

# Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo

Diana Signor <sup>(1\*)</sup>; Luísa Lorentz Magalhães Pissioni <sup>(2)</sup>; Carlos Eduardo Pellegrino Cerri <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Embrapa Semiárido, Rodovia BR 428 km 152, 56302-970 Petrolina (PE), Brasil.

<sup>(2)</sup> Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Departamento de Ciência do Solo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900 Piracicaba (SP), Brasil.

<sup>(\*)</sup> Autora correspondente: diana.signor@embrapa.br

Recebido: 21/fev./2014; Aceito: 7/abr./2014

## Resumo

Biocombustíveis contribuem para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). No Brasil, o principal biocombustível é o etanol de cana-de-açúcar. Além dos colmos, as folhas de cana-de-açúcar também podem ser usadas para produzir etanol. O objetivo deste trabalho foi avaliar as emissões de GEE ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) induzidas pela presença de palha sobre o solo. Três experimentos foram conduzidos em Latossolos, em Piracicaba: imediatamente após a colheita, aos seis e aos 12 meses após a colheita. Foram avaliados os efeitos de três doses de palha (0%, 50% e 100% da quantidade disponível na superfície) sobre as emissões. Imediatamente após a colheita, as emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  aumentaram com o aumento da quantidade de palha. Aos seis meses após a colheita houve consumo de  $\text{CH}_4$  à medida que a quantidade de palha aumentou. Doze meses após a colheita, as emissões dos três gases foram similares, independentemente da quantidade de palha. Remover a palha de cana-de-açúcar não aumenta as emissões de GEE do solo em comparação ao manejo sem retirada da palha da superfície. Contudo, estudos adicionais são necessários para investigar os efeitos sobre a produtividade de cana-de-açúcar, sobre a erosão e sobre outros atributos do solo.

**Palavras-chave:** dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, etanol de segunda geração, resíduo vegetal.

## Greenhouse gases emissions due to sugarcane trash on the soil

### Abstract

Biofuels are important to reduce greenhouse gases (GHGs) emissions to atmosphere. In Brazil, the main biofuel is ethanol from sugarcane. Beyond stalk, sugarcane sheets are also stating to be used to produce second generation ethanol. The objective of this work was evaluate soil GHGs ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ ) emissions induced by sugarcane trash on soil surface. Three experiments were done in an Oxisol, in Piracicaba region, taking in account three periods: immediately after sugarcane harvest, six and twelve months after harvest. In each experiment, we evaluated the effects of three sugarcane trash rates (0%, 50% and 100% of the quantity available at soil surface). Immediately after harvest,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  emissions increased linearly with trash rate on soil surface. Six months after harvest there were  $\text{CH}_4$  consumption by soil as trash on surface increased. Twelve months after harvest, emissions of the three gases were similar in all trash rates. Removing sugarcane straw from soil surface do not increase soil GHGs emissions as compared to the current management, in which 100% of trash is maintained on the soil surface. However, other studies are needed to investigate its effects under sugarcane yield, soil erosion and under other soil attributes.

**Key words:** carbon dioxide, methane, nitrous oxide, second generation ethanol, plant residue.

## 1. INTRODUÇÃO

Os principais gases de efeito estufa (GEE) são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). As emissões de  $\text{CO}_2$  estão associadas ao uso de combustíveis fósseis e às mudanças de uso da terra, o  $\text{CH}_4$  provém de atividades agrícolas e da queima de combustíveis fósseis, enquanto as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  devem-se principalmente à agricultura (IPCC, 2007). Uma medida eficiente para conter o aumento da concentração atmosférica de GEE é a substituição dos combustíveis fósseis

por biocombustíveis. Essa é uma importante estratégia para o desenvolvimento de um manejo sustentável em nível regional, mas os aspectos econômicos e ambientais relacionados aos biocombustíveis também devem ser considerados (Cerri et al., 2013). No Brasil, o principal biocombustível utilizado é o etanol derivado da cana-de-açúcar. Na safra 2012/2013, cerca de 50% da produção brasileira de cana-de-açúcar foi destinada à produção de mais de 23 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2013).

No Brasil, a colheita da cana-de-açúcar, que tradicionalmente era precedida pela queima das folhas, vem sendo realizada sem uso do fogo, o que contribui para a redução das emissões de GEE (Leal et al., 2013). Outros benefícios do sistema de colheita sem queima consistem em: melhoria nos atributos físicos do solo (Dourado-Neto et al., 1999), maior crescimento e ciclagem de raízes (Alvarez et al., 2000), maior infiltração de água no solo (Graham et al., 2002), redução da densidade do solo (Tominaga et al., 2002), menores custos de renovação do canavial, reciclagem e liberação gradual de nutrientes pela decomposição da palha, menores perdas de nutrientes e diminuição da emissão de gases e fuligem (Canellas et al., 2003).

Contudo, a grande quantidade de palha na superfície do solo pode aumentar o tempo para a rebrota da cana soca, aumentar a incidência de algumas pragas e promover a saturação por potássio em solos que recebem aplicação de vinhaça, de forma que muitas usinas já consideram a possibilidade de retirar parte da palha do campo (Sordi e Manechini, 2013). Essa palha pode ser utilizada diretamente para queima nas caldeiras e geração de energia, para a produção de  $\text{CH}_4$  em biodigestores (posteriormente usado como fonte de energia) ou para a produção de etanol de segunda geração (Sordi e Manechini, 2013). A produção de etanol de primeira e de segunda geração em uma mesma planta industrial utilizando a palha da cana-de-açúcar como fonte de material lignocelulósico apresenta melhores resultados econômicos em comparação aos processos isolados (Dias et al., 2012; Sordi e Manechini, 2013).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar sobre as emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  do solo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

As emissões de GEE foram estudadas em três áreas de cultivo comercial de cana-de-açúcar (cana soca) colhidas sem queima na região de Piracicaba, SP. O clima local é tropical de altitude (Cwa), segundo a classificação de Köppen, com temperatura anual média de  $22^\circ\text{C}$  e precipitação anual de 1.400 mm. Em cada uma dessas áreas, que representam diferentes momentos após a última colheita da cana-de-açúcar, implantou-se um experimento no qual os tratamentos foram doses de palha em função da quantidade inicial presente na superfície. O experimento 1 foi implantado em área logo após a colheita; o experimento 2 foi conduzido em área na qual a última colheita havia sido feita há seis meses; e o experimento 3 foi realizado em área na qual a última colheita havia sido feita há 12 meses.

Amostras de solo das camadas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm de profundidade foram coletadas nas três áreas experimentais. As amostras foram secas, destorroadas, tamisadas a 2 mm, homogeneizadas e caracterizadas química (Raj et al., 2001) e granulometricamente (Camargo et al., 1986) (Tabela 1). A quantidade de palha de cana-de-açúcar sobre a superfície do solo foi estimada com o uso de um quadrante de  $1\text{ m}^2$  (Tabela 2).

Três experimentos, um em cada área experimental, foram conduzidos simultaneamente no período de 16 de abril de 2010 a 2 de junho de 2010. Avaliou-se o efeito de três doses de palha (0%, 50% e 100% da quantidade total presente em cada área, calculadas em função dos valores indicados na Tabela 2) sobre as emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  pelo solo. Portanto, para o experimento 1, as doses 0%, 50% e 100% da quantidade total de palha corresponderam a  $0\text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $8,97\text{ Mg ha}^{-1}$  e  $17,95\text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente. Para o experimento 2, as doses foram  $0\text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $4,08\text{ Mg ha}^{-1}$  e

**Tabela 1.** Caracterização dos solos e localização geográfica de áreas de cana-de-açúcar utilizadas nos experimentos na região de Piracicaba, SP

Prof cm	P mg kg <sup>-1</sup>	MO -----g kg <sup>-1</sup> ----	N -----g kg <sup>-1</sup> ----	C	pH CaCl <sub>2</sub>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Dens g cm <sup>-3</sup>	Argila -----g kg <sup>-1</sup> ----	Areia
Área recém-colhida (22°31,956' S, 47°30,821' W, 749 m de altitude): Latossolo Vermelho													
0-5	31	32	1,9	24,2	4,6	15,9	15	3	5	55	1,3	635	238
5-10	25	27	1,6	20,5	4,4	9,0	7	3	6	63	1,2	621	235
10-20	23	24	1,6	18,9	4,3	9,2	6,7	2	7	63	1,1	623	235
20-30	9	20	1,3	15,9	4,6	5,5	9	2	2	42	1,2	634	234
Área colhida há seis meses (22°32,690' S, 47°30,739' W, 662 m de altitude): Latossolo Vermelho													
0-5	14	29	1,6	26,4	5,0	8,3	21	7	1	41	1,2	573	293
5-10	13	40	1,3	19,5	4,9	8,2	21	7	1	44	1,2	585	284
10-20	10	26	1,4	19,5	4,8	7,4	19	6	1	42	1,2	597	274
20-30	15	28	1,3	19,6	4,9	4,5	28	8	1	40	1,2	595	273
Área colhida há 12 meses (22°34,150' S, 47°33,330' W, 640 m de altitude): Latossolo Vermelho-Amarelo													
0-5	52	39	1,7	25,9	5,1	23,4	28	15	1	38	1,2	643	228
5-10	58	31	1,6	24,0	4,8	20,4	17	7	1	42	1,2	630	225
10-20	39	27	1,5	21,4	4,5	17,8	12	5	3	51	1,1	653	218
20-30	22	21	1,4	19,6	4,3	14,7	7	3	6	56	1,2	659	216

Prof: profundidade de amostragem do solo; MO: matéria orgânica; Dens: densidade do solo.

8,17 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, e para o experimento 3, 0 Mg ha<sup>-1</sup>, 3,95 Mg ha<sup>-1</sup> e 7,90 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Em cada experimento, o delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três tratamentos (doses de palha) e quatro repetições. Cada parcela experimental foi representada por uma câmara estática, no interior da qual foram adicionadas as respectivas doses de palha e coletadas as amostras de gases para avaliação das emissões de GEE do solo.

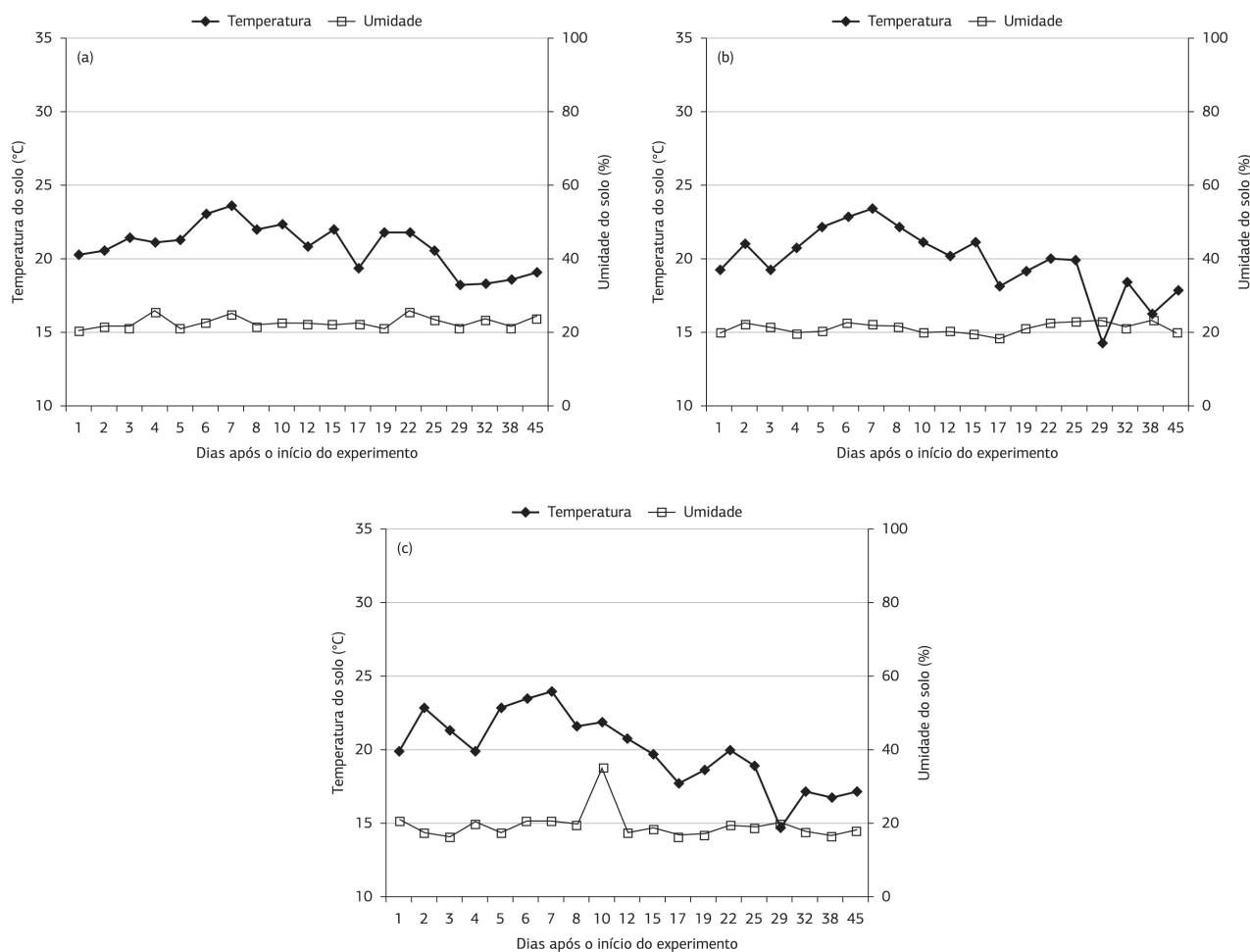
As variações de temperatura e umidade do solo e a precipitação pluviométrica nas áreas experimentais ao longo do período de avaliação são apresentadas na

figura 1. A temperatura do solo foi medida nos primeiros 2,5 cm de profundidade. A umidade do solo foi calculada gravimetricamente a partir de amostras de solo (0-5 cm) coletadas no momento das coletas de gases e posteriormente secas em estufa a 105 °C até peso constante. As informações sobre a precipitação pluviométrica durante o período de avaliação foram obtidas das estações meteorológicas localizadas próximas às áreas experimentais.

As câmaras utilizadas eram formadas por duas partes: uma base circular de metal, parcialmente enterrada ao solo, instalada no início do experimento e mantida fixa até o final do período de avaliação, e uma tampa de PVC, que

**Tabela 2.** Caracterização da palha de cana-de-açúcar presente na superfície do solo aos zero, seis e 12 meses após a última colheita na região de Piracicaba, SP

Área experimental	Quantidade de palha sobre o solo	Hemicelulose	Celulose	Lignina	Carbono	Nitrogênio
Meses após a colheita	Mg ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>				
0	17,95	294,5	333,2	95,0	296	6
6	8,17	255,5	325,8	131,8	332	6
12	7,90	229,1	269,6	148,9	334	10



**Figura 1.** Variações de temperatura (°C) e umidade (%) do solo ao longo do período experimental em áreas de cana-de-açúcar colhidas sem queima da palhada na região de Piracicaba, SP; (a) imediatamente após a última colheita; (b) seis meses após a última colheita; (c) 12 meses após a última colheita.

era encaixada na base no momento da coleta das amostras, contendo uma abertura superior para o acoplamento da seringa utilizada nas coletas. No momento da coleta das amostras, a tampa era apoiada em uma canaleta de 2 cm de altura presente na base de metal e a vedação entre a base e a tampa era feita por uma lâmina de água depositada no interior da canaleta.

Em cada dia de avaliação foram coletadas, por câmara, quatro amostras dos gases emitidos pelo solo: imediatamente após o fechamento da câmara (tempo zero); aos 15 minutos (tempo 15); aos 30 minutos (tempo 30); e aos 45 minutos após o fechamento da câmara. As amostras foram coletadas no início da manhã (entre 7 e 10 horas), armazenadas em frascos hermeticamente fechados e previamente submetidos a vácuo e foram encaminhadas para análise. As concentrações de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  foram determinadas por cromatografia gasosa, em equipamento Shimadzu GC 2014.

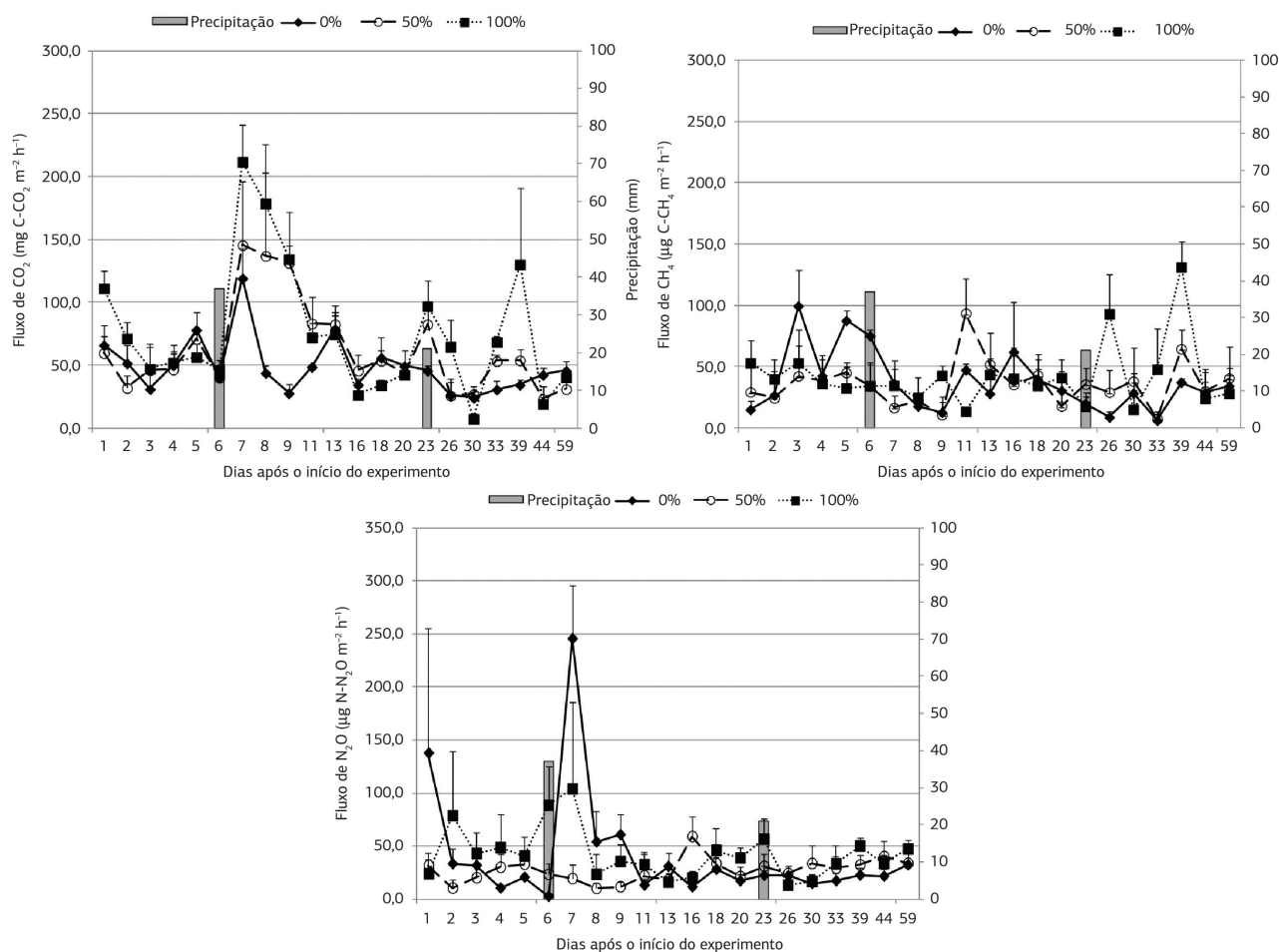
A partir da variação das concentrações dos gases no interior da câmara, do volume e da área de cada câmara, da temperatura do solo no momento da coleta e da pressão atmosférica foram calculados, para cada dia de avaliação, os

fluxos de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),  $\text{CH}_4$  ( $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) e  $\text{N}_2\text{O}$  ( $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) em cada câmara.

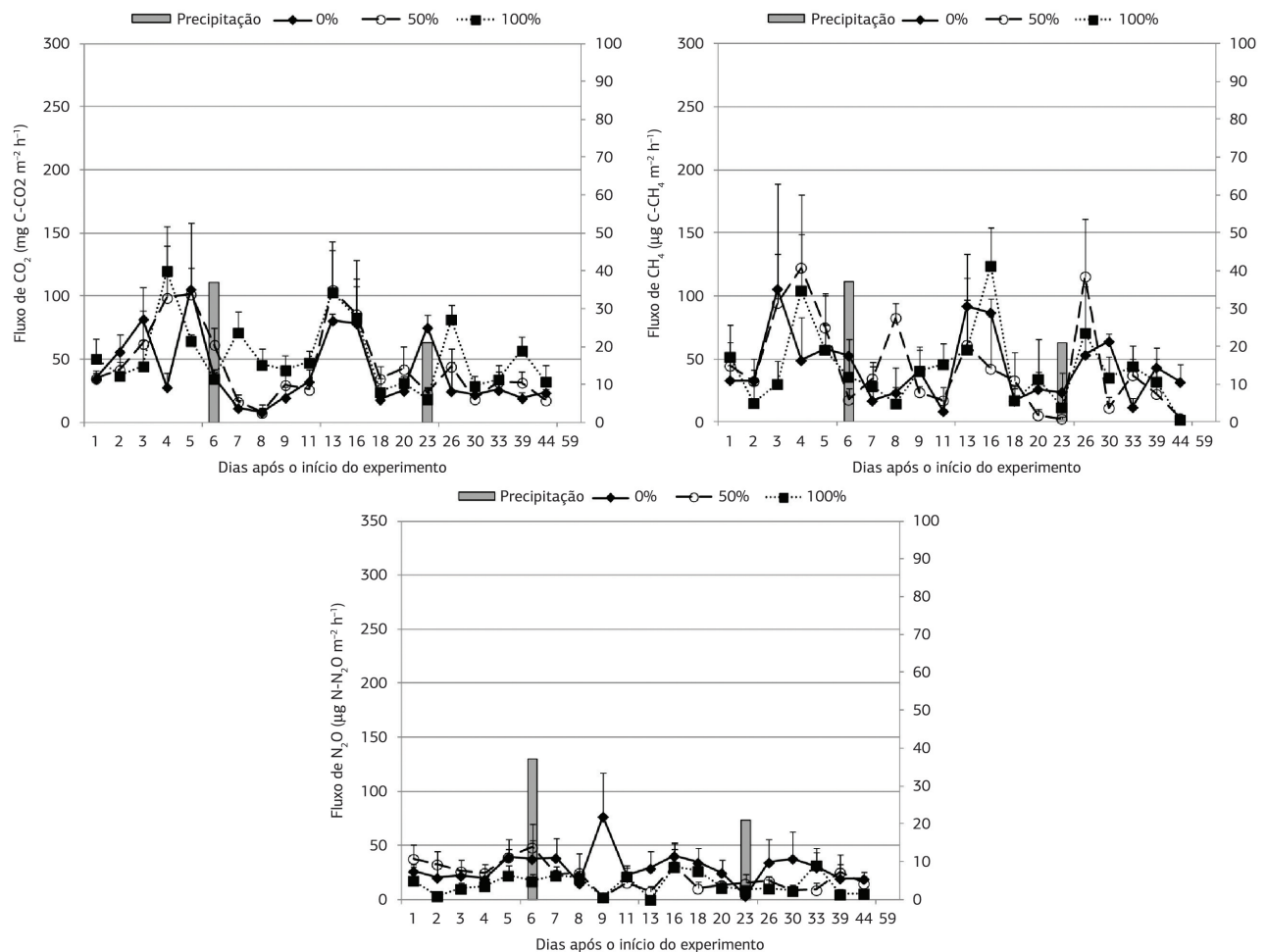
Os fluxos diários de GEE foram tabulados em planilha eletrônica. Para cada parcela experimental, as quantidades totais de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  emitidas no período de avaliação (emissão acumulada) foram estimadas por integração matemática das curvas dos fluxos diários. Em cada experimento, as emissões totais dos GEE foram submetidas à análise de variância. O efeito das doses de palha sobre as emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , quando significativo, foi determinado por análise de regressão.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos fluxos diários dos três gases nas quatro câmaras de cada repetição alocadas em cada área experimental, foram calculados os fluxos médios de cada gás para cada dia de avaliação (médias das quatro câmaras) (Figuras 2, 3, 4). Em todos os experimentos, os coeficientes de variação dos fluxos foram elevados.



**Figura 2.** Fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), de  $\text{CH}_4$  ( $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) e de  $\text{N}_2\text{O}$  ( $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) em áreas de cana-de-açúcar imediatamente após a última colheita (experimento 1), em função da dose de palha sobre o solo (0%, 50% e 100% da quantidade depositada pela colheita, correspondendo a 0, 8,97 e 17,95  $\text{Mg ha}^{-1}$ , respectivamente); barras verticais indicam o erro padrão da média ( $n = 4$ ).



**Figura 3.** Fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), de  $\text{CH}_4$  ( $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) e de  $\text{N}_2\text{O}$  ( $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) em áreas de cana-de-açúcar aos seis meses após a colheita (experimento 2), em função da dose de palha sobre o solo (0%, 50% e 100% da quantidade depositada pela colheita, correspondendo a 0, 4,08 e 8,17  $\text{Mg ha}^{-1}$ , respectivamente); barras verticais indicam o erro padrão da média ( $n = 4$ ).

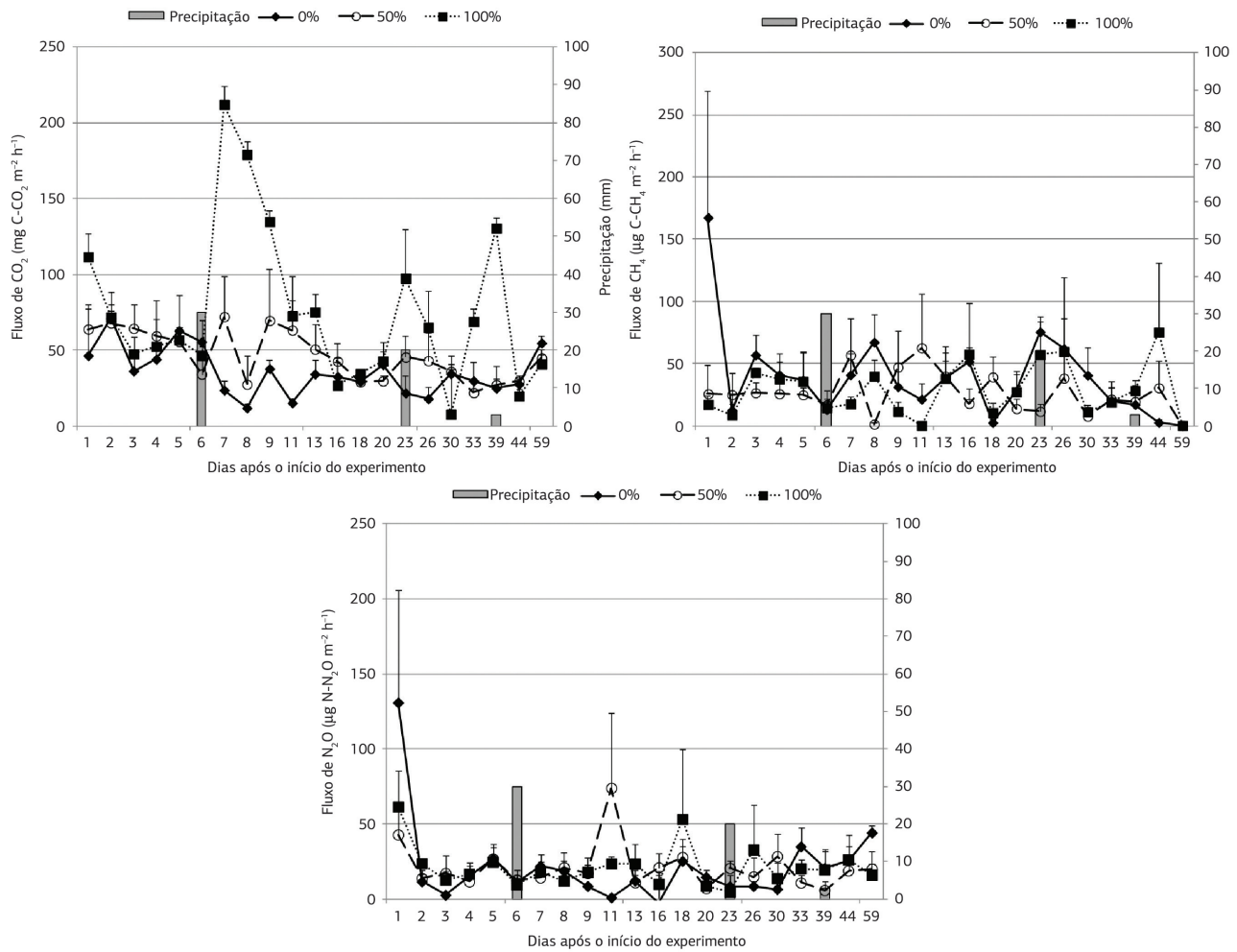
Nos experimentos 1 e 3, a presença de palha sobre a superfície aumentou o fluxo médio de  $\text{CO}_2$ , em comparação ao tratamento sem palha. Nos experimentos 1 e 2, os fluxos médios de  $\text{CH}_4$  foram semelhantes para todas as doses de palha, enquanto no experimento 3 o menor fluxo médio foi observado na área com 50% da quantidade original de palha. Carmo et al. (2013), em experimento com um ano de duração, não verificaram efeito da quantidade de palha de cana-de-açúcar sobre os fluxos de  $\text{CH}_4$  do solo.

Nos experimentos 1 e 3, os fluxos médios de  $\text{N}_2\text{O}$  foram semelhantes em todas as doses de palha, enquanto no experimento 2 o fluxo médio de  $\text{N}_2\text{O}$  diminuiu com o aumento da quantidade de palha sobre a superfície. Carmo et al. (2013) observaram que os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  em áreas cultivadas com cana-de-açúcar foram significativamente maiores que os do tratamento controle apenas quando havia mais de 14  $\text{Mg ha}^{-1}$  de palha sobre a superfície do solo. No presente estudo, a maior dose de palha utilizada foi de 17,95  $\text{Mg ha}^{-1}$  (dose 100% no experimento 1, conduzido imediatamente após a colheita) e, apesar de esse valor superar

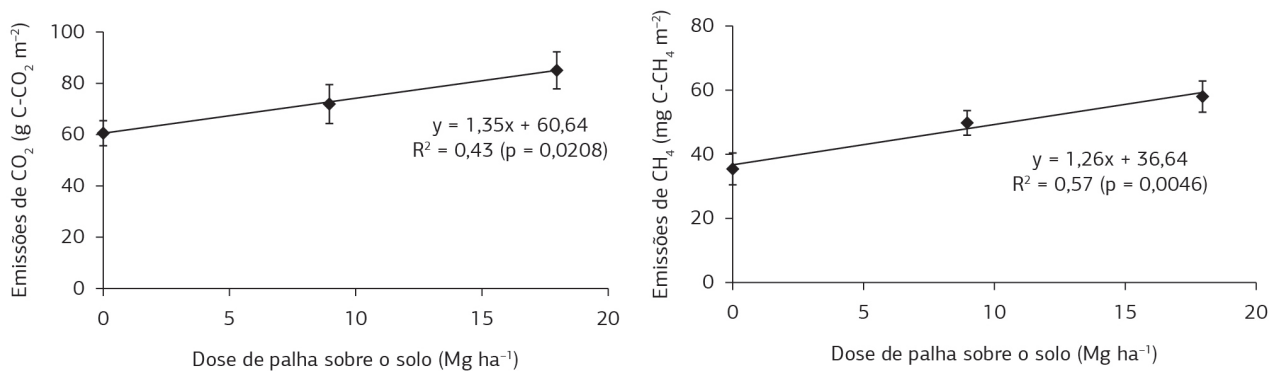
a dose indicada por Carmo et al. (2013), o fluxo médio de  $\text{N}_2\text{O}$  não superou o fluxo do tratamento controle. A ausência de efeito da dose de palha sobre os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$ , mesmo quando a quantidade de palha sobre o solo foi elevada, pode ser explicada pela variabilidade espacial nas emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ , as quais se devem à distribuição heterogênea dos microrganismos responsáveis pela produção desse gás no solo, como relatado por Davidson et al. (1996).

No experimento 1, houve efeito significativo da dose de palha sobre as emissões totais de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ . No experimento 2, apenas as emissões de  $\text{CH}_4$  foram influenciadas pela dose de palha sobre a superfície do solo, enquanto no experimento 3 não houve efeito significativo das doses de palha sobre nenhum dos três gases avaliados.

No experimento 1, que foi conduzido imediatamente após a colheita, as emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  aumentaram linearmente com o aumento da dose de palha mantida sobre o solo (Figura 5). Para um aumento de 1  $\text{Mg ha}^{-1}$  de palha deixada sobre o solo, houve um aumento nas emissões da ordem de 1,35  $\text{g C-CO}_2 \text{ m}^{-2}$  e de 1,26  $\text{mg C-CH}_4 \text{ m}^{-2}$ .



**Figura 4.** Fluxo de CO<sub>2</sub> (mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), de CH<sub>4</sub> (µg C-CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) e de N<sub>2</sub>O (µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) em áreas de cana-de-açúcar aos 12 meses após a colheita (experimento 3), em função da dose de palha sobre o solo (0%, 50% e 100% da quantidade depositada pela colheita, correspondendo a 0, 3,95 e 7,90 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente); barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 4).



**Figura 5.** Emissão de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> do solo em função da dose de palha de cana-de-açúcar sobre a superfície, imediatamente após a colheita; barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 4).

A relação positiva entre a quantidade de C-CO<sub>2</sub> emitida pelo solo e o conteúdo de matéria orgânica, que está relacionado à adição de resíduos vegetais, é bem conhecida (Oliveira et al., 2013; Vargas et al., 2013; Ciotta et al., 2004; Costa et al., 2003; Vargas e Scholles 2000). Carmo et al. (2013) acompanharam durante um ano as emissões de

GEE do solo em áreas com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar, em Piracicaba, SP, e verificaram que as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram com o aumento da quantidade de palha sobre a superfície. No presente trabalho, as emissões acumuladas de CO<sub>2</sub> aumentaram linearmente com o aumento da dose de palha apenas no

experimento 1. Entretanto, nossos resultados não diferem daqueles observados por Carmo et al. (2013), uma vez que esses autores afirmam que as emissões ocorrem principalmente nos primeiros 30 dias após a deposição da palha sobre o solo (situação representada pelo experimento 1) tornando-se, a partir de então, similares às do tratamento controle (como confirmado nos experimentos 2 e 3). Resultado similar ao do experimento 1 também foi observado por Vargas et al. (2013), em experimento conduzido durante 60 dias em condições controladas. Nesse caso, as emissões de  $\text{CO}_2$  de solo cultivado com cana-de-açúcar aumentaram linearmente com o aumento da umidade do solo e foram mais intensas na presença de palha do que na ausência desse resíduo sobre o solo.

Vale ressaltar que as emissões de  $\text{CO}_2$  do solo não são contabilizadas na elaboração dos inventários de emissão de GEE na agricultura, porque o  $\text{CO}_2$  emitido pelo solo provém da respiração das raízes das plantas e da atividade microbiana de decomposição, representando, portanto, o carbono que está ciclando no ambiente. Assim, o balanço de C em diferentes usos ou condições de manejo deve ser feito em estudos de longo prazo, considerando a variação nos estoques desse elemento no solo ao longo do tempo.

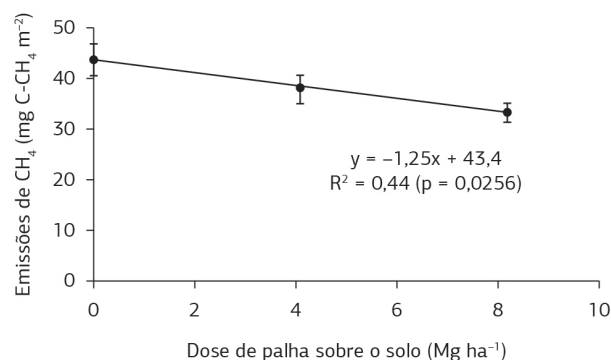
Vargas et al. (2013) não observaram relação entre as emissões de  $\text{CH}_4$  e a presença de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo. Contudo, no presente estudo o aumento da quantidade de  $\text{CH}_4$  emitida pelo solo em função do aumento da quantidade de palha, como observado no experimento 1, pode estar relacionado ao aumento da atividade microbiana induzida pela adição dos restos culturais, como observado para as emissões de  $\text{CO}_2$ .

Apesar de não avaliada no presente trabalho, as emissões de  $\text{CO}_2$  imediatamente após a colheita sugerem que ocorreu aumento da atividade microbiana do solo, o que possivelmente contribuiu para a geração de sítios de anaerobiose. Apesar de a emissão de  $\text{CH}_4$  pelo solo não ser comum, Le Mer e Roger (2001) afirmam que a disponibilidade de  $\text{O}_2$  é o principal fator que limita o consumo desse gás no solo, enquanto a adição de material orgânico estimula a metanogênese. Além disso, esses autores ainda relatam que a atividade metanotrófica no solo é reduzida quando o conteúdo de água supera a capacidade de campo. Portanto, nas condições do experimento 1, as emissões positivas de  $\text{CH}_4$  podem estar relacionadas, por um lado, ao estímulo à metanogênese promovido pela adição de C via palha e, por outro, à redução da atividade metanotrófica, em decorrência da formação de sítios de anaerobiose. Além disso, a atividade metanotrófica também pode ter sido reduzida devido à maior umidade do solo, garantida pela presença de palha sobre a superfície.

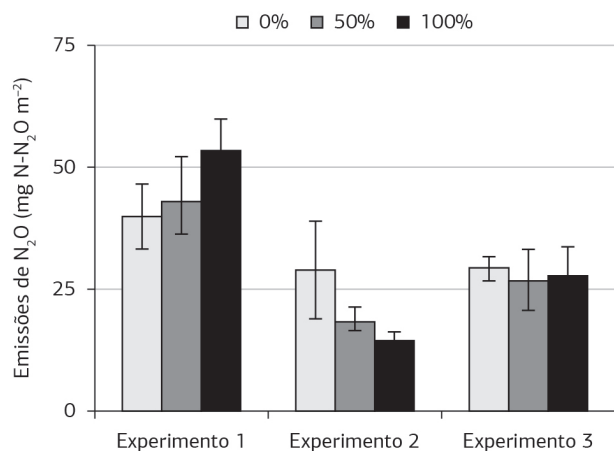
Aos seis meses após a última colheita, a quantidade de palha sobre a superfície influenciou negativamente as emissões de  $\text{CH}_4$  pelo solo e não apresentou efeito sobre as emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . O aumento de  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  na quantidade de palha sobre a superfície reduziu as emissões de  $\text{CH}_4$  em

$1,25 \text{ mg C-CH}_4 \text{ m}^{-2}$  (Figura 6). Esse comportamento revela que a presença de palha sobre o solo estimulou o consumo de  $\text{CH}_4$  pelos microrganismos metanotróficos, que utilizam esse gás como fonte de C e de energia. A maioria dos solos apresenta emissão negativa de  $\text{CH}_4$  e as taxas de consumo desse gás podem variar de  $5,5 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , em solos agrícolas, a  $9,9 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , em solos de floresta (Le Mer e Roger, 2001). Weier et al. (1996) também observaram, para áreas cultivadas com cana-de-açúcar, consumo de  $\text{CH}_4$  pelo solo quando ele estava coberto pela palha e após a aplicação de ureia. Oliveira et al. (2013), avaliando o efeito de aplicação de vinhaça em solo cultivado com cana-de-açúcar em Piracicaba, SP, também relataram a ocorrência de fluxos negativos de  $\text{CH}_4$ . Contudo, nossos resultados diferem dos observados por Carmo et al. (2013). Esses autores, avaliando as emissões de GEE induzidas pela presença de palha de cana-de-açúcar, não observaram relação entre as emissões de  $\text{CH}_4$  e a dose de palha sobre o solo.

Em nenhum dos três experimentos realizados observou-se efeito da quantidade de palha sobre a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  do solo (Figura 7). Em função da ausência de efeito da dose de palha sobre as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ , não foi feita análise de regressão para as emissões desse gás em nenhum dos experimentos. Vargas et al. (2013), em condições controladas, observaram que as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  do solo aumentaram em função da presença de palha na superfície, apresentando comportamento similar às emissões de  $\text{CO}_2$ : baixas emissões quando há baixa disponibilidade de água no solo, independentemente da presença de palha, e aumento das emissões com o aumento da umidade do solo, sendo esse aumento de maior intensidade quando há palha sobre o solo. As diferenças nas emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  entre os resultados observados por Vargas et al. (2013) e os apresentados no experimento 1 podem ser explicadas pela menor variabilidade das parcelas experimentais no experimento daqueles autores, que conduziram o estudo em casa de vegetação e não em condições de campo como as do presente trabalho, as quais são notadamente mais variáveis.



**Figura 6.** Emissão de  $\text{CH}_4$  do solo em função da dose de palha de cana-de-açúcar sobre a superfície, aos seis meses após a colheita; barras verticais indicam o erro padrão da média ( $n = 4$ ).



**Figura 7.** Emissão de óxido nítrico nos experimentos 1 (imediatamente após a colheita), 2 (aos seis meses após a colheita) e 3 (aos 12 meses após a colheita) em função da dose de palha de cana-de-açúcar mantida sobre o solo (0%, 50% e 100% das quantidades originais presentes em cada área experimental); barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 4).

Considerando a presença de restos culturais sobre o solo e o pequeno número de operações de preparo, que se restringem à reforma do canavial, feita apenas a cada seis ou oito anos, as áreas de cana-de-açúcar colhidas sem queima podem ser comparadas às áreas sob o sistema de plantio direto. Dessa forma, a deposição da palha de cana-de-açúcar sobre a superfície do solo em função da colheita sem queima também poderia estar associada ao aumento da emissão de GEE, de maneira similar ao que ocorre sob plantio direto.

Nas áreas sob plantio direto, o maior conteúdo de água no solo (Baggs et al., 2006), a maior temperatura devida à retenção de calor da própria palha (Liu et al., 2011), o aumento do conteúdo de C orgânico disponível no solo (Brentrup et al., 2000) e a qualidade bioquímica dos resíduos (Gomes et al., 2009) estimulam a produção de N<sub>2</sub>O. A maior quantidade de C disponível, por estimular o crescimento e a atividade microbiana e também por fornecer carbono orgânico aos microrganismos desnitrificadores (Cameron et al., 2013), influencia reações de nitrificação e desnitrificação (Bremner, 1997), os principais processos responsáveis pela produção de N<sub>2</sub>O no solo. Por outro lado, o crescimento microbiano e a atividade de microrganismos aeróbicos aumentam o consumo de O<sub>2</sub>, gerando sítios de anaerobiose no solo, os quais favorecem o processo de desnitrificação (Potthoff et al., 2005) e dificultam o consumo de CH<sub>4</sub> pelos microrganismos metanotróficos (Le Mer e Roger, 2001).

Por outro lado, em áreas onde o plantio direto foi implantado há menos de dez anos, as emissões de N<sub>2</sub>O do solo são maiores que nas áreas sob manejo convencional (Six et al., 2004). Entretanto, em áreas mais antigas de plantio direto, o solo emite quantidades menores de N<sub>2</sub>O em comparação ao solo de plantio convencional. Dessa forma, a ausência de efeito da quantidade de palha sobre as

emissões de N<sub>2</sub>O no presente estudo (Figura 7) sugere que as áreas de cana soca comportam-se de forma semelhante às áreas mais antigas de plantio direto.

Com base nos resultados obtidos, a retirada de parte da palha de cana-de-açúcar do campo, ou mesmo a retirada de 100% dos resíduos, diminui a emissão de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> do solo nos primeiros dias após a colheita, em comparação ao manejo tradicional. Apesar de não avaliado neste trabalho, isso possivelmente se deve à redução da atividade microbiana de decomposição, já que nesse caso a quantidade de resíduos adicionada foi reduzida em relação ao manejo convencional (deposição de toda a palha sobre o solo). No intervalo entre duas colheitas sucessivas, observou-se uma pequena alteração nas emissões de CH<sub>4</sub> pelo solo em função da quantidade de palha presente na superfície.

Assim, apesar de os experimentos terem sido realizados em apenas um tipo de solo, este trabalho sugere que a produção de etanol de segunda geração a partir da palha de cana-de-açúcar não aumenta as emissões de GEE do solo, demonstrando sua sustentabilidade ambiental. O pequeno aumento nas emissões de CH<sub>4</sub> em função da redução da quantidade de palha ocorrido no experimento 2 não representa um impasse ao uso da palha como matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração, pois a quantidade de palha retirada do campo pode ser definida de forma a não comprometer o balanço de GEE do biocombustível.

Contudo, nossos resultados são preliminares e estudos adicionais devem ser feitos em outras regiões produtoras e em outras classes de solo a fim de confirmar as informações apresentadas neste trabalho. Além disso, a seleção do material que será retirado do solo também deve ser considerada na avaliação das emissões de GEE induzidas pela quantidade de palha de cana-de-açúcar depositada sobre a superfície. Segundo Franco et al. (2013), as folhas que já estão secas no momento da colheita apresentam composição química favorável para a produção de etanol de segunda geração, enquanto os ponteiros (folhas ainda verdes) não são tão interessantes para esse fim, pois diminuem o rendimento. Entretanto, esse material representa uma importante fonte de nutrientes para a soqueira de cana-de-açúcar.

Ainda nesse sentido, ressalta-se que, apesar de a retirada da palha da superfície não ter alterado as emissões de GEE do solo, outros benefícios promovidos pela cobertura de solo podem ser reduzidos ou completamente perdidos com a remoção da palha para produção de etanol de segunda geração. Nesse sentido, estudos futuros também devem analisar simultaneamente o efeito da remoção da palha de cana-de-açúcar sobre as emissões de GEE e sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo; efeitos sobre as perdas de solo, água e nutrientes durante chuva; sobre incidência de pragas e doenças na cana-de-açúcar; sobre a produtividade da cana-de-açúcar; bem como sobre o consumo de combustível para coleta e transporte da palha até a unidade industrial.



## 4. CONCLUSÃO

Imediatamente após a colheita da cana-de-açúcar, as emissões de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> aumentam linearmente com o aumento da quantidade de palha depositada sobre o solo. Entretanto, esse comportamento desaparece seis ou 12 meses após a deposição da palha.

As emissões de N<sub>2</sub>O não são afetadas pela quantidade de palha, independentemente do tempo decorrido desde a sua deposição sobre o solo.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. *Scientia Agricola*, v.57, p.653-659, 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000400009>
- BAGGS, E.M.; CHEBII, J.; NDUFA, J.K. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. *Soil and Tillage Research*, v.90, p.69-76, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.08.006>
- BREMNER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.49, p.7-16, 1997. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009798022569>
- BRENTROP, F.; KÜSTERS, J.; LAMMEL, J.; KUHLMANN, H. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.5, p.349-357, 2000. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02978670>
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim Técnico IAC, n.106)
- CAMERON, K.C.; DI, H.J.; MOIR, J.L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, v.162, p.145-173, 2013. <http://dx.doi.org/10.1111/aab.12014>
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 935-944, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018>
- CARMO, J.B.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L.C.; SOUSA NETO, E.R.; PITOMBO, L.M.; DUARTE-NETO, P.J.; VARGAS, V.P.; ANDRADE, C.A.; GAVA, G.J.C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; ELIA NETO, A.; MARTINELLI, L.A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy*, v.5, p.267-280, 2013. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x>
- CERRI, C.E.P.; GALDOS, M.V.; CARVALHO, J.L.N.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. *Scientia Agricola*, v.70, p.361-368, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162013000500011>
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J.A. Manejo da calagem e seu efeito sobre componentes da acidez de um Oxisol sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.317-326, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200010>
- COMPANHIA BRASILEIRA DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2012/2013, quarto levantamento, abril/2013. Brasília: CONAB, 2013. 18p. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_04\\_09\\_10\\_30\\_34\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_abril\\_2013\\_4o\\_lev.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_30_34_boletim_cana_portugues_abril_2013_4o_lev.pdf)>. Acesso em: 21 out. 2013.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.527-535, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000300014>
- DAVIDSON, E.A.; MATSON, P.A.; BROOKS, P.D. Nitrous oxide emission controls and inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1145-1152, 1996. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040027x>
- DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETTI, O.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology*, v.103, p.152-161, 2012. PMID:22019267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.120>
- DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. *Scientia Agricola*, v.56, p.1215-1221, 1999. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161999000500025>
- FRANCO, H.C.J.; PIMENTA, M.T.B.; CARVALHO, J.L.N.; MAGALHÃES, P.S.G.; ROSSELL, C.E.V.; BRAUNBECK, O.A.; VITTI, A.C.; KÖLLN, O.T.; ROSSI NETO, J. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purpose in Brazil. *Scientia Agricola*, v.70, p.305-312, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162013000500004>
- GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F.S.; PICCOLO, M.C.; ZANATTA, J.A.; VIEIRA, F.C.B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based under subtropical climate. *Soil and Tillage Research*, v.106, p.36-44, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.10.001>
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long term sugarcane experiment in South Africa. *European Journal of Soil Science*, v.53, p.589-598, 2002. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00472.x>
- INTERGOVERNMENTAL PANNEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate change 2007: synthesis report. Geneva: IPCC, 2007. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511546013>
- LEAL, M.R.L.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C.O.F. Sugarcane straw availability, quality,

recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy*, v.53, p.11-19, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007>

LE MER J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, v.37, p.25-50, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6)

LIU, C.; WANG, K.; MENG, S.; ZHENG, X.; ZHOU, Z.; HAN, S.; CHEN, D.; YANG, Z. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.140, p.226-233, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.009>

OLIVEIRA, B.G.; CARVALHO J.L.N.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. *Geoderma*, v.200-201, p.77-84, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.005>

POTTHOFF, M.; DYCKMANS, J.; FLESSA, H.; MUHS, A.; BEESE, F.; JOERGENSEN, R.G. Dynamics of maize (*Zea mays* L.) leaf straw mineralization as affected by the presence of soil and the availability of nitrogen. *Soil Biology e Biochemistry*, v.37, p.1259-1266, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.11.022>

RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade do solo. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

SIX, J.; OGLE, S.; BREIDT, F.J.; CONANT, R.T.; MOSIER, A.R.; PAUSTIAN, K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Global Change Biology*, v.10, p.155-160, 2004. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x>

SORDI, R.A.; MANECHINI, C. Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective. *Scientia Agricola*, v.70, p.1-2, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162013000500002>

TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; TIMM, L.C. Variability of soil water content and bulk density in a sugar cane field. *Australian Journal of Soil Research*, v.40, p.604-614, 2002. <http://dx.doi.org/10.1071/SR01020>

VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO<sub>2</sub> e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.35-42, 2000.

VARGAS, V.P.; CANTARELLA, H.; MARTINS, A.A.; SOARES, J.R.; CARMO, J.B.; ANDRADE, C.A. Sugarcane crop residue increases N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions under high soil moisture conditions. *Sugar Tech*, v.16, p.174-179, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s12355-013-0271-4>

WEIER, K.L. Trace gas emissions from a trash blanketed sugarcane field in tropical Australia. In: WILSON, J.R.; HOGARTH, D.M.; CAMPBELL, J.A.; GARSIDE, A.L. (Ed.). *Sugarcane: Research Towards Efficient and Sustainable Production*. Brisbane: CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, 1996. p.271-272.