,0

$t\ ha^{-1}$ (Figura 4d), ao passo que naqueles onde o BRI esteve entre 12,7 e 14,4%, a PRO ficou compreendida entre 35,0 e 78,0 $t\ ha^{-1}$.

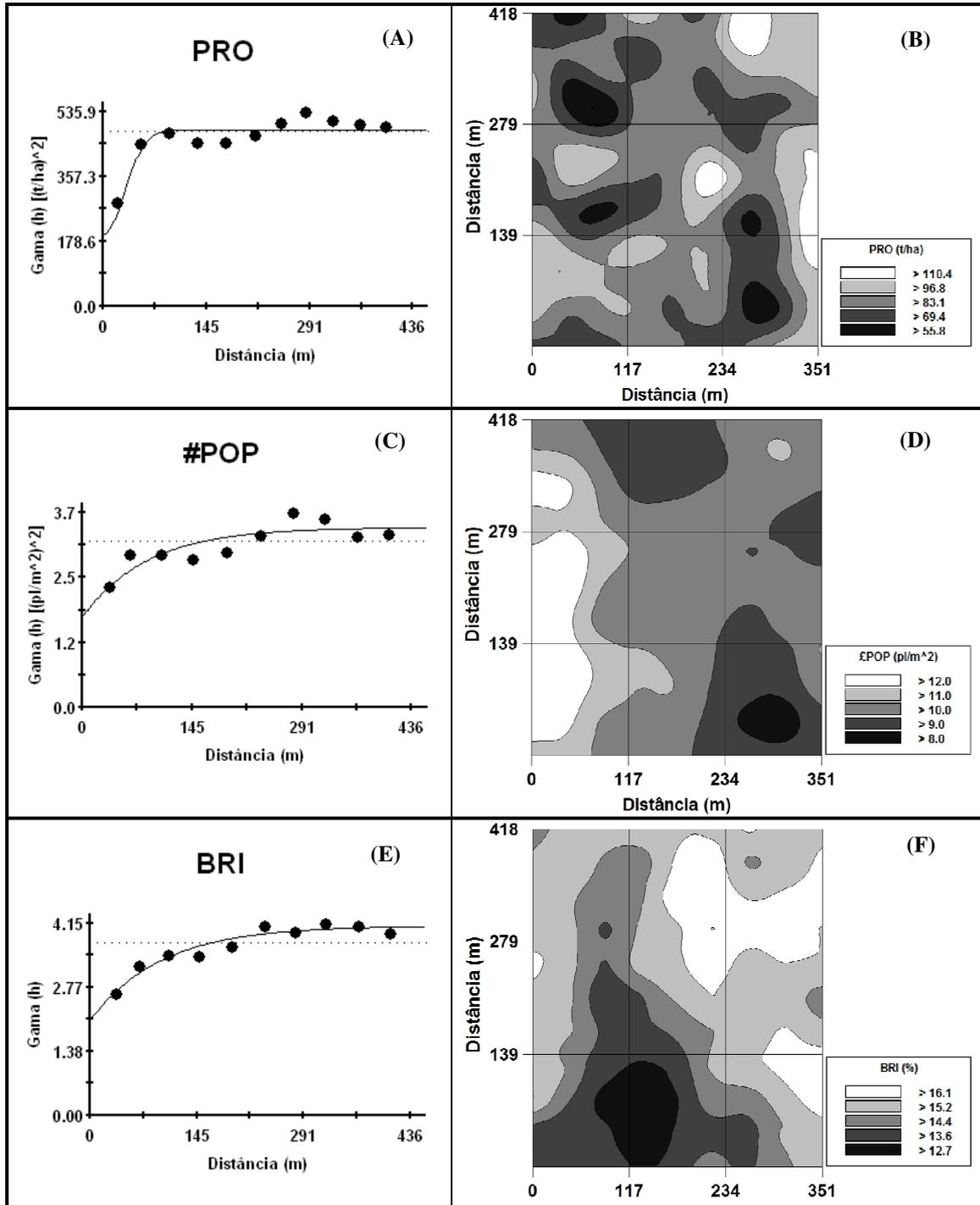


Figura 3. Semivariogramas simples e mapas de krigagem de atributos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

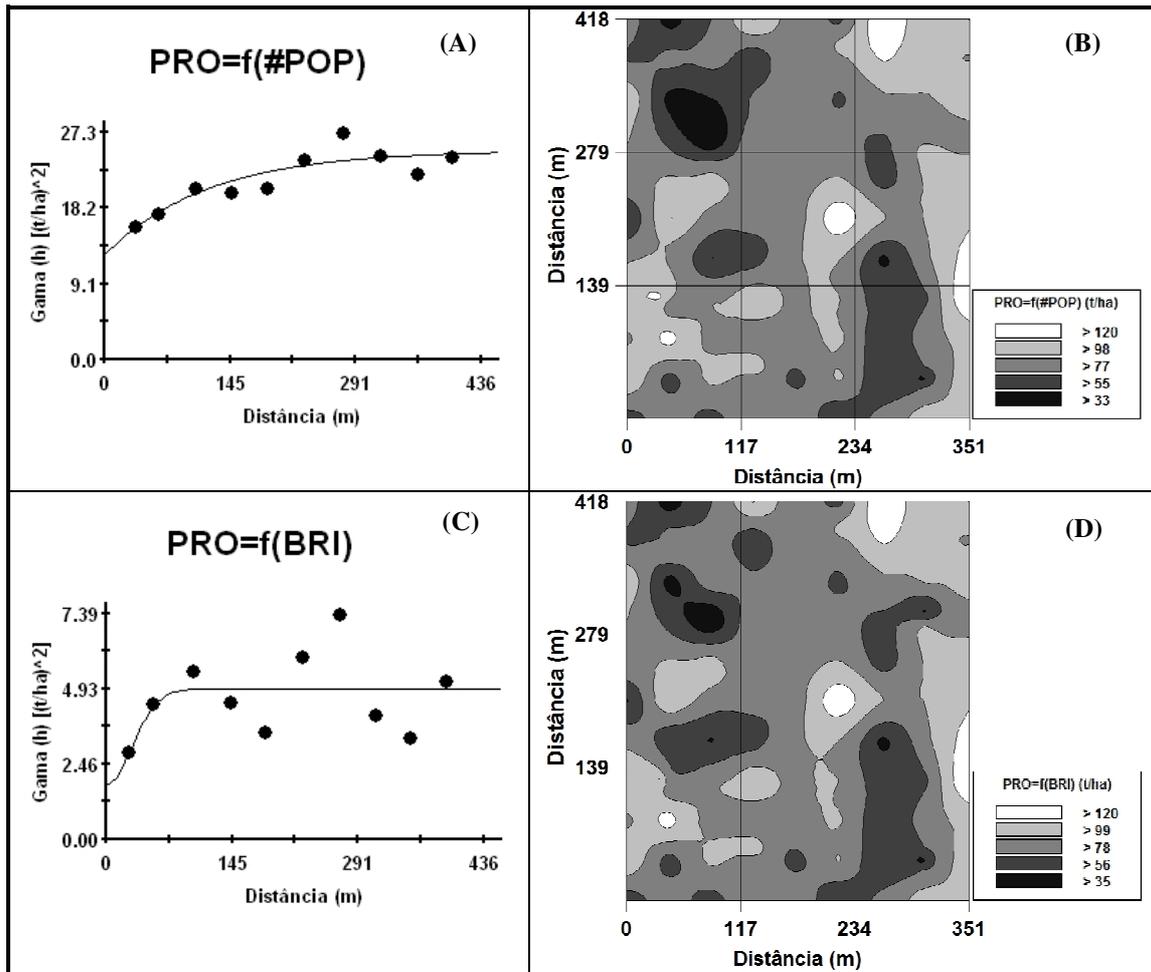


Figura 4. Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem de atributos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

CONCLUSÕES

Para as regressões simples, a população de plantas é o componente da produção que apresenta a melhor correlação quadrática com a produtividade da cana-de-açúcar, dada por: $PRO = -0,553^{**}.POP^2+16,14^{*}.POP-15,77$. Entretanto, para as regressões lineares múltiplas, a equação $PRO = -$

$21,11+4,92.POP^{**}+0,76.PUR^{**}$ é a que melhor se apresenta para estimar a referida produtividade.

Do ponto de vista espacial, a melhor correlação com a produtividade da cana-de-açúcar é determinada, também, pelo componente da produção população de plantas.

ABSTRACT: Nowadays, the culture of the sugarcane plays an important role regarding the Brazilian reality, especially in the aspect related to the alternative energy sources. In 2009, the municipality of Suzanápolis (SP), in the Brazilian Cerrado, an experiment was conducted with the culture of the sugarcane in a Red eutrophic, with the aim of selecting, using Pearson correlation coefficients, modeling, simple, linear and multiple regressions and spatial correlation, and also the best technological and productive components, to explain the variability of the productivity of the sugarcane. The geostatistical grid was installed in order to collect the data, with 120 sampling points, in an area of 14.53 ha. For the simple linear regressions, the plants population is the component of production that presents the best quadratic correlation with the productivity of the sugarcane, given by: $PRO = -0.553^{**}xPOP^2+16.14^{*}xPOP-15.77$. However, for multiple linear regressions, the equation $PRO = -21.11+4.92xPOP^{**}+0.76xPUR^{**}$ is the one that best presents in order to estimate that productivity. Spatially, the best correlation with yield of the sugarcane is also determined by the component of the production population of plants.

KEYWORDS: Renewable energy. Geostatistical. *Saccharum spp.* Regressions.

REFERÊNCIAS

- CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p.20-25, 2008.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar**. Primeiro Levantamento, abril/2012, Brasília: CONAB, 2012. 19p.
- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA DE AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CONSECANA. **Manual de instruções**. 5.ed. Piracicaba, 2006. 112p.
- CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, 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**, Viçosa, v. 28, n. 6, p.1013-1021, 2004.
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 908-916, 2011b.
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, 2012.
- 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**, Goiania, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011a.
- DEWEY, D. R.; LU, K. H. A correlation path coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 51, n. 2, p. 515-518, 1959.
- GIOIA, M. T. **Produtividade e qualidade da cana soca correlacionadas com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico do noroeste Paulista**. 2011. 127f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.
- GS⁺: **Geostatistics for environmental sciences**. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.
- LANDELL, M. G. A.; SILVA, M. A. Manual do experimentador: melhoramento da cana-de-açúcar. In: **Metodologia de Experimentação: ensaios de competição em cana-de-açúcar**. Pindorama: Instituto Agronômico, 2004. Não paginado. (Apostila de Treinamento Interno)
- LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação: IAC, 2008. Cap.32, p. 697-722.
- LIMA, C. G. R. **Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um Argissolo Vermelho de Suzanópolis (SP)**. 2012. 101f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M. Classificação da composição iônica da água de irrigação usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 55-59, 2001.

- MOLIN, J. P. VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; FAULIN, G. C.; MASCARIN, L. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 3, p. 309-324, 2007.
- MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, 2010.
- MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milheto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 1, p. 407-410, 2012.
- PIRES, J. L. F. **Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção**. 2002. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- RAPASSI, R. M. A.; TARSITANO, M. A. A.; BOLONHEZI, A. C. Avaliação técnica e econômica de sistemas de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) na região oeste do estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 11-21, 2009.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros e Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302p.
- SCAPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação- IAC, 2008. Cap. 2, p. 47 - 56.
- SILVA, M. A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana de ano. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 109-117, 2008.
- 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, P. D. G.; 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.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR-UNICA. **Produção de cana-de-açúcar no Brasil**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em 20 Set. 2009.
- WATANABE, R. T.; FIORETTO, R. A.; HERMANN, R. Propriedades químicas do solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da adição da palhada de colheita, calcário e vinhaça em superfície (sem mobilização). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 25, n. 1, p. 93-100, 2004.
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; CARVALHO-ZANÃO, M. P.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 3, p. 429-438, 2010.