



Distribuição espacial da emissão de CO₂, temperatura e umidade em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café ⁽¹⁾.

Uilson Franciscon⁽²⁾; Milton Cesar Costa Campos⁽³⁾; Douglas Marcelo Pinheiro da Silva⁽⁴⁾; Diogo André Pinheiro da Silva⁽⁵⁾; Pérsio de Paula Neto⁽⁶⁾; Anderson Cristian Bergamin⁽⁷⁾

⁽¹⁾Trabalho executado com recursos da Fapeam; ⁽²⁾ Acadêmico em Engenharia Ambiental do IEAA/UFAM-AM, e-mail: uilsonfranciscon@gmail.com; ⁽³⁾Professor Adjunto III, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Humaitá-AM, e-mail: mcesarsolos@gmail.com; ⁽⁴⁾ Professor Auxiliar de Ensino I da Universidade Federal do Amazonas, Brasil; ⁽⁷⁾Professor Adjunto da Universidade Federal de Rondônia, Brasil.

RESUMO: A formação de CO₂ do solo é principalmente por meio de processos biológicos, através da decomposição da matéria orgânica, respiração de organismos do solo e do sistema radicular das plantas. O objetivo do trabalho é avaliar a distribuição espacial da emissão de CO₂, temperatura e umidade e suas relações. A área de estudo está situada no município de de apuí, sul do Amazonas, uma área de Terra Preta Arqueológica (TPA), sob cultivo de café na qual foi delimitada uma malha amostral nas dimensões de 42 x 100 m, onde foram feitas leituras da emissão de CO₂, juntamente com leituras da temperatura pelo sistema automatizado portátil de fluxo de CO₂ do solo LI-COR (LI-8100) e a umidade foi registrada utilizando-se um aparelho TDR. Para análise dos dados foram utilizadas a estatística descritiva e geoestatística. Todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, sendo que para emissão de CO₂ e umidade do solo, tiveram como melhor ajuste no modelo exponencial e para a temperatura do solo o melhor modelo de ajuste foi o esférico. As variáveis FCO₂ e U_{solo} apresentaram dependência espacial moderada, e a T_{solo} com forte dependência espacial. Nas regiões do mapa onde ocorrem os maiores valores de distribuição espacial para emissão de CO₂, não foram os maiores valores encontrados para a temperatura, denotando que nesse estudo a variável temperatura não teve relação direta com a emissão de CO₂.

Termos de indexação: solo antrópico, fluxo de CO₂, geoestatística

INTRODUÇÃO

A região amazônica se caracteriza pela presença de uma floresta úmida e densa com solos ácidos e pobres, produto do intenso intemperismo químico e biológico. Os níveis de ocupação desta extensa faixa de terra e da permanência de civilizações se deve “ao nível de cultura das sociedades, condicionado pelo potencial agrícola do ambiente que ocupam”

(Meggers, 1996). De acordo com Lehmann (2003), em muitas regiões as sociedades indígenas formaram extensos depósitos de resíduos, para muitos simplesmente rejeitos, que alteraram as propriedades do solo.

Os vestígios mais contundentes, com ampla distribuição, são as manchas de solos de cor negra ricos em matéria orgânica e com muitos fragmentos de artefatos cerâmicos, e por vezes com líticos, mais conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) ou mesmo Terra Preta Arqueológica (TPA), ou simplesmente Terra Preta (Kampf e Kern, 2005). Os atributos do solo nestes ambientes apresentam variações marcantes nas propriedades, físicas, químicas, biológicas e mineralógicas.

Quanto à formação de CO₂ do solo, este é produzido principalmente por meio de processos biológicos, através da decomposição da matéria orgânica, respiração de organismos do solo e do sistema radicular das plantas. As trocas gasosas entre o solo e a atmosfera são governadas pela difusão do CO₂ através dos poros no solo, que podem ser influenciadas pelas propriedades do solo ou pela cobertura vegetal presente no local (Ball & Smith, 1991). As variáveis climáticas têm relações diretas nos fluxos de CO₂ para a atmosfera. Desse modo, os principais fatores que afetam as emissões são a temperatura (do ar e do solo) e o teor de umidade do solo, adicionado as relações das condições climáticas e topográficas do local (Brito et al., 2010).

A variabilidade espacial dos atributos dos solos é resultado de processos pedogenéticos diversos e pode ser demonstrada tanto por levantamentos e análises dos solos, bem como nas diferenças encontradas nas produções das plantas (Silva et al., 2010). Como consequência do uso e manejo, esses atributos exibem variabilidade espacial e temporal em macro, meso e micro escalas (Panosso et al., 2008).

Ainda são escassos, trabalhos com avaliação da emissão de CO₂ de solos utilizando a ferramenta geoestatística, especialmente relacionando essa variabilidade com a temperatura, umidade, que são possíveis fatores



influenciadores dessas emissões, assim este estudo tem como objetivo identificar essas relações em uma área sob cultivo de café.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está situada no município de Apuí, sul do Estado do Amazonas, sob as coordenadas geográficas de 7° 30' 22" S e 63° 01'15" W. A zona climática da região, segundo a classificação de Köppen, pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, com precipitação média anual variando entre 2.250 e 2.750 mm, e com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As médias anuais de temperatura variam em torno de 25° C e 27° C, e umidade relativa do ar variam entre 85 e 90%.

Foi escolhida uma área de Terra Preta Arqueológica (TPA), sob cultivo de café na qual foi delimitada uma malha amostral nas dimensões de 42 x 100 m, com espaçamento regular entre os pontos de 10 m na direção do eixo Y e 6 m na direção do eixo X, totalizando 88 pontos. As leituras da emissão de CO₂, juntamente com leituras da temperatura e umidade foram realizadas no ano de 2013, no período chuvoso, nos quais foram efetuadas quatro coletas em dias consecutivos. A emissão de CO₂ do solo (FCO₂) foi registrada com um sistema automatizado portátil de fluxo de CO₂ do solo LI-COR (LI-8100).

A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm³ com área de contato circular de 83,7 cm². Essa câmara foi colocada sobre colares de PVC previamente inseridos no solo a uma profundidade de 3 cm. A utilização dos colares de PVC evita que ocorram distúrbios causados pela inserção da câmara diretamente no solo, como a quebra de sua estrutura porosa, por exemplo, causando um aumento de CO₂ emitido pelo solo. Foram instalados os colares no campo 24 horas antes das leituras, e acoplado a câmara de solo LI-8100 sobre os colares, não encostando a câmara no solo minimizando-se assim os distúrbios mecânicos sobre o mesmo.

A temperatura do solo (TS) foi monitorada concomitantemente às avaliações de emissão de CO₂ do solo utilizando-se um sensor de temperatura que é parte integrante do sistema LI-8100. Tal sensor consiste de uma haste de 20 cm que é inserida no interior do solo, o mais perpendicular possível em relação à superfície, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de CO₂.

A umidade do solo (US), em % volume, foi registrada utilizando-se um aparelho TDR (Time

Domain Reflectometry) - Campbell® Hydrosense™ Campbell Scientific - Austrália, constituído por uma sonda apresentando duas hastas de 12 cm e inseridas no interior do solo o mais perpendicular possível em relação à sua superfície, nos locais próximos aos colares de PVC, as medidas foram realizadas simultaneamente às avaliações da emissão de CO₂ e temperatura do solo em cada um dos pontos.

A análise exploratória dos dados realizada calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, assimetria, curtose, coeficiente de variação e teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), pelo software estatística.

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (Isaaks & Srivastava, 1989). Sob a teoria da hipótese intrínseca, pelo semivariograma experimental que é estimado pela **Equação 1**:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

sendo: $\gamma(h)$ - valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou a construção e exame dos semivariogramas, por meio do programa GS+. No caso de mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi escolhido com base no melhor coeficiente de determinação (r^2) e teste de validação cruzada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas para a taxa de emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo são apresentadas na **tabela 1**. A média de CO₂ foi de 3,99 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. As quantidades de CO₂ emitidas do solo são superiores comparadas aos valores encontrados em solos vegetados com floresta nativa (D' Andrea et al., 2010). Em estudos de Pinto Júnior et al (2009), encontraram valores de média mensal do fluxo de CO₂ do solo em floresta de transição cerrado e área de pastagem com valores de 2,88 \pm 1,51 a 8,45 \pm 2,92 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. O valor médio de temperatura do solo foi de 27,85 °, segundo La Scala Júnior (2009) apesar da temperatura do solo influenciar na emissão de CO₂, a umidade do solo tem papel determinante, pois representa fator limitante para a atividade microbiana.

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis fluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo em uma área de TPA sob cultivo de café.

Estatística	FCO ₂	Tsolo	Usolo
	$\mu\text{mol m}^{-2}$	C°	%



Média	3,99	27,85	22,02
Mediana	3,88	27,82	22,00
Mínimo	2,43	26,64	14,75
Máximo	6,33	28,81	29,50
Assimetria	0,85	-0,08	0,24
Curtose	0,26	0,25	0,43
Desvio Padrão	0,90	0,42	2,86
CV (%)	22,69	1,52	13,00
Valor de p	0,01	0,20*	0,20*

Fluxo de CO₂ (FCO₂), Temperatura do solo (Tsolo), Umidade do solo (Usolo), CV = Coeficiente de variação; Valor de p = Teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais à zero). Com base no critério de classificação do CV adotado por Warrick & Nielsen (1980), verifica-se que a emissão de CO₂ e umidade do solo apresentaram valores entre (12 < CV < 24%) considerado moderado e a temperatura do solo apresentou (CV < 12%) sendo classificado como baixo. O coeficiente de variação do fluxo de CO₂ de diferentes localizações dentro de um ecossistema é indicativo da sua variação espacial. Entretanto, apenas o C.V. não é suficiente para a comparação entre os fluxos de CO₂ de diferentes estudos, em parte devido à falta de padronização no esquema experimental, como o tamanho e a forma da área, o número de pontos amostrais e o seu arranjo espacial (Vieira et al., 1997).

Em relação ao teste de normalidade, verificou-se que as variáveis temperatura e umidade do solo apresentaram condição significativa, e a emissão de CO₂ apresentou efeito não significativo ao teste de Kolmogorov-Smirnov. Para Gonçalves et al. (2001), as variáveis do solo não precisam obrigatoriamente apresentar distribuição normal como pré-requisito para a análise geoestatística, o mais importante é que a distribuição não apresente caudas muito alongadas o que poderia inviabilizar a análise.

Os resultados da análise geoestatística apresentados na **tabela 2** onde mostram que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial. A escolha do melhor modelo ajustado ao semivariograma, baseou-se nas técnicas dos valores de r² e validação cruzada, emissão de CO₂ e umidade do solo, com melhor ajuste do modelo exponencial, para a temperatura do solo o melhor modelo de ajuste o esférico. De acordo com Souza et al. (2009), os modelos matemáticos exponencial e esférico são os que predominam nos trabalhos em ciência do solo. O modelo esférico e exponencial descreve variáveis com alta continuidade espacial ou menos erráticas em distâncias curtas, sendo

frequentemente adotado para a descrição desta variável (La Scala Jr. et al., 2012; Panosso et al., 2009).

Tabela 2. Modelos e parâmetros para as variáveis fluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo em uma área de TPA sob cultivo de café.

	FCO ₂	Tsolo	Usolo
Modelo	Exp.	Esf.	Exp.
Co	0,42	0,03	2,62
C₀ + C₁	0,84	0,18	8,99
a (m)	33,90	18,82	35,10
C₀ / C₀ + C₁	50,00	16,67	29,14
r²	0,84	0,85	0,95
VC	0,60	0,75	0,91

FCO₂ = fluxo de CO₂; Tsolo = temperatura do solo; Usolo = umidade do solo; Exp. = exponencial; Esf. = esférico; C₀: Efeito Pepita; C₀+C₁: Patamar; a (m): Alcance (metros); r²: Coeficiente de determinação; VC: Validação cruzada.

O valor de alcance (a) é um importante parâmetro no estudo do semivariograma, uma vez que representa a distância máxima que pontos da mesma variável ainda estão correlacionados espacialmente. Valores estimados a partir dos modelos de semivariogramas da emissão de CO₂ do solo para o alcance foram de 33,90 m. Schwendenmann et al. (2003) em estudos de fluxos de CO₂ em áreas de floresta encontraram resultados distintos para o alcance em função da variação sazonal no ano. Rochette et al. (1991) encontraram valor de alcance bem definido de 20 m para a respiração do solo em área com a cultura do milho. Dasselaar et al. (1998) encontraram valores de alcance de 55 e 75 m para a emissão de CO₂ em solos com cobertura vegetal.

O coeficiente de determinação de determinação r² para os ajustes dos modelos ao semivariograma foram acima de 0,80, próximos a 1, mostrando que os modelos foram os melhores para expressar a variabilidade das variáveis em estudo.

Para a análise da razão de dependência espacial (C₀ / C₀+C₁), expressa em percentual do efeito pepita em relação ao patamar tendo por objetivo a melhor compreensão da dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), para razão de dependência espacial (RD) < 25%; 25% < RD > 75%; e RD > 75%, para variabilidade forte, moderada e fraca, respectivamente. As variáveis FCO₂ e Usolo apresentaram dependência espacial moderada, e a Tsolo com forte dependência espacial. Em estudos sob solos desprovidos de vegetação Herbst et al. (2010), encontraram estruturas de dependência espacial variando de fraco a forte.



CONCLUSÕES

As análises geoestatísticas demonstraram dependência espacial para a emissão de CO₂, temperatura, umidade e atributos do solo.

Neste estudo pode se observar que as variáveis temperatura e umidade não tiveram relação direta com a emissão de CO₂.

REFERÊNCIAS

- BALL, B.C.; SMITH, K.A. Gas movement. In: Smith, K.; Mullins, C. (Ed.). Soil analysis: physical method. New York: Marcel Dekker, p. 511-549, 1991.
- BRITO, L.F.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, GENER, T.; LA SCALA JÚNIOR, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. *Bragantina Campinas*, v.69, p.19-27, 2010.
- 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 soils. *Soil Science Society America Journal, Madison*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- D' ANDREA, A.F.; SILVA, M.L.N.; FREITAS, D.A.F.; CURTI, N.; SILVA, C.A. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta native. *Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo*, v.30, n.62, p.85-92. 2010.
- DASSELAAAR, A.V.P.V.; CORRÉ, W.J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, Å. K.; coppicing. *Global Change Biology, Oxford*, v. 12, n. 1, p.110-121, 2006.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum*, v.23, n.5, p.1.149-57, 2001.
- HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J.A.; WEIHERMULLER, L.; VANDERBORGHT, J.; VERECKEN, H. Multivariate conditional stochastic simulation of soil heterotrophic respiration at plot scale. *Geoderma*, v.160, p.74-82, 2010.
- KAMPF, N.; KERN, D.C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: VIDAL-TORRADO, P. et al. Tópicos em Ciência do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 277-320, 2005.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; DE FIGUEREDO, E.B.; PANOSSO, A.R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Brazilian Journal Biology*, v.72, n.3, p.775-875, 2012.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; GONZÁLEZ, A.P.; MIRANDA, J.G.V. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in an agricultural field during fallow. *International Agrophysics*, v.23, p.353-358, 2009.
- LEHMANN, J. K., D.C.; GLASER, B. AND WOODS, W.I. (Ed.). *Amazonian Dark Earths: origin, properties and management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, cap. 75, p. 51, 2003
- MEGGERS, B.J. *Amazônia: man and culture in a counterfeit paradise*. Revised edition. ed. Washington: Smithsonian Institution Press, 1996.
- PANOSSO, A.R.; PEREIRA, GENER, T.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolo sob cultivo de cana de açúcar em dois sistemas de manejo. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.28, p.227-236, 2008.
- PANOSSO, A.R.; RIBEIRO, C.E.R.; ZANINI, J.R.; PAVANI, L.C.; PERREIRA, G.T.; JÚNIOR, N. L. S. Variabilidade espacial da emissão de CO₂, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. *Ciências Agrárias*, v.30, suplemento 1, p.1017-1034, 2009.
- PINTO JÚNIOR, O.B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A.C.; NOGUEIRA, J.S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amazonica*, v.39, p.813-822, 2009.
- ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Canadian Journal of Soil Science, Ottawa*, v. 71, n. 2, p. 189-196, 1991.
- SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J.J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, la selva, Costa Rica. *Biogeochemistry*, v.64, n.1 p.111-128, 2003.
- SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, A.F.; Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.01, p.1-8, 2010.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v.40, p.48-56. 2009.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. & TILLOTSON, P.M. The Scaling of ofsemivariograms and the kriging estimation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, 21:525-533, 1997.
- 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, p.385, 1980.