

Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa

Alexandre Fonseca D'Andrea¹, Marx Leandro Naves Silva², Diego Antonio França de Freitas², Nilton Curi², Carlos Alberto Silva²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB, CEP 58015-4300, João Pessoa, PB, Brasil, alexandre.dandrea@ifpb.edu.br;

²Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, UFLA/DCS, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil, marx@ufla.br; diego_ufla@yahoo.com.br; niltcuri@dcs.ufla.br; csilva@dcs.ufla.br

Resumo - O solo é um importante compartimento de carbono no globo terrestre, armazenando quantidade expressiva desse elemento em formas orgânicas, principalmente em áreas florestais. Compreender os fatores que afetam as perdas de CO₂ do solo é fundamental para a redução das emissões de gases causadores de efeito estufa para a atmosfera. O objetivo deste trabalho foi avaliar os padrões de variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em floresta nativa em um Latossolo Vermelho distroférrico, textura muito argilosa, no Município de Lavras, MG. Foi delimitada uma grade com 32 pontos, espaçados regularmente pela distância de 5 m, na qual foram avaliados o fluxo de CO₂, fatores ambientais (evaporação de água, temperatura e umidade do solo) e atributos relacionados à fertilidade (pH, soma de bases e alumínio trocável), estrutura (densidade do solo e porosidade total) e matéria orgânica do solo (carbono orgânico total e carbono da biomassa microbiana). Análises de correlação linear simples indicaram que as emissões de CO₂ do solo são um fenômeno de natureza complexa, não podendo ser explicadas de maneira satisfatória por um único atributo do solo ou do ambiente. O fluxo de CO₂ não apresenta variabilidade espacialmente estruturada na escala de amostragem adotada, com distribuição considerada aleatória.

Termos para indexação: Fatores ambientais, carbono, matéria orgânica, correlação linear.

Short-term variations in flux and spatial variability of soil CO₂ in native forest

Abstract - Soil is an important compartment of carbon in terrestrial ecosystem, retaining substantial quantity of this element in organic forms, mainly in forest areas. The understanding of the factors that affect the fluxes of soil CO₂ is the basic to the reduction of emissions of greenhouse gases to the atmosphere. The objective of this work was to evaluate the patterns of spatial variability of soil CO₂ flux in native forest in a very clayey dystroferic Red Latosol (Oxisol), in Lavras city, Minas Gerais state, Brazil. A grid of 32 points was delimited, regularly spaced in 5 m distance, in which the CO₂ flux and environmental factors (water evaporation, temperature and soil moisture) and attributes related to fertility (pH, base soil saturation and exchangeable aluminium), structure (bulk density and total porosity) and soil organic matter (total organic carbon, microbial biomass carbon) were evaluated. Simple linear correlation analyses indicated that the soil CO₂ emissions are a complex phenomenon, being not satisfactorily explained by a single soil or environment attribute. The CO₂ flux did not present spatially structured variability in the adopted sampling scale, having a distribution that was considered as randomized.

Index terms: Environmental factors, carbon, organic matter, linear correlation.

Introdução

No âmbito das mudanças climáticas globais, o solo e suas formas de uso estão em foco, sobretudo no que se refere à agricultura. Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de gases de efeito estufa, dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (Houghton, 2001). A influência de práticas agrícolas na emissão de gases que causam o efeito estufa é assunto de grande

interesse, especialmente quando se trata do CO₂, o principal componente do efeito estufa. Atividades agrícolas que envolvem o manejo do solo, como o seu preparo, têm afetado a dinâmica dessa emissão (Bayer et al., 2000; La Scala et al., 2001; Nsabimana et al., 2009).

O carbono no ecossistema terrestre está presente em diversas formas, incluindo a fauna, a flora, o material em decomposição e o carbono no solo, este último é, em geral, encontrado em maior quantidade no primeiro

metro do solo (FAO, 2007; Nsabimana et al., 2009). Nos continentes, o maior reservatório de carbono está nos solos, que contêm estimados 1.500 Pg C; a atmosfera contém aproximadamente 750 Pg C; e, estima-se que 560 Pg C estejam estocados na cobertura vegetal sendo que cerca de 75% deste total se encontram estocados em florestas e mais especificamente aproximadamente 50% encontram-se em florestas tropicais (Grace, 2001; Dias, 2006).

Na superfície do solo, o CO₂ é produzido naturalmente por meio de processo mediado por microrganismos, durante a decomposição aeróbica da matéria orgânica e respiração do sistema radicular das plantas. O fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo é um dos principais componentes do ciclo global do carbono (Yim et al., 2002), contribuindo com cerca de 50% do carbono que compõe a respiração total do ecossistema (Roberts, 2000).

Segundo Sotta (1998) e Schwendenmann et al., (2003), a taxa de transferência de CO₂ (emissão de CO₂ para a atmosfera por intermédio do solo, microrganismos, fauna e processos químicos) é controlada por: taxa de produção no solo, gradientes de temperatura no solo e na atmosfera; concentração na interface solo-atmosfera, propriedades físicas do solo, e flutuações da pressão atmosférica do ambiente que está sendo analisado, além da quantidade e qualidade da serrapilheira, sendo que a composição química do material residual adicionado ou da matéria orgânica do solo também afetam as taxa de produção de CO₂.

A variabilidade espacial das propriedades do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogênicos diversos. Em adição, muito da variabilidade pode ser causada ainda pelo uso e manejo dos solos e, como consequência, as propriedades do solo podem exibir variabilidade espacial em macro, meso e microescalas (Panosso et al., 2008). Estudos de variabilidade têm sido conduzidos no Brasil, onde foi registrada uma variação das médias mensais do fluxo de CO₂ do solo em florestas com mata nativa e eucalipto, com aumento das emissões nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro), o que foi atribuído às condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo (Lira et al., 1999). La Scala Júnior et al. (2000) mostraram que a precipitação pluviométrica também causou interferências no padrão das emissões de CO₂ do solo.

São poucos os trabalhos que caracterizaram a variabilidade da emissão de CO₂ de solos utilizando

técnicas de análise de semivariância (Fang et al., 2001), especialmente, relacionando essa variabilidade àquela da temperatura e da umidade do solo, que são possíveis fatores influenciadores dessa emissão.

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a estrutura da variabilidade espacial de curta escala das emissões de CO₂ e identificar atributos do solo ou fatores do ambiente relacionados ao processo, em um Latossolo da região de Lavras, MG, coberto por mata nativa.

Material e métodos

O trabalho foi realizado em um povoamento florestal de mata nativa localizado no *campus* da Universidade Federal de Lavras, MG, sob Latossolo Vermelho distroférrico típico, textura muito argilosa, altitude média de 935 m e área de 5,8 ha. O clima da região é do tipo Cwa de Köppen, com média pluviométrica mensal na estação chuvosa (dezembro a fevereiro) de 254 mm e na estação seca (maio a julho) de 25 mm (Brasil, 1992), temperatura média anual de 19°C e precipitação média anual de 1.530 mm.

A área de estudo consta de um fragmento remanescente de mata nativa do tipo floresta estacional semidecídua montana (Oliveira-Filho et al., 1994). Esta fisionomia vegetal caracteriza-se por uma porcentagem de árvores caducifólias no conjunto florestal entre 20% e 50% e está relacionada com um clima tropical de altitude, com duas estações bem definidas, uma chuvosa de verão e outra seca de inverno. Conforme Oliveira Filho et al. (1994), esta Reserva Florestal não sofreu corte raso e tem mantido aproximadamente os mesmos limites desde 1920. Porém, os autores citam que a retirada de lenha e de pequenas peças de madeira e a abertura de trincheiras para estudos de perfis de solo eram frequentes até 1986, quando a Reserva foi declarada área de preservação permanente e cercada.

Na área, foi selecionada, ao acaso, uma subárea retangular com as dimensões de 15 m × 35 m, na qual foram delimitados 32 pontos dispostos sobre um eixo cartesiano, espaçados em grade regular pela distância de 5 m em direções perpendiculares chamadas convencionalmente de X e Y, sendo determinado este número de pontos considerando o aspecto operacional e a viabilidade dos recursos disponíveis para a realização do trabalho. Todas as medições realizadas em campo e as amostragens para determinação em laboratório de

atributos químicos, físicos e biológicos do solo foram tomadas seguindo a localização dos pontos da grade.

Para as medições dos fluxos de CO₂ e vapor d'água do solo, foi utilizado um analisador de gás infravermelho (IRGA) portátil, modelo ADC LCA-4 (*Analytical Development Company Bioscientific Ltd, Hoddesdon, England*), acoplado a uma campânula cilíndrica de ciclo fechado (modelo PLC4 & 2250 *Soil Hood*, do mesmo fabricante) com área superficial de 98,5 cm² e volume de 926 mL, equipada com miniventilador para mistura interna do ar. As leituras foram feitas em fevereiro de 2004, sendo que o IRGA foi operado no modo diferencial, com fluxo de ar nas tubulações de entrada e saída da campânula de 240 μmol s⁻¹, mantido por meio de um sistema de bombeamento presente no interior do equipamento.

A serrapilheira em cada ponto da grade foi cuidadosamente removida imediatamente antes das medições e a campânula ligeiramente pressionada sobre a superfície do solo, aprofundando um alongamento até um ressalto que delimita o volume efetivo da câmara, a fim de melhorar o selamento da interface campânula-solo e evitar perdas ou enriquecimento lateral de CO₂. Os fluxos de CO₂ e de vapor d'água do solo foram calculados por meio da diferença entre a concentração dos gases no ar que entra na campânula e no ar que deixa a mesma, após ter sido atingido um estado de equilíbrio dinâmico (Davidson et al., 2004). O tempo de leitura adotado foi de 3 a 4 minutos, tomado com base em testes preliminares realizados no campo com o intuito de verificar o intervalo decorrido desde a inserção da campânula no solo até a estabilização do valor medido.

Em cada ponto da grade, a temperatura do solo foi medida com um termômetro de bulbo de mercúrio, posicionado a 12 cm de profundidade, e a umidade do solo média da faixa de 0-12 cm determinada com um reflectômetro de domínio no tempo (TDR, modelo *Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum Technologies, IL, USA*). A calibração das leituras do TDR foi feita a partir de dados de umidade gravimétrica (determinada pelo método padrão de estufa) e densidade do solo (Blake & Hartge, 1986), coletados na área. Os resultados foram convertidos em umidade em base volume e, em seguida, submetidos à análise de regressão linear simples com os valores de umidade volumétrica lidos no TDR. A equação obtida foi usada para corrigir todas as leituras de umidade feitas no campo com o equipamento, com expressão final dos resultados em

cm³ 100 cm⁻³ de solo, a partir deste ponto referido como % vol.

Uma semana após as medições dos fluxos de gases do solo (13 de fevereiro de 2004), foram coletadas amostras de solo, em cada ponto da grade, para a realização de análises químicas e físicas (fração terra fina, <2 mm). A avaliação da biomassa microbiana foi realizada em amostras passadas em peneira de 4 mm para a retirada de raízes e outros resíduos orgânicos visíveis, como restos de animais e vegetais. Depois de armazenadas por 10 dias em câmara fria a 4 °C, as amostras foram incubadas no escuro, à temperatura ambiente, por uma semana, para estabilização da atividade microbiana, sendo então realizadas as análises de laboratório. Para as análises de porosidade total e densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas em 16 pontos da grade, espaçados pela distância de 5 m na direção Y e 10 m na direção X, com o uso do amostrador de Uhland, em cilindros com dimensões médias de 8,26 cm de altura por 6,96 cm de diâmetro interno. Todas as amostragens foram feitas na faixa de profundidade de 0-10 cm.

Os componentes do complexo sortivo do solo foram determinados de acordo com a metodologia proposta por Claessen (1997) e o carbono orgânico total, por oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, segundo método modificado de Walkley & Black (1934). A determinação do teor de carbono da biomassa microbiana foi feita pelo método da fumigação-extração (Vance et al., 1987), com uso de K₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ como extrator, oxidação a quente com K₂Cr₂O₇ 0,0667 mol L⁻¹ + H₂SO₄:H₃PO₄ (2:1) e titulação com (NH₄)₂Fe(SO₄)₂·6H₂O 0,0333 mol L⁻¹. Foi utilizado o fator 0,26 para conversão do carbono extraído a carbono da biomassa microbiana (Feigl et al., 1995).

A porosidade total do solo foi determinada a partir da massa de água retida após saturação e de valores de densidade do solo, obtidos em amostras com estrutura indeformada (Blake & Hartge, 1986), sendo expressa em % vol.

A análise da variabilidade espacial foi verificada por meio das ferramentas da geoestatística, utilizando-se o programa GS+ Professional Edition Versão 5.0.3 Beta (Gamma Design Software, MI, USA), com ajuste de modelos teóricos e estimação de dados em pontos não amostrados.

A partir dos modelos gerados e dentro dos limites máximos de distância da grade delimitada no campo, foram feitas estimativas dos fluxos de CO₂ do solo por

meio de interpolação por crigagem pontual normal, assumindo que os valores em pontos não medidos são realizações da mesma função estacionária aleatória (Soares, 2000). Neste procedimento, foram utilizados 16 pontos vizinhos, ponderados pela distância e pelo grau de autocorrelação definido pelo modelo do semivariograma, respeitando o alcance da dependência espacial.

Em complemento às análises descritivas dos dados georreferenciados, foi calculado o número mínimo necessário para a obtenção de amostras representativas para cada um dos atributos avaliados, dentro de um determinado limite de tolerância para os desvios em torno da média, com o uso da seguinte expressão (Cline, 1944):

$$N = [(t_{5\%} \times DP) / E]^2$$

em que N: número de amostras; $t_{5\%}$ estatística t de Student ao nível de significância $\alpha=5\%$ ($n=32$ observações, exceto para porosidade total e densidade do solo, em que $n=16$); DP: desvio padrão dos dados; E: erro tolerado em torno da média (foram utilizados valores de E para 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de desvio em relação à média).

Adicionalmente, foram feitas análises de correlação linear simples entre o fluxo de CO_2 do solo e os demais atributos, a fim de verificar o grau de associação. Os

coeficientes de correlação (r) obtidos foram submetidos ao teste t. Os valores do fluxo de CO_2 do solo foram, ainda, submetidos à análise de regressão linear múltipla com acréscimo sequencial de variáveis, em função de propriedades relacionadas ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo. Os testes t e F foram utilizados, respectivamente, para a verificação da significância dos parâmetros do modelo multivariado ajustado e do coeficiente de determinação (R^2).

Resultados e discussão

As estatísticas descritivas para a taxa de emissão de CO_2 do solo, evaporação de água, temperatura do solo, umidade do solo, teor de alumínio trocável, pH, soma de bases, porosidade total, densidade do solo, carbono orgânico e carbono da biomassa microbiana são apresentadas na Tabela 1. A temperatura e umidade do solo apresentaram pequena variabilidade, uma vez que as medições foram tomadas em um período da tarde de um único dia. Com relação ao teor de carbono microbiano, existe uma grande amplitude dos dados, que também é relatada por outros autores para a biomassa microbiana na camada superficial de solos tropicais florestais (Dias, 2006).

Tabela 1. Estatísticas descritivas para taxa de emissão de CO_2 do solo (FCO_2), evaporação de água (E), temperatura do solo (T), umidade do solo (U), teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (CO) e carbono da biomassa microbiana (Cmic), em área de mata nativa.

Estatística	FCO_2 E ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	E ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	U (% vol)	Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	pH	SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	PT (% vol)	Ds (kg dm^{-3})	CO (g kg^{-1})	Cmic (mg g^{-1})
$n^{(1)}$	32	32	32	32	32	32	32	16	16	32	32
Mínimo	0,67	2,59	21,6	22,1	1,1	4,0	0,6	56,1	0,8	18	94
Máximo	4,05	17,50	22,8	34,4	2,2	4,5	1,7	64,2	1,1	31,3	1629
Média	1,55	12,98	22,3	28,7	1,6	4,2	0,8	60,6	1	25,1	991
DP ⁽²⁾	0,81	2,79	0,34	2,53	0,25	0,13	0,24	1,99	0,07	3,26	312,25
CV ⁽³⁾	52,1	21,5	1,5	8,8	15,3	3,2	28,7	3,3	7	13	31,5
Assimetria	1,27	-1,33	-0,27	-0,23	0,25	-0,13	1,46	-0,32	-0,63	0,25	-0,38
Curtose	1,24	4,34	-0,78	0,41	-0,11	-0,75	2,98	-0,02	0,32	-0,41	0,62

⁽¹⁾número de observações; ⁽²⁾desvio padrão; ⁽³⁾coeficiente de variação (%).

Para os fluxos de CO_2 do solo, os 32 pontos amostrais demarcados na grade regular foram suficientes apenas para garantir médias dentro da tolerância de 20% para a mata nativa (Cline, 1944). Por sua vez, fatores do ambiente, como a temperatura e a umidade do solo, e

os relacionados à estrutura (porosidade e densidade do solo) foram quantificados com médias que atenderam ao estreito limite de 5% de desvio. Para os atributos relacionados à matéria orgânica do solo, o número de amostras foi suficiente para uma média bastante precisa

do teor de carbono orgânico, enquanto que, para o carbono da biomassa microbiana, houve uma grande amplitude dos valores encontrados.

A associação linear dos fluxos de CO₂ do solo com os demais atributos, efetuadas através de análises de correlação simples, não identificaram nenhuma

propriedade que, isoladamente, estivesse correlacionada com as emissões de gás carbônico do solo de maneira significativa (Tabela 2). Na mata nativa, os baixos coeficientes de correlação obtidos entre os atributos avaliados e o fluxo de CO₂ do solo foram confirmados por equações de regressão com ajuste pequeno e não significativo (Tabela 2).

Tabela 2. Efeito isolado da variável, equações, coeficiente de determinação das equações (R²), significância (P) e número de observações obtidas por regressão linear múltipla com acréscimo sequencial de variáveis para fluxo de CO₂ do solo (Y, em g m⁻² h⁻¹), em função de atributos relacionados aos conjuntos: ambiente, fertilidade, estrutura e matéria orgânica do solo (MOS).

Modelo	Variável	Efeito isolado	Equação	R ²	Observações
Ambiente	evaporação	0,27 ^{NS}	Y = -2,43 + 0,08 E + 0,18 T - 0,04 U ^{NS}	0,09	32
	temperatura	0,1 ^{NS}			
	umidade	-0,08 ^{NS}			
Fertilidade	alumínio	-0,18 ^{NS}	Y = -3,07 + 0,03 Al + 0,96 pH + 0,62 SB ^{NS}	0,09	32
	pH	0,25 ^{NS}			
	soma de bases	0,26 ^{NS}			
Estrutura	porosidade total	0,1 ^{NS}	Y = -7,15 + 0,10 PT + 2,48 Ds ^{NS}	0,03	16
	densidade do solo	0,03 ^{NS}			
MOS	carbono orgânico	-0,05 ^{NS}	Y = 2,00 + 2×10 ⁻³ CO - 5×10 ⁻⁴ Cmic ^{NS}	0,04	32
	carbono da biomassa microbiana	-0,19 ^{NS}			

^{NS}: não significativo (valor de F<1).

A dificuldade encontrada ao se tentar estabelecer relações diretas entre as propriedades do solo e os fluxos de CO₂ é um indício da natureza complexa do fenômeno, sendo que as análises devem ser efetuadas por períodos mais longos. Neste trabalho, não existiram condições ambientais limitantes, ao contrário de diversos estudos realizados em regiões temperadas, principalmente sobre variações temporais, nos quais a temperatura ou a umidade foi indicada como o fator mais influente nas emissões de CO₂ do solo (Rayment & Jarvis, 2000; Yim et al., 2003; Schwendenmann et al., 2003; Scott-Denton et al., 2003). Porém, D'Andréa et al. (2009) observaram que os fatores abióticos do ambiente (temperatura e água) não foram os principais determinantes dos fluxos de CO₂ do solo em regiões tropicais instaladas com cafeeiros. Por outro lado, os fatores bióticos (plantas e microbiota do solo) são os que parecem condicionar as emissões de CO₂ do solo, nestes ecossistemas. Além disso, os fatores que afetam o fluxo de CO₂ do solo estão, com frequência, fortemente inter-relacionados, covariando com a matéria orgânica e a respiração do sistema radicular das plantas (Xu & Qi, 2001).

Como as emissões de CO₂ refletem diferentes fenômenos no solo (respiração de raízes, atividade de

microrganismos e a própria difusão física do CO₂), é bem provável que não haja um único determinante do processo (Schwendenmann et al., 2003). A estrutura da distribuição espacial das emissões de CO₂ do solo foi comparada com a dos demais atributos por meio de análises geoestatísticas conduzidas com os resultados obtidos. O fluxo de CO₂ do solo (FCO₂) não apresentou dependência espacial na escala de amostragem adotada, assim como a evaporação de água (E), a umidade (U) e a estrutura (porosidade total, PT e densidade do solo, Ds). Por outro lado, houve dependência espacial para a fertilidade (Al, pH e SB) e matéria orgânica do solo (CO e Cmic).

A validação cruzada (realizada nos casos em que houve dependência espacial) indicou um ajuste razoável dos modelos para os atributos de fertilidade do solo, com coeficientes de correlação significativos e uma relação próxima da 1:1 entre os valores observados e estimados. No entanto, a maior dispersão dos pontos na validação cruzada para T, CO e Cmic aponta restrições quanto a estimativas feitas com base nos modelos ajustados, ainda que o coeficiente angular da regressão para Cmic (b=0,90), por exemplo, tenha estado próximo da linha 1:1 (Figura 1).

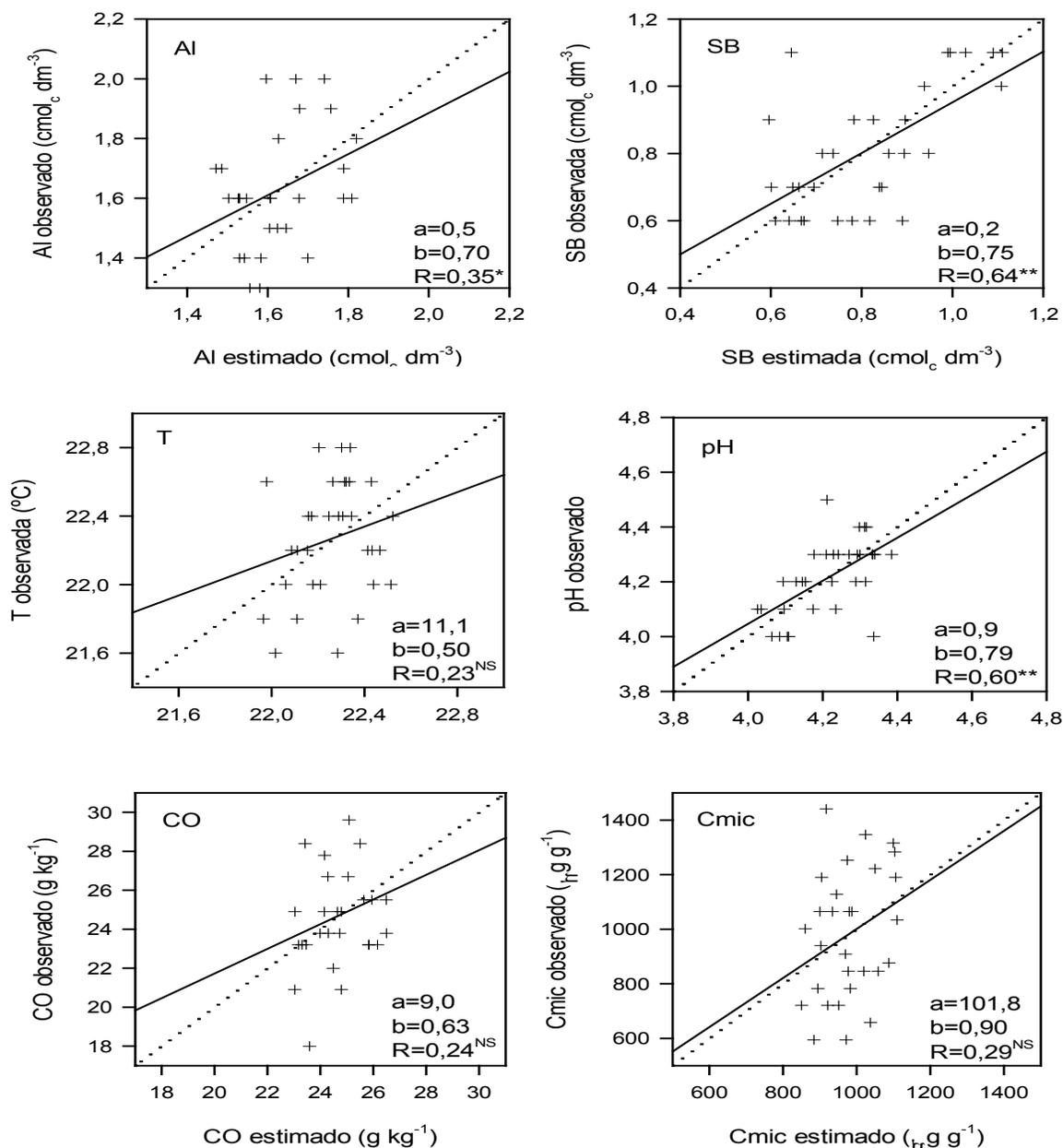


Figura 1. Gráficos de validação cruzada para teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), temperatura do solo (T), teor de carbono orgânico total (CO) e teor de carbono da biomassa microbiana (Cmic), num Latossolo com povoamento de mata nativa. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. ^{NS}: não significativo, pelo teste t. * e **: significativo a 5% e 1%, pelo teste t.

Houve predominância de um grau de dependência espacial (GDE) moderado, de acordo com a classificação apresentada por Cambardella et al. (1994), devido a valores relativamente mais elevados para a variância de efeito pepita (Co), especialmente no caso de T, Al, CO e Cmic, que representou de 43% a 49% da variabilidade total dos dados. Por outro lado, as variações de pH

e soma de bases (SB) foram quase que inteiramente influenciadas pela posição dos pontos no espaço, com forte GDE.

Neste trabalho, o alcance da continuidade espacial do FCO_2 não pôde ser detectado, uma vez que o modelo ajustado indicou uma variância de efeito pepita puro. Caso exista, a dependência espacial das emissões de

CO₂ do solo em mata nativa ocorre em distâncias muito curtas, menores do que cinco metros, que é o espaçamento mínimo entre os pontos de leitura na grade regular delimitada no campo. A presença de variabilidade em curta distância também foi verificada numa floresta boreal canadense por Rayment & Jarvis (2000), que mediram o fluxo de CO₂ do solo numa área com 30 m de raio e observaram que pontos separados por 1 m já apresentavam variabilidade tão grande quanto os separados por distâncias maiores.

A vegetação do fragmento de mata nativa é diversificada e não está concentrada em locais definidos, como nos pontos correspondentes às linhas de plantio presentes numa floresta implantada. Além disso, existe a presença marcante de sub-bosque na mata nativa, com a ocorrência de um grande entrelaçamento de ramos e, bem provavelmente, do sistema radicular das plantas. Essas considerações podem auxiliar a interpretação da grande variabilidade observada em curta distância para o fluxo de CO₂ do solo na mata nativa.

Conclusões

A mata nativa apresenta variabilidade espacial dos fluxos de CO₂ do solo aleatório e altamente variável em curta distância.

As emissões de gás carbônico do solo em um sistema florestal nas condições do presente estudo são um fenômeno de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que, isoladamente, explique sua variação no espaço.

Referências

- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTINETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a Sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, n. 54, p.101-109, 2000.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density, In: KLUTE, A. (Eds.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v. 1, p. 363-375.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normais Climatológicas: 1961 – 1990. Brasília: MA/SNI/INMET, 1992. 84 p.
- 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 soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. *Soil Science*, Baltimore, v. 58, n. 4, p. 275-288, 1944.
- D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FREITAS, D. A. F.; ROSCOE, R.; GUIMARÃES, P. T. G. Variações de curto prazo nas emissões de CO₂ do solo em diferentes sistemas de manejo do cafeeiro. *Química Nova*, v. 32, p. 2314-2317, 2009.
- DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; BOLSTAD, P.; CLARK, D. A.; CURTIS, P. S.; ELLSWORTH, D. S.; HANSON, P. J.; LAW, B. E.; LUO, Y.; PREGITZER, K. S.; RANDOLPH, J. C.; ZAK, D. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 113, p. 39-51, 2002.
- DIAS, J. D.; **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de florestas nativa da Amazônia**. 2006. 88 p. Dissertação (Mestrado em Solos) - Escola Superior Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba.
- FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 33, p. 155-165, 2001.
- FAO. **State of the World's Forests 2007**. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 24 set. 2007.
- FEIGL, B. J.; SPARLING, G. P.; ROSS, D. J.; CERRI, C. C. Soil microbial biomass in Amazonian soils: evaluation of methods and estimates of pool sizes. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 27, n. 11, p. 1467-1472, 1995.
- GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology*, London, v. 92, n. 2, p. 189-202, 2004.
- HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; LINDEN, P. J. van der; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis**. New York: Cambridge University Press, 2001. 881 p. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; LOPES, A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 62, p.163-166, 2001.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.
- LIRA, A. C. S. de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. de. Respiração do solo sob eucalipto e cerradão. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 56, p. 15-28, 1999.
- NSABIMANA, D.; KLEMEDTSON, L.; KAPLIN, B. A.; WALLIN, G. Soil CO₂ flux in six monospecific forest plantations in Southern Rwanda. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 41, p. 396-402, jan. 2009.

- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de. Composição florística e estrutura comunitária de um remanescente de floresta semidecídua montana em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 17, p. 167-182, 1994.
- PANOSSO, A. R.; PEREIRA, GENER, T.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA 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.
- RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, p. 35-45, jan. 2000.
- ROBERTS, J. M. **Effects of temperature on soil respiration: a brief overview**. Wallingford: Center for Ecology and Hydrology, 2000. 45 p.
- 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, p. 111-128, 2003.
- SCOTT-DENTON, L. E.; SPARKS, K. L.; MONSON, R. K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 35, p. 525-534, 2003.
- SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: IST Press, 2000. 206 p.
- SOTTA, E. D.; MEIER, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNET, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, Oxon, v. 10, n. 5, p. 601-617, 2004.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.
- XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Viterbo, v. 7, p. 667-677, 2001.
- YIM, M. H.; JOO, S. J.; NAKANE, K. Comparison of Field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods. **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 189-197, 2002.
- YIM, M. H.; JOO, S. J.; SHUTOU, K.; NAKANE, K. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. **Forest Ecology and Management**, v. 175, p. 585-588, 2003.

Recebido em 02 de julho de 2010 e aprovado em 26 de outubro de 2010