

Variabilidade espacial da emissão de CO₂ e porosidade do solo em área de cana-de-açúcar⁽¹⁾

Rose Luiza M. Tavares ⁽²⁾; Zigomar Menezes de Souza ⁽³⁾; Newton La Scala Junior ⁽⁴⁾

⁽¹⁾Trabalho executado com recursos da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP; ⁽²⁾Doutoranda do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, SP; ⁽³⁾Professor do Colegiado de Engenharia Agrícola da UNICAMP, Campinas, SP, E-mail:zigomarms@feagri.unicamp.br; ⁽⁴⁾Professor do da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV – UNESP, Jaboticabal, SP.

RESUMO: O cultivo sem queima da cana-de-açúcar influencia de forma positiva a qualidade do solo, pelo aumento da palha residual depositada no solo após colheita, contribuindo para melhoria de seus atributos físicos e de forma indireta, na emissão de CO₂ para atmosfera. Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da emissão de CO₂, macro e microporosidade do solo em sistemas de manejo de cana-de-açúcar. Para isso, foram estudadas duas áreas de cana-de-açúcar: com e sem queima do canavial, caracterizadas como “cana crua” e “cana queimada”, respectivamente, e em ambas as áreas foi instalada uma malha amostral (100 x 100 m) com pontos espaçados em diferentes distâncias. Os resultados mostraram que a emissão de CO₂ e macroporosidade foram maiores na área de cana crua e as áreas apresentaram dependência espacial dos atributos avaliados, cujo modelo dos variogramas experimentais foi o exponencial, com alcances em torno de 20 m e forte grau de dependência espacial.

Termos de indexação: Respiração do solo, macroporosidade, *Saccharum officinarum*.

INTRODUÇÃO

A queima do canavial antes da colheita é uma prática usual no Brasil, pois facilita o corte manual, porém, esse processo tem sido questionado em relação aos seus efeitos na qualidade do solo e do meio ambiente. Em 2011, foram 1,67 milhões de ha de cana-de-açúcar queimadas no estado de São Paulo (UNICA, 2013), cujo processo é responsável pela emissão estimada de 941 kg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Figueiredo & La Scala, 2011).

Portanto, a recente tendência de adoção de práticas agrícolas que levem a uma maior sustentabilidade do sistema, pressiona a agroindústria sucroalcooleira a rever seus processos, incluindo a colheita da cana sem queima prévia. No caso do estado de São Paulo, a adoção da colheita mecanizada e sem queima do canavial é inevitável e foi decretada por lei estadual (47.700, de 11 de março de 2003). O cultivo sem queima da cana-de-açúcar influencia de forma positiva a qualidade do solo, pelo aumento da palha residual depositada no solo após colheita, contribuindo para

melhoria de seus atributos físicos e microbiológicos e de forma, indireta, na emissão de CO₂ para atmosfera.

A emissão de CO₂ do solo é resultado de processos físicos e biológicos, que interferem na produção e transporte de CO₂ do solo para atmosfera, sendo que a produção está relacionada à ação dos microrganismos durante o processo de decomposição da matéria orgânica do solo e à respiração das raízes das plantas, enquanto que o transporte relaciona-se à estrutura física do solo, principalmente a porosidade que condiciona fluxo de gases no solo. Brito et al. (2009), relataram que a emissão de CO₂ do solo foi maior na área que apresentou maior quantidade de macroporosidade do solo viabilizando o fluxo de O₂ e CO₂ do solo.

O estudo da variabilidade espacial da emissão de CO₂ na agricultura é importante na manutenção da sustentabilidade de culturas, auxiliando na preservação do carbono do solo e redução da emissão de gases que causam o efeito estufa (Panosso et al., 2008), também fornece importantes informações em relação à dinâmica de CO₂ no solo (BRITO et al., 2009) e na tentativa de modelar a dependência espacial da emissão do gás no solo (Panosso et al., 2009).

Práticas de manejo que resultam em modificações na matéria orgânica do solo e influenciam nos atributos físicos e químicos do solo afetam diretamente a atividade microbiana e conseqüentemente a emissão de CO₂. Apesar de todos os esforços, ainda são necessários estudos a respeito das mudanças nos atributos do solo quando consideramos a conversão do agroecossistema de cana queimada para cana crua e como este processo poderá afetar nas perdas de carbono do solo por meio da emissão de CO₂. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da emissão de CO₂, macro e microporosidade do solo em sistemas de cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em duas áreas de cana-de-açúcar localizadas no município de Pradópolis-SP (21°21'43" de latitude sul e 48°04'18" de longitude oeste, 438 m de altitude), com topografia entre plana a suavemente ondulada e



com solo classificado como Latossolo Vermelho, textura argilosa. O clima é o mesotérmico de inverno seco (Cwa) pelo critério de classificação climática de Köppen.

As áreas de estudo foram cultivadas com cana-de-açúcar em diferentes manejos: 1 - cana-de-açúcar com queima e corte manual; 2- cana-de-açúcar sem queima e corte mecanizado, com 10 anos de implantação do sistema de cana crua. Em cada área foi instalada uma malha amostral contendo 30 pontos amostrais espaçados em diferentes distâncias, totalizando uma área de 01 ha (Figura 1), sendo todos os pontos georreferenciados com auxílio de uma estação total e DGPS.

A avaliação de CO₂ foi realizada nos pontos da malha amostral com auxílio de câmaras de solo fabricadas pela companhia LI-COR, Nebraska, EUA, modelo LI-8100. As amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos de 0,04 m de altura e 0,05 m de diâmetro, a microporosidade foi determinada em mesa de tensão e correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa, após saturação, e a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade segundo o metodologia proposta pela Embrapa (2011).

Foi utilizada a estatística descritiva e teste t a 5% de probabilidade para comparação de dados médios e a dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de variogramas baseados na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca. Do ajuste de um modelo matemático, foi estimado o modelo teórico para o variograma (efeito pepita, C₀; patamar, C₀+C₁; e o alcance, a). Foram considerados de dependência espacial forte os variogramas que têm efeito pepita < 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca, > 75% (Cambardella et al., 1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A emissão de CO₂ do solo foi maior ($p < 0,05$) na área de cana crua com $3,01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ comparada à de cana queimada com $1,55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tabela 1). Valores estes similares aos detectados em estudo sobre fluxo de CO₂ em solos sob cana-de-açúcar (La Scala et al., 2000; Panosso et al., 2009; Corradi et al., 2013). Na área de cana crua, há presença de palhada sobre o solo, resultante do processo de colheita mecanizada, essa palhada estimula à ação de organismos do solo responsáveis pela decomposição desse material, refletindo em maior emissão de CO₂ (Fang et al., 1998; Epron et al., 2004).

A macroporosidade do solo, que é o atributo físico mais afetado pelo processo de compactação (Viana et al., 2011), foi maior ($p < 0,05$) na área de cana crua com $0,31 \text{ m m}^{-3}$ comparada à de

queimada com $0,19 \text{ m m}^{-3}$ (Tabela 1), enquanto que a microporosidade não apresentou diferença ($p > 0,05$). Os valores de macro e microporosidade foram similares aos encontrados em estudo de Souza et al. (2001) em Latossolo Vermelho sob sistema de semeadura direta, cujos valores foram de 0,12 e 034 m m^{-3} para macro e microporosidade, respectivamente. Em ambas as áreas a macroporosidade foi superior a 10%, o que não restringe o desenvolvimento radicular (Viana et al., 2011).

Observa-se que os atributos avaliados apresentaram simetria nos dados com valores dos coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero (Tabela 1). O coeficiente de variação para os dados físicos variou, segundo classificação de Warrick & Nielsen (1980), de baixo (CV < 12%) a médio (12% < CV < 20%), enquanto que a emissão de CO₂ apresentou CV alto (> 24%), o que pode ser indício da alta variabilidade espacial (Panosso et al., 2008). Outros estudos também encontraram alto CV para emissão de CO₂ do solo (Fang et al., 1998; Epron et al., 2004).

Para análise geoestatística, ambas as áreas avaliadas apresentaram dependência espacial dos atributos avaliados (Tabela 2). O modelo exponencial foi o que mais se ajustou nos variogramas experimentais dos atributos estudados. Corroborando com os resultados, variogramas com modelos exponenciais para macro e microporosidade do solo foram encontrados em estudos de Santos et al. (2006) e Parfitt et al. (2009) e para emissão de CO₂ em estudo de Panosso et al. (2009).

O alcance (a) da dependência espacial da emissão de CO₂ na área de cana crua foi de 23,10 m, e na de cana queimada de 11,50 m (Tabela 2). Em estudo de Panosso et al. (2008), foi encontrado alcance de 32,7 m para área com cana crua. La Scala et al. (2000) detectou alcance variando de 20 a 50 m em área com solo nu (sem cobertura vegetal). O grau de dependência espacial, representado pela relação C_0/C_0+C_1 (efeito pepita/patamar) foi forte (< 25%), segundo classificação de Cambardella et al. (1994). Estudo de Panosso et al. (2009) detectaram forte grau de dependência espacial em estudo sobre CO₂ em solos de cana crua e queimada.

Por meio dos variogramas experimentais, foram obtidos os mapas de distribuição espacial dos atributos avaliados, onde observa-se algumas similaridades nos mapas de CO₂ e macroporosidade do solo para as duas áreas de cana-de-açúcar (Figura 2). Uma das funções da macroporosidade é proporcionar no solo a infiltração de água e gases (Alvenäs & Jansson, 1997).

Verifica-se por meio dos mapas de macro e microporosidade do solo um comportamento

complementar e antagônico entre os dois atributos, e isto foi anteriormente observado em estudos de Viana et al. (2011) sobre estudo de atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo e Camilotti et al. (2005) que estudaram atributos físicos do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua.

CONCLUSÕES

A emissão de CO₂ e a macroporosidade do solo foi maior no sistema de cana crua, fato relacionado principalmente à presença de palhada.

Os atributos avaliados apresentaram estruturas de dependência espacial semelhantes, com modelos exponenciais ajustados aos variogramas, alcance médio de 20 m e forte grau de dependência espacial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVENÁS, G.; JANSSON, P. E. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88:47-56, 1997.

BRITO, L. de F. et al. Soil CO₂ emission of sugarcane fields as affected by topography. *Scientia Agricola*, 66:77-83, 2009.

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

CAMILOTTI, F. et al. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. *Engenharia Agrícola*, 25:189-198, 2005.

CORRADI, M. M. Crop residues on short-term CO₂ emissions in sugarcane production areas. *Engenharia Agrícola*, 33:699-708, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 3. Ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011, 230 p.

EPRON, D. et al. Spatial and temporal variations of soil respiration in a eucalyptus plantation in Congo. *Forest, Ecology and Management*, 202:149-160, 2004.

FANG, C. et al. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 205:135-146, 1998.

FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA JÚNIOR, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 141:77-85, 2011.

LA SCALA JR., N. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32:1469-1473, 2000.

PANOSSO, A. R. et al. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. *Soil and Tillage Research*, 105:275-282, 2009.

PANOSSO, A. R. et al. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. *Engenharia Agrícola*, 28:227-236, 2008.

PARFITT, J. M. B et al. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:819-830, 2009.

SANTOS, M. L. et al. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. *Acta Scientiarum Agronomy*, 28:313-321, 2006.

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*, 25:699-707, 2001.

UNICA – União das Indústrias de Cana-de-açúcar. Relatório de acompanhamento de safra 2013/2014. Disponível em <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=63>. Acesso em 20/03/2014.

VIANA, E. T. et al. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:2105-2114, 2011.

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, 1980. p.319-344.

Tabela 1. Estatística descritiva da emissão de CO₂, macro e microporosidade em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar.

Estatística	Cana Queimada			Cana Crua		
	CO ₂	Macro	Micro	CO ₂	Macro	Micro
Média	1,55 b	0,19 b	0,34 a	3,01 a	0,31 a	0,33 a
DP	0,46	0,02	0,04	0,73	0,03	0,04
Assimetria	-0,18	0,02	-3,15	1,46	1,17	-1,47
Curtose	-0,51	-0,98	1,88	1,44	1,41	1,58
CV	29,65	12,67	17,86	24,43	15,87	14,47

CO₂ = Emissão de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Macro = macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Micro = microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente segundo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 2. Análise geoestatística da emissão de CO₂, macro e microporosidade em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar.

Estatística	Cana Queimada			Cana Crua		
	CO ₂	Macro	Micro	CO ₂	Macro	Micro
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
C ₀	0,03	1,00	0,08	0,28	0,01	0,01
C ₀ +C ₁	0,24	4,26	7,16	1,74	10,02	10,02
a (m)	11,50	19,80	32,00	23,10	21,20	18,30
C ₀ /C ₀ +C ₁	12	23	1,1	16	0,09	0,09
r ²	0,88	0,86	0,91	0,91	0,78	0,88
SQR	0,0011	0,49	3,32	0,09	0,32	1,97

CO₂ = Emissão de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Macro = macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Micro = microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; C₀/C₀+C₁ = relação efeito pepita/patamar; r² = coeficiente de determinação; SQR = soma do quadrado do resíduo; Exp. = exponencial; Esf. = esférico; Gaus. = gaussiano.

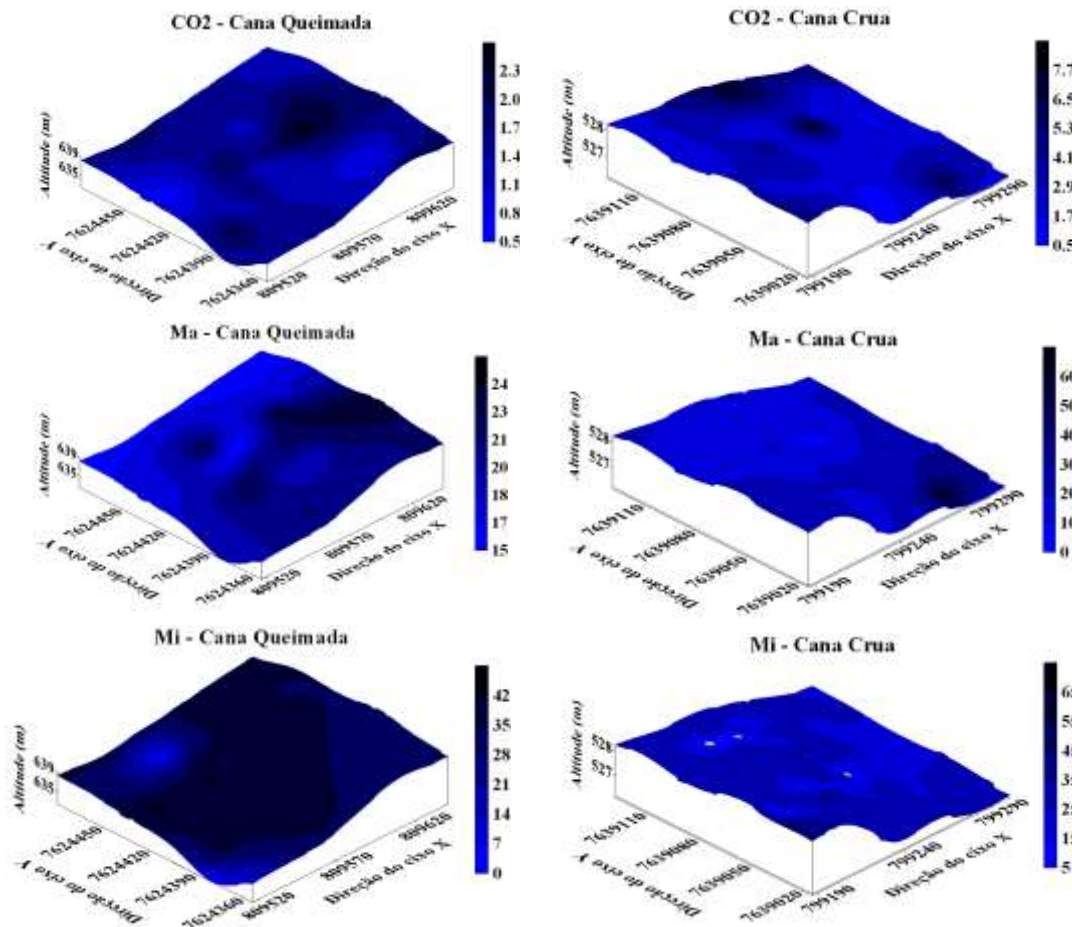


Figura 2. Mapas de distribuição espacial da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), macroporosidade (Ma - %) e microporosidade (Mi - %) em sistemas de manejo de cana-de-açúcar.