

Análise espacial de atributos do solo e correlações com fluxos de gases em diferentes sistemas de produção agrícola

Sandra Furlan Nogueira ¹
Célia Regina Grego ¹
Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues ¹
Flávia Maria Andrade Gimenes ²
André Luiz dos Santos Furtado ¹
Sandro Roberto Brancalião ³
João José Assumpção de Abreu Demarchi ²

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite
Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão, 13070-115 Campinas, SP.
{sandra, crgrego, crisagr, andre}@cnpm.embrapa.br

² Instituto de Zootecnia - IZ
Rua Heitor Penteado, nº 56, Centro, 13460-000 Nova Odessa, SP.
{fmeandrade, demarchi}@iz.sp.gov.br

³ Instituto Agrônômico de Campinas - IAC
Caixa Postal 28 - CEP 13012-970 Campinas, SP.
sandro@iac.sp.gov.br

Abstract. Different tillages in agricultural systems influence the chemical and physical properties of the soil and consequently the biogeochemical cycles, changing the flow of greenhouse gases. The objective of this study was to correlate spatially the physical and chemical properties of the soil with GHG emissions in three production systems with different levels of conservation tillage. Areas with pasture in degradation, sugar cane system and soybean production in zero tillage were studied. All areas presented the same type of soil - Oxisol. The physical properties evaluated were: particle size and bulk density. The chemical parameters measured were base saturation (V%), cation exchange capacity (CEC) and organic matter (OM). The gas fluxes measured were CO₂ and N₂O. Considering only situations that occurred spatial dependency of soil properties and correlation of gas fluxes was observed that: in the pasture occurred higher CO₂ fluxes in areas with higher content of organic matter, in cane sugar system the N₂O fluxes were higher at sites with lower content of clay and no correlation was found in soybean area. Agricultural systems with lower management interference have a great number of attributes with spatial dependence and significant correlation with gas emissions rates.

Palavras chave: geostatistics, correlation analysis, soil properties, soil gas fluxes, geoestatística, análise de correlação, atributos do solo, fluxo de gases do solo.

1. Introdução

No Brasil, o setor agropecuário brasileiro vem crescendo significativamente nas últimas décadas. Não apenas é observado o aumento de áreas cultivadas como também o incremento tecnológico em alguns sistemas produtivos. Ou seja, o setor busca melhorar as técnicas de manejo através da fertilização mineral, do uso de colhedoras, plantio direto, entre outras. Muitas dessas intervenções são conhecidas atualmente como técnicas de manejo conservacionistas, direcionando o setor agrícola para o aumento na produtividade.

Diferentes níveis de manejo agrícola interferem nas propriedades químicas e físicas do solo e conseqüentemente nos ciclos biogeoquímicos, alterando o fluxo de gases de efeito estufa (GEE), tais como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Sabe-se que o aumento da emissão desses gases para a atmosfera encontra-se em grande parte ligado à queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2006), contudo, maior atenção passou a ser dada às emissões geradas pelas mudanças do uso do solo e pelas atividades agrícolas (Galdos e al, 2009; Denman et al., 2007).

A partir do solo, os gases de efeito estufa são principalmente emitidos através dos processos microbiológicos. Por sua vez, as variações de seus fluxos são reguladas pelas características físicas e químicas do solo que controlam as atividades microbianas e a difusão dos gases no solo (Sparling, 1997).

As características do solo são predominantemente dependentes espacialmente, uma vez que se diferenciam conforme a localização na paisagem, e foram e ainda são muito estudadas por meio da análise geoestatística (Vieira e Dechen, 2010; Grego et al., 2011; Vasquez et al., 2012).

O entendimento dos diferentes níveis de manejos em sistemas de produção agropecuária, assim como o comportamento espacial das variáveis químicas e físicas do solo em cada sistema e subseqüentes alterações nos fluxos de gases de efeito estufa, representa uma importante etapa nas investigações sobre a sustentabilidade dos agroecossistemas. A hipótese deste estudo é que sistemas agrícolas com um maior número de atributos do solo com dependência espacial apresentam correlação espacial com o fluxo de gases do solo.

O objetivo deste trabalho foi identificar a dependência espacial de atributos físicos e químicos do solo e sua correlação espacial entre variáveis e a emissão de GEE em três sistemas agrícolas com diferentes níveis de manejo: pastagem em degradação, cana-de-açúcar com queima e produção de soja em plantio direto.

2. Material e Métodos

2.1 Áreas de estudo

Foram avaliados três sistemas de produção descritos a seguir: (1) Pastagem (*Brachiaria brizantha* Hochst. ex A. Rich): área da Fazenda do Instituto de Zootecnia de Nova Odessa, SP. O solo do local é um Latossolo vermelho amarelo. A pastagem tem sido utilizada sem controle de taxa de lotação (área de escape), não recebendo fertilização mineral; (2) Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.): área da Fazenda Aparecida, localizada em Mogi Mirim, SP, em um Latossolo vermelho escuro. Esta área tem sido manejada sob sistema de plantio direto com o cultivo de cana-de-açúcar há 12 anos e (3) Soja (*Gycine max* L.Merr): área da Fazenda Santa Elisa, pertencente ao Instituto Agrônômico de Campinas, SP, em um Latossolo vermelho escuro, cultivado em plantio direto com culturas anuais de grãos no verão e inverno.

Segundo a EMBRAPA (2006), os Latossolos caracterizam-se como solos bastante intemperizados e homogêneos no seu perfil, de baixa fertilidade natural, representada pelos baixos valores de saturação por bases e baixos teores de fósforo.

2.2 Propriedades químicas e físicas do solo

Em cada sistema, o solo foi coletado em rede de 50 pontos georreferenciados em uma área de cerca de 3 hectares. As coletas nas áreas de pastagem, cana-de-açúcar e soja foram realizadas nos dias 22 de julho, 23 e 24 de setembro de 2011, respectivamente (Figura 1).

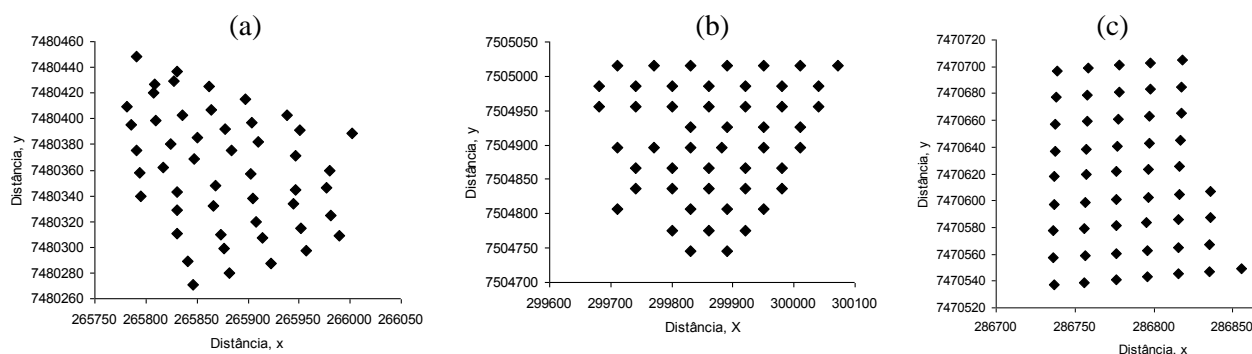


Figura 1. Rede de amostragem de solo com 50 pontos georreferenciados (coordenadas em UTM) nas áreas de estudo com pastagem (a), cana-de-açúcar (b) e soja (c).

Para a avaliação de atributos físicos do solo foram coletadas amostras para a granulometria, determinando-se os teores de areia, silte e argila na profundidade de 0-0,20 m. Para densidade utilizou-se amostras indeformadas, coletadas com anéis volumétricos conforme metodologia descrita por Camargo et al. (1986) na profundidade de 0-0,10 m.

Para a avaliação dos atributos químicos foram coletadas amostras deformadas nas profundidades de 0-0,10 m. Os atributos químicos analisados foram: soma de bases, CTC e matéria orgânica (MO), conforme metodologia descrita em Claessen (1997).

2.3 Amostragem de ar do solo e cálculos dos fluxos de gases

Em cada sistema agrícola, amostras de ar atmosférico foram coletados em rede de 12 pontos georreferenciados (3 amostragens por ponto) na mesma área, vértices da rede e datas de coletas de atributos físicos e químicos do solo. Para a determinação dos fluxos de CO₂ e N₂O utilizou-se o método da câmara fechada (Jacinthe e Dick, 1997), sendo que a determinação da concentração dos gases se deu por cromatografia gasosa (Shimadzu, GC-14A), equipado com detector ⁶³Ni de captura de elétrons (ECD) e um detector de ionização por chama (FID) (Steudler et al., 1991). Os fluxos foram obtidos através da inclinação da curva (*slope*) após 20 minutos e aplicação da fórmula dos gases ideais.

2.4 Espacialização e análise estatística

Os dados foram analisados por meio da estatística descritiva para exploração inicial e para a verificação da normalidade da distribuição de frequência dos dados. Para distribuições normais de frequência, os valores de assimetria e curtose foram próximos de zero e três.

Para verificar a dependência espacial das variáveis, interpolar dados e elaborar os mapas, foi empregada a análise geoestatística segundo Vieira e Dechen (2010). Foram construídos semivariogramas presumindo estacionariedade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância. Os semivariogramas foram ajustados ao modelo matemático de melhor correspondência. Após ajuste do semivariogramas estima-se valores para os locais não amostrados com condições de não tendenciosidade e variância mínima, usando-se a krigagem.

Os programas computacionais e procedimentos para construção, ajuste do modelo do semivariograma e krigagem foram baseados em Vieira et al. (2002).

Nas situações em que ocorreu dependência espacial do atributo do solo, uma análise de correlação foi realizada entre os valores do atributo e dos fluxos de gases.

3. Resultados e Discussão

3.1 Área de pastagem

O solo da pastagem apresentou textura areno-argilosa e densidade média (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva e parâmetros de ajuste do semivariograma, efeito pepita (Co), variância estrutural (C1) e alcance (a) para os atributos químicos, físicos e gases do solo na pastagem.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)	Co	C1	a	Modelo de ajuste
Areia g kg ⁻¹ (0 - 0,2 m)	364,90	230,00	459,00	17,71	2200,0	2350,00	110,00	Esférico
Argila g kg ⁻¹ (0 - 0,2 m)	367,70	253,00	470,00	18,02				
Silte g kg ⁻¹ (0 - 0,2 m)	267,50	148,00	373,00	23,83				
Densidade g cm ⁻³ (0-0,1 m)	1,44	1,16	1,65	8,95	0,00	0,01	50,00	Esférico
MO g dm ⁻³ (0-0,1 m)	33,32	23,00	43,00	14,05	4,00	17,00	55,00	Esférico
CTC mmolc dm ⁻³ (0-0,1 m)	64,14	55,00	93,00	16,11				
V % (0-0,1 m)	32,57	18,00	58,00	31,88	10,00	106,00	90,00	Esférico
CO ₂ g C m ² h ⁻¹	39,61	5,23	116,25	105,82				
N ₂ O µg N m ² h ⁻¹	-0,68	-3,38	1,66	211,26				

Foi observada dependência espacial para os atributos físicos areia e densidade (Figura 2). Os mapas permitiram inferir que a porção superior esquerda da área apresentou maior teor de areia e densidade do solo. Para os atributos químicos do solo, MO e V%, houve dependência espacial com predomínio de ajuste dos semivariogramas pelo modelo esférico (Figura 3).

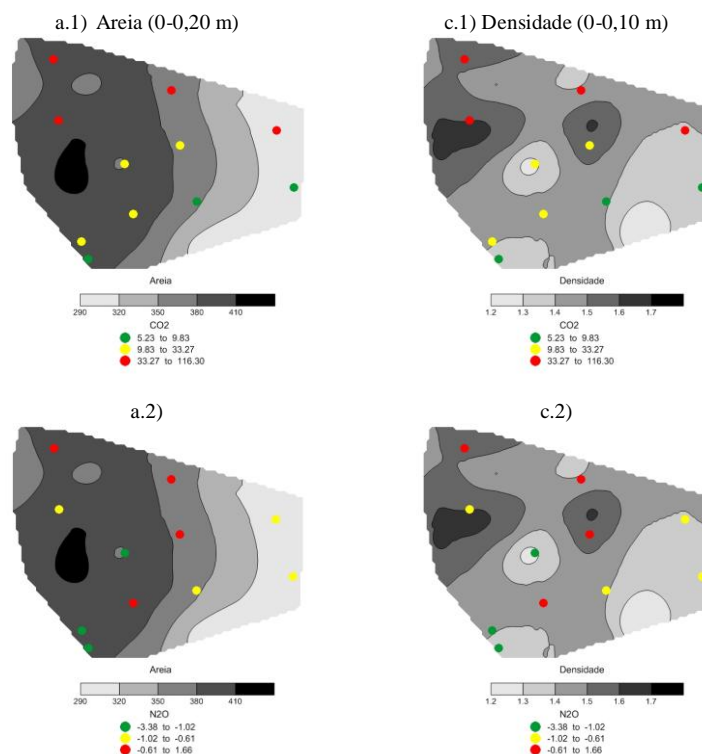


Figura 2. Mapas espacializados por krigagem ordinária dos atributos físicos do solo e distribuição pontual de fluxos de CO₂ e N₂O em área de pastagem.

Com relação aos atributos químicos, os mapas de matéria orgânica e V% apresentaram manchas de maiores e menores valores na mesma localização (Figura 3). Como a pastagem estudada não recebeu nenhuma adição de fertilizantes químicos ou orgânicos, as características químicas do solo refletem a composição original do solo e da ciclagem interna de nutrientes na superfície do solo. Ou seja, apesar de determinada área apresentar maior soma de bases, a presença de nutrientes não é suficiente (CTC muito baixa e V% baixo – Tabela 1) para aumentar a produtividade primária líquida (PPL) naquele local e consequentemente resultar em incremento de MO no solo.

Tabela 2. Matriz de correlação entre atributos do solo e fluxo de gases em área de pastagem.

	Areia	Argila	Silte	Densidade	MO	CTC	V%	CO ₂
CO ₂	-0,28	-0,15	0,43	-0,26	0,61	-0,42	-0,15	
N ₂ O	-0,22	-0,12	0,34	-0,16	0,28	-0,39	0,03	0,62

Por outro lado, os maiores fluxos de CO₂ foram observados nas manchas de maior conteúdo de MO (Tabela 2). Isso provavelmente ocorreu, pois a porção superior da área era limitada por uma pequena mata, podendo ter as folhas das árvores contribuído para o maior conteúdo de MO, diversidade e metabolismo microbiano no solo.

Capins são plantas de ciclo C4 e, portanto, bastante eficientes no processo fotossintético. Esta vantagem fisiológica torna os capins muito vigorosos e adaptados a condições adversas. Quando cultivados em áreas sem manejo de fertilizantes e sem controle de taxa de lotação, utilizam os nutrientes naturais do solo e da ciclagem interna da liteira. Essa observação é

comprovada pelo fluxo negativo de N_2O , ou seja, presença de bactérias fixadoras de nitrogênio (Tabela 1) e também pela ausência de correlação entre o fluxo de N_2O e os atributos químicos do solo.

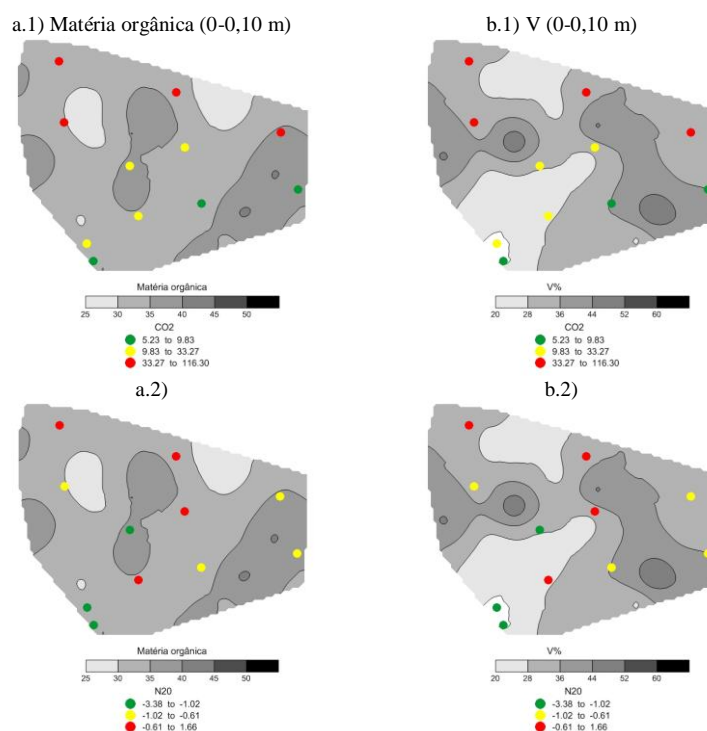


Figura 3. Mapas espacializados por krigagem ordinária dos atributos químicos do solo e distribuição pontual de fluxos de CO_2 e N_2O em área de pastagem.

3.2 Área de cultivo de cana-de-açúcar

O solo da área de cana-de-açúcar apresentou textura argilosa e densidade do solo abaixo do valor crítico para o desenvolvimento de raízes ($1,45 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabela 3), relativo ao valor de argila proposto por Michelin (2005). Esta lavoura de cana-de-açúcar, apesar de receber práticas convencionais de fertilização, apresenta CTC baixa e V% média. Dentre os atributos do solo avaliados, apenas argila e MO apresentaram dependência espacial (Figura 4).

Avaliando o comportamento dos fluxos relativos aos atributos com dependência espacial, o fluxo de N_2O apresentou correlação negativa com teor de argila (Tabela 4). Elevados teores de argila podem significar menor microporosidade que se relaciona com aumento da densidade do solo (Gonçalves et al, 2007). Argenton et al. (2005) constataram que, em Latossolo vermelho argiloso, a deficiência de aeração inicia-se com densidade de $1,30 \text{ g cm}^{-3}$.

Tabela 3. Estatística descritiva e parâmetros de ajuste do semivariograma, efeito pepita (Co), variância estrutural (C1) e alcance (a) para os atributos químicos, físicos e gases do solo na cana-de-açúcar.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)	Co	C1	a	Modelo de ajuste
Areia g kg^{-1} (0 - 0,20 m)	234,64	206,00	251,00	4,29	-			
Argila g kg^{-1} (0 - 0,20 m)	471,42	384,00	551,00	9,14	750,00	450,00	180,00	Esférico
Silte g kg^{-1} (0 - 0,20 m)	293,94	215,00	391,00	15,12	-			
Densidade g cm^{-3} (0-0,10 m)	1,28	1,18	1,41	5,54	-			
MO g dm^{-3} (0-0,1 m)	35,64	25,00	46,00	14,71	10,00	15,00	80,00	Esférico
CTC mmolc dm^{-3} (0-0,1 m)	81,14	63,00	117,00	14,16	-			
V % (0-0,1 m)	56,92	35,00	76,00	18,19	-			
$CO_2 \text{ g C m}^2 \text{ h}^{-1}$	45,63	20,54	76,67	31,15	-			
$N_2O \mu\text{g N m}^2 \text{ h}^{-1}$	0,57	-9,07	3,08	589,16	-			

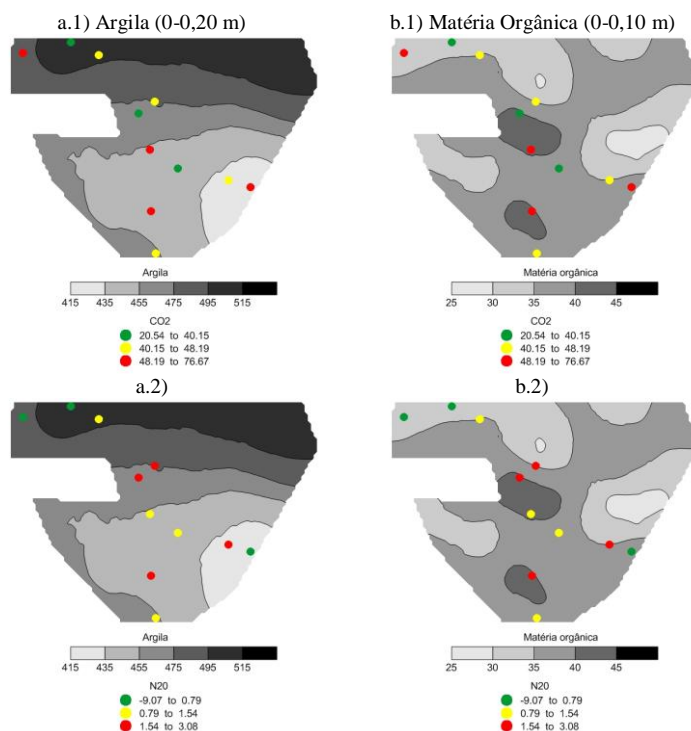


Figura 4. Mapas espacializados por krigagem ordinária dos atributos do solo e distribuição pontual de fluxos de CO₂ e N₂O em área de cana-de-açúcar.

Tabela 4. Matriz de correlação entre atributos do solo e fluxo de gases em área de cana-de-açúcar.

	Areia	Argila	Silte	Densidade	MO	CTC	V%	CO ₂
CO ₂	-0,39	-0,41	0,52	0,34	-0,07	-0,06	-0,06	
N ₂ O	-0,32	-0,51	0,60	0,23	0,09	-0,54	-0,40	0,14

3.3 Área de cultivo de soja

Semelhante à área de cana, o solo da área de soja apresentou textura argilosa e densidade abaixo do valor crítico. As características de fertilidade foram as melhores entre os sistemas avaliados, com CTC média e V% média (Tabela 5).

Dentre os atributos avaliados, apenas argila, densidade e V% apresentaram dependência espacial (Figura 5). O manejo de sistemas de plantio direto prevê adubações de cobertura e manutenção da palhada de diferentes culturas. Isso significa entrada de nutrientes minerais e ciclagem interna de nutrientes, resultando em maior heterogeneidade espacial das características químicas, físicas e biológicas do solo (Panosso et al, 2008).

Tabela 5. Estatística descritiva e parâmetros de ajuste do semivariograma, efeito pepita (Co), variância estrutural (C1) e alcance (a) para os atributos químicos, físicos e gases do solo na soja.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)	Co	C1	a	Modelo de ajuste
Areia g kg ⁻¹ (0 - 0,2 m)	119,76	-1,00	148,13	16,08	-			
Argila g kg ⁻¹ (0 - 0,2 m)	510,10	432,50	563,25	5,99	700,00	290,00	25,00	Esférico
Silte g kg ⁻¹ (0 - 0,2 m)	365,95	322,01	457,79	8,41	-			
Densidade g cm ⁻³ (0-0,1 m)	1,23	1,08	1,38	6,22	0,005	0,0051	50	Esférico
MO g dm ⁻³ (0-0,1 m)	33,78	22,00	40,00	13,12	-			
CTC mmolc dm ⁻³ (0-0,1 m)	84,30	67,00	111,00	10,69	-			
V % (0-0,1 m)	49,78	29,00	70,00	19,62	34,00	76,00	60,00	Esférico
CO ₂ g C m ² h ⁻¹	61,04	36,17	78,94	20,32	-			
N ₂ O µg N m ² h ⁻¹	11,16	3,42	17,00	37,50	-			

A ausência de correlação entre os fluxos de gases e as variáveis com dependência espacial pode ser explicada pelo maior número de interferências sofridas pelo sistema, o que torna a variação espacial de fluxos ainda mais difícil de ser compreendida (Nkongolo e al, 2010).

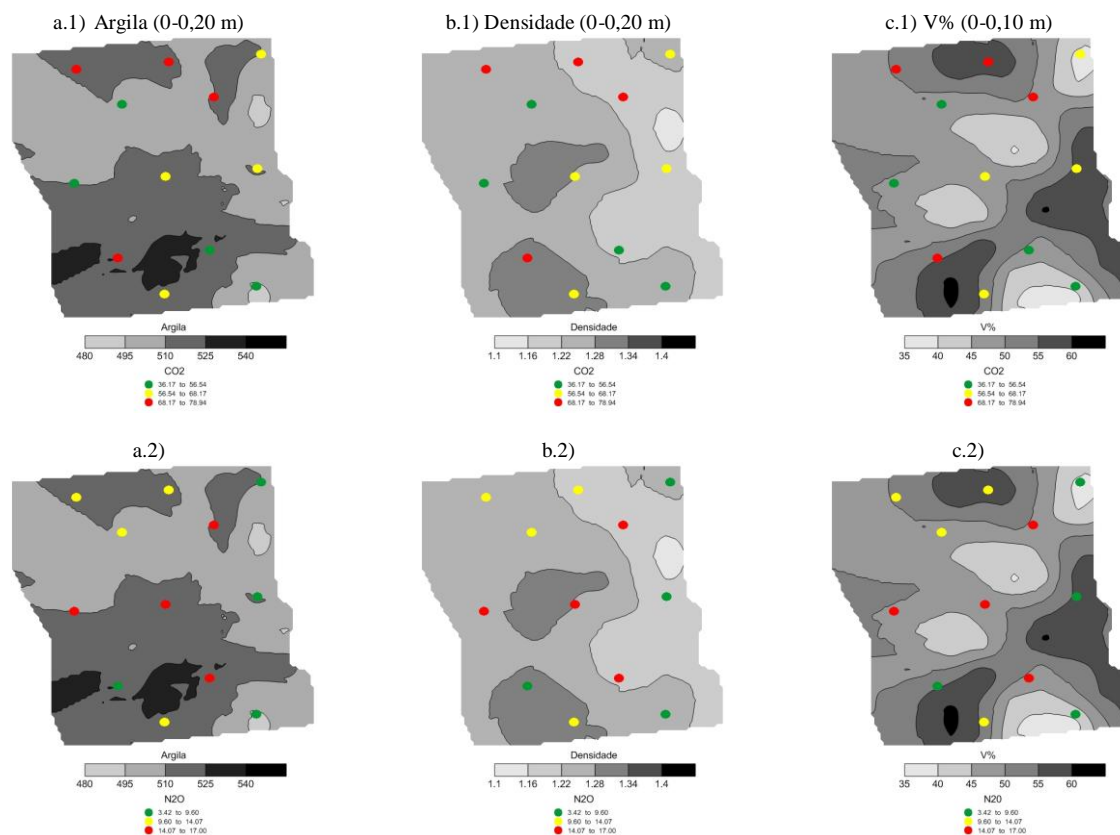


Figura 5. Mapas espacializados por krigagem ordinária dos atributos do solo e distribuição pontual de fluxos de CO₂ e N₂O em área de soja.

Tabela 6. Matriz de correlação entre atributos do solo e fluxo de gases em área de soja.

	Areia	Argila	Silte	Densidade	M. O.	CTC	V%	CO ₂
CO ₂	0,06	0,11	-0,14	-0,12	-0,02	0,39	0,34	
N ₂ O	-0,24	-0,34	-0,15	0,38	0,77	-0,21	-0,12	0,14

4. Conclusões

Considerando apenas situações onde ocorreu dependência espacial dos atributos do solo e correlação dos fluxos de gases, podemos concluir que:

- Sistemas agrícolas com menores interferências de manejo e, portanto, características de solo mais homogêneas, apresentam maior número de atributos com dependência espacial e melhor correlação com o de fluxo de gases;
- Em sistemas agrícolas com manejo intensificado, a rede de amostragem deve ser maior do que a testada neste estudo. A rede de coleta de amostras de ar deve acompanhar a rede coleta de solo.

Referências Bibliográficas

ARGENTON J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 29, p. 425-435, 2005.

CAMARGO, O.A. de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas (Boletim técnico, 106), 93p, 1986.

DENMAN, K.L.; BRASSEUR, G.; CHIDTHAISONG, A.; CIAIS, P.; COX, P.M.; DICKINSON, R.E.; HAUGLUSTAINE, D.; HEINZE, C.; HOLLAND, E.; JACOB, D.; LOHMANN, U.; RAMACHANDRAN, S.; da SILVA DIAS, P.L.; WOFYSY, S.C.; ZHANG, X. **Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry**. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, M.L. (eds.). Cambridge University Press, 2007.

CLAESSEN, M.E.C. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS (Documentos, n. 1). 212p., 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 306 p., 2006.

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

GONÇALVES, R.A.B.; GLOAGUEN, T.V.; FOLEGATTI, M.V.; LIBARDI, P.L.; LUCAS, I.; MONTES, C.R. Distribuição de poros em solos irrigados com água salina e com água residuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 34, p. 701-707, 2010.

GREGO, C.R.; COELHO, R.M.; VIEIRA, S.R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.337-350, 2011.

IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Kanagawa, Japan, 2006.

JACINTHE, P.A.; DICK, W.A. Soil management and nitrous oxide emissions from cultivated fields in Southern Ohio. **Soil Tillage Research**, v.41, p.221-235, 1997.

NKONGOLO, N.V.; JOHNSON, S.; SCHMIDT, K.; EIVAZI, F. Greenhouse gases fluxes and soil thermal properties in a pasture in central Missouri. **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 7, p. 1029–1039, 2010.

PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, L.; LA ESCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em dois sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 28, p. 227-236, 2008.

SPARLING, G.P. **Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health**. In: PANKHURST, C., DOUBE, B.M., GUPTA, V.V.S.R. (Eds), *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, Wallingford; New York, pp. 97-119, 1997.

STEUDLER, P.A.; MELILLO, J.M.; BOWDEN, R.D.; CASTRO, M.S.; LUGO, A.E. The effects of natural and human disturbances on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in a Puerto Rican wet forest. **Biotropica**, v.23, p.356-363, 1991.

VIDAL- VÁZQUEZ, E.; PAZ- FERREIRO, J.; VIEIRA, S.R.; TOPP, G.C.; MIRANDA, J.G.V.; PAZ GONZALEZ, A. Fractal description of the spatial and temporal variability of soil water content across an agricultural field. **Soil Science**, v.177, p.131-138, 2012.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Spatial variability studies in São Paulo, Brazil along the last twenty five years. **Bragantia**, v.69, p.53-66, 2010.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.A.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters. In: ALVAREZ V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F. de; MELLO, J.W.V. de; COSTA, L.M. da. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.1-45, 2002.