

VARIABILIDADE ESPACIAL DO TEOR DE CARBONO ORGANICO NO SOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA MECANICAMENTE

INTRODUÇÃO

A cana de açúcar tem sido apontada como uma das melhores opções de energia renovável, razão pela qual vem aumentando significativamente os níveis de produção desta cultura nos últimos anos. No ano 2009 a colheita de cana-de-açúcar resultou em cerca de quatro vezes o valor registrado 48 anos atrás, sendo que a área colhida incrementou em 15 milhões de hectares nesse mesmo período de tempo (FAOSTAT, 2011).

Mundialmente, o Brasil figura como o principal produtor de cana-de-açúcar e o segundo maior produtor de etanol. Responsável por aproximadamente um terço da área colhida e da produção global, o Brasil destaca-se pela sua experiência e capacidade de responder a demanda internacional de biocombustíveis para o setor transporte, estratégia recentemente lançada como medida de mitigação das emissões de gases efeito estufa (GEE) (ZUURBIER e DE VOOREN, 2008).

A prática de queima nos canaviais é geralmente adotada nas diversas regiões canavieiras do Brasil e do mundo com o objetivo de facilitar as operações de corte e carregamento. Porém devido ao forte impacto ambiental que esta atividade gera vem sendo implementadas uma serie de politicas que procuram a eliminação gradativa desta pratica, substituindo-a pela *colheita de cana crua*. Nesse manejo a palha é deixada sobre a superfície do solo, podendo desta maneira potencializar incrementos no conteúdo da matéria orgânica do solo (MOS) e minimizar os problemas relacionados à poluição atmosférica.

A MOS é um importante constituinte, uma vez que influencia as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo; assim a adoção de práticas

agrícolas que promovam o incremento desta poderiam resultar em um efeito positivo sobre a qualidade do solo.

Em regiões de clima tropical a matéria orgânica, mesmo em baixo teor, contribui com mais de 50% da CTC dos solos (PREZOTTI et al., 2007), além de desempenhar um importante papel na dinâmica do efeito estufa; mudanças na concentração de carbono orgânico no solo (COS) podem levar a alterações significativas no volume de CO₂ emitido para a atmosfera.

Assim como outros atributos do solo, o conteúdo de carbono orgânico neste compartimento varia em função do tempo e do espaço. O conhecimento dessa distribuição espacial torna-se relevante na definição de práticas de manejo e no estudo do impacto que tais práticas geram sobre a qualidade ambiental. O preparo do solo por exemplo, é considerada uma atividade que promove a mineralização do COS, resultando em emissões de CO₂ a atmosfera; porém a quantidade emitida do referido gás não pode ser atribuída somente ao impacto de tal prática agrícola, mas sim associado a estrutura da dependência espacial do COS sob o agroecossistema.

A análise geoestatística constitui por tanto uma valiosa ferramenta para a condução controlada dos sistemas de manejo na cana-de-açúcar.

Nesse contexto, a presente pesquisa se propôs caracterizar espacialmente o teor de COS em área de cana de açúcar colhida mecanicamente. O entendimento dessas informações irão contribuir na redução do fenômeno de efeito estufa e na melhora da sustentabilidade do etanol que vem sendo produzido a partir desta cultura.

MATERIAIS E METODOS

O estudo foi conduzido em um solo classificado como Latossolo Vermelho escuro eutrófico (EMBRAPA, 2006) em uma área pertencente à usina Iracema, localizada no município de Iracemópolis, na região nordeste do estado de São Paulo. Segundo o sistema de classificação de Köppen, a região apresenta clima Aw: tropical com verão chuvoso e inverno seco (precipitação do

mês mais seco menor que 30 mm, temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio inferior a 18 °C).

O local experimental corresponde a área com histórico de uso de cana-de-açúcar superior a 30 anos, sendo que no momento da avaliação a área encontrava-se ocupada por plantio de cana da variedade SP91-1049 colhida mecanicamente (sem queima) durante os últimos seis anos.

Estabeleceu-se uma grade regular de 57 x 76 metros, composta por 168 pontos amostrais com distancia mínima de 5 metros entre eles (Figura 1). Em cada um desses pontos foram coletadas amostras de solo com o auxílio de trado a cada 10 cm até atingir a profundidade de 20 cm. As amostras foram secas ao ar, homogeneizadas, tamisadas em peneira de 2 mm, posteriormente moídas manualmente e tamisadas em peneira de 100 meshes e finalmente analisadas por combustão seca no equipamento LECO CN-2000.

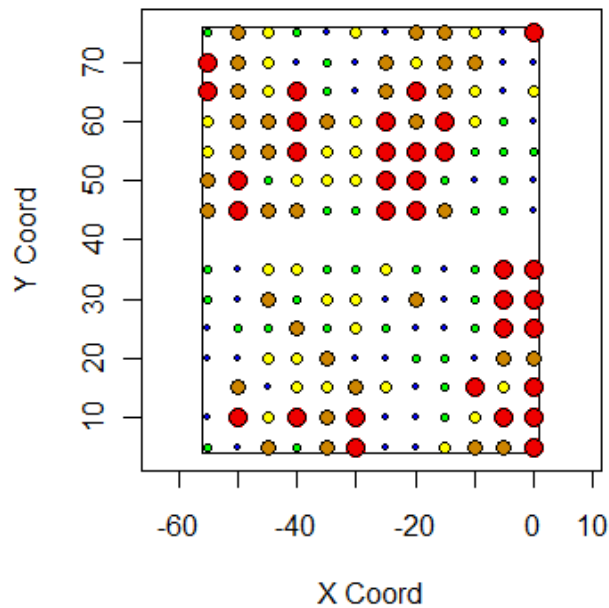


Figura 1 – Grade regular estabelecida no local experimental

Os resultados obtidos foram analisados através da estatística descritiva calculando-se as medidas de posição (média e mediana) e de dispersão (valor máximo, valor mínimo, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e

curtose). A variabilidade dos dados foi classificada segundo Warrick & Nielsen (1980) a partir das informações no coeficiente de variação (CV). A distribuição normal ou lognormal dos dados foi também verificada através da distribuição de frequência do teor de carbono orgânico do solo nas duas camadas avaliadas e das informações proporcionadas pelos coeficientes de assimetria e curtose.

A dependência espacial foi analisada aplicando técnicas geoestatísticas sobre a variável objeto de estudo, utilizando-se o semivariograma com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca. O semivariograma pode ser definido como a média do quadrado das diferenças entre todas as observações separadas pela distância h e a sua estimação é dada pela equação descrita a seguir:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N_i(h)} \sum_{j=1}^{N_i(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{eq (1)}$$

Onde $\gamma(h)$ é a semivariância para todas as amostras localizadas no espaço separado pelo intervalo da distância h , sendo que tal distância não deve ser maior do que a metade da largura da área amostrada, nem menor do que a menor distância de amostragem; N_i é o número total de pares de amostras separados por uma distância h ; $Z(x_i)$ é o valor da variável Z em um ponto x_i ; e $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z em um ponto x_i mais distância h . Plotando a semivariância $\gamma(h)$ contra a distância h obtém-se o semivariograma, o qual exibe um comportamento aleatório ou sistemático que pode ser descrito por modelos teóricos (linear, esférico, exponencial, gaussiano, entre outros) (Burrough e McDonnell, 1998).

O valor da semivariância na interseção com o eixo Y é definido como *efeito pepita* (C_0) e representa a variância devido a erros inerentes às medições ou à micro-variabilidade da propriedade que não pôde ser detectada com a escala de amostragem utilizada. O valor da semivariância aumenta com o aumento da distância de separação entre as amostras, atingindo um valor aproximadamente constante chamado de *patamar* ($C_0 + C_1$), o qual é aproximadamente igual à variância dos dados amostrais quando as hipóteses de estacionaridade são

satisfeitas. A distância na qual o patamar ocorre é chamado de *alcance* (A) e representa a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente

Ao semivariograma experimental gerado pelos dados pertencentes a camada 0-10 cm foram ajustados os modelos teóricos *Gaussiano* e *Mátern*. Entretanto para o semivariograma gerado pelo teor de COS na camada 10-20 cm foram ajustados os modelos *exponencial* e *Matern*. A verificação do modelo que apresentou melhor ajuste foi realizada através do índice AIC calculado para cada um deles. Uma vez feito este procedimento procedeu-se a krigagem.

A razão entre o efeito pepita e o patamar (C_0/C_0+C_1), expressa como porcentagem, foi usada para classificar a dependência espacial do atributo estudado, conforme proposto por Cambardella et al. (1994); onde são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que apresentam C_0/C_0+C_1 menor ou igual a 0,25, de dependência espacial moderada quando o resultado de tal razão está entre 0,25 e 0,75 e de dependência espacial fraca, quando o for maior que 0,75.

O análise do padrão espacial da variável objeto de estudo foi também realizada pelo método de inferência bayesiana. A maior limitação imposta por este método é a escolha das funções de distribuições das prioris, para o conjunto de parâmetros do modelo que possam afetar significativamente os resultados da inferência.

Resultados e Discussão

Os resultados da análise de estatística descritiva são apresentados na tabela 1. Estes dados foram calculados após a identificação e exclusão de um ponto correspondente a camada 0-10, caracterizado como atípico durante a análise exploratória.

O coeficiente de variação encontrado na referida análise indica variabilidade media segundo Warrick & Nielsen para o teor de C nas duas profundidades avaliadas, fato que poderia sugerir a existência de um padrão espacial associado

a este atributo do solo. Os valores dos coeficientes de assimetria e curtose indicam que os dados analisados apresentam distribuição normal.

Os teores médios de carbono orgânico encontrados tanto na camada 0-10 quanto na camada 10-20 cm coincidem com os resultados reportados em outras pesquisas. Signor (2010) em estudo que objetivou a avaliação do efeito do sistema de colheita da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono orgânico do solo encontrou teor médio de 2,62% na camada 0-10 cm e 2,18% na camada 10-20 cm em áreas de seis anos de colheita mecanizada após plantio; mesma condição avaliada nesta pesquisa. Razamfimbelo et al (2006) e Galdos et al (2009) reportam também valores muito semelhantes em áreas de cana-de-açúcar com o mesmo sistema de colheita, 23,7 e 19,84 g Kg⁻¹ na camada 0-10 cm respectivamente. Na camada de 10-20 cm Galdos et al (2009) encontraram 18,49 g de C por Kg⁻¹ de solo.

Tabela 1 - Análise de estatística descritiva do teor de carbono orgânico do solo (%) nas profundidades estudadas

	Media	Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desvio padrão	Coeficiente de Variação (%)	Coeficiente de Assimetria	Curtose
Camada 0-10	2.38	2.37	1.32	4.69	0.54	22.55	0.48	0.90
Camada 10-20	2.26	2.19	1.40	3.64	0.43	19.08	0.53	0.29

De acordo com o índice AIC calculado para cada modelo matemático proposto, o modelo *Matern* foi o que apresentou melhor ajuste aos semivariogramas experimentais dos teores de carbono nas camadas 0-10 e 10-20 cm (Figura 2). O referido modelo mostra alcances de dependência espacial (A) diferentes nas duas profundidades avaliadas, sendo tal parâmetro maior na camada sub-superficial (Tabela 2). Assim a medida que aumenta a profundidade observa-se homogeneidade dos valores de teor de COS em uma área de maior raio, com maior descontinuidade na distribuição espacial desse atributo em superfície. Esta condição pode ser atribuída a influência do manejo do solo sobre

a expressão das características do mesmo. Souza et al (2001) estudando a variabilidade espacial de atributos físicos do solo reporta tendência similar a encontrada nesta pesquisa.

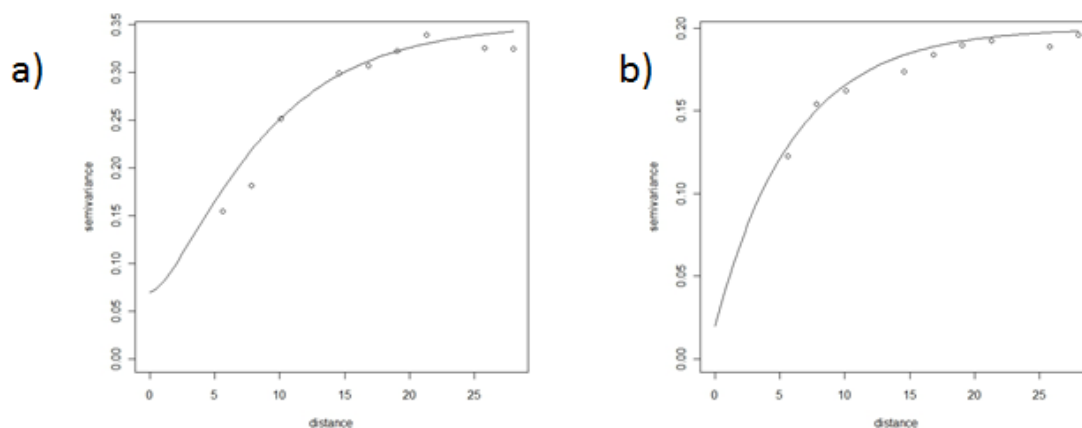


Figura 2 – Semivariogramas do teor de COS na camada 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b) de profundidade

Avaliando a razão do efeito pepita sobre o patamar da variável objeto de estudo, nas duas camadas avaliadas, observou-se que elas apresentaram dependência espacial moderada. Não foram encontradas pesquisas que avaliem a variabilidade espacial do COS em solo sob cana de açúcar; porém resultados diversos tem sido reportados em relação a estrutura espacial deste atributo do solo em outros agroecossistemas, as diferenças na dependência encontram-se associadas basicamente ao maior ou menor impacto do manejo agrícola sobre o solo (Mendez et al., 2007, Reina-Sanchez, 2010; Pereira 2010).

Tabela 2 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados do teor de carbono orgânico do solo nas duas profundidades avaliadas

	Modelo	Co	C0+C1	A	C0/C0+C1	GDE	Log Verossimilhanca
0-10	Matern	0.0753	0.2158	5,686	0.3489342	Moderada	-100.4
10-20 c	Matern	0.0665	0.1192	7,800	0.55788591	Moderada	-78.64

Co: efeito pepita; C0+C1: Patamar; A: alcance prático; GDE: grau de dependência espacial

Os parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores de teor de carbono em locais não amostrados por krigagem gerando, desta forma, mapas de distribuição espacial dessa variável (Figura 4). Pode-se observar, com base nesses mapas, que os maiores valores de estoque de carbono se encontram na camada superficial do solo (0-30 cm), que eles diminuem com a profundidade e que há um comportamento homogêneo.

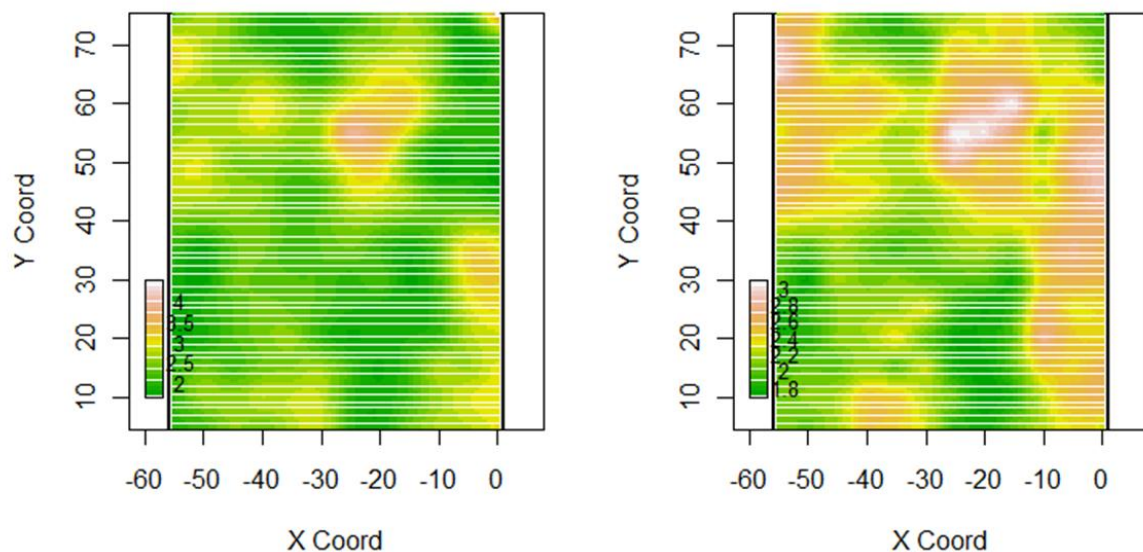


Figura 4 - Distribuição espacial do teor de carbono orgânico no solo (g Kg^{-1}) das amostras de solo coletadas nas profundidades de 0-10 cm (A), e 10-20 cm (B)

Quando realizada a análise pela abordagem Bayesiana foram encontrados os resultados reportados na tabela 3. Esses dados foram diferentes das informações mostradas pela abordagem tradicional que envolve o semivariograma. Nas duas camadas avaliadas os parâmetros fornecidos por esta análise estiveram acima dos valores reportados na tabela 2. Tal discrepância pode estar atribuída a falhas na escolha das funções de distribuições das prioris para o conjunto de parâmetros do modelo, uma vez que esta escolha foi de tipo não informativa.

Tabela 3- Intervalo de credibilidade para os parametros β : Beta, C0+C1: Patamar; A: alcance da distribuicao *A posteriori*

Parametros	Camada 0-10 cm					
	1° Quantil	Mediana	Media	3°Quantil	2,5%	97,5%
β	2,21	2,33	2,31	2,45	1,50	2,95
C0+C1	0,28	0,33	0,47	0,46	0,23	1,58
A	7,12	10,60	17,39	14,24	7,12	92,58
Parametros	Camada 10-20 cm					
	1° Quantil	Mediana	Media	3°Quantil	2,5%	97,5%
β	2,20	2,26	2,25	2,31	1,26	3,11
C0+C1	0,16	0,18	0,37	0,23	0,13	1,63
A	3,56	3,56	24,9	7,12	3,56	163,89

Desde o ponto de vista agrônomo, o conhecimento do padrão espacial do carbono orgânico no solo constitui uma valiosa ferramenta. A partir destas informações será possível o planejamento de estratégias de manejo que conduzam a sua conservação. Atividades como o preparo do solo durante as operações de reforma do canavial possuem forte impacto sobre a dinâmica da matéria orgânica no solo, resultando em emissões de CO₂ a atmosfera, fato que altera o balanço de carbono encontrado nesta cultura, cujo principal fim é a produção de etanol, influenciando por tanto na sustentabilidade ambiental deste biocombustível.

CONCLUSÕES

O conteúdo de carbono orgânico no solo sob áreas de cana de açúcar colhida mecanicamente apresenta dependência espacial tanto na camada 0-10 cm quanto na camada de 10 a 20 cm de profundidade, o que sugere a aplicação de técnicas de manejo localizadas para evitar possíveis perdas deste elemento.

As práticas agrícolas influenciam na variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo, resultando em maior descontinuidade no padrão de distribuição espacial deste elemento em superfície do que em subsuperfície.

REFERENCIAS

BURROUGH, P.A., MCDONNELL, R.A. Principles of Geographical Information System. **Oxford University Press**, UK, p. 333. 1998.

CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2.ed. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306p.

FAOSTAT - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. 2011. FAOSTAT. Disponível em: <http://faostat.fao.org/> Último acesso em 20 de agosto de 2011.

GALDOS, V.M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, n. 3/4, p. 347-352, 2009.

MENDEZ, A.M.S.; DUDA, P.G.; LIMA, J.A.G, BEZERRA, L. Variabilidade espacial de características químicas de um Cambissolo cultivado com mamão no semi-árido do Rio Grande do Norte. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 7, n 2, p. 169-174, 2007

PEREIRA, P.R.B. **Distribuição espacial do carbono no solo e avaliação dos fluxos dos gases de efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O) em áreas de vegetação de cerrado, *Pinus spp* e *Eucalyptus spp* na estação Experimental de Mogi Mirim (IF/SMA – SP)**. 2010. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências) . Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

PREZOTTI, L. C.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G.; OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo - 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. 305p.

RAZAFIMBELO, T.; , BERNARD BARTHE'S, B.; LARRE'-LARROUY, M.C.; LUCA, E.F.; LAURENT, J.Y.; CERRI, C.C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1/4, p. 285-289, 2006.

REINA-SANCHEZ, G.A. **Variabilidade espacial do carbono e outros atributos do solo em uma área destinada ao reflorestamento no Rio Grande do Norte**. 2010. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. 2010. 119 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SOUZA, Z.M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, 2001

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 385 p.

ZUURBIER, P.; VAN DE VOOREN, J., (Eds.). **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen, Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2008. 256 p