



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504>

Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira

Juliano L. Iamaguti¹, Mara R. Moitinho¹, Daniel D. B. Teixeira²,
Elton da S. Bicalho¹, Alan R. Panosso³ & Newton La Scala Junior¹

¹ Departamento de Ciências Exatas/Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias/Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, SP. E-mail: jliamaguti@gmail.com; maramoitinho@gmail.com (Autora correspondente); eltonbicalho@ig.com.br; lascala@fcav.unesp.br

² Departamento de Solos e Adubos/Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias/Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, SP. E-mail: daniel.dbt@hotmail.com

³ Departamento de Matemática/Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP. E-mail: arpanosso@yahoo.com.br

Palavras-chave:

respiração do solo
subsolagem
cana-de-açúcar
gases do efeito estufa

RESUMO

O preparo mecânico do solo é uma das práticas agrícolas que contribuem para o aumento da perda de carbono via emissão de CO₂ do solo (FCO₂). Com este trabalho objetivou-se investigar o efeito de três sistemas de preparo do solo na FCO₂, temperatura e umidade do solo em área de reforma da cultura de cana-de-açúcar. A área experimental foi constituída de três parcelas, cada uma recebendo um dos preparos do solo: preparo convencional (PC), subsolagem convencional (SC) e subsolagem localizada (SL). A FCO₂, temperatura e a umidade do solo foram avaliadas durante o período total de 17 dias. A FCO₂ foi maior no preparo PC (0,75 g CO₂ m⁻² h⁻¹). A temperatura do solo não diferiu ($p > 0,05$) entre as subsolagens: SL (26,2 °C) e SC (25,9 °C). A umidade do solo foi maior na SL (24%), seguida pela SC (21,8%) e preparo PC (18,3%). Apenas no preparo PC foi observada correlação significativa ($r = -0,71$; $p < 0,05$) entre FCO₂ e a temperatura do solo. O preparo PC apresentou emissão total (2.864,3 kg CO₂ ha⁻¹), superior às emissões nas subsolagens: SC (1.970,9 kg CO₂ ha⁻¹) e SL (1.707,7 kg CO₂ ha⁻¹). A conversão do sistema de preparo PC para a SL diminuiu as emissões de CO₂ do solo, reduzindo a contribuição da agricultura para o aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera.

Key words:

soil respiration
subsoiling
sugarcane
greenhouse gases

Soil tillage and emission of CO₂, soil temperature and soil moisture in a sugarcane area

ABSTRACT

Soil tillage is one of the agricultural practices that may contribute to increase the loss of carbon through emission of CO₂ (FCO₂). The aim of this study was to investigate the effect of three soil tillage systems on FCO₂, soil temperature and soil moisture in a sugarcane area under reform. The experimental area consisted of three tillage plots: conventional tillage (CT), conventional subsoiling (CS), and localized subsoiling (LS). FCO₂, soil temperature and soil moisture were measured over a period of 17 days. FCO₂ showed the highest value in CT (0.75 g CO₂ m⁻² h⁻¹). Soil temperature presented no significant difference ($p > 0.05$) between LS (26.2 °C) and CS (25.9 °C). Soil moisture was higher in LS (24%), followed by CS (21.8%) and CT (18.3%). A significant correlation ($r = -0.71$; $p < 0.05$) between FCO₂ and soil temperature was observed only in CT. The conventional tillage presented a total emission (2,864.3 kg CO₂ ha⁻¹) higher than the emissions observed in CS (1,970.9 kg CO₂ ha⁻¹) and LS (1,707.7 kg CO₂ ha⁻¹). The conversion from CT to LS decreased soil CO₂ emissions, reducing the contribution of agriculture in increasing the concentration of greenhouse gases in the atmosphere.

INTRODUÇÃO

O aumento da concentração global dos gases de efeito estufa, tais como, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) contribuem para a alteração do balanço da entrada e saída da energia proveniente da radiação solar no sistema Terra-atmosfera, tendendo a elevar a temperatura média do planeta e provocar as mudanças climáticas globais (Solomon et al., 2007).

A agricultura mundial é responsável pela emissão de quantidades significativas de CO_2 , CH_4 e N_2O para atmosfera contribuindo com 11, 47 e 58% do total das emissões antrópicas desses gases, respectivamente (IPCC, 2007).

No Brasil, a participação da agricultura na emissão desses gases no total das emissões antrópicas é acentuada, sendo 75, 78 e 91% para CO_2 , CH_4 e N_2O , respectivamente (Cerri et al., 2007) quando então se considera a conversão de áreas naturais em agrícolas. No país, a área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2013/14 é de aproximadamente 8,89 milhões de hectares sendo a produção estimada em 653,8 milhões de toneladas. Na mesma safra, para o Estado de São Paulo, maior produtor nacional de cana-de-açúcar, são estimados 4,7 milhões de hectares cultivados e uma produção de 367,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2014). Estima-se que 722,3 mil hectares da área pertencente ao estado de São Paulo foram reformados na safra 2013/14 (CANASAT, 2014).

As emissões oriundas do solo, associadas à perda de carbono do solo via emissão de CO_2 em áreas agrícolas, frequentemente não são consideradas devido à sua grande variação no tempo (Schwendenmann et al., 2003; Epron et al., 2006) e no espaço (Teixeira et al., 2012) e por ser um fenômeno resultante de uma interação complexa das propriedades físicas, químicas, biológicas e climáticas (Epron et al., 2006; Kasper et al. 2009; Lal, 2009; Ussiri & Lal, 2009; Moitinho et al., 2013; Silva-Olaya et al., 2013).

Uma vez identificados os fatores que influenciam a emissão de CO_2 do solo em áreas agrícolas, abrem-se oportunidades para adoção de práticas que reduzam as emissões líquidas desse gás. A exemplo da adoção de práticas agrícolas mais conservacionistas, como o cultivo mínimo e o plantio direto que em substituição ao plantio convencional aumentam o potencial de sequestro e o estoque de carbono no solo (La Scala et al., 2006; Cerri et al., 2007). Assim, a conversão do sistema de preparo convencional para o preparo reduzido ou mínimo do solo pode contribuir para a redução da emissão de CO_2 do solo para a atmosfera (Lal, 2009).

O preparo do solo tem, por objetivo, a desagregação das camadas compactadas do solo, proporcionando um ambiente adequado ao crescimento e desenvolvimento radicular das plantas diminuindo a resistência mecânica ao crescimento das raízes e melhorando as condições de aeração e infiltração de água no solo (Fortin et al., 1996). No entanto, a quebra dos agregados do solo expõe parte do carbono orgânico lábil protegido em seu interior e o torna disponível à degradação microbiana (Reicosky & Archer 2007; Lal, 2009). Neste processo os microrganismos obtêm energia por meio da oxidação de carboidratos, com conseqüente produção de água e CO_2 (Six et al., 2006). Além disso, o preparo intensivo do solo pode reduzir a cobertura vegetal que protege o solo,

expondo-o à radiação solar o que resulta, na elevação da temperatura (Licht & Al-Kaisi, 2005) e redução da umidade do solo (Schwartz et al., 2010), favorecendo a atividade microbiana.

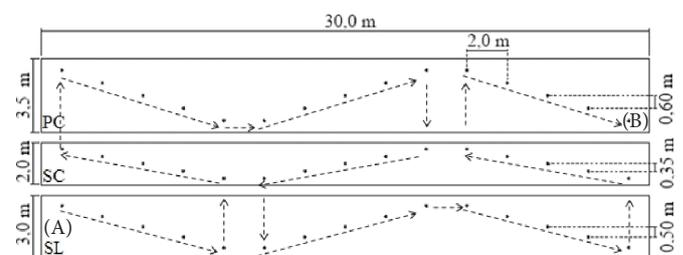
Desta forma e considerando que no tipo de mobilização causada pela operação mecanizada a porção de solo impactado e a presença ou não de cobertura vegetal influenciam na magnitude da perda de CO_2 dos solos objetivou-se, com este trabalho, investigar o efeito de três sistemas de preparo do solo na emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo durante a reforma do canal no interior do Estado de São Paulo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em janeiro de 2013 no município de Barrinha, Estado de São Paulo. A área experimental, cujas coordenadas centrais são $21^\circ 13' \text{ S}$ e $48^\circ 06' \text{ O}$, está localizada a 543 m de altitude. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico de textura muito argilosa (Santos et al., 2013) e relevo plano com declividade menor que 0,5%. No local cultiva-se cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) há mais de oito anos com o sistema de colheita mecanizada, sendo a última reforma do canal executada no ano de 2008.

De acordo com a classificação de Thornthwaite, o clima local pode ser definido como B1rAa', tipo Megatérmico Úmido, com pouco ou nenhum déficit hídrico, sendo a evapotranspiração de verão menor que 35% da evapotranspiração anual. A temperatura média anual é de 23° C e a precipitação média anual é de 1.443 mm, com período de maior concentração nos meses de outubro a março e precipitações mais espaçadas e com menores intensidades nos meses de abril a setembro.

No dia 28 de janeiro de 2013 foi instalado o experimento em três parcelas cada uma contendo 15 pontos e representadas por colares de PVC totalizando 45 pontos amostrais utilizados para as avaliações da emissão de CO_2 (FCO_2), temperatura (T_{solo}) e umidade (U_{solo}) do solo (Observação: Os pontos indicam a posição dos colares de PVC na parcela utilizados para as avaliações da emissão de CO_2 do solo. As setas indicam o caminhamento realizado iniciando em (A) terminando em (B), Figura 1). Cada parcela recebeu um tipo de preparo do solo constituído por preparo convencional (PC), subsolagem convencional (SC) e subsolagem localizada (SL) em área de reforma de canal.



Obs.: Os pontos indicam a posição dos colares de PVC na parcela utilizados para as avaliações da emissão de CO_2 do solo. As setas indicam o caminhamento realizado iniciando em (A) terminando em (B)

Figura 1. Croqui da área experimental indicando as parcelas com preparo convencional (PC), subsolagem convencional (SC) e subsolagem localizada (SL)

O delineamento experimental utilizado para a avaliação da FCO₂, temperatura e umidade do solo foi o inteiramente casualizado com parcelas subdivididas no tempo. Não foram consideradas pseudo-replicações sendo o sorteio aleatório utilizado para a escolha das parcelas.

As parcelas experimentais apresentaram área variável com 30 m de comprimento e largura igual do implemento utilizado em cada sistema de preparo (Figura 1). Em cada parcela foram distribuídos ordenadamente em diagonal e inseridos no solo, 15 colares de PVC (diâmetro de 0,10 m) numa profundidade de 0,03 m, sendo utilizados para a acoplagem da câmara de solo para a avaliação da emissão de CO₂. As parcelas foram consideradas homogêneas quanto às propriedades físicas do solo (textura e estrutura inicial): densidade (1,35 g cm⁻³), volume total de poros (50,55%), argila (58,54%), silte (20,23%) e areia total (17,20%) e químicas do solo: teor de matéria orgânica (32 g dm⁻³) e pH (5,4).

Previamente às operações de preparo do solo foi realizada a eliminação mecânica da soqueira da cana-de-açúcar em área total no dia 29 de maio de 2012, sendo uma de suas funções o controle da população do bicudo da cana-de-açúcar (*Sphenophorus levis*). A operação foi feita com implemento constituído de enxadas rotativas que, em alta rotação, cortam o solo e a soqueira, havendo a quebra dos torrões de solo e a separação das raízes da soqueira do contato com o solo. Após a eliminação mecânica da soqueira, no dia 1 de junho de 2012, foram realizadas as seguintes operações, em sequência: calagem, utilizando calcário dolomítico com PRNT de 90%, a uma quantidade de 2,3 t ha⁻¹ e gessagem, sendo aplicado gesso agrícola (CaSO₄) a uma quantidade de 1,24 t ha⁻¹ e passagem de grade niveladora na profundidade de trabalho de 0,20 m.

As operações mecanizadas de preparo do solo foram realizadas no dia 28 de janeiro de 2013 com o uso de um trator CASE MX240 de 240 cv de potência a 2.000 rpm, ao qual foram acoplados os implementos utilizados em cada sistema de preparo do solo.

O preparo convencional (PC) consistiu na utilização de uma grade intermediária de arrasto de dupla ação deslocada, com 28 discos de 28" do tipo recortado sendo 14 discos na seção dianteira e 14 na seção traseira. A largura de trabalho do implemento é de 3,50 m e a profundidade de trabalho de 0,25 m. Foram realizadas duas passadas com a grade a uma velocidade média de aproximadamente 7 km h⁻¹, a segunda imediatamente após a primeira, de forma a simular o efeito da grade aradora. Neste preparo o consumo médio de diesel é alto (40 L ha⁻¹) e a capacidade operacional é baixa (1,2 ha h⁻¹). Para medir o consumo de diesel, como as operações de cada trator são controladas com o GPS foi possível verificar a quantidade de área preparada; considerando que o trator inicia as operações com o tanque de combustível completo, no próximo reabastecimento completo foi possível medir o volume de combustível utilizado na operação anterior; portanto, dividiu-se o volume de diesel do reabastecimento pela área trabalhada na operação anterior ao reabastecimento.

A subsolagem convencional (SC) consistiu na utilização de um subsolador de arrasto constituído de 5 hastes do tipo reta com ponteira estreita, com espaçamento de 0,40 m entre hastes, um disco de corte por haste e dois rolos destorroadores. A largura de trabalho do implemento é de 2,00 m e a

profundidade de trabalho de 0,40 a 0,45 m. O subsolador foi passado uma vez sobre a parcela correspondente a este preparo, na velocidade média de aproximadamente 3,5 km h⁻¹. Na subsolagem convencional o solo das camadas sub-superficiais de toda a área é mobilizado, sendo a palha da cana-de-açúcar cortada apenas na linha de passagem da haste do subsolador e incorporada ao solo. Semelhante ao preparo convencional, neste preparo o consumo médio de diesel e a capacidade operacional são de 40 L ha⁻¹ e 1,2 ha h⁻¹, respectivamente.

A subsolagem localizada (SL) foi realizada com um subsolador montado modificado constituído de 4 hastes do tipo reta, cada uma com ponteira estreita dotada de uma asa voltada para o lado interno da linha de plantio e dois rolos destorroadores. Cada par de hastes subsola uma linha de plantio, portanto o implemento utilizado subsola 2 linhas de plantio espaçadas 1,50 m, sendo a largura de trabalho de 3,00 m e a profundidade de trabalho de 0,40 a 0,45 m. O subsolador modificado foi passado uma vez sobre a parcela correspondente a este preparo a uma velocidade média de aproximadamente 4,0 km h⁻¹.

A subsolagem localizada difere da convencional na área mobilizada de solo pois a subsolagem é realizada apenas na linha de plantio da cana-de-açúcar mantendo a camada compactada na entrelinha, o que oferece maior resistência ao rolamento e reduz a patinagem das máquinas. O volume de solo desagregado é ainda menor e a incorporação de resíduos vegetais é mínima. Há um consumo médio menor de diesel (20 L ha⁻¹ para subsolador de 2 linhas) e maior capacidade operacional (1,9 ha h⁻¹ para subsolador de 2 linhas). A operação é totalmente controlada por piloto automático guiado por sistema Trimble RTK com precisão de 0,02 m, sendo o caminho realizado pelo trator com subsolador registrado no sistema de piloto automático e transferido para as máquinas de plantio e de colheita, para que trafeguem sobre a camada compactada inicialmente pelo trator com subsolador.

As avaliações da FCO₂, T_{solo} e U_{solo} foram realizadas nos dias 29 e 31 de janeiro e 1, 2, 3, 5, 6 e 14 de fevereiro de 2013, no período da manhã, com início às 8 h e término às 9 h 30 min. Em cada preparo foram obtidos 120 valores para a emissão de CO₂ e temperatura do solo (15 pontos e 8 dias de medições). A avaliação da umidade do solo não foi realizada nos dias 5 e 6 após o preparo (2 e 3 de fevereiro de 2013) devido à quebra de uma das hastes do TDR-Campbell. Portanto, foram obtidos 90 valores de umidade do solo (15 pontos e 6 dias de medições) em cada preparo.

A emissão de CO₂ do solo foi determinada utilizando-se uma câmara de solo LI-8100 (LI-COR Bioscience, Nebraska, EUA). Tal sistema é fechado com volume interno de 854,2 cm³ e área de contato com o solo de 83,7 cm², sendo acoplada sobre o colar de PVC. A câmara se constitui de um sistema de análise de fotossíntese que analisa a concentração de CO₂ em seu interior por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho. O modo de medida leva 90 s, em cada ponto, para a determinação da emissão de CO₂ do solo, sendo a concentração de CO₂ dentro da câmara determinada a cada 2,5 s.

A temperatura do solo foi monitorada na camada de 0,0-0,20 m de profundidade, com o uso de um termopar acoplado

ao sistema LI-8100, sendo constituído por uma haste com 6,4 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento. Esta haste é inserida no solo, a uma distância de 10 a 15 cm do ponto no qual a avaliação de CO_2 é realizada.

A umidade do solo, por sua vez, foi medida utilizando-se o sensor TDR-Campbell® portátil (Time-Domain Reflectometer), que possui duas hastas metálicas com 5 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, as quais são inseridas no solo, a uma distância de 10 a 15 cm a partir da borda do colar de PVC. O valor da umidade do solo é derivado a partir do tempo que uma corrente elétrica leva para percorrer a distância de 32 mm de uma haste a outra.

Os valores da emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo foram previamente analisados para verificação da presença de outliers, sendo posteriormente submetidos a análise de variância (ANOVA). Ao verificar diferenças significativas entre os tratamentos pela ANOVA, as médias entre os tratamentos foram comparadas pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Foram também realizadas análises de correlação linear para determinação do grau de relacionamento entre as variáveis analisadas. As emissões acumuladas de CO_2 do solo, durante todo o período de estudo, foram estimadas pelo método da área abaixo das curvas de emissão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O preparo convencional apresentou emissão média de $0,749 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, sendo esta significativamente ($p < 0,05$) superior à dos demais preparos. Neste preparo houve uma emissão média 42,4% superior à do preparo SC e 66,8% superior ao SL. O preparo SC apresentou uma emissão média de $0,526 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, a qual não diferiu significativamente ($p > 0,05$) da emissão no preparo SL ($0,449 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). A emissão máxima de CO_2 foi observada no preparo PC ($1,441 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) e a mínima no preparo SL ($0,143 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (Tabela 1).

Esses resultados são similares aos obtidos por Teixeira et al. (2011) ao avaliar o efeito da utilização da enxada rotativa na presença e ausência de cobertura de palha da cana-de-açúcar em relação à parcela sem preparo e sem cobertura de palha e observaram que os maiores valores de FCO_2 ($0,777 \text{ g CO}_2$

$\text{m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) foram registrados nas áreas com utilização da enxada rotativa na presença de palha. La Scala et al. (2006) verificaram, avaliando a FCO_2 após preparo convencional (PC), reduzido (PR) e solo sem preparo (SP) também em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, que a FCO_2 total foi maior no PC ($1,361,8 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$) quando comparado ao PR ($894,9 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$) e SP ($523,5 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$).

Aumentos na FCO_2 induzido pelo preparo têm sido associados à intensidade do preparo do solo sendo um fator determinante da variabilidade do fluxo de CO_2 do solo em períodos curtos (La Scala et al., 2009; Morell et al., 2010). A atividade decompositora dos microrganismos também é intensificada imediatamente após o preparo do solo devido à exposição do carbono antes protegido no interior dos agregados, à maior oxigenação do solo e às temperaturas mais elevadas (Reicosky & Archer, 2007), ocasionando aumentos na emissão de CO_2 e decréscimo do carbono estocado no solo (Lal, 2009). Entretanto ocorre, após certo período, a redução das frações lábeis da matéria orgânica do solo e a atividade basal microbiana decresce (Six et al., 2006). Já o efeito do preparo do solo em longo prazo sobre o fluxo de CO_2 parece estar mais relacionado às alterações nas propriedades do solo, principalmente na estrutura do solo (Kasper et al., 2009).

A temperatura média do solo (T_{solo}) foi significativamente maior ($p < 0,05$) no preparo PC ($26,6 \text{ }^\circ\text{C}$). Os preparos SC ($25,9 \text{ }^\circ\text{C}$) e SL ($26,2 \text{ }^\circ\text{C}$) não diferiram significativamente entre si ($p > 0,05$). O valor máximo da T_{solo} foi medido em PC ($27,8 \text{ }^\circ\text{C}$) e o mínimo em SC ($24,7 \text{ }^\circ\text{C}$) (Tabela 1). Silva-Olaya et al. (2013) obtiveram, em estudo desenvolvido no nordeste de São Paulo, avaliando diferentes manejos e preparos do solo durante a reforma do canal, valores médios da T_{solo} no preparo convencional ($23,6 \text{ }^\circ\text{C}$) maiores que a T_{solo} dos preparos reduzido ($22,9 \text{ }^\circ\text{C}$) e localizado ($22,7 \text{ }^\circ\text{C}$).

A umidade média do solo (U_{solo}) diferiu significativamente ($p < 0,05$) entre os preparos PC (18,3%) e SL (24,0%) porém a média da U_{solo} no preparo SC (21,8%), não diferiu ($p > 0,05$) dos preparos PC e SL. O valor máximo da U_{solo} (35,0%) foi encontrado no preparo SL e o valor mínimo foi observado no PC (9,0%).

De acordo com Hillel (2005), solos desagregados apresentam menor condutividade térmica quando comparados a solos agregados fato este passível de explicar o maior valor médio da T_{solo} observado no preparo PC, uma vez que a dissipação da energia térmica no interior do solo ou para a atmosfera será mais lenta. Após o preparo o solo apresenta maior superfície exposta à atmosfera, o que facilita a evaporação da água e, conseqüentemente, leva à redução da U_{solo} (Boast & Simmons, 2005). Isto pode explicar a diferença significativa da U_{solo} entre os preparos PC e SL. Em adição, a manutenção dos resíduos da colheita da cana-de-açúcar sob a superfície do solo, a exemplo do preparo SL, contribui de forma positiva para propiciar um microclima amenizando principalmente a temperatura máxima encontrada no solo, nos períodos mais quentes do dia, proporcionando condições mais estáveis de temperatura e auxiliando na manutenção do teor de água do solo (Ussiri & Lal, 2009).

A correlação entre FCO_2 e a T_{solo} foi significativa e negativa ($r = -0,711$; $p < 0,05$) somente no PC (Tabela 2). Em geral, a temperatura do solo apresenta relação direta com FCO_2 uma

Tabela 1. Estatística descritiva da emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo, nos sistemas de preparo do solo: convencional (PC), subsolagem convencional (SC) e subsolagem localizada (SL)

Preparo	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Emissão de CO_2 ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)*						
PC	0,749 a	0,211	0,019	0,391	1,441	28,2
SC	0,526 b	0,184	0,017	0,192	0,941	35,0
SL	0,449 b	0,166	0,015	0,143	0,952	37,0
Temperatura do solo ($^\circ\text{C}$)*						
PC	26,6 a	0,50	0,05	25,50	27,82	1,9
SC	25,9 b	0,50	0,05	24,68	27,18	1,9
SL	26,2 b	0,43	0,04	25,41	27,41	1,6
Umidade do solo (%)**						
PC	18,3 b	5,1	0,6	9,0	32,0	27,9
SC	21,8 ab	5,0	0,5	11,0	34,0	22,9
SL	24,0 a	5,0	0,5	13,0	35,0	20,8

*N = 120, **N = 90, CV - Coeficiente de variação; Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Tabela 2. Correlação de Pearson entre a emissão de CO₂ (g CO₂ m⁻² h⁻¹), a temperatura (T_{solo}, °C) e a umidade do solo (U_{solo}, %) após o preparo convencional (PC), a subsolagem convencional (SC) e o preparo localizado (SL)

	Nº obs.	R
Preparo convencional		
T _{solo} (°C)	8	-0,711*
U _{solo} (%)	6	0,465 ^{NS}
Subsolagem convencional		
T _{solo} (°C)	8	0,313 ^{NS}
U _{solo} (%)	6	0,293 ^{NS}
Preparo localizado		
T _{solo} (°C)	8	0,459 ^{NS}
U _{solo} (%)	6	0,090 ^{NS}

*Valor significativo (p < 0,05); ^{NS}Valor não significativo (p > 0,05)

vez que, dependendo do sistema de preparo, a exemplo do PC, com a incorporação dos resíduos ao solo, aumenta-se a taxa de emissão de CO₂ do solo, em virtude da maior área de contato do solo com os resíduos, somada à maior aeração, ao aumento na temperatura do solo (Licht & Al-Kaisi, 2005; Silva-Olaya et al., 2013) e à diminuição da umidade (Schwartz et al., 2010; Moitinho et al., 2013), decorrentes do processo de revolvimento. Em contrapartida, Verbug et al. (2005) relatam que o fluxo de CO₂ do solo apresenta relação inversa com a temperatura do solo quando esta excede os 20 °C.

Neste estudo entre FCO₂ e U_{solo}, no preparo PC, a correlação foi não significativa (p > 0,05). Nos preparos SC e SL a correlação entre FCO₂, T_{solo} e U_{solo} também foi não significativa (p > 0,05) (Tabela 2).

Reicosky & Archer (2007) não observaram correlação significativa entre FCO₂, T_{solo} e U_{solo} investigando preparos mais intensos do solo utilizando arado de aiveca que consegue revolver o solo nas profundidades de 0,40 a 0,45 m capazes de promover a inversão da leiva. Já em estudo realizado por La Scala et al. (2006), houve correlação linear positiva entre FCO₂ e U_{solo} e não significativa com T_{solo}. Teixeira et al. (2011) observaram, avaliando a correlação linear da FCO₂ com T_{solo} e U_{solo} que somente no preparo com enxada rotativa com a presença de palha superficial houve correlação (r = 0,84; p < 0,05) entre FCO₂ e U_{solo}. Essas variáveis, no entanto, podem apresentar correlações não lineares com FCO₂ (Ussiri & Lal, 2009). Ainda o efeito da U_{solo} sobre FCO₂ pode ser parcialmente oculto pelo efeito da T_{solo}, uma vez que U_{solo} e T_{solo} são variáveis interdependentes e comumente se alteram simultaneamente (Ding et al., 2010). Em geral, a umidade do solo se relaciona às variações temporais da FCO₂ quando ela se torna um fator limitante (Epron et al., 2006; Schwartz et al., 2010), o que não ocorreu neste experimento visto que a correlação entre U_{solo} e FCO₂ foi não significativa (p > 0,05) nos preparos estudados.

O preparo convencional apresentou FCO₂ diária maior do que os preparos SC e SL (Figura 2A).

No PC do dia 1 a 3 após o preparo, a FCO₂ permaneceu equilibrada (0,800 g CO₂ m⁻² h⁻¹), comportamento diferente daquele observado nos preparos SC e SL nos quais ocorreu um aumento na FCO₂. Este comportamento difere dos resultados obtidos por La Scala et al. (2009) e Teixeira et al. (2011), em que ocorreu uma baixa na FCO₂ a partir do primeiro dia avaliado.

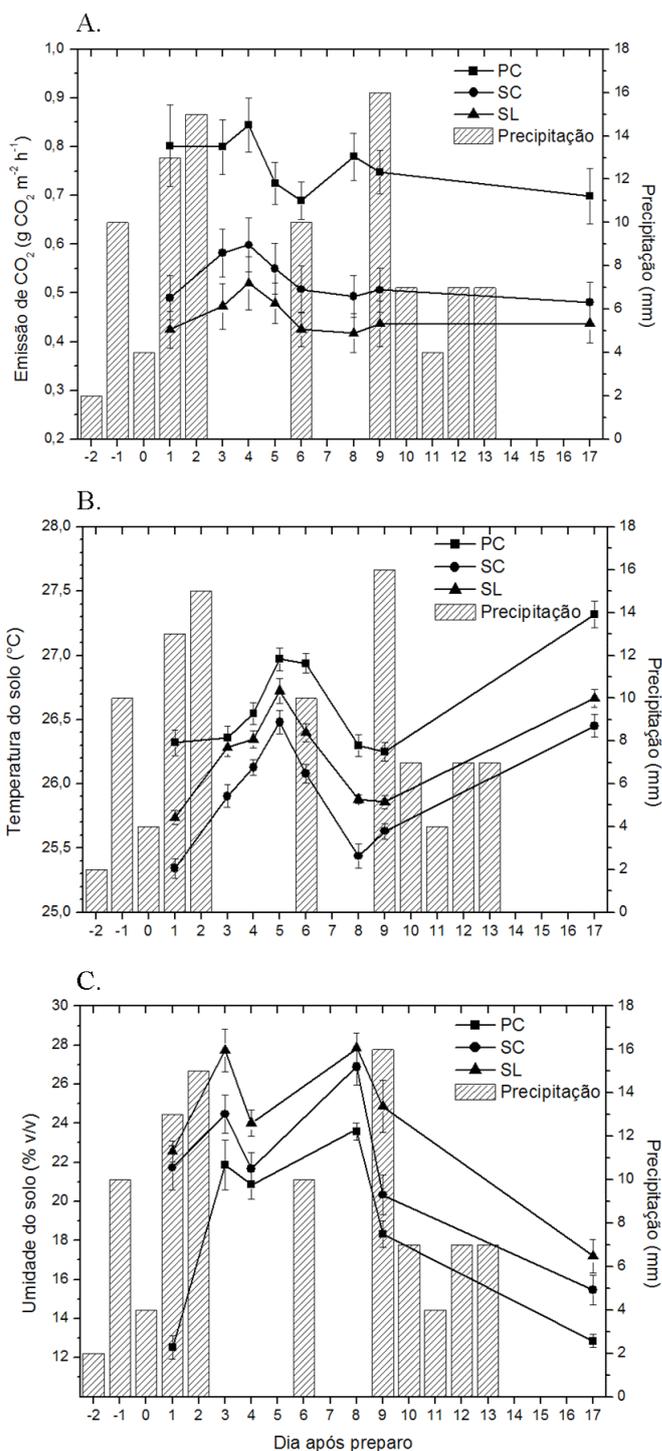


Figura 2. Emissão de CO₂ do solo (A), temperatura do solo (B), umidade do solo (C) e precipitações ocorridas no período de estudo com barras do erro-padrão da média nos diferentes preparos avaliados

Uma provável explicação para o aumento da FCO₂ nos dias 3 e 4 pode ser atribuída à elevação da temperatura do solo no mesmo período (Figura 2B). Este fato também pode explicar a ocorrência da FCO₂ máxima nos três preparos no dia 4, com valores para PC, SC e SL iguais a 0,844 g CO₂ m⁻² h⁻¹, 0,598 g CO₂ m⁻² h⁻¹ e 0,520 g CO₂ m⁻² h⁻¹, respectivamente (Figura 2A).

No PC, entre os dias 6 e 8, ocorreu um aumento da FCO₂ (0,690 g CO₂ m⁻² h⁻¹ para 0,780 g CO₂ m⁻² h⁻¹) (Figura 2A) que pode estar relacionado com a maior desagregação do solo e

início da decomposição microbiana dos resíduos vegetais das camadas mais profundas e que foram incorporados à camada de solo de 0 a 0,25 m de profundidade pelo preparo convencional. Neste mesmo período, nos preparos SC e SL houve uma pequena queda na FCO_2 de $0,015 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e $0,007 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente, comportamento diferente do preparo convencional (PC), que pode estar relacionado com a menor desagregação do solo e à menor incorporação de resíduos vegetais ao solo nos preparos SC e SL.

No período entre os dias 8 e 17, constatou-se a elevação da temperatura do solo em cerca de 1°C nos três preparos e a umidade do solo diminuiu 10,7% em PC e SL e 11,4% em SC (Figuras 2B e 2C). No preparo convencional houve, neste período, uma redução da FCO_2 de $0,780 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para $0,699 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Figura 2A), que pode estar relacionada com a menor disponibilidade de água para a atividade microbiana.

No preparo SC ocorreu um aumento da FCO_2 do dia 8 para 9, seguido de uma queda até o dia 17, no qual foi registrado o menor valor da FCO_2 para este preparo ($0,481 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Da mesma forma, SL apresentou o menor valor da FCO_2 no dia 8 ($0,418 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), seguido de um aumento no dia 9 e permanecendo inalterada até o dia 17.

Nota-se que o valor da FCO_2 mínima no PC ($0,690 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) foi 15,4 e 32,7% maior que o valor da FCO_2 máxima nos preparos SC ($0,598 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) e SL ($0,520 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), respectivamente (Figura 2A).

A média diária da temperatura do solo (T_{solo}) foi superior no PC, seguida por SL e SC (Figura 2B). Nos três preparos o padrão de evolução da T_{solo} foi semelhante ocorrendo aumento do dia 1 para o 5, diminuição do dia 5 para o 9 (exceto para SC) e aumento do dia 9 para o 17 após o preparo do solo. No primeiro intervalo, do dia 1 para o 5, a maior elevação da T_{solo} foi registrada no preparo SC, de $1,2^\circ \text{C}$, seguida por SL e PC, com variação de $1,0$ e $0,7^\circ \text{C}$, respectivamente. No segundo intervalo, do dia 5 ao 9, ocorreu redução da T_{solo} de $0,9$, $0,8$ e $0,7^\circ \text{C}$ nos preparos SC, SL e PC, respectivamente. No intervalo final, após o dia 9, houve elevação de $0,9$, $0,8$ e $1,0^\circ \text{C}$ da T_{solo} nos preparos SC, SL e PC, respectivamente. Portanto, no período de 17 dias a maior variação da T_{solo} ocorreu no preparo SC (de $1,2^\circ \text{C}$), seguida por SL e PC (de 1°C em ambos). As pequenas variações da T_{solo} em regiões tropicais influenciam pouco a FCO_2 , visto que nessas regiões a T_{solo} apresenta valores próximos à condição mais favorável à atividade microbiana (Schwendenmann et al., 2003).

A umidade média do solo (U_{solo}) na camada de 0-0,12 m (Figura 2C) foi medida antes da precipitação pluvial, ocorrida no mesmo dia no período noturno. Portanto, a elevação da U_{solo} foi perceptível apenas nas medições realizadas no dia posterior à chuva. Observa-se, ainda, que a U_{solo} foi menor no PC, especialmente no dia 1 após o preparo, permanecendo em 12,5%, mesmo após uma chuva acumulada de 14 mm nos dias -1 e 0 após o preparo, ou seja, 43,4 e 44,7% menor que em SC e SL, respectivamente. Isto pode ser explicado tanto pela maior infiltração da água no perfil do solo como pela evaporação mais rápida no solo mais desagregado logo após o preparo (Boast & Simmons, 2005).

Nos dias 1 e 2 após o preparo do solo a chuva acumulada foi de 28 mm, elevando a U_{solo} no dia 3 para 21,9; 24,5 e 27,7% nos preparos PC, SC e SL, respectivamente. Nota-se que,

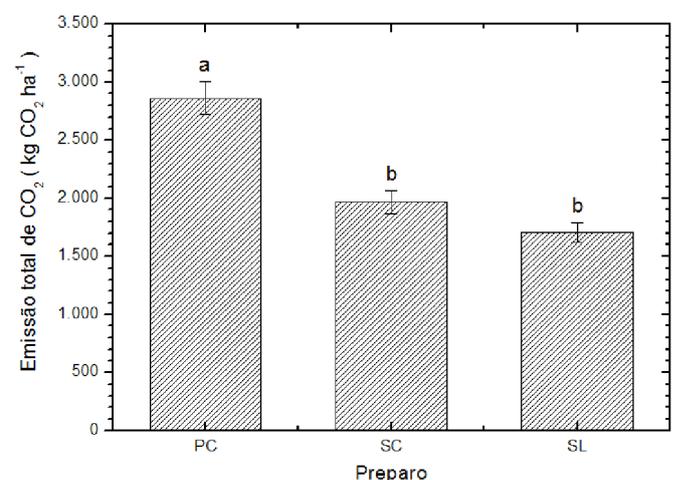
no preparo PC a umidade foi 75% maior no dia 3 (21,9%) em relação ao dia 1 (12,5%), possivelmente por apresentar menor taxa de infiltração de água no perfil do solo devido ao provável preenchimento com água nos poros das camadas de solo abaixo da camada estudada (0,12 m de profundidade).

No dia 8 após o preparo do solo foi registrado o maior valor da U_{solo} nos três preparos, sendo de 23,6; 26,9 e 27,9% para PC, SC e SL, respectivamente. A partir deste dia até o 17º ocorreu queda na U_{solo} , mesmo com chuva acumulada de 41 mm entre os dias 9 e 13. Os menores valores da U_{solo} nos preparos SC e SL foram registrados no dia 17, com valores iguais a 15,5 e 17,2%, respectivamente, após três dias consecutivos sem chuva na região.

Os valores da FCO_2 total nos preparos PC, SC e SL no período de 17 dias após o preparo foram de 2.864,3; 1.970,9 e 1.707,7 $\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente (Figura 3). O valor da FCO_2 total do preparo convencional foi 45,3% ($893,4 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$) e 67,7% ($1.156,6 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$) maior do que os observados nos preparos SC e SL, respectivamente.

Considerando a área total de reforma na safra 2013/2014 (CANASAT, 2014) a diferença entre esses preparos representaria uma diminuição potencial de 64 e 83 mil t CO_2 que deixariam de ser emitidos do solo para a atmosfera neste período, nos preparos SC e SL, considerando apenas a mudança no tipo de preparo do solo.

Em estudo conduzido em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, La Scala et al. (2001) avaliaram as emissões de CO_2 após o preparo do solo com enxada rotativa (ER), escarificador (ES), arado de disco seguido de grade (AD + G), grade de disco pesada seguida por grade de disco (GDP + GD) e solo sem preparo (SP) e observaram que a emissão de CO_2 no preparo ES foi maior que nos demais preparos sendo 23, 37, 50 e 140% maior que nos preparos AD + G, GDP + GD, ER e SP, respectivamente. O fato dos autores terem observado maiores valores da FCO_2 no preparo menos intenso do solo só ressalta a informação sobre a complexidade desse fenômeno sendo, portanto, a caracterização do padrão da FCO_2 um grande desafio pois além de apresentar grande variabilidade, as variáveis envolvidas no processo de produção e emissão também são dependentes das condições edafoclimáticas locais.



Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Figura 3. Emissão total de CO_2 do solo durante o período de 17 dias após o preparo do solo, com barras do erro-padrão da média nos diferentes preparos avaliados

CONCLUSÕES

1. A emissão de CO₂, a temperatura e a umidade do solo são afetadas pelas formas de preparo empregadas durante operações de reforma em área de cana-de-açúcar.

2. No preparo convencional o solo exposto e desagregado favorece maiores perdas de CO₂ associadas a elevações da temperatura e a umidade reduzida do solo. Porém, quando adotadas práticas de manejo mais conservacionista em que o preparo do solo é realizado apenas na linha de plantio da cana-de-açúcar, a umidade é preservada.

3. A conversão do sistema de preparo convencional para a subsolagem localizada reduz, de forma significativa, as emissões de CO₂ do solo diminuindo a contribuição da agricultura para o aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera.

4. Considera-se que estudos futuros são necessários para se determinar, em um período maior de avaliação, o efeito da incorporação dos resíduos culturais realizada pelos sistemas de preparo sobre o fluxo de CO₂ do solo.

LITERATURA CITADA

- Boast, C. W.; Simmons, F. W. Evaporation of water from bare soil. In: Hillel. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Oxford: Elsevier, 2005. p.494-502.
- CANASAT - Monitoramento da cana-de-açúcar via satélite. Tabelas do Estado de São Paulo. <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>>. 15 Abr. 2014.
- Cerri, C. E. P.; Sparovek, G.; Bernoux, M.; Easterling, W. E.; Melillo, J. M.; Cerri, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. *Scientia Agricola*, v.64, p.83-99, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162007000100013>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Quarto levantamento da safra de cana-de-açúcar, 2013/2014. 2014. Brasília. CONAB. http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_10_09_00_57_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_13.pdf. 15 Abr. 2014.
- Ding, W.; Yu, H.; Cai, Z.; Han, F.; Xu, Z. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation. *Geoderma*, v.155, p.381-389, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.023>
- Epron, D.; Bosc, A.; Bonal, D.; Freycon, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. *Journal of Tropical Ecology*, v.22, p.565-574, 2006. <http://dx.doi.org/10.1017/S0266467406003415>
- Fortin, M. C.; Rochette, P.; Pattey, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1541-1547, 1996. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000050036x>
- Hillel, D. Thermal properties and processes. In: Hillel, D. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Oxford: Elsevier, 2005. p.156-163.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 2007. 863p.
- Kasper, M.; Buchan, G. D.; Mentler, A.; Blum, W. E. H. Influence of soils tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil & Tillage Research*, v.105, p.192-199, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.08.002>
- La Scala, N.; Bolonhezi, D.; Pereira, G. T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.91, p.244-248, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.11.012>
- La Scala, N.; Lopes, A.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red Latosol in southern Brasil. *Soil & Tillage Research*, v.62, p.163-166, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00212-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00212-4)
- La Scala, N.; Lopes, A.; Spokas, K.; Archer, D. W.; Reicosky, D. First-order decay models to describe soil C-CO₂ loss after rotary tillage. *Scientia Agricola*, v.66, p.650-657, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000500010>
- Lal, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, v.60, p.158-169, 2009. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>
- Licht, M. A.; Al-Kaisi, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, v.80, p.233-249, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.03.017>
- Moitinho, M. R.; Padovan, M. P.; Panosso, A. R.; La Scala, N. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.1720-1728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000600028>
- Morell, F. J.; Álvaro-Fuentes, J.; Lampurlanés, J.; Cantero-Martínez, C. Soil CO₂ fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: effects of tillage systems and nitrogen fertilization. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.139, p.167-173, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.07.015>
- Reicosky, D. C.; Archer, D. W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil & Tillage Research*, v.94, p.109-121, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2006.07.004>
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Oliveira, J. B.; Coelho, M. R.; Lumberras, J. F.; Cunha, T. J. F. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- Schwartz, R. C.; Baumhardt, R. L.; Evett, S. R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil & Tillage Research*, v.110, p.221-229, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.07.015>
- Schwendenmann, L.; Veldkamp, E.; Brenes, T.; O'Brien, J.; Mackensen, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest. *La Salva Biogeochemistry*, v.64, p.111-128, 2003. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024941614919>
- Silva-Olaya, A. M.; Cerri, C. E. P.; La Scala, N.; Dias, C. T. S.; Cerri, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, v.8, p.1-8, 2013. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>

- Six, J.; Frey, S. D.; Thies, R. K.; Batten, K. M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society America Journal*, v.70, p.555-569, 2006. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M. *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996p. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment_report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf>. 18 Dez. 2012.
- Teixeira, D. D. B.; Bicalho, E. S.; Panosso, A. R.; Perillo, L. I.; Iamaguti, J. L.; Pereira, G. T.; La Scala, N. Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO₂ emissions and related properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1466-1475, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500010>
- Teixeira, L. G.; Fukuda, A.; Panosso, A. R.; Lopes, A.; La Scala, N. Soil CO₂ emission as related to incorporation of sugarcane crop residues and aggregate breaking after rotary tiller. *Engenharia Agrícola*, v.31, p.1075-1084, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000600005>
- Ussiri, A. N.; Lal, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. *Soil & Tillage Research*, v.104, p.39-47. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.11.008>
- Verburg, P. J.; Larsen, J.; Johnson, D. W.; Schorran, D. E.; Arnone, J. A. Impacts of an anomalously warm year on soil CO₂ efflux in experimentally manipulated tallgrass prairie ecosystems. *Global Change Biology*, v.11, p.1720-1732, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001032.x>