

Comissão 2.3 - Mineralogia do solo

COMPORTAMENTO DOS ÓXIDOS DE FERRO DA FRAÇÃO ARGILA E DO FÓSFORO ADSORVIDO, EM DIFERENTES SISTEMAS DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR⁽¹⁾

Diogo Mazza Barbieri⁽²⁾, José Marques Júnior⁽³⁾, Gener Tadeu Pereira⁽⁴⁾, Newton La Scala Jr.⁽⁴⁾, Diego Silva Siqueira⁽⁵⁾ & Alan Rodrigo Panosso⁽⁶⁾

RESUMO

Na agricultura, a obtenção de maiores produtividades das culturas com base no manejo sustentável do solo tem levado a uma busca gradativa do conhecimento das variáveis envolvidas nos sistemas de produção. Determinar as causas da variabilidade dos atributos passa a ser uma etapa do planejamento estratégico no setor sucroenergético. Este trabalho teve por objetivo estudar a variabilidade espacial dos óxidos de ferro da fração argila e sua relação com atributos físicos e químicos do solo, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar na Região de Ribeirão Preto, SP. Duas parcelas de 1 ha foram delimitadas em áreas com sistema de colheitas mecanizada e manual. Foram retiradas, em cada área, amostras de solos em 126 pontos, na profundidade de 0,00-0,25 m. Os resultados das análises mineralógicas e químicas foram submetidos às análises geoestatísticas, obtendo-se a dependência espacial, os semivariogramas e os mapas de krigagem dos atributos estudados. Para analisar a correlação espacial entre os atributos estudados, foram construídos semivariogramas cruzados. A variabilidade espacial dos atributos químicos é maior em áreas com colheita de cana crua, quando comparada com áreas de colheita de cana queimada, ao contrário dos atributos mineralógicos, que apresentaram os maiores alcances na área de cana crua. Os atributos matéria orgânica, diâmetro médio do cristal da goethita apresentaram correlação espacial negativa, enquanto a argila apresentou correlação positiva com a adsorção de fósforo nos dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar avaliados.

Termos de indexação: colheita mecanizada, colheita manual, planejamento sustentável, geoestatística.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 17 de julho de 2012 e aprovado em 19 de julho de 2013.

⁽²⁾ Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), FCAV/UNESP, Campus de Jaboticabal. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellani, s/n. CEP 14870-900 Jaboticabal (SP). Bolsista CAPES. E-mail: diogombarbieri@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor, Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP. E-mail: marques@fcav.unesp.br

⁽⁴⁾ Professor, Departamento de Ciências Exatas, FCAV/UNESP. E-mail: genertp@fcav.unesp.br; lascala@fcav.unesp.br

⁽⁵⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da FCAV/UNESP. Bolsista FAPESP Proc n° 2011/06053-3. E-mail: diego_silvasilqueira@yahoo.com.br

⁽⁶⁾ Pós doutorando da FCAV/UNESP. Bolsista FAPESP Proc n° 10/20364-9. E-mail: arpanosso@yahoo.com.br

SUMMARY: BEHAVIOR OF IRON OXIDES IN THE CLAY FRACTION AND ADSORBED PHOSPHORUS UNDER DIFFERENT SUGARCANE CULTIVATION SYSTEMS

In agriculture, the search for higher crop yields based on sustainable soil management has led to a gradual pursuit of knowledge of the variables related to production systems. The identification of the causes of variability of these properties has become a part of strategic planning in the sugar and ethanol industry. This study investigated the spatial variability of iron oxides in the clay fraction and its relationship to soil physical and chemical properties in different sugarcane cultivation systems in the region of Ribeirão Preto, São Paulo State. Two 1-ha plots were outlined in areas with mechanical and manual harvesting systems. Soil samples were taken at 126 points from the 0.00-0.25 m layer in both areas. The mineralogical and chemical data were subjected to geostatistical analyses, to determine the spatial dependence, semivariograms and kriging maps of the properties. To analyze the correlation between the parameters cross-semivariograms were constructed. The spatial variability of chemical properties was greater in areas with mechanical harvesting than burnt harvesting (manual harvesting), whereas the range of the mineralogical properties was largest in the area of green-harvested sugarcane. The properties organic matter, mean crystal diameter goethite had a negatively spatial correlation, while clay was positive correlated with P sorption in the two sugarcane harvest systems.

Index terms: mechanical harvesting, hand harvesting, sustainable planning, geostatistics.

INTRODUÇÃO

Com a globalização da economia e a atual competitividade do mercado agrícola é de fundamental importância a redução de custos ao longo da cadeia produtiva, porém mantendo altos os níveis de produtividade das culturas. Acrescenta-se a essa realidade econômica a necessidade de conservação dos recursos naturais por meio de uma maior eficiência na manipulação da lavoura, como no caso da aplicação de insumos, que deve ser realizada de acordo com a necessidade local de cada cultura. Essas questões estão relacionadas ao desenvolvimento de índices globais sobre a mudança no uso da terra (Rockström et al., 2009) e das ferramentas que viabilizam a produção sustentável.

Dentre as ferramentas, destacam-se aquelas utilizadas pela agricultura de precisão, que tem como objetivos otimizar o uso de insumos agrícolas, reduzir os custos da lavoura (Barbieri et al., 2008) e aumentar a produtividade (Ragagnin et al., 2010). Porém, para que a agricultura de precisão obtenha o sucesso esperado, é preciso detectar a variabilidade espacial (Silveira et al., 2000; Earl et al., 2003) e a temporal dos atributos do solo e, com base nessas informações, tomar as decisões corretas em relação às verdadeiras necessidades de aplicação de insumos durante todo o processo produtivo (Weirich Neto et al., 2006; Machado et al., 2007).

A variabilidade espacial dos solos e seus atributos tem origem na sua formação (Marques Júnior & Lepsch, 2000) e ao longo do tempo tende a aumentar, em razão dos vários fatores, dentre esses a topografia (Barbieri et al., 2008; Siqueira et al., 2010) e ação antrópica, como preparo do solo (Silveira et al., 2000;

Carvalho et al., 2002), aplicação de fertilizantes e tipo de colheita (Cavalcante et al., 2007). Portanto, quando se estuda os atributos do solo, é importante considerar a variabilidade, pois os fatores e processos de sua formação, que atuaram ao longo do tempo, imprimiram-lhe variabilidades naturais que, somadas ao manejo, acentuam a variabilidade dos seus atributos.

A melhoria das condições de trabalho, da produção sustentável e da competitividade tem provocado mudanças no sistema de colheita da cana-de-açúcar no setor sucroenergético. A mudança no sistema de colheita manual com queima (cana queimada) para colheita mecanizada sem queima (cana crua) (Campos et al., 2010) tem proporcionado alterações nas propriedades do solo (Mendonza et al., 2000; Roque et al., 2010), em razão não somente do aumento do tráfego de máquinas, mas também à grande quantidade de palha deixada sobre o solo. Segundo Salviano et al. (1998), os sistemas de manejo conservacionistas criam um ambiente no solo diferente daquele encontrado no sistema convencional, resultante dos efeitos dos resíduos superficiais e da reduzida movimentação do solo.

Alguns autores têm demonstrado que nos sistemas de produção agrícola em que a palhada é deixada sobre o solo a variabilidade espacial dos atributos químicos é maior (Souza, 1992; Silveira et al., 2000; Zanão Júnior et al., 2010), em relação ao sistema convencional. Silveira et al. (2000) descreveram que o acúmulo e a qualidade do material de cobertura produzido ao longo dos anos, o não revolvimento do solo e as frequentes adubações e calagens em superfície formam acúmulo superficial de matéria orgânica e nutriente, aumentando tanto a variabilidade vertical quanto a horizontal.

Além das características químicas, outros atributos do solo têm sofrido alterações com as atuais mudanças no tipo de colheita da cana-de-açúcar, entre esses os óxidos de Fe que, apesar de serem considerados estáveis por longo tempo, têm apresentado diferenças no teor (Silva Neto et al., 2008) e na cristalografia (Inda Junior & Kämpf, 2005). A variabilidade espacial dos óxidos de ferro também tem sofrido alterações em razão do acúmulo de palha sobre o solo e as diferentes formas do relevo (Camargo et al., 2008a; Montanari et al., 2010).

Alguns autores têm estudado a correlação espacial entre alguns atributos do solo, encontrando bons resultados (Angelico, 2006; Camargo et al., 2008b; Schaffrath et al., 2008). A correlação espacial pode ser feita empregando-se a geoestatística, que vem sendo muito utilizada para avaliar e descrever detalhadamente a distribuição espacial das propriedades do solo (Vieira, 2000), por meio da construção de um semivariograma cruzado (Guimarães, 2004). Utilizando o semivariograma cruzado, Angelico (2006) encontrou boa correlação espacial entre os atributos pH, teor de Mn e matéria orgânica, possibilitando realizar a estimativa do pH e Mn eficientemente pelos teores de matéria orgânica. Conforme relatado por Camargo et al. (2013), a compreensão da relação entre P adsorvido e atributos mineralógicos ainda é duvidosa.

Dessa forma, é muito importante estudar a influência das práticas de colheita na variabilidade dos atributos do solo e verificar as correlações espaciais entre esses atributos, pois quando uma prática interfere em determinado atributo do solo esse pode interferir em vários outros, alterando, assim, várias características de determinado solo. O conhecimento dessas correlações espaciais é de extrema importância para os planejamentos estratégico, tático e operacional, não só no setor sucroenergético, mas em qualquer sistema produtivo que vise à sustentabilidade. Portanto, este trabalho teve por objetivo estudar o comportamento dos óxidos de Fe da fração argila e do P adsorvido em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho eutroférico da região de Ribeirão Preto, SP.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na área da Usina São Martinho, na região de Ribeirão Preto, SP, com latitude de 21° 24' S e longitude de 48° 09' W, com altitude média de 550 m. O clima é do tipo tropical com chuvas de verão (Aw), pelo critério de classificação climática de Köppen. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifólia.

O solo é um Latossolo Vermelho eutroférico, textura muito argilosa (LVef - Oxissol), segundo a classificação proposta pela Embrapa (2006), cultivado

com cana-de-açúcar por mais de 30 anos. O relevo em ambas as áreas é suave ondulado, com declividades variando de 3 a 4 %.

O estudo foi realizado em duas áreas vizinhas, com diferentes históricos de manejo: sistema de colheita mecanizada e sem queima (cana crua - CC), por sete anos, com grande quantidade de resíduos da cultura sobre a superfície do solo; e sistema de colheita manual e com queima (cana queimada - CQ), por 30 anos (Figura 1). Os canaviais instalados nas áreas passaram por uma renovação no ano de 2006; a coleta das amostras para análises químicas e físicas foi realizada no ano posterior, logo após o primeiro corte. Na renovação, ocorreram as seguintes operações: subsolagem, erradicação química da soqueira, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e 1 t ha⁻¹ de gesso agrícola. A adubação de plantio foi realizada na sulcação, sendo utilizados 500 kg ha⁻¹ da fórmula 10-25-25 e o plantio, realizado de forma manual. Em ambas as áreas, foram aplicados em soqueira, ao longo dos anos, 100 m³ de vinhaça, 300 kg ha⁻¹ de ureia na cana queimada e 200 kg ha⁻¹ de nitrato de amônia na cana crua. Na cana queimada, o adubo nitrogenado foi incorporado a aproximadamente 20 cm de profundidade, enquanto na área de cana crua a aplicação foi realizada superficialmente ao lado da linha de plantio.

Sobre a possível influência da posição das áreas em diferentes locais da paisagem na circulação hídrica lateral e seus efeitos nos óxidos de Fe, com base em resultados anteriores sobre a variabilidade espacial nessa mesma área (Panosso et al., 2011, 2012), partiu-se da premissa de que nesse caso a variância do manejo supera a variância natural do solo e seus atributos influenciados pelo fluxo lateral subsuperficial.

Uma malha de espaçamento de 10 x 10 m foi confeccionada em cada sistema de colheita, e os pontos localizados nos cruzamentos das malhas foram georreferenciados. Os solos foram amostrados, perfazendo um total de 126 pontos em cada malha; as amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0,00-0,25 m.

O teor de argila foi determinado como proposto por Embrapa (1997), empregando-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica de baixa rotação, por 16 h. Foram determinados o teor de matéria orgânica (MO) e o teores de K, Ca, Mg e H+Al (Raij, 2001); a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e o V% foram calculados. Os resultados de adsorção de P foram obtidos de acordo com o método descrito por Casagrande & Camargo (1997). Solução contendo 100 mg L⁻¹ de P foi adicionada às amostras de solo; a quantidade de P adsorvido foi calculada subtraindo-se o valor determinado em solução do valor total adicionado.

A caracterização da goethita (Gt) e da hematita (Hm) foi feita com amostras pulverizadas após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L⁻¹

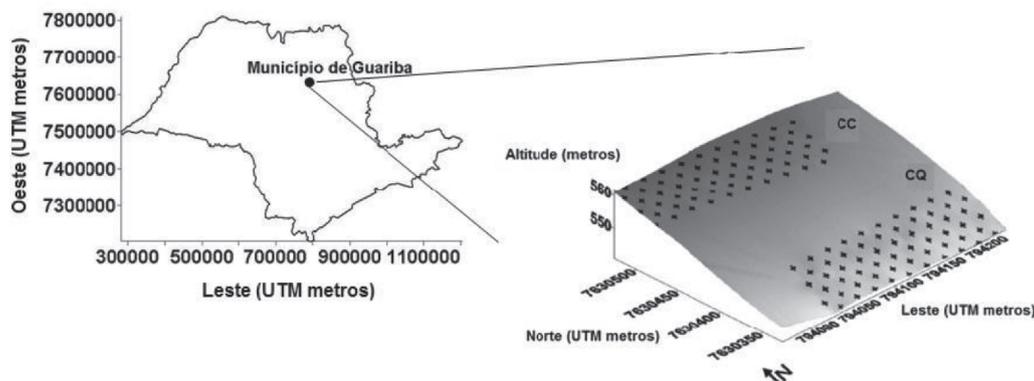


Figura 1. Localização da área e do modelo digital de elevação (MDE); área com sistema de colheita manual com queima (cana queimada - CQ); e sistema de colheita mecanizada sem queima (cana crua - CC).

(1 g argila para 100 mL solução), para concentração dos óxidos de Fe, segundo método de Norrish & Taylor (1961), modificado por Kämpf & Schwertmann (1982). As amostras foram lavadas com solução de HCl 0,5 mol L⁻¹ (1 g argila para 100 mL solução) em agitação por 4 h, para evitar a presença da sodalita nas amostras, uma vez que essa dificulta a leitura de alguns reflexos no difratograma. Para a correção dos desvios no posicionamento (d) dos reflexos, foram acrescentados às amostras 10 % em peso de cloreto de sódio moído e peneirado em malha 0,10 mm, antes de serem difratados. A difração dos raios-X foi realizada em aparelho HGZ, equipado com ânodo de cobalto e filtro de Fe e intervalo de varredura de 23 a 49 a 1 °2θ/min. Todas as amostras foram preparadas pelo método do pó e peneiradas em malha de 0,10 mm.

Utilizaram-se para avaliação os reflexos Hm (012 e 110) e Gt (110 e 111). O diâmetro médio cristalino (DMC) da Hm e o da Gt foram calculados a partir da LMA e da posição dos reflexos dos minerais Hm (110) e Gt (110). Foi utilizada a equação de Scherrer (Schulze, 1984) para o cálculo do DMC. A razão Gt/(Gt + Hm) foi calculada, empregando-se as áreas dos reflexos Hm (012) e Gt (110); para o cálculo dessa razão, a área do reflexo Gt (110) foi multiplicada por 0,35, em razão da intensidade de 35 % da Hm (012) (Kämpf & Schwertmann, 1998). O Fe ditonito (Fed) foi transformado em teor de Gt e Hm (Dick, 1986). Na figura 2, são apresentados seis dos 252 difratogramas analisados.

Os dados foram submetidos à estatística descritiva, calculando-se média, mediana, assimetria, curtose, coeficiente de variação e tipo de distribuição. Posteriormente, foi realizada a análise geoestatística, obtendo-se a dependência espacial, os semivariogramas e os mapas de krigagem dos atributos estudados. Para analisar a correlação espacial entre os atributos estudados, foram construídos semivariogramas cruzados, que puderam assumir valores tanto positivos, indicando que o aumento em um dos atributos foi acompanhado pelo aumento do outro, como negativos, que evidenciou que, quando ocorreu o

aumento de um dos atributos, ocorreu o decréscimo do outro (Bhatti et al., 1991; Mata, 1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise descritiva dos atributos granulométricos, químicos e mineralógicos encontram-se apresentados no quadro 1. O teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov indicou que alguns atributos estudados não apresentaram normalidade na distribuição dos dados; os valores de média e mediana são próximos, o que caracteriza uma distribuição próxima à simétrica. Os coeficientes de assimetria e curtose próximos a zero para os atributos que não apresentaram distribuição normal reforçam a proximidade à simetria na distribuição dos dados. De acordo com Cressie (1991), é importante que os dados não apresentem distribuições assimétricas, pois essas podem comprometer as análises geoestatísticas.

Souza et al. (2010) e Rachid Júnior et al. (2006), estudando a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar e da soja, não encontraram normalidade para a maioria dos atributos dos solos estudados, porém alcançaram valores de média e mediana bastante próximos. Camargo et al. (2008a), estudando variabilidade espacial de atributos mineralógicos em diferentes formas do relevo, obtiveram distribuição normal apenas para a relação Gt/Gt+Hm, enquanto para o restante dos atributos encontraram distribuições apenas simétricas.

De acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), encontraram-se valores de coeficiente de variação baixo, médio e alto para os parâmetros avaliados; os maiores valores foram para os atributos mineralógicos nas duas áreas estudadas. Camargo et al. (2008a) obtiveram valores de coeficiente de variação altos para a maioria dos atributos

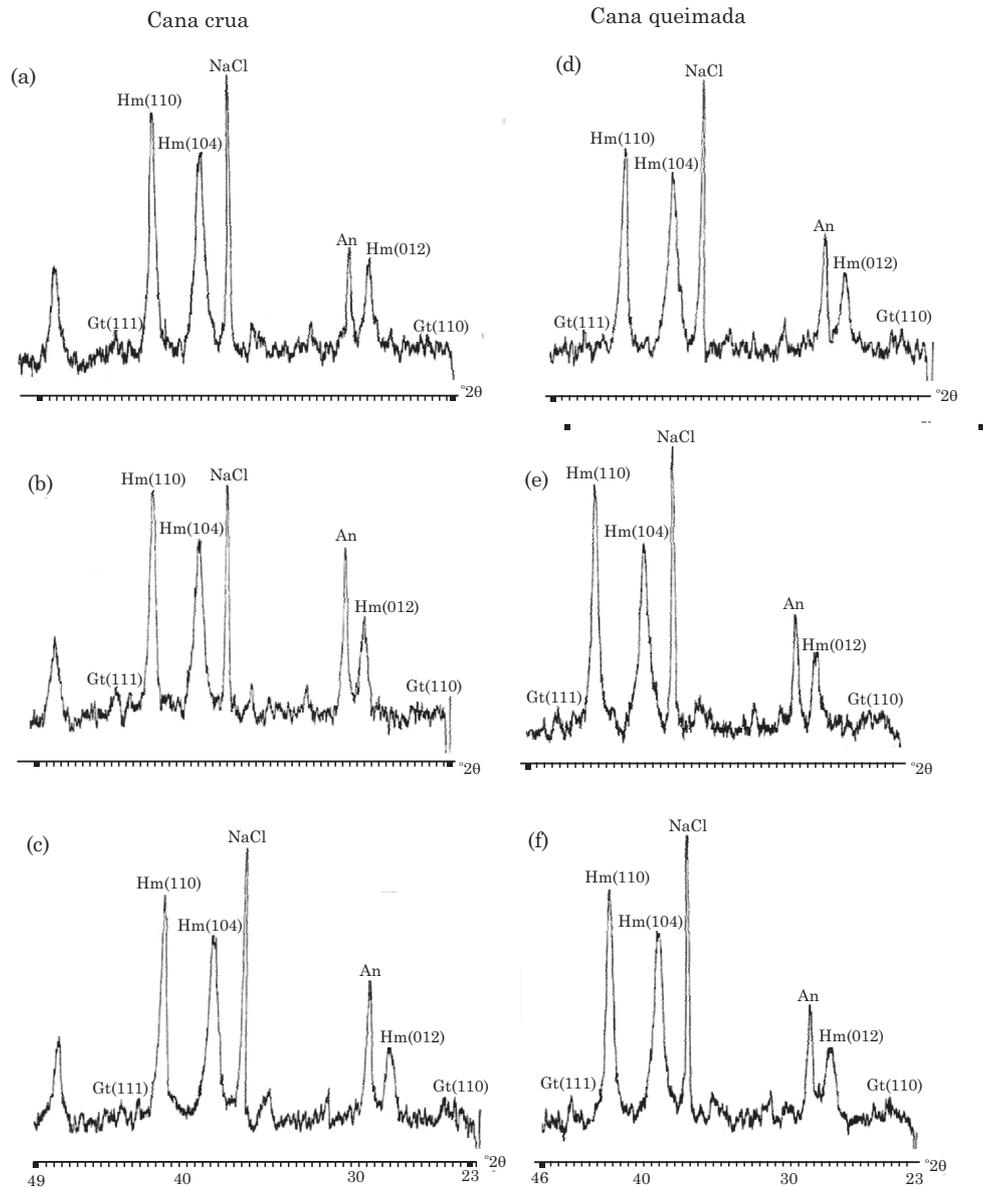


Figura 2. Difratomogramas dos óxidos de ferro presentes na fração argila de Latossolo Vermelho eutrófico, textura muito argilosa (LVef- Oxissol) obtidos no intervalo de 23 a 49° 2 θ para seis amostras de solo.

mineralógicos avaliados. Souza et al. (2010) alcançaram coeficientes de variação baixo e médio para os atributos químicos avaliados, enquanto Cavalcante et al. (2007) e Rachid Júnior et al. (2006) encontraram altos coeficientes de variação para esses mesmos atributos.

A análise geoestatística, efetuada por meio dos semivariogramas evidenciou que todos os atributos apresentaram dependência espacial nas duas áreas estudadas (Quadro 2); os modelos mais bem ajustados foram: esférico (10 atributos), gaussiano (oito atributos) e exponencial (dois atributos). Para Bertolani & Vieira (2001), o modelo esférico foi o que mais bem se ajustou aos atributos do solo, concordando com os resultados encontrados neste trabalho e com

os resultados apresentados por Souza et al. (2010), para atributos químicos, e por Camargo et al. (2008a), para atributos mineralógicos. Machado et al. (2007), estudando variabilidade espacial de atributos químicos, encontraram bom ajuste ao modelo gaussiano em parte dos atributos estudados, entre eles a CTC do solo.

A relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar do semivariograma (C_0+C_1) indicou o grau da dependência espacial dos atributos estudados (Trangmar et al., 1985). Segundo a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), todos os atributos estudados apresentaram forte dependência espacial (Quadro 2) [$C_0/(C_0+C_1) \leq 25\%$], com exceção da CTC na área de cana crua e o DMC-Gt, na de cana

Quadro 1. Estatística descritiva dos atributos granulométrico, químicos e mineralógicos de 126 amostras coletadas na profundidade de 0,00-0,25 m

Atributo	Tipo de colheita	Média	Mediana	Coeficiente			p
				Variação	Assimetria	Curtose	
Argila (g kg ⁻¹)	CC	637 a	635	3,2	0,30	0,11	<0,01
	CQ	613 b	610	3,4	-0,48	-0,13	>0,15
MO (g dm ⁻³)	CC	24 a	24	3,5	0,29	0,21	>0,15
	CQ	25 a	25	2,7	-0,11	-0,29	>0,15
P adsorvido (mg kg ⁻¹)	CC	373	370	19,0	0,06	0,70	>0,15
	CQ	415	405	39,5	-0,10	0,01	0,03
CTC (mmol _c dm ⁻³)	CC	75,4 b	75	11,2	-0,15	-0,17	>0,15
	CQ	86,1 a	87	11,1	-0,58	1,26	0,07
V (%)	CC	50 b	52	18,9	-0,60	0,01	>0,15
	CQ	65 a	63	8,4	-0,22	-0,37	>0,15
DMC - Hm (°2θ)	CC	53,93 b	53,94	0,1	-0,86	0,74	<0,01
	CQ	57,27 a	54,01	18,6	6,40	2,88	<0,01
DMC - Gt (°2θ)	CC	41,34 a	36,75	45,2	0,33	0,64	<0,01
	CQ	28,23 b	24,80	30,6	2,13	1,24	<0,01
Gt/(Gt+Hm)	CC	0,12 b	0,12	29,8	0,44	-0,02	>0,15
	CQ	0,17 a	0,16	44,6	0,76	0,97	<0,01
Hm (g kg ⁻¹)	CC	167,9 a	166,8	7,6	-0,11	-0,20	<0,01
	CQ	115,3 b	118,4	15,8	-0,71	0,68	>0,15
Gt (g kg ⁻¹)	CC	25,7 a	24,2	39,0	0,62	1,46	<0,01
	CQ	26,7 a	23,4	43,7	1,08	0,87	<0,01

Hm: hematita; Gt: goethita; DMC: diâmetro médio do cristal; MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica; CC: cana crua; CQ: cana queimada; p: valor de p para o Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

queimada, que apresentaram moderado grau de dependência espacial [(C₀/(C₀+C₁) entre 25 e 75 %]. Segundo Vieira (2000), o grau de dependência espacial forte e moderado demonstrou que os semivariogramas explicaram a maior parte da variância dos dados experimentais com grande confiabilidade na estimativa. Ragagnin et al. (2010) e Zanão Júnior et al. (2010), estudando variabilidade química do solo, detectaram grau de dependência espacial variando entre forte e moderada para todos os atributos estudados. Já Camargo et al. (2008a), em seus estudos de variabilidade espacial de atributos mineralógicos, encontraram moderado grau de dependência espacial para o DMC da goethita e da hematita.

O alcance indica a distância máxima em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si (Vieira et al., 1983), ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição aleatória. Para todos os atributos químicos estudados, o alcance foi maior na área de cana queimada (Quadro 2), indicando maior variabilidade espacial dos atributos na de cana crua. Isso confirmou os resultados apresentados por Souza (1992), Silveira et al. (2000) e Zanão Júnior et al. (2010), os quais encontraram maior variabilidade espacial de atributos químicos em áreas com acúmulo de palha sobre o solo, comparado com as de manejo convencional, sem cobertura de material orgânico.

De acordo com Silveira et al. (2000), a abundância de material de cobertura e a aplicação de insumos como calcário e adubo sem revolvimento do solo provocam acúmulo de nutrientes em superfície, causando aumento na variabilidade espacial. Além disto, a palhada sobre o solo atua como uma barreira física para a chegada do nutriente nele, fazendo com que em alguns locais as partículas de calcário e adubo alcancem a superfície dele e que em outros pontos fiquem localizados apenas sobre a camada de palha, aumentando assim a sua variabilidade espacial.

Adversamente aos atributos químicos, os teores e o DMC dos óxidos de Fe apresentaram os maiores alcances na área de cana crua, com exceção da relação Gt/Gt+Hm, que apresentou maior alcance na área de cana queimada. Alcances semelhantes foram encontrados por Camargo et al. (2008a), estudando variabilidade espacial de óxidos de Fe em Latossolos argilosos, na região de Jaboticabal, SP. É importante ressaltar que os alcances encontrados para os óxidos de Fe nas duas áreas estudadas foram muito próximos, indicando que a variabilidade espacial desses atributos é bastante semelhante nos dois sistemas de colheita e que quando comparado com os atributos químicos apresentam maior variabilidade espacial.

Os óxidos de Fe são atributos que sofrem a interferência do pedoambiente que é criado, em razão do tipo de colheita utilizado, que proporciona

Quadro 2. Geoestatística para os atributos mineralógicos, químicos e teor de argila de 126 amostras (cana crua e queimada) coletadas na profundidade de 0,0-0,25 m

Atributo	Tipo de colheita	Modelo	Alcance	C ₀	C ₀ +C ₁	[C ₀ /(C ₀ +C ₁)] x 100	R ²
			m			%	
Argila (g kg ⁻¹)	CC	Gaussiano	23	0,01	3,73	0,3	0,75
	CQ	Esférico	35	0,046	3,167	1,4	0,82
MO (g dm ⁻³)	CC	Gaussiano	27	0,10	67,32	0,1	0,99
	CQ	Esférico	54	3,33	13,56	19,7	0,96
P adsorvido (mg kg ⁻¹)	CC	Gaussiano	20	430	4839	8,2	0,92
	CQ	Esférico	45	7180	29710	19,5	0,96
CTC (mmol _c dm ⁻³)	CC	Esférico	36	19,8	54,14	26,8	0,50
	CQ	Exponencial	38	7,4	63,04	10,5	0,85
V (%)	CC	Gaussiano	26	27	87,41	23,6	0,97
	CQ	Exponencial	33	1,7	30,01	5,4	0,98
DMC-Hm (nm)	CC	Esférico	20	3,0 10 ⁻⁵	1,41 10 ⁻³	2,1	0,48
	CQ	Esférico	20	30,5	117,7	20,6	0,83
DMC-Gt (nm)	CC	Esférico	20	13,7	73,4	15,7	0,72
	CQ	Esférico	15	140	43,3	76,4	0,5
Gt/(Gt+Hm)	CC	Gaussiano	12	1,37 10 ⁻⁴	8,83 10 ⁻⁴	13,4	0,89
	CQ	Gaussiano	16	5,20 10 ⁻⁴	3,51 10 ⁻³	12,9	0,81
Hm (g kg ⁻¹)	CC	Esférico	25	0,1	85,6	0,1	0,5
	CQ	Gaussiano	17	52	305,5	14,5	0,91
Gt (g kg ⁻¹)	CC	Esférico	19	0,9	37,65	2,3	0,85
	CQ	Gaussiano	18	12,2	77,9	13,5	0,9

Hm: hematita; Gt: goethita; MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica; DMC: diâmetro médio do cristal; C₀: efeito pepita; C₀ + C₁: patamar; R²: coeficiente de determinação; [C₀/(C₀+C₁)] x 100: grau de dependência espacial; CQ: cana queimada e CC: cana crua.

ou não uma camada de palha sobre o solo. Já a variabilidade espacial dos atributos químicos, apesar de também sofrer a interferência da palha, é diretamente influenciada pelas doses homogêneas de insumos aplicados ao longo dos anos, o que justifica a maior variabilidade desses em relação aos óxidos de Fe.

Na figura 3, estão apresentados os mapas de isolinhas obtidos por meio da interpolação dos dados, pelo método da krigagem, para os atributos estudados. Observou-se nos mapas grande amplitude nesses atributos, entretanto essa diferença não pode ser observada na estatística clássica.

Analisando-se o mapa da MO na área de cana crua, perceberam-se locais em que o teor foi de apenas 6 g dm⁻³, enquanto em outros os teores chegaram a 38 g dm⁻³. O mesmo aconteceu para esse atributo na área de cana queimada, onde os teores variaram entre 18 e 30 g dm⁻³. Souza et al. (2010), estudando diferentes tipos de Latossolos, encontraram teores de MO variando entre 13 e 30 g dm⁻³. Os teores de argila e a CTC do solo apresentaram grandes amplitudes nos mapas de isolinhas; para o P_{ads}, observou-se variação de 180 a 500 mg kg⁻¹ e de 140 a 620 mg kg⁻¹, para as áreas de cana crua e queimada, respectivamente.

O V% apresentou nas duas áreas valores que estão abaixo (V < 60 %) do considerado por Raij et al. (1997) como ideal para cultura da cana-de-açúcar e valores acima do nível adequado (Figura 3), sugerindo que as doses de corretivo a serem aplicadas devem variar ao longo de cada área. Os mapas de isolinhas são de fundamental importância para o planejamento de adubações mais exatas e com menor relação.

Nos mapas de krigagem, quanto mais próximas entre si estão as isolinhas, maior a variabilidade de determinado atributo. Por meio da distribuição espacial dos mapas de óxidos de Fe, foi possível perceber a menor distância entre as isolinhas, quando comparados com os mapas químicos, indicando a maior variabilidade e reforçando os valores de alcance apresentados no quadro 2.

Os teores dos óxidos de Fe e a relação Gt/Gt+Hm também apresentaram grande amplitude, com exceção do DMC da Hm no sistema de cana crua, que evidenciou pequena variação de valores ao longo da área (Figura 3). Nos mapas do DMC da Gt, percebeu-se que os maiores valores encontrados na área de cana queimada estão bem próximos aos menores valores apresentados para a área de cana crua, indicando diferença no DMC da Gt nos dois sistemas de colheita avaliados. Com o objetivo de correlacionar alguns

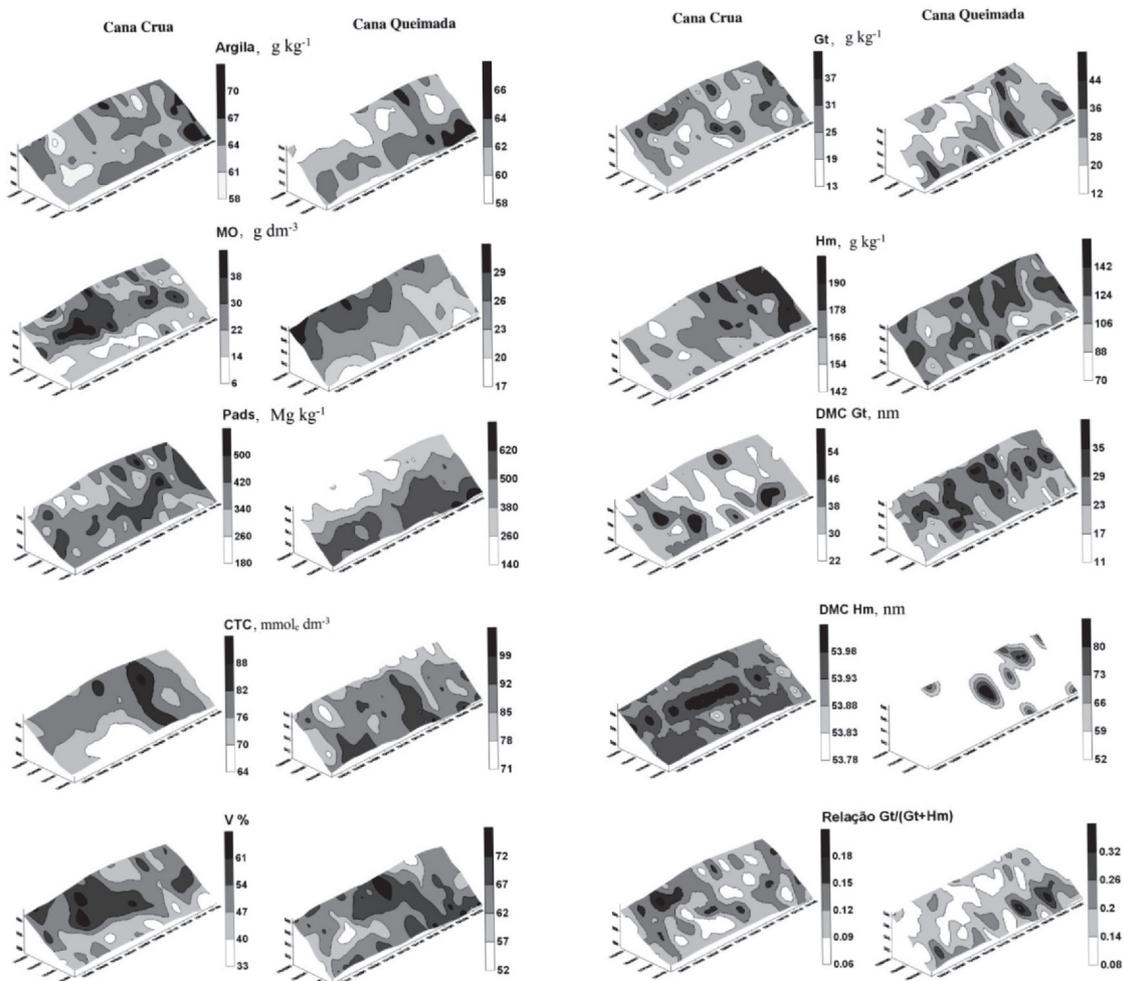


Figura 3. Mapas de isolinhas dos atributos químicos nas áreas de cana crua e cana queimada. MO: matéria orgânica; P_{ads} : fósforo adsorvido. Hm: hematita; Gt: goethita; e DMC: diâmetro médio do cristal.

atributos estudados, foram construídos os semivariogramas cruzados, fixando o P_{ads} e correlacionando-o espacialmente com outros atributos (Figura 4). Encontrou-se correlação negativa entre a MO e o P_{ads} nas duas áreas estudadas, demonstrando a influência dos teores de MO na adsorção de P e confirmando o que alguns pesquisadores têm demonstrado, ou seja, que essa pode competir com o íon fosfato pelos sítios de adsorção (Mesquita Filho & Torrent, 1993; Heredia & Cirelli, 2007). Em ambos os sistemas de colheita houve correlação espacial positiva entre o P_{ads} e o teor de argila, concordando com os resultados de Valladares et al. (2003), que encontraram maior capacidade de adsorção de P em locais com maiores teores de argila.

Já o DMC da Gt apresentou correlação espacial negativa com o P_{ads} , ou seja, nos locais onde o DMC da Gt foi maior, a adsorção de P foi menor, demonstrando a importância da cristalização da Gt na adsorção de P. A reatividade dos solos está relacionada com a superfície específica dos minerais. Quanto maior a superfície específica, menor é o DMC

do mineral e maior a sua reatividade. Assim, os resultados evidenciaram que nos locais com Gts menores (menor DMC), portanto mais reativas, maior é a adsorção. Os maiores teores de MO foram observados na área de cana crua (38 g dm^{-3}), juntamente com os maiores valores de DMC da Gt (54 nm) (Figura 3), indicando a tendência de novo equilíbrio dinâmico do sistema solo, diante das alterações mineralógicas graduais que podem ocorrer (Silva Neto et al., 2008). Pode-se inferir que as frações da MO (ácidos fúlvico e húmico), representadas pela alteração do grau de humificação, conforme discutido por Canellas et al. (2000) e Panosso et al. (2011), no ambiente de cana crua, dissolveram os minerais com menor DMC (menos cristalizados e com maior superfície específica), liberando o P adsorvido, deixando no sistema Gts maiores.

Inda Junior & Kämpf (2005), estudando a dissolução seletiva de óxidos de Fe, concluíram que a heterogeneidade da Gt ocorreu, possivelmente, como resultado de mudanças pedoambientais ao longo da pedogênese, que alteram os fatores controladores da

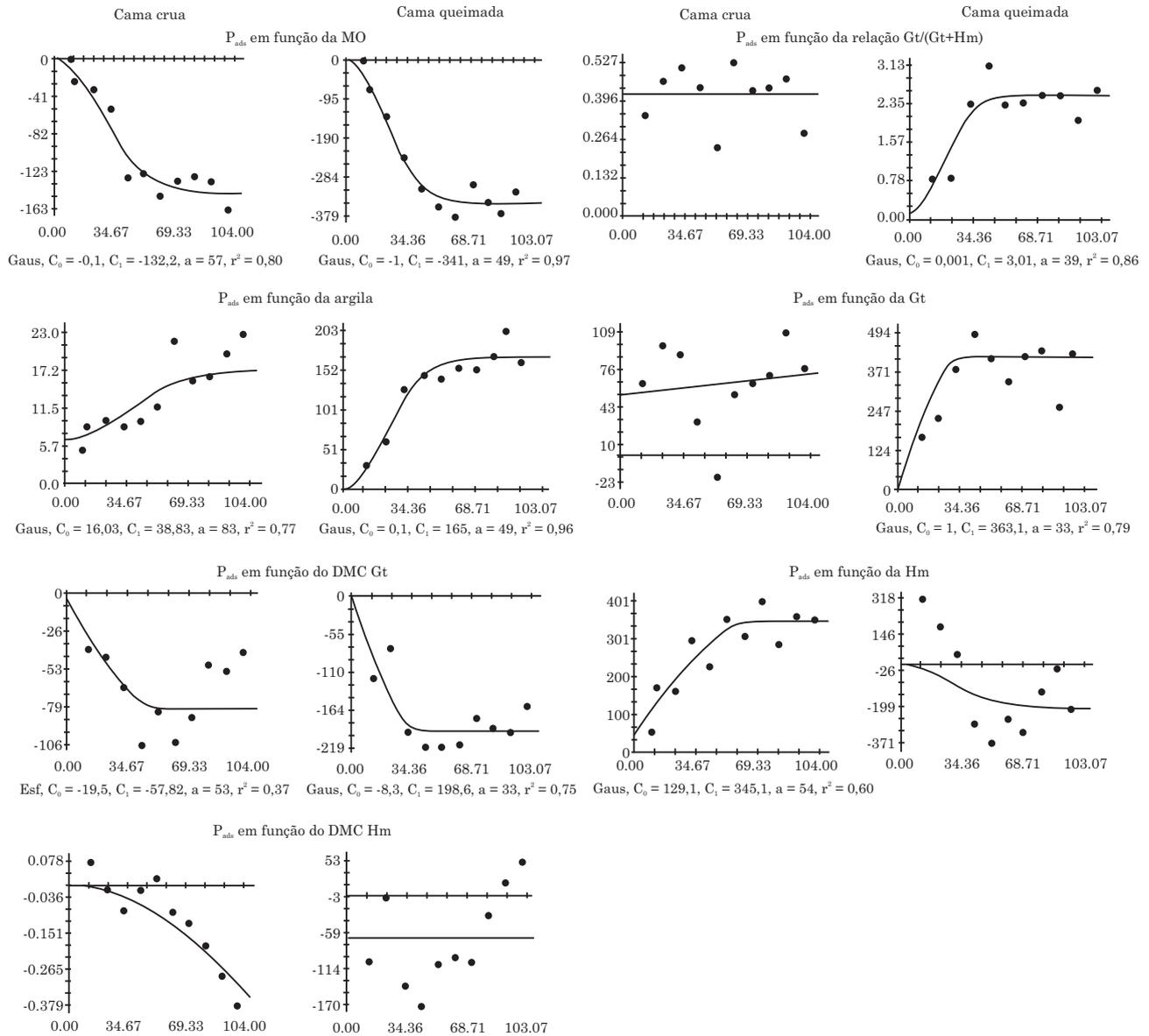


Figura 4. Semivariogramas cruzados dos atributos estudados. Gaus: gaussiano; Esf.: esférico; Co: efeito pepita; C1: patamar; a: alcance, em m; e R^2 : coeficiente de determinação.

atividade do Al^{3+} na solução do solo, como pH, teor de compostos orgânicos, saturação por bases e teor de silício. As diferentes cristalinidades desses minerais influenciam a superfície específica, capacidade de troca de ânions e consequentemente a adsorção de P desses e vários fenômenos de superfície (Rolim Neto et al., 2004). O DMC da Hm não apresentou correlação espacial com o P_{ads} , em ambas as áreas avaliadas.

A relação $Gt/(Gt+Hm)$ e o teor de Gt e de Hm na área de cana queimada apresentaram correlação espacial positiva com a adsorção de P, enquanto o restante dos atributos que foram apresentados com os semivariogramas cruzados não evidenciaram correlação espacial com o P_{ads} , ou seja, não interferiram na capacidade de adsorção de P do solo.

Schaffrath et al. (2008), estudando correlações entre atributos do solo por meio de semivariograma cruzado em áreas de preparo convencional e plantio direto, encontraram correlação espacial entre os atributos avaliados.

CONCLUSÕES

1. A variabilidade espacial dos atributos químicos foi maior em áreas com colheita de cana crua, quando comparada com as de colheita de cana queimada, enquanto os atributos cristalográficos e os teores dos óxidos de ferro apresentaram maior variabilidade espacial na área de cana queimada, com exceção da

relação Gt/(Gt+Hm), em razão da dissolução seletiva das Gt de menor DMC.

2. Os atributos matéria orgânica e diâmetro médio do cristal da Gt apresentaram correlação espacial negativa, enquanto a argila apresentou correlação positiva com a adsorção de fósforo nos dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar avaliados.

LITERATURA CITADA

- ANGELICO, J.C. Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. R. Bras. Ci. Solo, 30:931-936, 2006.
- BARBIERI, D.M.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. Eng. Agríc., 28:645-653, 2008.
- BERTOLANI, F.C. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. R. Bras. Ci. Solo, 25:987-995, 2001.
- BHATTI, A.U.; MULLA, D.J. & FRAZIER, B.E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. Remote Sens. Environ., 37:181-191, 1991.
- CANELLAS, L.P.; BERNER, P.G.; SILVA, S.G.; BARROS E SILVA, M. & SANTOS, G.A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. Pesq. Agropec. Bras., 35:133-143, 2000.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & ALLEONI, L.R.F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. Catena, 100: 100-106, 2013.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I - Mineralogia da fração argila. R. Bras. Ci. Solo, 32:2269-2277, 2008a.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. R. Bras. Ci. Solo, 32:2269-2277, 2008b.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1508, 1994.
- CAMPOS, L.H.F.; CARVALHO, S.J.P.; CHRISTOFFOLETI, P.J.; FORTES, C. & SILVA, J.S. Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453). Acta Sci. Agron., 32:345-350, 2010.
- CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geostatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. Pesq. Agropec. Bras., 37:1151-1159, 2002.
- CASAGRANDE, J.C. & CAMARGO, O.A. Adsorção de fosfato em solos com caráter ácrico validada por um modelo de complexação de superfície. R. Bras. Ci. Solo, 21:353-360, 1997.
- CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. R. Bras. Ci. Solo, 31:1329-1339, 2007.
- CRESSIE, N. Statistics for spatial data. New York, John Wiley, 1991. 900p.
- DICK, D.P. Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986. 196p. (Dissertação de Mestrado)
- EARL, R.; TAYLOR, J.C.; WOOD, G.A.; BRADLEY, I.; JAMES, L.T.; WAINE, T.; WELSH, J.P. GODWIN, R.J. & KNIGHT, S.M. Soil factors and their influence on within-field crop variability. Part I: Field observation of soil variation. Biosyst. Eng., 4:425-440, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- GUIMARÃES, E.C. Geostatística básica e aplicada. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 77p.
- HEREDIA, O.S. & CIRELLI, A.F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. Geoderma, 137:426-431, 2007.
- INDA JUNIOR, A.V. & KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. R. Bras. Ci. Solo, 29:851-866, 2005.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. R. Bras. Ci. Solo, 22:209-213, 1998.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. Geoderma, 29:27-39, 1982.
- MACHADO, L.O.; LANA, A.M.Q.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C. & FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. R. Bras. Ci. Solo, 31:591-599, 2007.
- MARQUES JUNIOR, J. & LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neocenoicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. Geociência, 19:265-281, 2000.

- MATA, J.D.V. Variabilidade espacial de indicadores da compactação de terra roxa estruturada, sob dois sistemas de preparo, cultivada com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 73p. (Tese de Doutorado)
- MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B. & ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. R. Bras. Ci. Solo, 24:201-207, 2000.
- MESQUITA FILHO, M.V. & TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). Geoderma, 58:107-123, 1993.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M.C.C.; SOUZA, Z.M. & CAMARGO, L.A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. R. Ci. Agron., 41:191-199, 2010.
- NORRISH, K. & TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. J. Soil Sci., 12:294-306, 1961.
- PANOSSO, A.R.; MARQUES JR, J.; MILORI, D.M.B.P.; FERRAUDO, A.S.; BARBIERI, D.M.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under slash-and-burn and green harvest. Soil Till. Res., 111:190-196, 2011.
- PANOSSO, A.R.; PERILLO, L.I.; FERRAUDO A.S.; PEREIRA, G.T.; VIVAS-MIRANDA J.G. & LA SCALA, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production area. Soil Till. Res., 124:8-16, 2012.
- RACHID JÚNIOR, A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. & JOHANN, J.A. Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo e da produtividade da soja num sistema de agricultura de precisão. Eng. Agríc., 14:156-169, 2006.
- RAGAGNIN, V.A.; SENA JÚNIOR, D.G. & SILVEIRA NETO, A.N. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 14:600-607, 2010.
- RAIJ, B.van. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 285p.
- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100)
- ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN, F.S.; LAMBIN, E.F.; LENTON, T.M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H.J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C.A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P.K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R.W.; J. FABRY, V.J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P. & FOLEY, J.A. A safe operating space for humanity. Nature, 461:472-475, 2009.
- ROLIM NETO, F.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L.M.; CORRÊA, M.M.; FERNANDES FILHO, E.I. & IBRAIMO, M.M. Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). R. Bras. Ci. Solo, 28:953-964, 2004.
- ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; BARBOSA, R.S. & SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. Pesq. Agropec. Bras., 45:744-750, 2010.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R. & SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L) em área severamente erodida. R. Bras. Ci. Solo, 22:115-122, 1998.
- SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 32:1369-1377, 2008.
- SCHULZE, D.G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cel dimension of Al-substituted of goethites and estimation of Al from them. Clays Clay Miner., 32:36-44, 1984.
- SILVA NETO, L.F.; INDA, A.V.; BAYER, C.; DICK, D.P. & TONIN, A.T. Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 32:1873-1881, 2008.
- SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P.; SILVA, S.C. & CUNHA, A.A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. Pesq. Agropec. Bras., 35:2057-2064, 2000.
- SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JR., J. & PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. Geoderma, 155:55-66, 2010.
- SOUZA, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 162p. (Tese de Doutorado)
- 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. Ci. Rural, 40:840-847, 2010.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. & UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Adv. Agron., 38:54-94, 1985.
- VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G. & ANJOS, L.H.C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. Bragantia, 62:111-118, 2003.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.1-53.

- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51:1-75, 1983.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.
- WEIRICH NETO, P.H.; SVERZUT, C.B. & SCHIMANDEIRO, A. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:338-343, 2006.
- ZANÃO JÚNIOR, L.A.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C.; ARAÚJO, J. & PEREIRA, M. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolos sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:389-400, 2010.