

# Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub>, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento

## Spatial variability of CO<sub>2</sub> emission, temperature and moisture of a bare oxisol submitted to different wetting levels

Alan Rodrigo Panosso<sup>1\*</sup>; Carlos Eduardo Rodrigues Ribeiro<sup>2</sup>; José Renato Zanini<sup>3</sup>; Luiz Carlos Pavani<sup>3</sup>; Gener Tadeu Pereira<sup>4</sup>; Newton La Scala Júnior<sup>5</sup>

### Resumo

A aplicação de lâminas de irrigação em solos é uma das práticas mais adotadas em ambientes tropicais, especialmente em épocas de seca. Neste trabalho, investigaram-se as emissões de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo, em 48 pontos distribuídos numa área de 35 x 25 m, afetados por irrigações, promovidas com um aspersor localizado no centro da área, que provocou um molhamento com perfil triangular com lâminas máximas aplicadas de 44,4 e 62,2 mm nos pontos mais próximos do aspersor. Os resultados indicam que as emissões, temperatura e umidade do solo foram fortemente afetadas pelas duas irrigações na área, cuja lâmina total de água somou 106,6 mm para os pontos mais próximos do aspersor e aproximadamente zero para os pontos mais distantes. Os mapas de variação espacial das variáveis, bem como a correlação linear entre elas, indica que as emissões estiveram positivamente relacionadas à umidade do solo e negativamente correlacionadas à temperatura do solo, após os eventos de molhamento da área. Os modelos de variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> mudam de exponencial para esféricos logo após os eventos de irrigação. Tais resultados indicam que o fator limitante à emissão de CO<sub>2</sub> do solo foi a umidade, pois, a despeito das reduções na temperatura do solo provocadas pelo molhamento, as emissões foram fortemente aumentadas.

**Palavras-chave:** Respiração do solo. Geoestatística. Irrigação por aspersão.

### Abstract

The irrigation application is one of the most useful techniques in tropical environments, especially during dry seasons. In this study, CO<sub>2</sub> efflux, temperature and soil moisture were studied in a field sampled with a grid having 48 points distributed in 35 x 25 m, under irrigation promoted by a sprinkler located at the center of the area, provoking different levels of water deposition, with maximum irrigation levels of 44.4 and 62.2 mm in points closer to the sprinkler. The results show that the emissions, temperature and moisture were strongly affected by the two irrigations events, having a total water level added of 106,6 mm for the points next to the sprinkler and zero for the most distant points from it. The maps of space variation of the variables, as well as the linear correlation between them, indicate that the emissions were positively related to the soil moisture and negative correlated to the soil temperature only after the irrigations events. The special variability models of soil CO<sub>2</sub> emission changed from exponential to spherical after the irrigations events. Such results indicate that soil moisture is among possible controlling factors of the soil CO<sub>2</sub> emission, because even with reductions in soil temperature provoked by the wetness, emissions increased strongly.

**Key words:** CO<sub>2</sub> efflux, geostatistics, sprinkler irrigation

<sup>1</sup> Doutorando em Agronomia, UNESP/Jaboticabal – SP. E-mail: arpanosso@yahoo.com.br.

<sup>2</sup> Engº Agrº Mestre em agronomia UNESP/Jaboticabal – SP.

<sup>3</sup> Professor Assistente Doutor, Deptº de Engenharia Rural, UNESP/Jaboticabal – SP.

<sup>4</sup> Professor Assistente Doutor, Deptº de Ciências Exatas, UNESP/Jaboticabal – SP.

<sup>5</sup> Professor Adjunto, Deptº de Ciências Exatas, UNESP/Jaboticabal – SP.

\* Autor para correspondência.

## Introdução

Com as recentes evidências que relacionam a mudança do clima ao aumento da concentração de gases do efeito estufa (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001; WOFSY; HARRISS, 2002) é cada vez mais importante investigar a emissão de gases provenientes de atividades agrícolas diversas. Assim, o balanço do principal gás do efeito estufa adicional, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), capturado pela vegetação e trocado entre o solo e a atmosfera, passa a ser uma das principais tarefas em atividades de pesquisas (SALISBURY; ROSS, 1985). Apesar de ainda não existir consenso nas validações de projetos de seqüestro de carbono ou redução de emissões de  $\text{CO}_2$  em solos de áreas agrícolas, existe consenso que atividades relacionadas ao uso e ao manejo de solos poderiam auxiliar em metas de redução das emissões já acordadas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001). Ainda, os solos de áreas agrícolas considerados como fontes de  $\text{CO}_2$ , poderiam ser sumidouros, se fosse compreendido como os processos de emissão dependem das diversas práticas e opções de manejo dos solos, principalmente durante o período em que estão desprovidos de vegetação, quando o agrossistema é puramente um emissor de  $\text{CO}_2$  para atmosfera (PAUSTIAN et al., 1997).

A prática da irrigação do solo vem sendo muito utilizada na agricultura nos últimos anos, particularmente em regiões tropicais e áridas. Como a temperatura e a umidade do solo são os principais fatores de controle da variabilidade temporal da emissão de  $\text{CO}_2$  em solos (EDWARDS, 1975; KIM; VERMA, 1992; RAICH; SCHLESINGER, 1992; HOWARD; HOWARD, 1993) e essas propriedades podem ser modificadas rapidamente após um molhamento, a influência de fatores como a precipitação ou a irrigação sobre a emissão de  $\text{CO}_2$  passa a ser um aspecto de importante caracterização. Apesar de todos os esforços, poucos trabalhos foram realizados para estudar o impacto da prática de irrigação sobre as emissões quase imediatas de  $\text{CO}_2$  do

solo em áreas agrícolas (CALDERÓN; JACKSON, 2002; RIETZ; HAYNES, 2003; WICHERN et al., 2004; ZANINI; BARRETO; LA SCALA JÚNIOR, 2005; VERBUG et al., 2005; MARIKO; URANO; ASANUMA, 2007), especialmente em ambientes tropicais, onde os altos valores de temperatura e umidade proporcionam uma elevada atividade microbiana. Nestas condições, a emissão de  $\text{CO}_2$  do solo é resultado da decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos do solo, portanto, com pouca influência da respiração de raízes.

Análises de geoestatística têm sido conduzidas para uma série de propriedades do solo, físicas, químicas e biológicas (JOHNSON; MORTENSEN; GOTWAY, 1996; SILVIANO; VIEIRA; SPAROVEK, 1998; WANG et al., 2002; SINEGANI; MAHBOOBI; NAZARIZADEH, 2005). A incorporação de funções que relacionam distância e covariância de propriedades do solo entre os pontos nas análises espaciais torna a determinação dessas propriedades mais acurada do que quando se considera que essas mesmas propriedades não são espacialmente dependentes. Atualmente os semivariogramas têm sido utilizados para reduzir a necessidade de amostragem intensa na chamada agricultura de precisão (WEBSTER; OLIVER, 1990). Entretanto, ainda são poucos os trabalhos que caracterizaram a variabilidade da emissão de  $\text{CO}_2$  de solos, utilizando técnicas de análise de semivariância (FANG et al., 1998; DASSELAAR et al., 1998; LA SCALA JÚNIOR et al., 2000; KOSUGI et al., 2007; OHASHI; GYOKUSEN, 2007).

O objetivo deste trabalho foi investigar o impacto do molhamento produzido pela irrigação promovida por um aspersor, sobre o padrão espacial da emissão de  $\text{CO}_2$  em uma área de um latossolo desprovido de vegetação, e sua relação com os padrões espaciais da temperatura e umidade do solo.

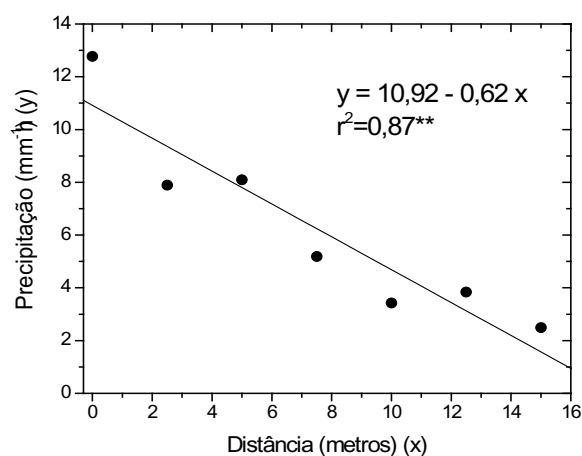
## Material e métodos

O experimento foi conduzido na Área Demonstrativa e Experimental de Irrigação (ADEI),

da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias UNESP/Jaboticabal, estado de São Paulo. O campo experimental localiza-se nas coordenadas 21°14'05" sul, 48°17'09" oeste e altitude média de 610 m. O clima da região é classificado, segundo Köepen, como sendo do tipo Aw, tropical de verão chuvoso e inverno seco. As normais climatológicas do município, derivadas do período de 1971 a 2000, indicam precipitação pluviométrica anual média de 1.425 mm, com maior concentração de outubro a março e precipitações pluviais mais espaçadas e de menores intensidades de abril a setembro; com 28,9 °C, 16,8 °C e 22,2 °C de temperatura máxima, mínima e média do ar, respectivamente, umidade relativa média do ar de 70,8 %, insolação total de 2.585,8 h e total médio de 117,5 dias com chuva (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2007).

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1999). A área experimental foi anteriormente cultivada com soja (*Glycine max* L.) em sistema de preparo convencional do solo (arado de disco seguido de grade niveladora) sendo a colheita feita mecanicamente cerca de 3 meses antes do início das avaliações. O preparo do solo foi realizado no dia 21 de julho de 2004, utilizando-se de uma grade niveladora que trabalhou a 20 cm de profundidade, aplicada uma vez na área, para eliminar a vegetação do local.

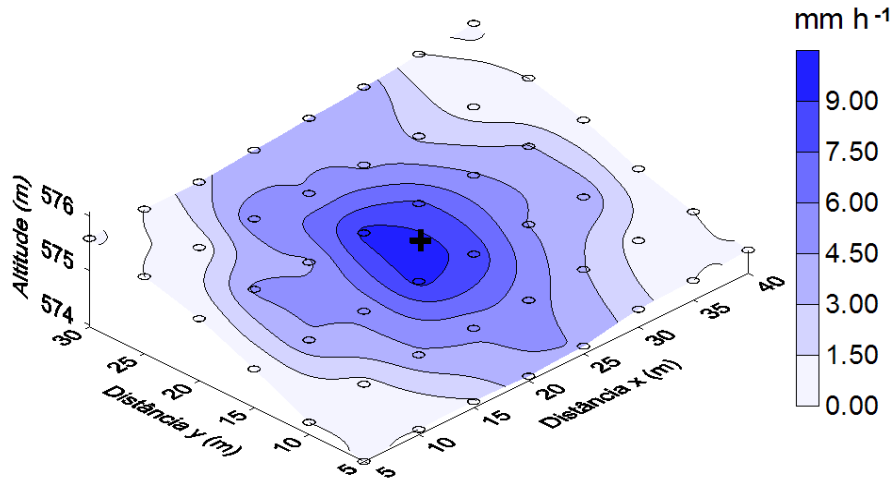
Antes da condução do experimento foi realizado um teste para a caracterização da distribuição de água do aspersor. O aspersor apresentou perfil de molhamento triangular, promovendo um gradiente de lâmina de água de 12,77 mm h<sup>-1</sup> ao seu redor e de 2,49 mm h<sup>-1</sup> a uma distância de 15 m (Figura 1). Os dados de precipitação foram estimados em função da distância do aspersor (distância = 0), por meio de uma regressão linear. Os valores estimados de a e b (± erro padrão da estimativa), e o r<sup>2</sup> foram os seguintes: a (mm h<sup>-1</sup>) = 10,92 ± 0,95; b (mm h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>) = -0,62 ± 0,11 e r<sup>2</sup> = 0,87 (p<0,002), respectivamente.



**Figura 1.** Perfil triangular da distribuição de água do aspersor. Regressão linear da precipitação (y) em função da distância (x) do perfil.

Após o teste de precipitação foi possível gerar o mapa de distribuição de água pelo aspersor (Figura 2). Nota-se que existe uma simetria da irrigação em torno do centro da área onde estava posicionado o aspersor. Os maiores valores de precipitação são observados em torno do emissor, diminuindo para a periferia do gradeado, assim como já mostrado na Figura 1, por meio da regressão linear ajustada. As pequenas variações na simetria de distribuição de água podem ser atribuídas à variação da velocidade e direção do vento durante o teste.

No dia 21 de julho de 2004, foi instalada uma malha regular com 48 pontos de avaliação de emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo, cobrindo uma área de 35 x 25 metros, em intervalos regulares de 5 metros de distância. Ao centro da área foi colocado um aspersor para a irrigação, modelo NY30, fabricado pela empresa Agropolo Implementos Agrícolas Ltda., contendo bocais com diâmetro de 6,2 e 4,6 mm. A pressão de trabalho adotada para o aspersor foi de 2,8 kgf cm<sup>-2</sup> (274,6 kPa), com raio do jato de maior alcance de aproximadamente 17 metros e vazão de 3,53 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Desta forma, a área molhada pelo aspersor foi de aproximadamente 908 m<sup>2</sup> perante uma área total do gradeado de 875 m<sup>2</sup>. Além disso, existiram pontos que não foram irrigados, localizados na periferia do gradeado (Figura 2).



**Figura 2.** Padrão espacial da distribuição de água pelo aspersor. ○ = colares inseridos no solo para avaliação da emissão de CO<sub>2</sub>; + = local de instalação do aspersor.

As avaliações da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo foram realizadas nos dias 22, 26, 29 e 30 de julho, entre 8 h e 11 h, e nos dias, 24 de agosto, 2 e 3 de setembro, no período entre 14 h e 17 h. Utilizando-se a denominação do dia Juliano para essas datas, elas correspondem a: 204, 208, 211, 212, 237, 246, 247 respectivamente. A irrigação foi realizada nos dias 212 e 247 durante 5 e 7 horas respectivamente, correspondendo a uma lâmina máxima aplicada, para os pontos mais próximos do aspersor, de 44,4 mm e 62,2 mm.

As avaliações da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) foram realizadas utilizando-se os sistemas LI-6400 e LI-6400-09, desenvolvidos pela companhia LICOR, EUA (HEALY et al., 1996). O CO<sub>2</sub> emitido pelo solo é captado pelos equipamentos e conduzido até uma câmara, que por sua vez é acoplada a um sistema de análise portátil LI-6400 que calcula as emissões de CO<sub>2</sub> do solo para o interior da câmara por espectroscopia de absorção óptica, na região espectral do infravermelho. Concomitantemente às leituras de emissão de CO<sub>2</sub>, foram realizadas medidas da temperatura do solo (TS) na camada de 0-20 cm de profundidade, utilizando-se um termômetro (termistor portátil), que é parte integrante do sistema ao qual a câmara para solos é acoplada. A umidade do solo (US) foi também medida em todos os pontos

estudados, utilizando-se um sistema portátil TDR-Campbel® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia), que avaliou a umidade disponível do solo (% em volume) na camada de 0-20 cm.

A variabilidade dos dados foi descrita pela estatística descritiva e ajuste de modelos aos semivariogramas experimentais da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo. A semivariância sob as hipóteses intrínsecas de estacionaridade pode ser estimada por:

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

em que  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância na distância de separação  $h$ ,  $N(h)$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ,  $z(x_i)$  é o valor da variável  $z$  no ponto  $x_i$ ;  $z(x_i + h)$  é o valor assumido pela variável  $z$  no ponto  $x_i + h$ . O gráfico do semivariograma pode apresentar um comportamento puramente aleatório ou sistemático, podendo ser descrito por modelos teóricos (ISAACS; SRIVATAVA, 1989). O valor da semivariância aumenta com o aumento da distância de separação entre locais amostrados, até um valor constante chamado de patamar ( $C_0 + C_1$ ). A distância onde ocorre essa estabilização é chamada de alcance

(a). O efeito pepita ( $C_0$ ) é o valor do intercepto do modelo com o eixo y.

O modelo ajustado ao semivariograma experimental é utilizado na técnica de interpolação denominada de krigagem, a qual fornece a melhor estimativa de um atributo em locais não amostrados dentro da área de estudo. Nesse processo as estimativas são feitas baseadas nos valores dos pontos vizinhos, e no conhecimento da correlação espacial existente entre os dados, fornecida pelos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais (WEBSTER; OLIVER, 1990). As estimativas dadas pela krigagem são sem tendência e variância mínima (“BLUE”).

Neste trabalho os modelos de semivariograma da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo foram estimados a partir do programa GS+ (GAMMA DESIGN, 1998) e os mapas dos padrões espaciais foram obtidos a partir do programa surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1995).

## Resultados e discussão

No dia 202, anterior ao início do experimento, ocorreu uma chuva de 14 mm na área, seguido de um longo período de seca durante os dias de avaliação. A umidade média do solo foi aproximadamente 14 % antes da primeira irrigação e aproximadamente 10 % antes da segunda. Anteriormente ao primeiro evento de irrigação, os valores médios de FCO<sub>2</sub> estiveram em torno de 2,46 e 2,39  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , nos dias 204 e 208, respectivamente, não ocorrendo um aumento na média da emissão de CO<sub>2</sub> após o evento de irrigação, 2,37 e 1,92  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nos dias 211 e 212 respectivamente (Tabela 1). Após o segundo evento de irrigação a média da emissão de CO<sub>2</sub> do solo passou de 0,87  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para 2,11  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  uma hora após o término da irrigação, no dia 247.

Esse aumento pode ser atribuído às condições de maior temperatura média do solo de 27,3 °C durante o segundo evento de irrigação comparado com a temperatura média do solo de 15,6 °C observada no primeiro evento de irrigação. Aumentos no fluxo de CO<sub>2</sub> do solo após a irrigação foram negativamente relacionados à temperatura do solo, que geralmente apresenta um efeito positivo, Verbug et al. (2005) afirmam que o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo apresenta uma menor relação, ou até mesmo relação inversa com a temperatura do solo quando essa excede 20 °C. Mariko, Urano e Asanuma (2007) observaram que eventos de molhamento aumentaram a emissão de CO<sub>2</sub> do solo de pastagem, em região semi-árida, desde que o teor volumétrico de água no solo fosse inferior a 10 %. A temperatura do solo é um dos fatores mais importantes no processo de emissão de CO<sub>2</sub>, durante e entre os dias, pois altas temperaturas levam a uma alta atividade microbiana nas camadas superiores do solo, resultando em um aumento na taxa de mineralização do C (FANG et al., 1998; CALDERÓN; JACKSON, 2002). Smart e Peñuelas (2005) observaram um aumento na emissão de CO<sub>2</sub> do solo durante 4 horas depois de chuvas, atribuindo tal aumento ao efeito físico de deslocamento e remoção do gás causado pelo caminhar da água dentro do perfil do solo. Os resultados indicam que quanto maior temperatura do solo, maior será a emissão induzida pelo molhamento, portanto, devemos considerar os valores de temperatura do solo no efeito da remoção física de CO<sub>2</sub> logo após eventos de molhamento. Altas temperaturas implicam em altas concentrações de CO<sub>2</sub> dentro do solo, causando maiores emissões induzidas pelo deslocamento e remoção do gás do interior do solo para atmosfera no processo de infiltração da água no solo, após a irrigação.



**Tabela 1.** Estatísticas descritivas da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo, para todos os dias de avaliação.

Emissão de CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )					
Dia	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	C.V.
204	2,46	0,85	0,26	0,52	35
208	2,39	0,68	-0,14	-0,02	28
211•	2,37	0,92	0,97	1,40	39
212••	1,92	0,63	0,91	2,95	33
237	1,02	0,26	0,50	-0,16	25
246	0,87	0,29	0,70	0,57	33
247•	2,11	1,37	0,80	-0,41	65

Temperatura do solo (°C)					
Dia	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	C.V.
204	15,9	0,48	-0,50	-0,33	3
208	15,3	0,50	-0,29	-0,54	3
211•	15,6	0,93	-0,99	0,93	6
212••	16,1	0,85	-0,09	-0,36	5
237	28,4	1,28	0,70	-0,21	4
246	27,9	1,16	0,42	0,15	4
247•	27,3	1,43	0,73	0,14	5

Umidade do solo (% volume)					
Dia	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	C.V.
204	17,75	3,79	0,45	-0,03	21
208	13,92	2,21	1,22	2,32	16
211•	19,79	10,28	0,96	-0,29	52
212••	18,04	7,77	1,44	1,61	43
237	12,13	1,63	-0,39	0,01	13
246	10,81	1,81	0,20	-0,71	17
247•	19,19	10,05	0,57	-1,23	52

N=48; • 01 hora após a irrigação; •• 25 horas após a irrigação; C.V.= Coeficiente de Variação.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais a zero). A condição de normalidade não é um pré-requisito fundamental para o emprego da análise geoestatística, o importante é que a distribuição não apresente grandes fugas nas extremidades da curva, que poderiam comprometer a análise (GONÇALVES; FOLEGATTI; MATA, 2001). As variáveis não apresentaram altos valores para os coeficientes de assimetria e curtose, a distribuição dos dados foi considerada próxima à distribuição normal, e a análise geoestatística foi realizada.

Foi observada estrutura de variabilidade espacial para a emissão de CO<sub>2</sub> do solo em todos os dias estudados (Tabela 2 e Figura 3). Houve modificações significativas nos padrões de variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub>, especialmente após os eventos de irrigação, pois os modelos mudaram de exponencial para esférico. O mesmo pode ser observado para a temperatura e umidade do solo, após a irrigação, quando os modelos mudaram de exponencial para esférico ou gaussiano (Tabela 2 e Figuras 4 e 5). O perfil triangular de distribuição de água do aspersor proporcionou níveis significativamente diferentes de umidade do solo ao longo do terreno

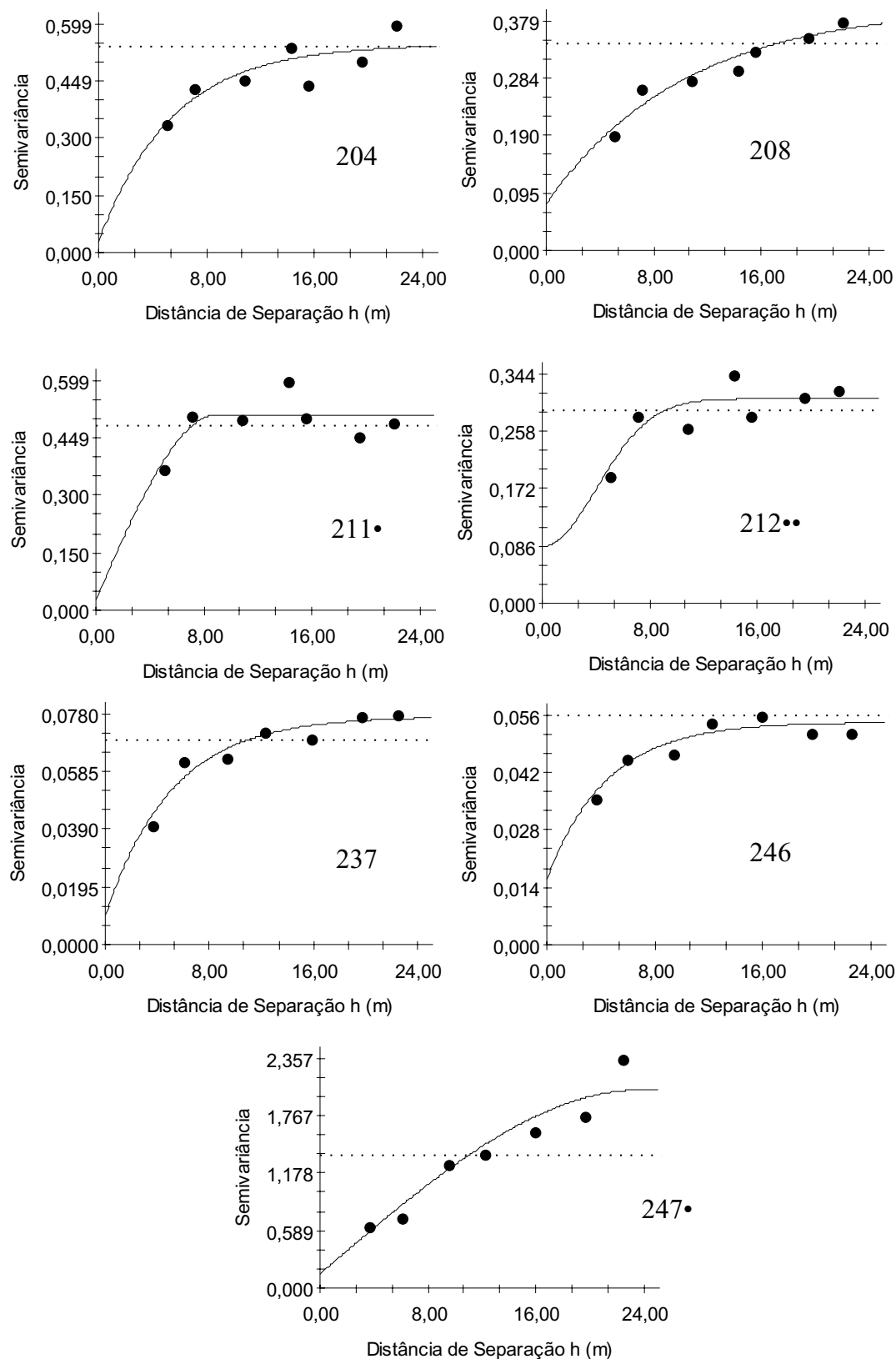
e, conseqüentemente, de temperatura e emissão de CO<sub>2</sub>. Kosugi et al. (2007), em estudo da variabilidade espacial da respiração do solo em floresta tropical, encontraram modelos de variabilidade esféricos para todos os períodos, e a umidade do solo foi o fator determinante da variabilidade espacial da respiração do solo naquelas condições. Ohashi e Gyokusen (2007), na caracterização da variabilidade espacial da respiração em floresta (*Cryptomeria japonica* D. Don), observaram diferentes modelos e alcances de variabilidade espacial durante as quatro estações do ano, sendo que os fatores que se correlacionaram com a respiração do solo (umidade do solo, pH, teores de nitrogênio e carbono, relação C/N e a altitude) também diferiram entre as estações. De

acordo com Isaaks e Srivastava (1989), modelos esféricos e gaussianos descrevem fenômenos menos erráticos, sem grandes variações quando comparados pontos próximos, em pequena escala. As mudanças nos padrões de variabilidade espacial observadas após os eventos de irrigação mostram um aumento na continuidade espacial dessas propriedades. Tais resultados sugerem que em solos desprovidos de vegetação em regiões tropicais, principalmente durante o período de seca, a umidade do solo é fator fundamental no processo de emissão do gás para a atmosfera, condicionando alterações não apenas na variabilidade temporal, mas também na variabilidade espacial desse fenômeno.

**Tabela 2.** Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, grau de variabilidade espacial, coeficiente de determinação e soma de quadrados de resíduo (SQR) para a emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo nos dias de avaliação.

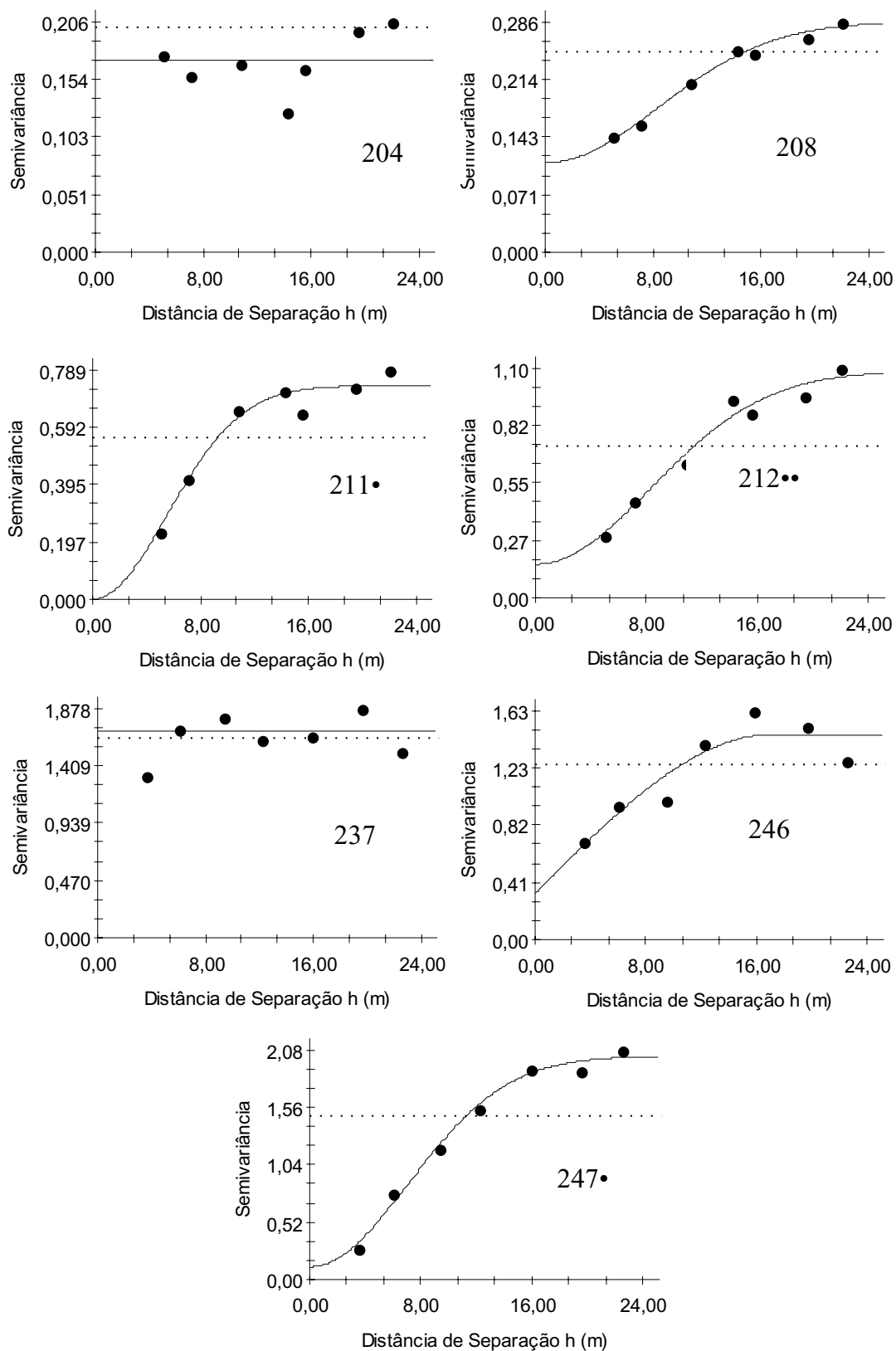
Emissão de CO <sub>2</sub>							
Dia	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> )	a (m)	r <sup>2</sup>	SQR
204	Exp	0,029	0,545	0,05	16,4	0,71	0,0125
208	Exp	0,057	0,360	0,16	20,2	0,91	1,63 E-03
211•	Esf	0,027	0,510	0,05	9,0	0,56	0,013
212••	Gau	0,085	0,307	0,28	9,9	0,70	4,4 E-03
237	Exp	0,010	0,077	0,13	15,4	0,92	7,8 E-05
246	Exp	0,016	0,054	0,31	13,4	0,89	3,2 E-05
247•	Esf	0,145	2,03	0,07	23,8	0,91	0,198
Temperatura do Solo							
Dia	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> )	a (m)	r <sup>2</sup>	SQR
204	E.P.P.	-----	-----	-----	-----	-----	-----
208	Gau	0,111	0,286	0,39	20,6	0,99	0,000252
211•	Gau	0,001	0,734	0,01	13,5	0,99	0,011
212••	Gau	0,160	1,084	0,15	20,3	0,97	0,017
237	E.P.P.	-----	-----	-----	-----	-----	-----
246	Esf	0,329	1,465	0,23	17,1	0,84	0,110
247•	Gau	0,116	2,024	0,06	17,4	0,99	0,030
Umidade do Solo							
Dia	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> )	a (m)	r <sup>2</sup>	SQR
204	Exp	4,430	12,35	0,36	18,7	0,58	7,130
208	E.P.P.	-----	-----	-----	-----	-----	-----
211•	Gau	31,400	159,3	0,20	18,5	0,94	595,000
212	Gau	2,700	53,75	0,05	11,0	0,83	145,000
237	E.P.P.	-----	-----	-----	-----	-----	-----
246	E.P.P.	-----	-----	-----	-----	-----	-----
247•	Gau	26,700	152,4	0,18	19,5	0,97	341,000

N= 48; • 01 hora após a irrigação; •• 25 horas após a irrigação; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gau = gaussiano; E.P. efeito pepita puro.

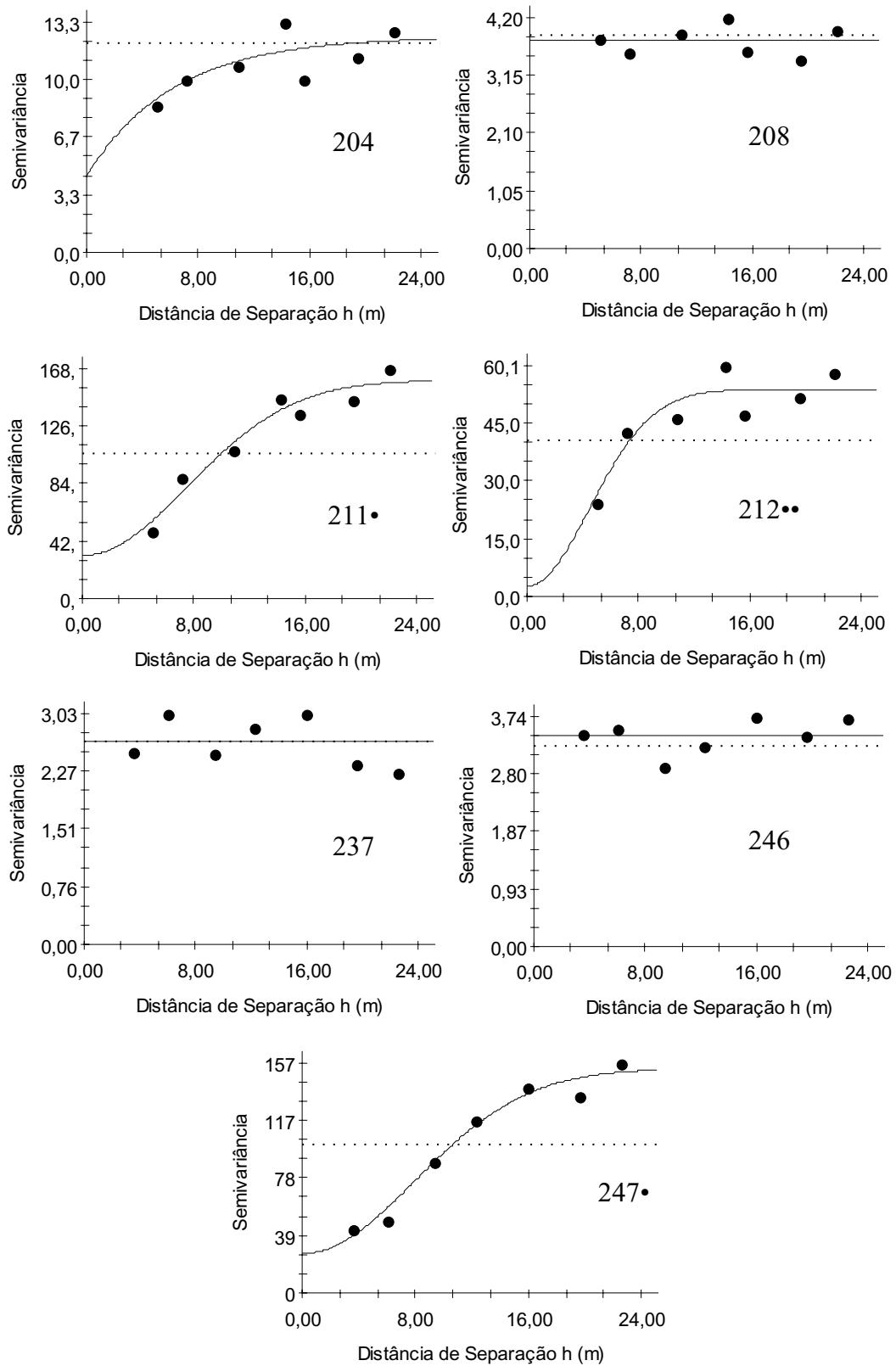


**Figura 3.** Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a emissão de CO<sub>2</sub> do solo. • 01 hora após a irrigação; •• 25 horas após a irrigação.





**Figura 4.** Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a temperatura do solo. • 01 hora após a irrigação; •• 25 horas após a irrigação.

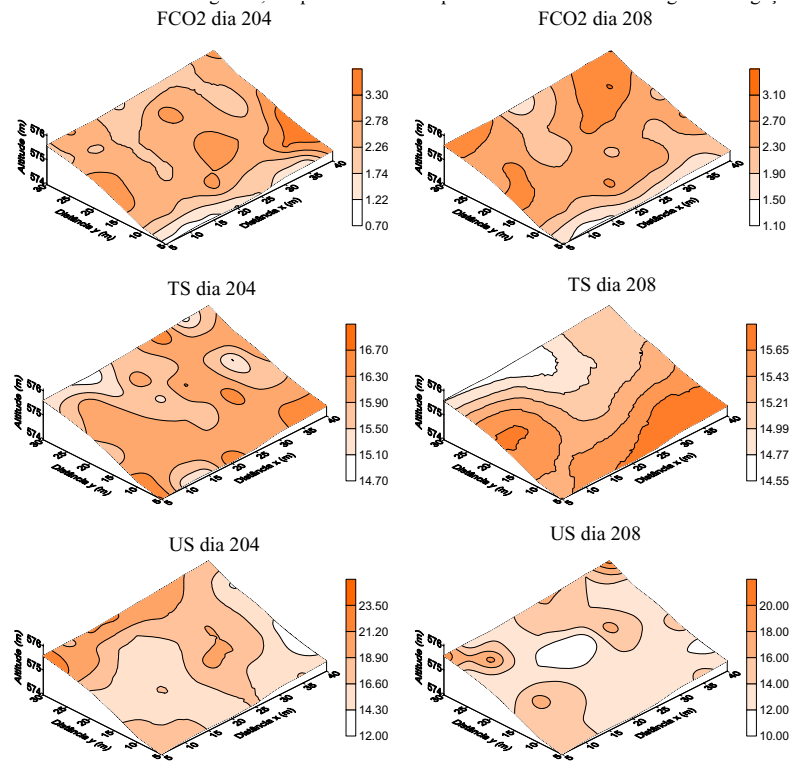


**Figura 5.** Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a umidade do solo. • 01 hora após a irrigação; •• 25 horas após a irrigação.

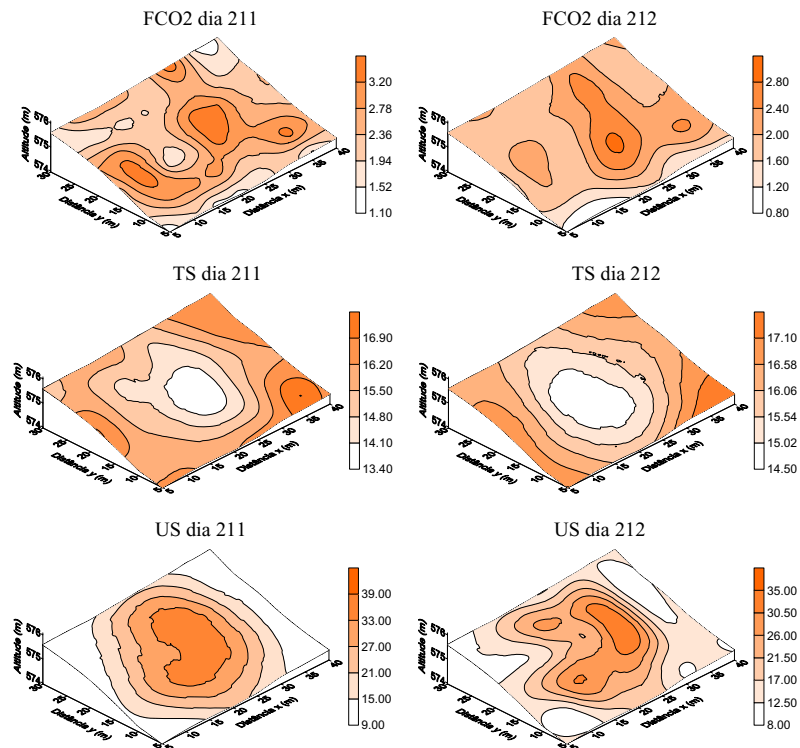
O alcance (a) é um importante parâmetro no estudo do semivariograma, pois representa a distância na qual não há correlação espacial entre os pontos de uma mesma variável. O alcance para FCO<sub>2</sub> apresentou maior valor (de 23,8 m) para o dia 247 e menor valor (de 9,0 m) para o dia 211, ambos uma hora após a irrigação. As variáveis TS, para os dias 204 e 237, e US, para os dias 208, 237 e 246, apresentaram efeito pepita puro, ou seja, não foi possível ajustar um modelo teórico aos semivariogramas experimentais. Dasselaar et al. (1998) encontraram valores de alcance da emissão de CO<sub>2</sub> do solo entre 55 e 75 m para diferentes dias em áreas vegetadas, enquanto Ohashi e Gyokusen (2007) encontraram alcances variando de 12 a 80m e Kosugi et al. (2007) encontraram valores de alcance variando de 4,4 a 24,7 m para a respiração e de 5,3 a 28,1 m para umidade do solo. Após o primeiro evento de irrigação houve uma diminuição nos valores dos alcances dos modelos de semivariograma para a FCO<sub>2</sub> de 20,2 para 9,0m e TS de 20,6 para 13,5m. Após o segundo evento de irrigação os alcances da FCO<sub>2</sub> aumentaram de 13,4 para 23,8m e os valores de TS mantiveram-se constantes, ao redor de 17m. Os valores do alcance para a umidade do solo aumentaram de 11,5 a 18,5m após o primeiro evento de irrigação e de ausência de dependência espacial a 19,5m após o segundo evento de irrigação.

A relação  $C_0/(C_0+C_1)$  permite a classificação da dependência espacial das propriedades estudadas (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). As emissões registradas nos dias 212 e 246 podem ser classificadas como moderada espacialmente dependente ( $0,25 < C_0/(C_0+C_1) < 0,75$ ). Por outro lado, as emissões registradas nos demais dias podem ser consideradas como possuindo forte dependência espacial, pois  $C_0/(C_0+C_1) \leq 0,25$  (CAMBARDELLA et al., 1994; CHIEN et al., 1997). Estudos conduzidos por La Scala Júnior et al. (2000) mostraram padrões de dependência espacial moderados em sua maioria para a emissão de CO<sub>2</sub> em solos desprovidos de vegetação.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os mapas de FCO<sub>2</sub>, TS e US na área estudada. A distribuição dos valores de FCO<sub>2</sub> na área nesses dias não indica uma tendência de concentração dos maiores e menores valores em locais específicos. Por outro lado, após o primeiro evento de irrigação, as emissões de CO<sub>2</sub> do solo dos dias 211 e 212 apresentaram concentração dos maiores valores de FCO<sub>2</sub> próxima ao centro, onde foram aplicadas as maiores lâminas de água (Figura 7). Comparando-se esses mapas, observa-se que 25 horas após irrigação (dia 212) as emissões refletem melhor o perfil de molhamento apresentado na Figura 2 do que as emissões registradas uma hora após a irrigação (dia 212). Pode-se ainda identificar faixas localizadas na região inferior das Figuras 6 e 7, onde se apresentam os menores valores de cotas, em que mesmo após o evento de irrigação o FCO<sub>2</sub> também apresentou os menores valores, comparados aos demais encontrados no restante da área. Nesses dias (211 e 212), fica claro também a influência do molhamento na distribuição espacial de TS e US, com maiores valores de US e menores valores de TS ao redor do centro. Um aumento na emissão de CO<sub>2</sub> do solo nos locais onde a temperatura do mesmo foi reduzida e a umidade aumentada indica que a umidade era o fator limitante à atividade microbiana, a despeito da redução da temperatura nesses locais. A variação da temperatura do solo ao longo da área nos dias 211 e 212 foi de aproximadamente 4 °C, enquanto essa variação antes do molhamento (dias 204 e 208) era de no máximo 2 °C. A variação da US na área após o molhamento é maior quando comparada com aquela anteriormente à irrigação, porém destaca-se o fato que, mesmo após a irrigação, houve pontos não irrigados que apresentaram valores de US inferiores àqueles encontrados antes da irrigação. Isso se deve ao fato já mencionado na discussão da Figura 2, de que nem todos os pontos da malha recebiam água de irrigação.



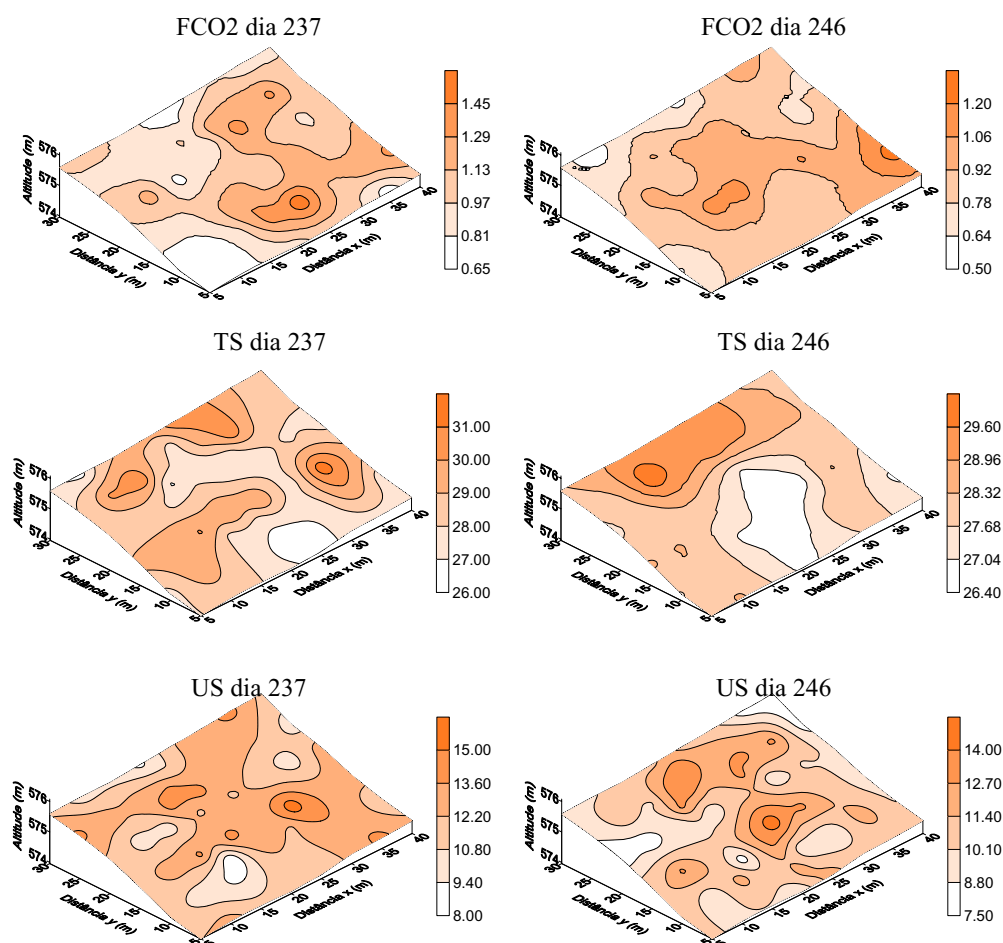
**Figura 6.** Mapas de padrão espacial de emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub> em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), de temperatura (TS em °C) e de umidade do solo (US em % volume) nos dias 204 e 208.



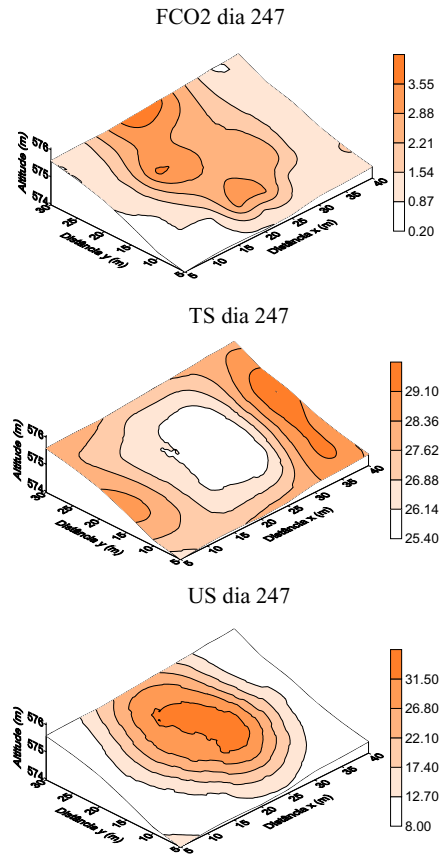
**Figura 7.** Mapas de padrão espacial de emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub> em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), de temperatura (TS em °C) e de umidade do solo (US em % volume) nos dias 211 e 212, 01 hora e 25 horas após a irrigação, respectivamente.

Após um período de 36 dias sem ocorrência de chuvas e irrigação, foram realizadas novas avaliações de FCO<sub>2</sub>, TS e US, nos dias 237, 246 e 247. Os valores médios de FCO<sub>2</sub> foram 1,02 e 0,87  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nos dias 237 e 246, respectivamente. Os mapas do padrão espacial de FCO<sub>2</sub> nesses dias apresentam uma distribuição quase sem agrupamentos de maiores ou menores valores em locais específicos da área (Figura 8). Entretanto, uma hora após o segundo evento de molhamento, que ocorreu no dia 247 (Figura 9), houve aumento

da média do FCO<sub>2</sub>, que subiu de 0,87  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (246) para 2,11  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (247). Além disso, o posicionamento das maiores e menores emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do terreno apresenta um nítido agrupamento dos maiores valores próximo ao aspersor. Semelhantemente ao ocorrido após o primeiro evento de irrigação (212), no dia 247 fica claro o efeito da irrigação na distribuição espacial de TS e US, com maiores valores da TS na periferia da área e no caso da US, maiores valores ao centro da área.



**Figura 8.** Mapas de padrão espacial de emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub> em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) de temperatura (TS em °C) e de umidade do solo (US em % volume) nos dias 237 e 246.



**Figura 9.** Mapas de padrão espacial de emissão de  $\text{CO}_2$  (FCO2 em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), de temperatura (TS em  $^{\circ}\text{C}$ ) e de umidade do solo (US em % volume) no dia 247, uma hora após irrigação.

Na Tabela 3 apresentam-se as estimativas dos coeficientes de correlação linear entre a FCO2, TS e US, para os dias estudados. Apesar de FCO2 se mostrar mais relacionada à variabilidade temporal da TS e US em experimentos diversos (EDWARDS, 1975; SINGH; GUPTA, 1977; HOWARD; HOWARD, 1993) tem-se nesta pesquisa uma situação diferente, pois a lâmina de irrigação não é uniforme na área, afetando fortemente as variáveis estudadas. Os coeficientes de correlações lineares

significativas ( $p < 0,05$ ) encontradas entre os valores de FCO2 e TS e US, indicam que as variações da emissão, de forma geral, estiveram negativamente correlacionadas às variações da temperatura do solo e positivamente relacionadas à umidade do solo, após as irrigações. Nota-se também, que após a segunda irrigação, terminada uma hora antes das avaliações do dia 247, a emissão de  $\text{CO}_2$  esteve ainda mais correlacionada com a temperatura e umidade do solo, do que nos dias 211 e 212, após a primeira irrigação.



**Tabela 3.** Valores estimados da correlação linear entre o fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO2) em cada dia, com a temperatura (TS) e com a umidade (US). Os números seguidos de asterisco representam índice de correlação significativo (p < 0,05).

FCO2 (dia)	TS	US
FCO2 (204)	0,13	-0,08
FCO2 (208)	-0,21	0,05
FCO2 (211)•	-0,35*	0,41*
FCO2 (212)••	-0,36*	0,61*
FCO2 (237)	-0,18	0,07
FCO2 (246)	-0,09	0,13
FCO2 (247)•	-0,66*	0,76*

• 01 hora após a irrigação. •• 25 horas após a irrigação.

## Conclusões

As emissões de CO<sub>2</sub> do solo foram afetadas positivamente pelo molhamento promovido por dois eventos de irrigação em área descoberta de vegetação e período sem chuvas. A irrigação aumentou a continuidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, tornando-a menos errática. A diferença de molhamento na área ocasionada pela aspersão provocou mudança na distribuição das maiores emissões, temperaturas e umidades do solo, sendo verificada correlação linear negativa e significativa entre a emissão e a temperatura do solo; e positiva e significativa entre a emissão e a umidade do solo, após irrigação. Os resultados indicam que o fator limitante à atividade microbiana neste estudo era a umidade do solo, pois, apesar da diminuição da temperatura do solo nos locais mais molhados, a emissão de CO<sub>2</sub> do mesmo aumentou.

## Referências

- CALDERÓN, F. J.; JACKSON, L. E. Rototillage, disking, and subsequent irrigation: effects on soil dynamics, microbial biomass, and carbon dioxide efflux. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 31, n. 3, p. 752-758, 2002.
- 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.
- CHIEN, Y.; LEE, D.; GUO, H.; HOUNG, K. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science*, Baltimore, v. 162, n. 4, p. 291-298, 1997.
- DASSELAAR, A. V. P. V.; CORRÉ, W. J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, A. K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON, L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v. 62, n. 33, p. 810-817, 1998.
- EDWARDS, N. T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 39, n. 2, p. 361-365, 1975.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999. 412 p.
- FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.
- GAMMA DESIGN. (GS+) *Geostatistics for the environmental sciences*. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.
- GOLDEN SOFTWARE. *Surfer for windows, Release 6.01*. Surface Mapping System, 1995.
- 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*, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.
- HEALY, R. W.; STRIEGL, R. G.; RUSSEL, T. F.; HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-

- atmosphere gas exchange: identification of physical processes. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 60, n. 3, p. 740-747, 1996.
- HOWARD, D. M.; HOWARD, P. J. A. Relationships between CO<sub>2</sub> evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 25, n. 11, p. 1537-1546, 1993.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Third assessment report, climate change 2001*. Disponível em: <[http://www.grida.no/climate-ipcc\\_tar](http://www.grida.no/climate-ipcc_tar)>. Acesso em: 1 jun. 2008.
- ISAAKS, E. H.; SRIVATAVA, R. M. *Applied geostatistics*. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
- JOHNSON, G. A.; MORTENSEN, D. A.; GOTWAY, C. A. Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using geostatistics. *Weed Science*, Champaign, v. 44, n. 3, p. 704-710, 1996.
- KIM, J.; VERMA, Y. Soil surface CO<sub>2</sub> flux in a Minnesota peatland. *Biogeochemistry*, Dordrecht, v. 18, n. 1, p. 37–51, 1992.
- KOSUGI, Y.; MITANI, T.; ITHO, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSOU, N.; TAKANASHI, S.; OHKUBO, S.; NIK, A. R. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 147, n 1/2, p. 35-47, 2007.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR J.; PEREIRA G. T.; CORÁ J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.
- MARIKO, S.; URANO, T.; ASANUMA, J.; Effects of irrigation on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from Mongolian steppe soil. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 333, n. 1, p. 118-123, 2007.
- OHASHI, M.; GYOKUSEN, K. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 39, n. 5, p. 1130-1138, 2007.
- PAUSTIAN, K.; ANDREN, O.; JANZEN, H. H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M.; WOOMER, P. L. Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management*, Oxon, v. 13, n. 4, p. 230–244, 1997.
- RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, Stockholm, v. 44, n. 2, p. 81–99, 1992.
- RIETZ, D. N.; HAYNES, R. J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 35, n. 6, p. 845-854, 2003.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. *Plant Physiology*. 3<sup>th</sup> ed. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1985. 682 p.
- SILVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK G. Variabilidade espacial de atributos de solo e *Crotalaria juncea* L. em áreas severamente erodida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 115-122, 1998.
- SINEGANI, A. A. S.; MAHBOOBI, A. A.; NAZARIZADEH, F. The effect of agricultural practices on the spatial variability of arbuscular mycorrhiza spores. *Turkish Journal of Biology*, Ankara, v. 29, n. 3, p. 149-153, 2005.
- SINGH, J. S.; GUPTA, S. R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, Bronx, v. 43, n. 4, p. 449-528, 1977.
- SMART, D. R.; PEÑUELAS, J. Short-term CO<sub>2</sub> emissions from planted soil subject to elevated CO<sub>2</sub> and simulated precipitation. *Applied Soil Ecology*, Amsterdam, v. 28, p. 247-57, 2005.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.
- UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. *Estação agroclimatológica da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – campus de Jaboticabal*. Disponível em: <<http://www.exatas.fcav.unesp.br/estacao>>. Acesso em: 5 dez. 2007.
- VERBURG, P. J.; LARSEN, J.; JOHNSON, D. W.; SCHORRAN, D. E.; ARNONE III, J. A. Impacts of an anomalously warm year on soil CO<sub>2</sub> efflux in experimentally manipulated tallgrass prairie ecosystems. *Global Change Biology*, Oxford, v. 11, n. 10, p. 1720–1732, 2005.
- WANG, G.; GERTNER, G.; SINGH, V.; SHINKAREVA, S.; PARYSOW, P.; ANDERSON, A. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall-runoff erosivity R factor. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 153, n. 1/2, p. 143-155, 2002.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. *Statistical methods in soil and land resource survey*. New York: Oxford University Press, 1990. 316 p.

WICHERN, F.; LUEDELING, E.; MÜLLER, T.; JOERGENSEN, R. G.; BUERKERT, A. Field measurements of the CO<sub>2</sub> evolution rate under different crops during an irrigation cycle in a mountain oasis of Oman. *Applied Soil Ecology*, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 85-91, 2004.

WOFSY, S. C.; HARRISS, R. F. *The north american carbon program (nacp)*: report of the nacp committee of

the u.s. Washington: Global Change Research Program, 2002. Disponível em: <<http://www.esig.ucar.edu/nacp/>>. Acesso em: 26 maio 2008.

ZANINI, J. R.; BARRETO, A. K. G.; LA SCALA JÚNIOR, N. Taxa de emissão de CO<sub>2</sub> de um latossolo fertirrigado com ácido fosfórico por gotejamento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p.179-188, 2005.

