

18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

GEOESTATÍSTICA MULTIVARIADA DA EMISSÃO DE CO₂ EM ÁREA AGRÍCOLA

Vivian Aparecida Brancaglioni, vivian.brancaglioni@gmail.com¹

Maira Caroline Terçariol, maira_carolt@hotmail.com²

Rafael Montanari, montanari@agr.feis.unesp.br³

Newton La Scala Júnior, lascala@fcav.unesp.br⁴

Antônio Sérgio Ferraudo, ferraudo@fcav.unesp.br⁵

Gener Tadeu Pereira, genertp@fcav.unesp.br⁶

Alan Rodrigo Panosso, alanrp@mat.feis.unesp.br⁷

^{1, 2, 7} Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Ilha Solteira – Departamento de Matemática - DMAT, Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000 Ilha Solteira, SP.

³ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Ilha Solteira – Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos - DEFERS, Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000 Ilha Solteira, SP.

^{4, 5, 6} Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Jaboticabal – Departamento de Ciências Exatas - DCE, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n 14884-900 - Jaboticabal, SP.

Resumo: A caracterização dos padrões espaciais da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) em áreas agrícolas é uma tarefa importante, uma vez que esse gás é o principal responsável pelo efeito estufa adicional. O processo de perda de carbono do solo para a atmosfera é resultante da atividade microbiana (oxidação química) e respiração das raízes, considerada, atrás apenas dos oceanos, a segunda maior fonte de CO₂ para atmosfera. O objetivo do trabalho foi caracterizar os padrões espaço-temporais de FCO₂, por meio de técnicas geoestatísticas e multivariadas, e suas relações com os atributos físico-químicos do solo. Foi instalado um gradeado amostral em área de rotação de culturas (milho/feijão) no sistema de plantio direto localizadas nas proximidades do município de Ilha Solteira, SP, com menores distâncias de separação de 0,5 m, totalizando 133 pontos. Para a coleta dos dados foram utilizados os sistemas LI-COR (LI-8100) e TDR. Inicialmente a variabilidade dos atributos foi analisada por meio das técnicas de estatística descritiva, correlação linear simples e regressão linear múltipla, apresentando valores médios de 2,14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 27,38 °C e 15,36 % volume, para o FCO₂, a temperatura e a umidade, respectivamente. Dentre as variáveis estudadas a que apresentou menor variabilidade foi a temperatura, enquanto que a FCO₂ apresentou grande variabilidade. A análise geoestatística foi realizada a partir do cálculo da semivariância em função da distância de separação. A maior parte dos modelos de variabilidade espacial foram exponenciais e esféricos. A estrutura multivariada do conjunto original dos dados foi avaliada pela análise de componentes principais. Resultados preliminares indicam que os três primeiros componentes principais (CP1, CP2 e CP3) captaram 76,2% da variabilidade dos dados originais, sendo os atributos físicos macroporosidade e porosidade total aquele com maior importância em CP1. FCO₂ apresentou maior importância somente em CP3.

Palavras-chave: Respiração do Solo, Dependência Espacial, Componentes Principais

1. INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera terrestre foi a principal causa do aquecimento global, representando cerca de 60% das emissões totais de gases do efeito estufa. No ano de 2005, por exemplo, a agricultura foi responsável por uma emissão global de 5,1 a 6,1 Gt CO₂-eq, sendo a segunda maior fonte antropogênica de emissões de gases de efeito estufa (GEE), representando 10-12% das emissões globais (IPCC, 2007).

O processo de perda de carbono do solo para a atmosfera é resultante da atividade microbiana (oxidação química) e respiração das raízes, sendo considerada a segunda maior fonte de CO₂ para atmosfera, atrás apenas dos oceanos. Existe

grande incerteza na quantificação desta variável, assim, é de extrema importância a caracterização dos padrões espaciais da emissão de CO_2 do solo (FCO₂) em áreas agrícolas (LA SCALA et al., 2000; PANOSSO et al., 2012).

A maioria dos atributos do solo apresenta dependência espacial, a caracterização da variabilidade espacial de Fm tem sido realizada em áreas agrícolas, ou mesmo em vegetação natural (KOSUGI et al., 2007; ALLAIRE et al., 2012). A análise geoestatística fornece uma grande variedade de técnicas estatísticas para incorporar as coordenadas espaciais das observações na análise dos dados com o objetivo de caracterizar a dependência espacial desses atributos.

Alternativamente, os padrões espaciais presentes em um conjunto de dados podem ser caracterizados utilizando-se técnicas de estatística multivariadas (HERBST et al., 2010), como por exemplo, a análise de componentes principais (ACP), com a vantagem de condensar a informação de inúmeras variáveis em novas variáveis latentes e ortogonais, denominadas componentes principais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – Setor de Produção Vegetal, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), localizada no município de Selvíria (MS), coordenadas geográficas 20° 18' 05" de latitude Sul e 52° 40' 28" de longitude Oeste, com elevação de 360 m acima do nível do mar. A precipitação média anual é de 1.300 mm, com temperatura média de 23,7 °C. O tipo climático é Aw, segundo Köppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico típico argiloso, com declive homogêneo de 0,025 m m⁻¹ (EMBRAPA, 2006). A vegetação natural é do tipo Cerrado, caracterizada por apresentar árvores de porte médio (3-5 m) e gramíneas na superfície. A área tem sido utilizada com a sucessão das culturas do milho (verão) e feijão (inverno) há pelo menos 25 anos. Nos primeiros 15 anos, foi realizado o preparo convencional para ambas as culturas, ao passo que, nos 10 últimos foi implantado o sistema de plantio direto. A cultura agrícola durante a condução do experimento foi a soja (*Glycine max* - L. Merrill), semeada no dia 07 de Novembro de 2013.

As avaliações de emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo foram realizadas após as operações de semeadura da cultura, e durante os estágios iniciais de crescimento da soja, quando, teoricamente, a emissão de CO_2 do solo encontra-se mais relacionada com o decaimento da matéria orgânica do mesmo. Devido à possível não uniformidade do espaçamento entre as linhas de plantio da cultura, a proposição do gradeado inicial foi de 50 × 50 m contendo 133 pontos amostrais, simétricos e com distâncias mínimas de separação entre pontos de 0,5 m (Figura 1).

A emissão de CO_2 do solo (FCO₂) foi registrada por meio de dois sistemas LI-COR (LI-8100) (Figura 2). Em seu modo de medição, o sistema monitorará as mudanças na concentração de CO_2 dentro da câmara (Figura 2c) por meio de espectroscopia na região do infravermelho. A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm³ com área de contato circular de 83,7 cm². Essa câmara será colocada sobre colares de PVC previamente inseridos no solo e cada um dos pontos do gradeado na profundidade de 3 cm. O fluxo de CO_2 foi computado em cada ponto por um ajuste da concentração de CO_2 do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após o fechamento da mesma. A temperatura do solo (Ts) foi monitorada concomitantemente às avaliações de respiração do solo utilizando-se um sensor de temperatura que é parte integrante do sistema ao LI-8100 (Figura 2b). Tal sensor consiste de uma haste de 20 cm que será inserida no interior do solo a 5 cm do local onde foram previamente instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de CO_2 . A umidade do solo (Us) foi determinada por meio de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry - Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália - Figura 2d). O aparelho de TDR é constituído por uma sonda, apresentando duas hastes de 12 cm, que devem ser inseridas no interior do solo a aproximadamente 5 cm dos colares de PVC. As avaliações de FCO₂, Ts e Us foram realizadas nos dias Julianos 323; 327; 330; 332; 337; 339 e 344 que contemplam o período do dia 19 de Novembro a 10 de Dezembro de 2013, durante o período das manhãs.

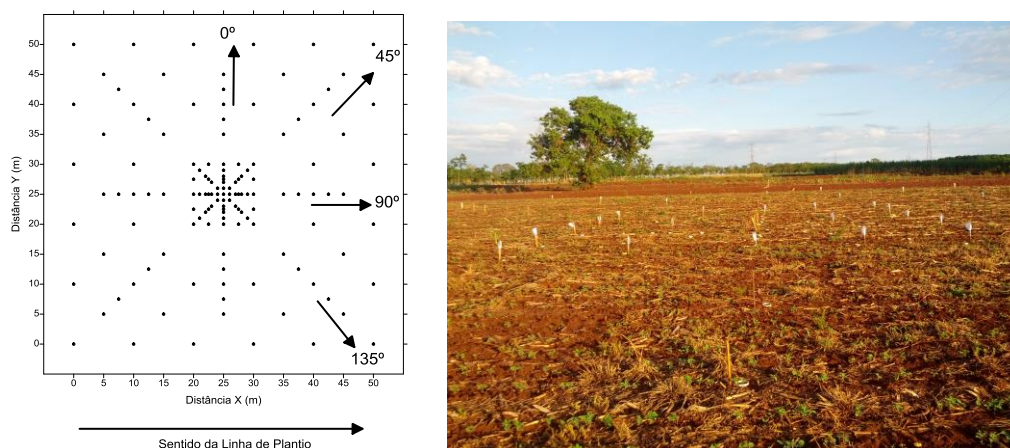


Figura 1. Gradeado amostral contendo 133 pontos, para determinação da emissão de CO_2 e demais atributos do solo indicando os pontos amostrais.



Figura 2. Sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (a), sensor de temperatura do solo (b) e câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (c), TDR - Hydrosense system, sistema portátil utilizado para avaliação da umidade do solo (d).

Após a operação de colheita da soja, as amostras em cada ponto, serão coletadas na profundidade de 0 a 10 cm, secas ao ar, antes de serem submetidas a qualquer tipo de análise. Após a secagem serão destorroadas e passarão pela peneira de malha 2 mm. Serão realizadas as seguintes análises de rotina: determinação do teor de matéria orgânica, de P disponível, K, Ca, Mg e H + Al. Serão calculadas a soma de bases e a capacidade de troca de cátions. Cálcio, magnésio e potássio trocáveis e fósforo disponível serão extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ, 2001). A densidade do solo será determinada em amostras indeformadas coletadas com amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 5,0 cm de diâmetro interno e 4,0 cm de altura (EMBRAPA, 1997). O volume total de poros foi calculado com base no valor de densidade. A distribuição de poros por tamanho, macroporosidade e microporosidade foi determinada utilizando-se funil de placa porosa sob a tensão de 60 cm de altura de coluna d'água em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra nesta condição corresponde aos microporos, e os macroporos foram calculados por diferença (EMBRAPA, 1997).

Os resultados foram apresentados em termos da estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, erro-padrão da média, mínimo, máximo e coeficientes de variação, assimetria e curtose). Nesta etapa as relações entre a emissão de CO₂ do solo e a temperatura e umidade do solo foram caracterizadas pelas análises de correlação linear simples e múltipla. A análise de regressão múltipla foi realizada por meio do método "stepwise" de seleção de variáveis. Neste método, os níveis de significância do teste F utilizados para o julgamento da entrada e/ou saída de uma variável, em um modelo, foram iguais a 5% (p=0,05).

A análise de componentes principais (ACP) condensou a informação relevante em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais denominados componentes principais (autovetores), gerados por combinações lineares das variáveis originais a partir dos autovalores da matriz de covariância. ACP condensa as variáveis medidas em novas variáveis não medidas, na tentativa de avaliar o poder discriminatório das variáveis originais. Foram considerados os componentes principais cujos autovalores forem superiores à unidade (KAISER, 1958). Os coeficientes das funções lineares, que definirão os CPs, foram utilizados na interpretação de seu significado, usando o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável.

A dependência espacial de cada variável foi determinada pela análise do variograma experimental (WEBSTER; OLIVER, 1990). A estimativa da semivariância, em uma dada distância de separação h , foi determinada pela fórmula:

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

Em que $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h , $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no ponto x_i e $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z no ponto $x_i + h$.

Os variogramas experimentais foram ajustados pelos seguintes modelos teóricos: (a) modelo exponencial $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1[1 - \exp\{-3(h/a)\}]$, $h > 0$; (b) modelo esférico: $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1[3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3]$, $0 \leq h \leq a$ e $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1$, $h > a$. e (c) modelo gaussiano $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1[1 - \exp\{-3(h/a)^2\}]$, $0 < h < d$, sendo d a máxima distância na qual o variograma foi definido.

Os parâmetros dos modelos ajustados aos variogramas experimentais foram utilizados na estimativa dos atributos estudados em locais não amostrados por meio da técnica de krigagem ordinária. Todas as análises foram realizadas por meio do software R, de domínio público (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), GS+ versão 9 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 1998) e Surfer versão 9 (Golden Software Inc, Golden, CO, EUA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva da emissão de CO₂ do solo (FCO₂), temperatura e umidade, observados nos 133 pontos em um período de sete dias. A média para FCO₂ variou de 1,34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 4,07 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, nos dias julianos 332 e 323 respectivamente, sendo o valor mínimo obtido em dia que a umidade do solo marcava em torno de 15 % volume, já o valor máximo se deu quando a temperatura média apontava 27,66 °C. Para a temperatura foram registradas médias de 25,68 °C a 29,08 °C para os dias 327 e 339. Não foi possível analisar a umidade para os dois primeiros dias do experimento devido problemas quanto à consistência das leituras do aparelho TDR, assim para os dias avaliados a média variou entre 11,53 % volume a 18,95 % volume, nos dias julianos 330 e 339 respectivamente. O CV (coeficiente de variação) para FCO₂ amostrado no experimento variou de 42,68% a 64,05%, valores esses que se enquadram com aqueles apresentados no cenário de colheita com a queima da palha da cana por A.R. Panosso et al. (2009b) e que podem ser considerados alto de acordo com a classificação de WARRICK e NIELSEN (1980), já os CV encontrados para a temperatura (1,39%-3,79%) foram classificados como baixos; para a umidade apresentou valores moderados, exceto para os dias 332 e 339 onde foram classificados como baixos, variando de 11,46% a 15,72%.

Tabela 1. Estatística descritiva da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo para os dias estudados do ano de 2013.

Dia Juliano	Média	Med	EP	Min	Max	CV	Q1	Q3	Assim	Curt
Emissão de CO ₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)										
323	4,07	3,79	0,19	-0,11	14,03	52,85	2,70	4,87	1,55	0,03
327	2,27	1,98	0,13	0,12	9,38	64,05	1,40	2,61	2,19	0,05
330	1,97	1,75	0,09	-0,01	5,25	53,73	1,27	2,44	1,04	0,01
332	1,34	1,23	0,05	-0,01	3,11	43,33	0,97	1,67	0,75	0,00
337	1,88	1,68	0,08	0,03	7,00	48,97	1,31	2,19	1,98	0,05
339	1,35	1,24	0,05	-0,10	3,73	44,15	0,96	1,66	0,88	0,02
344	1,94	2,12	0,08	-1,25	5,06	42,68	1,51	2,64	0,43	0,01
Temperatura do solo (°C)										
323	27,66	27,63	0,06	24,23	29,21	2,62	27,14	28,20	-0,61	0,02
327	25,68	25,68	0,03	24,82	26,54	1,45	25,39	25,97	0,04	0,00
330	26,39	26,38	0,05	24,91	27,71	2,18	25,99	26,79	-0,13	0,00
332	28,62	28,63	0,06	27,10	30,00	2,55	28,00	29,20	0,07	-0,01
337	27,28	27,15	0,09	25,49	29,70	3,79	26,46	27,85	0,49	-0,01
339	29,08	29,14	0,05	28,02	30,00	1,82	28,59	29,50	-0,03	-0,02
344	28,07	28,11	0,03	27,20	28,99	1,39	27,80	28,35	-0,14	-0,01
Umidade do solo (% volume)										
323	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
327	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
330	18,95	19,00	0,23	13,67	28,00	14,00	17,00	20,33	0,38	0,00
332	15,05	15,00	0,15	11,00	24,50	11,71	13,80	15,88	1,35	0,04
337	12,74	12,67	0,13	8,67	17,00	12,16	11,67	13,67	0,48	0,00
339	11,53	11,50	0,11	8,00	15,00	11,46	10,54	12,25	0,14	0,00
344	18,25	18,67	0,25	12,33	25,33	15,72	16,00	20,00	0,17	0,00

Med Mediana; *EP* Erro padrão da média; *Min* Mínimo; *Max* Máximo; *CV* Coeficiente de Variação (%); *Q1* primeiro quartil; *Q3* terceiro quartil; *Assim* Coeficiente de Assimetria; *Curt* Coeficiente de Curtose.

Dentre as variáveis estudadas a que apresentou menor variabilidade foi a temperatura, enquanto que a FCO₂ apresentou grande variabilidade. A maior parte dos modelos de variabilidade espacial de FCO₂, temperatura e umidade foram descritos por modelos exponenciais e esféricos (TEDESCHI et al., 2006; OHASHI e GYOKUSEN, 2007), exceto para o dia 327 em que o modelo gaussiano melhor se ajustou a variabilidade espacial de FCO₂ e para o dia 339 em que a temperatura não apresentou estrutura de variabilidade espacial (efeito pepita puro) e a variabilidade da umidade melhor se ajustou ao modelo gaussiano.

No estudo dos semivariogramas experimentais o alcance (a) é um parâmetro importante, pois tem o papel de representar a distância na qual ocorre a estabilização do semivariograma e definir o limite da dependência espacial (autocorrelação). O alcance para FCO₂ apresentou maior valor (de 27m) para o dia 344 e menor valor (de 10,9m) para o dia 339. PANOSSO et al. (2009a) encontraram valores de alcance para a emissão de CO₂ do solo entre 9,0 e 23,8 m para diferentes dias em solo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento, enquanto TEIXEIRA et al. (2013) encontraram alcances variando de 26,16 a 46,32 m em um curto período de estudos em áreas de cana-de-açúcar.

A razão entre o efeito pepita e o patamar ($C_0/(C_0+C_I)$), expressa em porcentagem, foi utilizada para classificar a dependência espacial das variáveis estudadas, de acordo com o proposto por CAMBARDELLA (1994): dependência espacial forte ($C_0/(C_0+C_I) \leq 0,25$), moderada ($0,25 < C_0/(C_0+C_I) < 0,75$) ou fraca ($C_0/(C_0+C_I) \geq 0,75$). As emissões de CO₂ registradas podem ser classificadas como moderados para todos os dias do experimento. Estudos conduzidos por TEIXEIRA et al. (2013) também apontaram padrões de dependência espacial moderados. Os valores encontrados para a temperatura podem ser classificados como forte para o dia 330 e moderada para os demais dias, observando os valores

obtidos para a umidade podemos dizer que apresentam dependência espacial forte para o dia 332 e moderada para todos os dias restantes.

Tabela 2. Modelos e estimativas dos parâmetros ajustados aos variogramas experimentais para a emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo para todos os dias avaliados no ano de 2013.

Dia Juliano	Modelo	C_0	C_0+C_I	a (m)	SQR	r^2	GDE
Emissão de CO ₂ do solo							
323	Esf	1,50	2,90	8,41	0,43	0,81	0,52
327	Gau	0,80	1,79	12,63	0,37	0,81	0,45
330	Exp	0,24	0,62	11,01	0,02	0,78	0,39
332	Exp	0,14	0,29	23,97	1,98E-03	0,89	0,48
337	Esf	0,29	0,61	21,31	5,40E-03	0,93	0,48
339	Esf	0,14	0,31	10,90	1,34E-03	0,95	0,45
344	Exp	0,47	0,82	27,00	0,02	0,79	0,57
Temperatura do solo							
323	Exp	0,12	0,45	6,93	7,64E-03	0,85	0,27
327	Exp	0,06	0,14	9,57	1,12E-03	0,60	0,43
330	Exp	0,00	0,39	4,71	0,03	0,81	0,00
332	Esf	0,28	0,60	29,95	0,01	0,88	0,47
337	Esf	0,35	1,27	28,80	0,19	0,80	0,28
339	EPP	0,28	0,28	---	---	---	1,00
344	Esf	0,06	0,14	13,95	5,17E-04	0,90	0,43
Umidade do solo							
323	---	---	---	---	---	---	---
327	---	---	---	---	---	---	---
330	Exp	3,29	6,59	31,86	0,56	0,86	0,50
332	Esf	0,65	2,76	2,19	0,33	0,86	0,24
337	Esf	1,13	2,52	53,20	0,23	0,91	0,45
339	Gau	1,13	1,59	9,02	0,03	0,83	0,71
344	Exp	3,77	7,29	4,23	2,83	0,56	0,52

GDE grau de dependência espacial = $C_0/(C_0+C_I)$, forte para valores menores que 0,25; moderado para valores entre 0,25 e 0,75; fraco para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994); *SQR* soma de quadrados do resíduo; *Exp* exponencial; *Esf* esférico; *EPP* = efeito pepita puro; *Gau* Gaussiano.

A análise de correlação linear simples entre a emissão de CO₂ do solo e os atributos avaliados demonstrou que FCO₂ foi positivamente correlacionada ($p < 0,05$) com os atributos PLA (0,17), P (0,23), MO (0,26), K (0,32), Ca (0,26), Mg (0,26), SB (0,29), CTC (0,33) e V (0,21). Por outro lado FCO₂ apresentou um coeficiente de correlação negativo e significativo ($p < 0,05$) somente com Al (-0,17). A análise de regressão múltipla pelo método de "stepwise" selecionou um modelo composto pelas variáveis CTC e K que explicaram 20% da variabilidade da emissão de CO₂ do solo ($R^2 = 0,20$).

Os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) apresentaram autovalores maiores que a unidade, e captaram 64,53% da variabilidade total dos dados originais (Figura 3a). CP1 representou um contraste dos atributos físicos PLA e MA, (responsáveis pela discriminação das amostras classificadas como grupo 2) contra Us e Ds (amostras do grupo 1). CP2, por sua vez, reteve CTC, MO, P e Fm (amostras do grupo 3). Maior continuidade foi observada nos padrões espaciais de CP2, quando comparada à CP1, indicando que os pontos localizados na região mais baixa da área de estudo apresentaram maiores valores de MO, CTC e P.

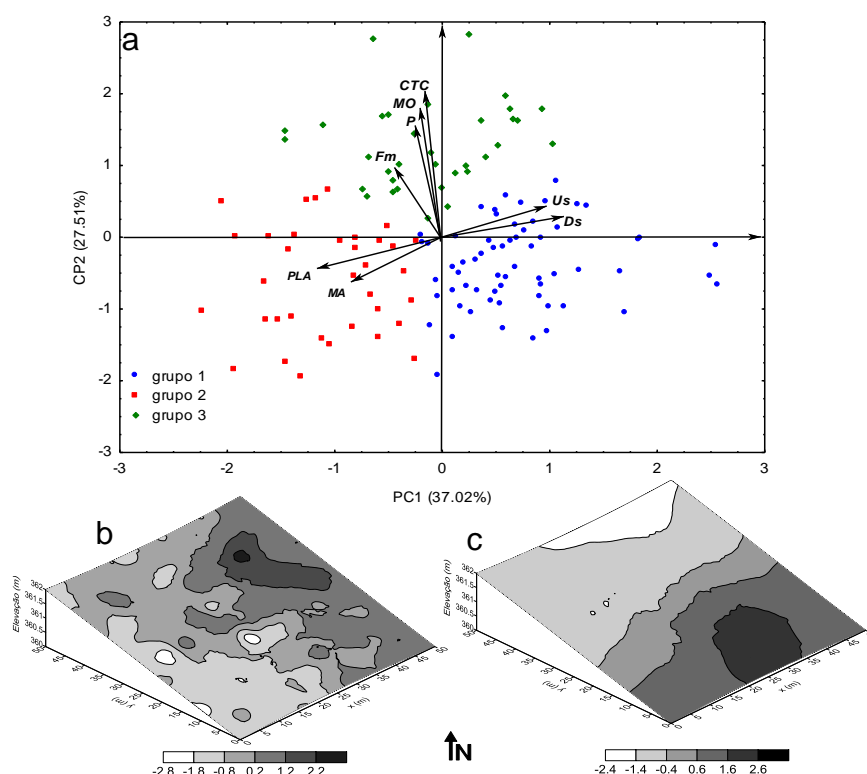


Figura 3. a) Representação bidimensional de CP1 e CP2 e resultados da análise de agrupamento não-hierárquico (grupos); b) padrões espaciais de CP1; c) padrões espaciais de CP2.

4. CONCLUSÕES

A emissão de CO₂ do solo apresentou relações diretas com as propriedades químicas do solo apenas. Os padrões de variabilidade espacial dos scores dos componentes principais indicam possível variabilidade devida à declividade do terreno (CP1) e à ação antrópica (CP2). A emissão de CO₂ do solo apresentou maior poder discriminatório somente no componente principal 3.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processo No. 2013/18726-8) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Allaire, S. E.; Lange, S. F.; Lafond, J. A.; Pelletier, B.; Cambouris, A. N.; Dutilleul, P. 2012. Multiscale spatial variability of CO₂ emissions and correlations with physico-chemical soil properties. *Geoderma*, v. 170, n., p. 251-260.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511.
- Embrapa. 1997. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPS, 212 p.
- Embrapa. 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 412 p.
- Gamma Design Software. 1998. GS+: geostatistics for the environmental sciences. Version 3.07 ed. Michigan: Gamma Design Software, p.
- Herbst, M.; Prolingheer, N.; Graf, A.; Huisman, J. A.; Weihermuller, L.; Vanderborght, J.; Vereecken, H. 2010. Multivariate conditional stochastic simulation of soil heterotrophic respiration at plot scale. *Geoderma*, v. 160, n. 1, p. 74-82.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers. Geneva, Suíça, p.
- Kaiser, H. F. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor-analysis. *Psychometrika*, v. 23, n. 3, p. 187-200.
- Kosugi, Y., Mitani, T., Ltoh, M., Noguchi, S., Tani, M., Matsuo, N., Takanashi, S., Ohkubo, S., Nik, A. R., 2007. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agric. Forest Meteorol.* 147, 35-47.

- La Scala, N.; Marques, J.; Pereira, G. T.; Cora, J. E. 2000. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 32, n. 10, p. 1459-1462.
- Ohashi, M., Gyokusen, K., 2007. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1130-1138.
- Panosso, A. R.; Perillo, L. I.; Ferraudo, A. S.; Pereira, G. T.; Miranda, J. G. V.; La Scala Jr, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production area. *Soil & Tillage Research*, v. 124, n., p. 8-16, 2012.
- Panosso, A. R.; Ribeiro, C. E. R.; Zanini, J. R.; Pavani, L. C.; Pereira, G. T.; La Scala, N. 2009a. Spatial variability of CO₂ emission, temperature and moisture of a bare oxisol submitted to different wetting levels. *Semina-Ciencias Agrarias*, v. 30, n., p. 1017-1033.
- Panosso, A. R.; Marques, J.; Pereira, G. T.; La Scala, N. 2009b. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. *Soil & Tillage Research* v. 105, p. 275-282
- R Development Core Team. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Tedeschi, V.; Rey, A.; Manca, G.; Valentini, R.; Jarvis, P. L.; Borghetti, M., 2006. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different development stages after coppicing. *Global Change Biol.* v. 12, p. 110-121.
- Teixeira, D. B.; Bicalho, E. S.; Cerri, C. E. P.; Panosso, A. R.; Pereira, G. T.; La Scala Jr, N. 2013. Quantification of uncertainties associated with space-time estimates of short-term soil CO₂ emissions in a sugar cane area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 167, n., p. 33-37.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R., 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). *Applications of Soil Physics*. Academic Press, New York.
- Webster, R.; Oliver, M. A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. New York: Oxford University Press, 328 p.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MULTIVARIATE GEOSTATISTIC OF SOIL CO₂ EMISSION IN AGRICULTURAL AREAS

Vivian Aparecida Brancaglioni, vivian.brancaglioni@gmail.com¹

Maira Caroline Terçariol, maira_carolt@hotmail.com²

Rafael Montanari, montanari@agr.feis.unesp.br³

Newton La Scala Júnior, lascala@fcav.unesp.br⁴

Antônio Sérgio Ferraudo, ferraudo@fcav.unesp.br⁵

Gener Tadeu Pereira, genertp@fcav.unesp.br⁶

Alan Rodrigo Panosso, alanrp@mat.feis.unesp.br⁷

^{1, 2, 7} Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Ilha Solteira – Departamento de Matemática - DMAT, Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000 Ilha Solteira, SP.

³ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Ilha Solteira – Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos - DEFERS, Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000 Ilha Solteira, SP.

^{4, 5, 6} Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Jaboticabal – Departamento de Ciências Exatas - DCE, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n 14884-900 - Jaboticabal, SP.

Abstract. *The characterization of the spatial patterns of soil CO₂ emission (FCO₂) in agricultural areas is an important task, since that is the main gas responsible for the greenhouse effect. The process of loss of soil carbon to the atmosphere is the result of microbial activity (chemical oxidation) and root respiration, considered, behind only the oceans, the second largest source of CO₂ to the atmosphere. The aim of this study was to characterize spatio-temporal pattern of CO₂, by means of techniques geostatistics and multivariate techniques, and their relationships with the physical and chemical soil attributes. A sampling grating was installed in the area of crop rotation (corn / bean) in no-tillage system located near the municipality of Ilha Solteira, SP, with smaller separation distances of 0.5 m, totaling 133 points. For data collection, were used the LI-COR (LI-8100) system and TDR. Initially the variability of attributes was analyzed by the techniques of descriptive statistics, simple linear correlation and multiple linear regression, presenting mean values of 2,14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 27,38 °C and 15.36 volume%, for FCO₂, temperature and humidity, respectively. Among the studied variables the one that showed less variability was the temperature, while the FCO₂ showed great variability. The geostatistical analysis was performed from the calculating the semivariance depending on the distance of separation. The most part of models of spatial variability were exponential and spherical. The multivariate structure the original set of data was evaluated by principal component analysis. Preliminary results indicate that the first three principal components (CP1, CP2 and CP3) captured 76.2% of the variability of the original data, being the physical attributes macroporosity and total porosity that the most important in CP1. FCO₂ showed greater importance only in CP3.*

Keywords: Soil respiration, spatial dependence, principal components