

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EMISSÃO DE CO₂ E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES,
MANEJO DO SOLO E PALHA EM ÁREAS DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

Mara Regina Moitinho

Bióloga

2013

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EMISSÃO DE CO₂ E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES,
MANEJO DO SOLO E PALHA EM ÁREAS DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

Mara Regina Moitinho

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Milton Parron Padovan

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2013

M715e Moitinho, Mara Regina
Emissão de CO₂ e sua relação com propriedades, manejo do solo
e palha em áreas de cana-de-açúcar / Mara Regina Moitinho. --
Jaboticabal, 2013
xi, 57 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013
Orientador: Newton La Scala Júnior
Banca examinadora: Antonio Sergio Ferraudo, Marcelo Valadares
Galdos
Bibliografia

1. Atributos do Solo. 2. Manejo da Cana-de-açúcar. 3. Preparo do
Solo. 4. Resíduos da Cultura. 5. Respiração do Solo. I. Título. II.
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.433.3:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.
e-mail: maramoitinho@gmail.com



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EMISSÃO DE CO₂ E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES, MANEJO DO SOLO E PALHA EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: MARA REGINA MOITINHO

ORIENTADOR: Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR


CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MILTON PARRON PADOVAN

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ANTONIO SERGIO FERRÁUDO

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. MARCELO VALADARES GALDOS

Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol / Campinas/SP

Data da realização: 28 de fevereiro de 2013.

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

MARA REGINA MOITINHO – Filha de Aurélio Rodriguês Moitinho Neto e Neuza da Silva Moitinho, nasceu em Paranhos, Mato Grosso do Sul, no dia 23 de março de 1986. Em fevereiro de 2007, ingressou no Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário da Grande Dourados – UNIGRAN, de Dourados-MS. Foi bolsista de iniciação científica do CNPq pela Embrapa Agropecuária Oeste de Dourados-MS, durante o período de fevereiro de 2009 até dezembro de 2010. Iniciou em março de 2011 o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. No mês de fevereiro de 2013, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo aprovada como Mestre em Agronomia.

“...que a importância de uma coisa não se mede com fita métrica nem com balanças nem barômetros, etc. Que a importância de uma coisa há que ser medida pelo encantamento que a coisa produza em nós.”

Henoch H. Barros

DEDICO

Aos meus pais Aurélio Rodriguês Moitinho Neto e Neuza da Silva Moitinho, às pessoas a quem devo a minha vida e tudo o que sou. Aos meus irmãos Maria Cristina Moitinho de Quadros e Aurélio Rodriguês Moitinho, por estarem sempre presentes, mesmo na distância.

Aos meus sobrinhos Jean Carlos Moitinho de Quadros e Jéssica Mayara Moitinho de Quadros.

OFEREÇO

Ao meu companheiro Luís Guilherme Vidal, pelo seu carinho, dedicação, apoio e parceria no enfrentamento das dificuldades durante todos esses anos de convívio. Às minhas *pets* “Kita, Pretinha e Mili”, simplesmente pelo fato de existirem em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nosso Senhor Jesus Cristo, sempre presentes em todos os momentos de minha vida iluminando meus caminhos.

Ao professor Newton La Scala Júnior, pela orientação na condução deste estudo, seus ensinamentos, paciência, confiança e apoio em futuros trabalhos.

Ao professor Milton Parron Padovan, pela valiosa lição de vida e perseverança. Obrigada pelo seu apoio incondicional, sem o qual não chegaria até aqui.

Ao amigo Alan Rodrigo Panosso, pela grande contribuição na estruturação e desenvolvimento deste trabalho, pelo carinho e palavras de incentivo e motivação.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Liziane De Figueiredo Brito e Glauco de Souza Rolim. E aos professores membros da Banca de Defesa, Antônio Sergio Ferraudó e Marcelo Valadares Galdos, cujas críticas e sugestões contribuíram de forma significativa para a qualidade final deste estudo.

Aos amigos e colegas de departamento, Elton da Silva Bicalho, João Fernandes da Silva Junior, Ricardo de Oliveira Bordonal, Eduardo Barretto de Figueiredo, Willians Luiz Bueno de Souza, Sísara Rocha Oliveira e Luciano Ito Perillo.

Ao querido amigo Daniel De Bortoli Teixeira, pela amizade, carinho e dedicação, sempre muito solícito.

À Ismênia Ribeiro de Oliveira, pelo agradável convívio, sendo sempre uma excelente companhia em conversas inteligentes e bem humoradas.

Aos amigos e funcionários do departamento de Ciências Exatas, Zezé, Shirley, Norival e Adriana, pelo carinho e amizade.

À Gisele de Brito Salomão, pela enorme ajuda com as análises de solos, sem a qual não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

À Jaqueline Silva Nascimento e ao Fermino de Almeida Ferreira, pelo empenho e dedicação durante as avaliações em campo.

Aos amigos e funcionários da Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO), Ivo de Sá Motta, Joaquim José Castilho, Willian Marra Silva, Antônio Carlos L. Garcia, Ilson França Soares, Luiz Moreira de Moraes, Mário Paes Kozima e Gabriel José Carneiro.

À Embrapa Agropecuária Oeste, pela concessão da área experimental.

À CAPES pela ajuda financeira.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 Introdução e Justificativa	1
1.2 Referências.....	8
CAPÍTULO 2 - EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES EDÁFICAS EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	14
Resumo.....	14
Summary.....	15
2.1 Introdução.....	15
2.2 Materiais e Métodos	18
2.3 Resultados e Discussão.....	21
2.3.1 Variabilidade temporal da emissão de CO ₂ do solo.....	21
2.3.2 Dependência linear simples entre emissão de CO ₂ e propriedades físicas e químicas do solo.....	22
2.3.3 Dependência multivariada entre emissão de CO ₂ e propriedades físicas e químicas do solo.....	26
2.3.4 Dependência linear simples entre as propriedades correlacionadas nos componentes principais.....	29
2.4 Conclusões	31
2.5 Literatura Citada.....	32
CAPÍTULO 3 - EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO SOB EFEITO DO PREPARO E RESÍDUOS DA COLHEITA EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	38
Resumo.....	38
Summary.....	39
3.1 Introdução.....	40
3.2 Materiais e Métodos	42
3.3 Resultados e Discussão.....	44
3.4 Conclusões	53
3.5 Literatura Citada.....	54

EMISSÃO DE CO₂ E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES, MANEJO DO SOLO E PALHA EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – A emissão de CO₂ do solo (FCO₂) em áreas agrícolas é um processo resultante da interação de diferentes fatores, tais como as condições de clima e solo. Em adição, as práticas adotadas de manejos do solo e da cultura determinam a intensidade desse processo. Neste estudo, objetivou-se: (i) investigar as possíveis relações existentes entre as propriedades edáficas e o processo de emissão de CO₂ do solo em áreas sob plantio de cana-de-açúcar, e (ii) o efeito do preparo do solo e da deposição de resíduos da cultura da cana-de-açúcar na FCO₂, temperatura e umidade do solo, durante a reforma do canavial. O estudo foi conduzido na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados-MS, e dividido em duas condições de campo. Na primeira condição, foram selecionados 60 pontos ao longo de uma área plantada de 3.000 m², composta por uma mistura das cultivares (RB 93-5744; RB 72-454; RB 93-5608; RB 85-5113 e SP 83-2847). Para as avaliações da FCO₂, foi utilizado o sistema portátil LI-8100, que quantifica a concentração de CO₂ em seu interior, por meio de espectroscopia de absorção óptica, na região espectral do infravermelho. Concomitantemente à avaliação da FCO₂, foram medidas as variáveis temperatura do solo (termômetro integrante do sistema LI-8100) e umidade do solo (aparelho TDR). A FCO₂ apresentou correlações positivas com a matéria orgânica do solo (MOS) ($r = 0,67$; $p < 0,001$), a porosidade livre de água (PLA) ($r = 0,71$; $p < 0,001$) e o teor de fósforo disponível ($r = 0,28$; $p < 0,05$), e negativa com a relação C/N do solo ($r = -0,75$; $p < 0,001$) e a umidade do solo ($r = -0,29$; $p < 0,05$). Dentre as associações mais expressivas, a FCO₂ foi relacionada diretamente com a MOS e a PLA, e inversamente com a relação C/N do solo. Na segunda condição de estudo, após a colheita da cana-de-açúcar, a área foi dividida em três parcelas experimentais de 25 x 40 m, constituindo os seguintes manejos: sem preparo do solo e com resíduos da colheita depositados sobre a superfície do solo (SPCR); sem preparo do solo e sem resíduos (SPSR), e com preparo do solo e sem resíduos (CPSR). Foram selecionados 10 pontos em cada parcela para as medições da FCO₂, temperatura e umidade do solo. A menor média da FCO₂ foi observada no manejo SPCR ($2,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), quando comparado aos manejos SPSR ($2,90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e CPSR ($3,22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). A umidade do solo foi a variável que apresentou valores diferenciados entre os manejos, sendo positivamente correlacionada ($r = 0,55$, $p < 0,05$) com as variações temporais da FCO₂ nos manejos SPCR e CPSR. Em adição, a média da temperatura do solo diferiu ($p < 0,05$) somente em SPCR ($24,3 \text{ }^\circ\text{C}$), em relação aos manejos SPSR ($26,3 \text{ }^\circ\text{C}$) e CPSR ($26,5 \text{ }^\circ\text{C}$), sugerindo que a manutenção do resíduo da colheita da cana-de-açúcar sobre a superfície proporciona uma temperatura do solo mais amena.

Palavras-chave: atributos do solo, manejo da cana-de-açúcar, preparo do solo, resíduos da cultura, respiração do solo

CO₂ EMISSION AND ITS RELATION TO PROPERTIES, SOIL MANAGEMENT AND STRAW IN AREAS OF SUGAR CANE

ABSTRACT – The CO₂ emission from soil (FCO₂) in agricultural areas is a process resulting from the interaction of different factors, such as climatic conditions and soil. In addition, the adopted practices of soil management and crop determine the intensity of this process. This study aimed to (i) investigate the possible relationships between the soil properties and process CO₂ emissions from soil under in areas under cultivation of sugar cane, and (ii) the effect of tillage and crop residue deposition of cane sugar in FCO₂, temperature and soil moisture during the reform of the sugar plantation. The study was conducted in the experimental area of Embrapa Agropecuária Oeste, MS, and divided into two field conditions. In the first condition were selected 60 points along a planted area of 3.000 m² composed of a mixture of cultivars (RB 93-5744; RB 72-454; RB 93-5608; RB 85-5113 and SP 83-2847). For the evaluations of FCO₂ was used system LI-8100, quantifying the concentration of CO₂ inside by optical absorption spectroscopy in the infrared spectral region. Concurrently with the evaluation of FCO₂ were measured soil temperature (thermometer built into the system LI-8100) and soil moisture (TDR device). The FCO₂ showed positive correlations with soil organic matter (SOM) ($r = 0.67$, $p < 0.001$), free water porosity (PLA) ($r = 0.71$, $p < 0.001$) and available phosphorus ($r = 0.28$, $p < 0.05$) and negatively correlated with C/N ratio of the soil ($r = -0.75$, $p < 0.001$) and soil moisture ($r = -0.29$, $p < 0.05$). Among the most significant associations, the FCO₂ was directly related to the SOM and PLA, and inversely with C/N ratio of the soil. In the second study condition, after harvesting the sugar cane area was divided into three plots of 25 x 40 m, resulting in the following managements: no tillage and crop residues deposited on the soil surface (SPCR); without tillage and without waste (SPSR) and no tillage and residue (CPSR). Were determined 10 points on each plot for measurements of FCO₂, temperature and soil moisture. The lowest average FCO₂ was observed in the management SPCR ($2.16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) compared to managements SPSR ($2.90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and CPSR ($3.22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Soil moisture was the variable that most values differentiated between managements, being positively correlated ($r = 0.55$, $p < 0.05$) with the temporal variations in FCO₂ managements SPCR and CPSR. In addition, the soil temperature difference ($p < 0.05$) only in SPCR ($24.3 \text{ }^\circ\text{C}$) compared to managements SPSR ($26.3 \text{ }^\circ\text{C}$) and CPSR ($26.5 \text{ }^\circ\text{C}$), suggesting that the maintenance of crop residue of cane sugar on the surface provides a soil temperature cooler.

Keywords: soil properties, management of sugar cane, tillage, crop residue, soil respiration

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução e justificativa

A ocorrência de fenômenos naturais extremos, como as intensas ondas de calor, tempestades, secas e furacões, cada vez mais severos, assim como a extinção de inúmeras espécies têm sido apontados como consequência das mudanças ocorridas no clima global. Tais mudanças são decorrentes principalmente da emissão de gases do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4), clorofluorcarbonos (CFCs) e vapores d'água, encontrados naturalmente na atmosfera e responsáveis por manter a temperatura média do planeta entre $15\text{ }^\circ\text{C}$ e $18\text{ }^\circ\text{C}$. Esses gases têm a capacidade de absorver a radiação infravermelha, que é refletida pela superfície terrestre, conseguindo, assim, manter a temperatura nesses valores. Sem esse fenômeno, a temperatura do planeta seria, em média, $30\text{ }^\circ\text{C}$ mais fria (SMITH et al., 2003). Entretanto, a concentração de GEE na atmosfera vem-se intensificando, elevando a temperatura da biosfera terrestre e ocasionando as mudanças climáticas.

Na década de 70, os cientistas relacionaram o aumento da concentração de GEE na atmosfera ao processo de aquecimento do planeta. Em 1988, as Nações Unidas criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), reunindo 2.500 cientistas para estudar esse fenômeno. Em 2007, o IPCC, em seu 4º relatório, afirmou que a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera desde a era pré-industrial (1750) até 2005 havia aumentado significativamente. Nesse período, o dióxido de carbono passou de 280 ppm (partes por milhão) para 379 ppm; o metano, de 715 ppb (partes por bilhão) para 1.774 ppb; e o óxido nitroso, de 270 ppb para 319 ppb. Os relatórios chamaram a atenção para as elevações na temperatura média do planeta, que poderão aumentar $5,8\text{ }^\circ\text{C}$ até o final do século XXI. Neste mesmo relatório, a agricultura foi apontada como uma grande fonte emissora de GEE, sendo responsável mundialmente por aproximadamente 22% das emissões totais de CO_2 , 80% das emissões de N_2O e 55% das emissões de CH_4 (IPCC, 2007).

No Brasil, esses valores são ainda mais expressivos. Estima-se que 75% das

emissões de CO₂, 94% das emissões de N₂O e 91% das emissões de CH₄ sejam oriundas de atividades agrícolas, em especial mudanças do uso e manejo dos solos (CERRI et al., 2007). O País tem uma posição de destaque em relação à emissão de GEE, figurando em quarto lugar entre os maiores emissores, embora possua uma eficiente matriz energética, destacando-se mundialmente pela sustentabilidade do setor com forte participação de fontes renováveis de energia, como a biomassa energética (extraída da cana-de-açúcar) e a hidroeletricidade.

O biocombustível produzido pelo setor sucroenergético brasileiro está cada vez mais conquistando o mercado externo. O País que, é pioneiro no uso do etanol como combustível veicular, ocupa a primeira posição no ranking mundial como exportador, respondendo por mais da metade do etanol comercializado no mundo (CONAB, 2012).

De acordo com dados da Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB), as áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar continuam em expansão no Brasil. O Estado de São Paulo é o maior produtor, com 51,87% (4.419,46 mil hectares), seguido por Goiás, com 8,52% (725,91 mil hectares), Minas Gerais, com 8,47% (721,86 mil hectares), Paraná, com 7,17% (610,83 mil hectares), Mato Grosso do Sul, com 6,37% (542,70 mil hectares), Alagoas, com 5,23% (445,71 mil hectares), Pernambuco, com 3,84% (327,61 mil hectares) e demais estados produtores com representações abaixo de 3% (CONAB, 2012).

Embora o Mato Grosso do Sul ocupe a quinta posição no ranking nacional, o Estado é o que mais cresceu em expansão e consolidação de novas áreas cultivadas com a cultura nos últimos anos, aumentando em aproximadamente 40% as áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar. De acordo com os avanços alcançados até o momento e com as projeções futuras, em poucos anos, o Estado passará a ser o segundo maior produtor de cana-de-açúcar no Brasil (BIOSUL, 2012). Atualmente, o Estado conta com 24 unidades instaladas, sendo 93% da colheita realizada mecanicamente (87% cana crua e 6% com a queima prévia do canavial) e 7% colhida manualmente e com queima. Diante desse crescimento acelerado do setor agrícola e da constante preocupação com os impactos ambientais oriundos de práticas inadequadas de uso e manejo dos solos agrícolas, responsáveis por emissões significativas de GEE (BAYER et al., 2006), governos

têm debatido formas de diminuir tais emissões sem prejudicar o crescimento econômico do setor.

Dentre os gases que causam o efeito estufa, o CO₂ é o que mais contribui para esse fenômeno, devido à grande quantidade emitida na atmosfera, sendo considerado o mais importante GEE antropogênico. As emissões anuais de CO₂ na atmosfera aumentaram em 80% entre 1970 e 2004 (IPCC, 2007).

As principais estratégias adotadas para a redução das emissões de CO₂ consistem na diminuição da queima de combustíveis fósseis, minimização do desmatamento e queimadas, manejo adequado do solo e, por fim, estratégias de maximização do sequestro de carbono no solo (CERRI et al., 2007). Os solos são considerados grandes reservatórios naturais de carbono. Em uma escala global, solos de até 1 m de profundidade podem conter até 1.500 GtC (gigatonelada de carbono), o que equivale a quase três vezes a quantidade de carbono presente na biomassa terrestre e duas vezes a quantidade estocada na atmosfera (BRUCE et al., 1999).

Os estudos referentes aos mecanismos de sequestro de carbono estão sendo direcionados em duas áreas básicas: uma relacionada à compreensão dos processos de emissão e absorção por diferentes ecossistemas naturais (AMADO et al., 2001; FERNANDES et al., 2002; SIX et al., 2006) e outra no desenvolvimento de alternativas de uso da terra que promovam o sequestro de CO₂ por esses sistemas (LA SCALA et al., 2001; LAL, 2004; DE REZENDE et al., 2006; PANOSSO et al., 2009). Assim, torna-se imprescindível compreender os mecanismos envolvidos no processo de produção e emissão de CO₂ do solo, bem como os fatores que influenciam tais processos, para futuras ações mitigadoras.

A produção de CO₂ no interior do solo é basicamente um processo bioquímico diretamente relacionado à atividade biológica, como a respiração de raízes e a decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana, influenciada pela temperatura e umidade do solo (EPRON et al., 2006; LAL, 2009). Além da produção de CO₂, faz parte do processo de emissão o transporte do gás do interior do solo até a superfície. As trocas de gases entre o solo e a atmosfera são governadas por dois mecanismos: movimento de gás de uma zona de maior concentração para outra de menor (difusão), e fluxo de massa, ocasionado pelo movimento conjunto do ar do

interior dos solos misturado ao gás, respondendo a um gradiente de pressão, o qual varia em função de textura, estrutura e teor de umidade do solo (BALL; SIMTH, 1991; KANG et al., 2000).

Por outro lado, o CO₂ emitido dos solos agrícolas é resultante de interações entre o clima e as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como o teor de matéria orgânica (LAL, 2009), populações de microrganismos e densidade do sistema radicular (DUIKER; LAL, 2000; LONGDOZ; YERNAUX; AUBINET, 2000), densidade do solo (XU; QI, 2001), pH do solo (RETH; MARKUS; FALGE, 2005; FUENTES et al., 2006), teor de fósforo disponível (DUAH-YENTUMI et al., 1998), textura (DILUSTRO et al., 2005), capacidade de troca catiônica (LA SCALA et al., 2000), mineralogia do solo (LA SCALA et al., 2000), teor de magnésio (XU; QI, 2001), preenchimento de água nos poros (SMART; PEÑUELAS, 2005), temperatura do solo (USSIRI; LAL, 2009; SILVA-OLAYA et al., 2013), umidade do solo (LA SCALA et al., 2006), e até mesmo a posição topográfica do terreno (EPRON et al., 2006; BRITO et al., 2009) é apontada como um fator que influencia a taxa de respiração do solo.

Contudo, algumas dessas propriedades estão relacionadas à emissão de CO₂, por afetarem de alguma forma a atividade microbiana presente no interior do solo e/ou a formação, a estabilização e a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS). A MOS possui estreita relação com o fluxo de CO₂, pois constitui a fonte primária de energia para a atividade dos microrganismos do solo. De acordo com Carvalho et al. (2010), a maior reserva de carbono orgânico da superfície terrestre encontra-se na MOS.

O balanço entre a entrada e a saída de carbono no solo, pela adição e decomposição dos resíduos, dependerá, dentre outros fatores, da dinâmica da atividade microbiana, que é regulada pela relação C/N (carbono/nitrogênio) desse resíduo (SIX et al., 2006). A relação C/N do solo também está relacionada com a atividade microbiana, com o grau de humificação e com a estabilidade da MOS. Quanto mais baixa for essa relação, maior será o processo de decomposição do material orgânico, e vice-versa (SOUSA, 2003; DORODNIKOV et al., 2011).

De acordo com Sousa (2003), em solos agrícolas, os valores para a relação C/N normalmente variam entre 9 e 14, apresentando decréscimo no perfil do solo,

com o aumento da profundidade. A alta relação C/N também afeta a disponibilidade de nitrogênio no solo, isso porque ocorre um esgotamento do nitrogênio, devido ao aumento da demanda desse elemento pela microbiota. Sobre tais condições, alguns estudos sustentam que a adição de nitrogênio ao solo aumenta a emissão de CO₂, pois estimula a decomposição dos resíduos, principalmente os mais recalcitrantes (RECOUS; AITA; MARY, 1999; MARQUES et al., 2000).

Além da qualidade dos resíduos, a aeração, a umidade, a temperatura, o pH e o suprimento nutricional do solo são importantes reguladores da atividade decompositora dos microrganismos (SIX et al., 2006). No que diz respeito à aeração do solo, o estudo do sistema poroso é importante para a melhor compreensão do armazenamento e do movimento de água e de gases no interior do mesmo.

Schwendenmann et al. (2003), investigando a variação espacial e temporal do fluxo de CO₂ em florestas, observaram a influência do teor de carbono do solo e da concentração de fósforo (P) na emissão de CO₂ do solo. Contudo, o principal fator identificado para explicar as variações temporais no fluxo de CO₂ foi o conteúdo de água presente no solo. Ainda segundo os autores, o fluxo de CO₂ diminuiu nos períodos em que o solo apresentava elevada umidade, provavelmente devido à menor difusão de gás e taxa de produção de CO₂.

Linn e Doran (1984) observaram que a atividade microbiológica e as emissões de CO₂ e N₂O foram intensificadas em condições próximas a 60% de preenchimento dos poros por água. Entretanto, a atividade microbiana aeróbica diminuiu com valores acima de 60% como resultado da aeração reduzida. Em contrapartida, Panosso et al. (2011) e Teixeira et al. (2012), em estudos mais recentes desenvolvidos em área de cana-de-açúcar, observaram que a porosidade livre de água foi o atributo que melhor explicou a variabilidade espaçotemporal da emissão de CO₂ do solo.

Flutuações na temperatura do solo e do ar também podem explicar as variações nas taxas de respiração do solo (DUIKER; LAL, 2000; LONGDOZ; YERNAUX; AUBINET, 2000). Fang e Moncrieff (2001) observaram que a respiração do solo foi intensificada quando a temperatura do solo apresentava valores até 32 °C com a temperatura ambiente próxima de 40 °C, enquanto em temperaturas mais elevadas a respiração era reduzida. Diante do exposto, conclui-se que não há um

determinante único no processo de emissão de CO₂ do solo; entretanto, a intensidade do fluxo dependerá das práticas adotadas de manejos do solo e da cultura (LAL, 2004).

As atividades de preparo do solo, procedimento comum na agricultura convencional, interferem no fluxo de CO₂, independentemente das condições edáficas, conforme indicam vários estudos (FORTIN et al., 1996; REICOSKY; DUGAS; TORBERT, 1997; ROCHETTE; ANGERS, 1999; LA SCALA et al., 2001; ALVAREZ et al., 2001) que, embora conduzidos em diferentes tipos de solos e clima, apresentam similaridades nos padrões da emissão de CO₂ do solo. As elevações iniciais na taxa de respiração do solo estão relacionadas com a intensidade do preparo. Em um curto período de 5 horas, até 81 g m⁻² de CO₂ podem ser emitidos para a atmosfera (REICOSKY; DUGAS; TORBERT, 1997). 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 a temperaturas mais elevadas (BEARE et al., 1994; REICOSKY; LINDSTROM, 1993). Entretanto, após certo período, ocorre a redução das frações lábeis da MOS, e a atividade basal microbiana decresce (SIX et al., 2006).

Em adição, o preparo também deixa o solo suscetível ao processo de erosão, o que resulta em maior perda de carbono (BERTOL et al., 2003). A incorporação dos resíduos vegetais ao solo, no momento do preparo, também resulta em acréscimos nas taxas de emissões de CO₂, pois aumenta a área de contato entre o solo e o resíduo, que, associados à maior aeração e temperatura, facilitam a ação da atividade microbiana (SILVA-OLAYA et al., 2013).

Por outro lado, a manutenção de resíduos culturais sobre a superfície do solo contribui para elevar sua rugosidade, que, em associação ao mínimo ou nulo revolvimento do solo, favorece um controle mais eficaz da erosão hídrica. Essa cobertura dissipa a energia da chuva e, em parte, da enxurrada, protege a superfície do solo do selamento e, com isso, aumenta a taxa de infiltração, constituindo-se em uma prática eficiente no desenvolvimento da estrutura do solo e contribuindo para a reversão ou a prevenção do processo de degradação (LEITE et al., 2004; PES, 2009).

Em áreas de cana-de-açúcar, a deposição dos resíduos da colheita na superfície contribui de forma positiva com alguns atributos do solo, como, por exemplo, nas taxas de infiltração e na estabilidade de agregados (GRAHAM; HAYNES, 2006), proporcionando, em algumas ocasiões, um significativo aumento no teor da matéria orgânica do solo (CANELLAS, et al., 2010), menores valores de resistência do solo à penetração e densidade do solo (SOUZA et al. 2005), além de propiciar um microclima que contribui de forma a amenizar, 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),

De acordo com Razafimbelo et al. (2006), o sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, no qual os resíduos são mantidos sobre o solo, contribui para o aumento do estoque de carbono orgânico nas camadas mais superficiais do solo. Estes mesmos autores observaram um acréscimo, a longo prazo, de 20% e 15% no teor de carbono orgânico das camadas de 0-5 e 0-10 cm, respectivamente. Contudo, em estudos recentes, La Scala, De Figueiredo e Panosso (2012) concluem que, apesar de o sistema de manejo de cana crua contribuir para que grandes quantidades de carbono sejam depositadas na superfície do solo por diversas safras, no processo de reforma do canavial, grande parte desse carbono pode ser perdida em curto período de tempo (REICOSKY; LIDSTROM, 1993; DE RESENDE et al., 2006; LA SCALA et al., 2006), reduzindo o potencial de sequestro de carbono neste agrossistema.

Dentro desse contexto, fica evidente a complexidade do fenômeno, sendo, portanto, a caracterização do padrão da emissão de CO₂ do solo um dos grandes desafios da comunidade científica, devido às incertezas relacionadas a essas medidas, que, além de apresentarem grande variação ao longo do tempo e do espaço, as variáveis envolvidas no processo de produção e emissão são também dependentes das condições edafoclimáticas locais. Neste sentido, o presente estudo teve por objetivo geral investigar a emissão de CO₂ do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sobre duas condições de campo: antes da colheita e após a colheita. Os objetivos do estudo foram investigar possíveis relações entre os atributos do solo e o processo de emissão de CO₂ do solo em áreas sob cultivo de

cana-de-açúcar e compreender o efeito da manutenção da palha residual e do preparo do solo sobre as emissões de CO₂, temperatura e umidade do solo durante a reforma do canavial.

1.2 Referências

ALVAREZ, R.; ALVAREZ, C. R.; LORENZO, G. Carbon dioxide fluxes following tillage from a Mollisol in the Argentine rolling Pampa. **European Journal of Soil Biology**, Issy les Moulineaux, v. 37, n. 3, p. 161-166, 2001.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 237-245, 2006.

BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: SMITH, K.; MULLINS, C. (Ed.). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 511-549.

BEARE, M. H.; CABRERA, M. L.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 3, p. 787-795, 1994.

BERTOL, I.; MELLO, E. L.; GUADAGNIN, J. C.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Nutrients losses by water erosion. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 581-586, 2003.

BIOSUL. **Encerramento da Safra 2012/2013**. Disponível em: <http://www.biosulms.com.br/arqv/coletiva_encerramento_11_12.pdf>. Acesso em: 25 out. 2012.

BRITO, L. F.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA Jr., N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77-83, 2009.

BRUCE, J. P.; FROME, M.; HAITES, E.; JANZEN, H.; LAL, R. Carbon sequestration in soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 54, n. 1, p. 382-389, 1999.

CANELLAS, L. P.; BUSATO, J. G.; DOBBS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; RUMJANEK,

V. M.; OLIVARES, F. L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, n. 3, p. 375–383, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.

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 Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n.1, p. 83-89, 2007.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, segundo levantamento, agosto/2012. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília. Conab. Disponível: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_05_09_11_59_boletim_cana_portugues_-_agosto_2012_2o_lev.pdf Safra 2010/2011>. Acesso em: 31 out. 2012.

DE RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; DE OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugarcane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 281, n. 1-2, p.339–351, 2006.

DILUSTRO, J. J.; COLLINS, B.; DUNCAN, L.; CRAWFORD, C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 87-97, 2005.

DORODNIKOV, M.; KUZYAKOV, Y.; FANGMEIER, A.; WIESENBERG, G. L. B. C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric CO₂: Turnover vs. Stabilization. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 43, n. 3, p. 579-589, 2011.

DUIKER, S. W.; LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1-2, p. 21-30, 2000.

DUAH-YENTUMI, S.; RONN, R.; CHRISTENSEN, S. Nutrients limiting microbial growth in a tropical forest soil of Ghana under different management. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 19-24, 1998.

EPRON, D.; BOSCH, 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**, Nova York, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FANG, C.; MONCCRIEFF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.33, n. 2, p.155-165, 2001.

FERNANDES, S. A. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; PICOLLO, M. C. Seasonal variation of chemical properties and CO₂ and CH₄ fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in ultisol of the Brazilian Amazon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, n. 3-4, p. 227-241, 2002.

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**, Madison, v. 60, n. 5, p. 1541-1547, 1996.

FUENTES, J. P.; BEZDICEK, D. F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S.; SMITH, J. L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 2, 123-131, 2006.

GRAHAM, M. H.; HAYNES, R.J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microbial community in the row and inter-row of sugarcane under burning and trash retention. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, n. 1, p. 21–31, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - **IPCC. Climate Change 2007: Mitigation**. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

KANG, S.; KIM, S.; OH, S.; LEE, D. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover, and air temperature. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 136, n. 3, p. 173-184, 2000.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.

LA SCALA JUNIOR, N.; LOPES, A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, n. 3-4, p. 163-166, 2001.

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**, Amsterdam, v.91, n. 1-2, p. 244-248, 2006.

LA SCALA JR., N.; DE FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. On the mitigation potential associated with atmospheric CO₂ sequestration and soil carbon accumulation in major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, p. 775-785, 2012.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 122, 2004.

LEITE, D.; BERTOL, I.; GUADAGNIN, J. C.; SANTOS, E. J.; RITTER, S. R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I - Perdas de solo e água. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1033-1044, 2004.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed Forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. **Global Change Biology**, Oxford, v. 6, n. 1, p. 907-917, 2000.

LINN, D. M.; J. W. DORAN. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 48, n. 6, p. 1267-1272, 1984.

MARQUES, T. C. L. L. S. M.; VASCONCELLOS, C. A.; FILHO, I. P.; FRANÇA, G. E.; CRUZ, J. C. Evolvimento de dióxido de carbono e mineralização do nitrogênio em latossolo vermelho-escuro com diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p. 581-589, 2000.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 2, p. 275-282, 2009.

PANOSSO, A. R.; MARQUES, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190–196, 2011.

PES, L. Z. **Fluxo de gases de efeito estufa em sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no planalto do Rio Grande do Sul**. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2009.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRE´-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystems Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285–289, 2006.

RECOUS, S.; AITA, C.; MARY, B. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, n. 1, p. 119-133, 1999.

REICOSKY, D. C.; LINDSTROM, N. J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 6, p. 1237-

1245, 1993.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 41, n.1, p. 105-118, 1997.

RETH, S.; MARKUS, R.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – A modified model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, n. 1, p. 21-33, 2005.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D. A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 4, p. 621-628, 1999.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; LA SCALA JR., N.; DIAS, C. T. S.; CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2013.

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**, Madison, v. 70, n. 2, p. 555-569, 2006.

SMART, D. R.; PEÑUELAS, J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 247-57, 2005.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, n. 4, p. 779–791, 2003.

SOUSA, S. G. A. **Produção e Decomposição de Serrapilheira de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial, Rio Barigui, Araucária, PR.** 2003. 127 f. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2003.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p.271-278, 2005.

TEIXEIRA, 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 Ciência do Solo**,

Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1466-1475, 2012.

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**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 39-47. 2009.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 667-677, 2001.

CAPÍTULO 2 – Emissão de CO₂ do solo e sua relação com propriedades edáficas em áreas de cana-de-açúcar

Resumo

A produção de CO₂ no interior do solo ocorre devido aos processos biológicos, como a decomposição dos resíduos orgânicos e a respiração dos organismos e raízes do solo. Já a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera resulta de interações entre o clima e as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O objetivo deste estudo foi investigar as possíveis relações existentes entre as propriedades edáficas e o processo de emissão de CO₂ do solo (FCO₂) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, ao longo de 10 dias de estudo. Para as avaliações da FCO₂, foi utilizado o sistema portátil LI-8100, que monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho. Concomitantemente à avaliação de FCO₂, foram medidas as variáveis temperatura do solo (termômetro integrante do sistema LI-8100) e umidade do solo (aparelho TDR). Após o 10º dia de avaliações, foram realizadas as coletas de solo para as análises físicas e químicas. A média geral da FCO₂ foi 2,08 μmol m⁻² s⁻¹, da temperatura do solo foi 19,48 °C e da umidade do solo foi 17,20%. A FCO₂ apresentou correlações positivas com a matéria orgânica do solo (MOS) (r = 0,67; p < 0,001), a porosidade livre de água (PLA) (r = 0,71; p < 0,001), o volume total de poros (VTP) (r = 0,59; p < 0,05) e o teor de fósforo disponível (r = 0,28; p < 0,05), e negativa com a relação C/N do solo (r = -0,75; p < 0,001) e a umidade do solo (r = -0,29; p < 0,05). Dentre as associações mais expressivas, a FCO₂ foi relacionada diretamente com a MOS e a PLA, e inversamente com a relação C/N do solo.

Termos de indexação: atributos do solo, correlações, C/N, matéria orgânica, porosidade, respiração do solo.

Summary: CO₂ emission and its relationship to soil properties in areas of sugar cane

The production of CO₂ in the soil is due to biological processes such as the decomposition of organic waste and respiration of roots and soil organisms. Since the emission of CO₂ from soil to the atmosphere is the result of interactions between climate and the physical, chemical and biological soil properties. The objective of this study was to investigate the possible relationships between the soil properties and the process of soil CO₂ emission (FCO₂) in areas planted with cane sugar, over 10 study days. For the evaluations of FCO₂ was used system LI-8100, that monitors changes in CO₂ concentration within the camera, by optical absorption spectroscopy in the infrared region. Concurrently with the evaluation of FCO₂ variables were measured soil temperature (thermometer built into the system LI-8100) and soil moisture (TDR device). After the 10th day of the evaluations were conducted of soil sampling for physical and chemical analysis. The overall average of FCO₂ was 2.8 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, the soil temperature of 19.48 °C and 17.20% soil moisture. The FCO₂ showed positive correlations with soil organic matter (SOM) ($r = 0.67$, $p < 0.001$), free water porosity (PLA) ($r = 0.71$, $p < 0.001$) and available phosphorus ($r = 0.28$, $p < 0.05$) and negatively correlated with C/N ratio of the soil ($r = -0.75$, $p < 0.001$) and soil moisture ($r = -0.29$, $p < 0.05$). Among the most significant associations, the FCO₂ was directly related to the SOM and PLA, and inversely with C/N ratio of the soil.

Index terms: soil attributes, correlations, C/N, organic matter, porosity, soil respiration.

2.1 Introdução

A concentração de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases de efeito estufa, como o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e clorofluorcarbonos (CFCs) na atmosfera, tem aumentado consideravelmente, e desde a revolução industrial, as emissões anuais de CO₂ aumentaram 80% entre 1970 e 2004. O aumento da concentração desse gás na atmosfera acarreta mudanças climáticas pela

intensificação do fenômeno de efeito estufa, elevando a temperatura média do planeta, que poderá aumentar 5,8 °C até o ano de 2100 (IPCC, 2007).

As estratégias mais empregadas para a redução das emissões incluem maior eficiência energética, utilização de fontes renováveis, essencialmente gerada por hidroelétricas e biocombustíveis, além de tecnologias de sequestro e armazenamento de carbono pelos diferentes ecossistemas terrestres. Dentre as fontes de energia usadas no Brasil, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) passou a ser a segunda matriz energética, ficando atrás apenas do petróleo. O País é considerado o maior produtor mundial da cultura, respondendo por 45% do açúcar e 54% do etanol comercializado no mundo (CONAB, 2012).

As áreas destinadas à produção dessa cultura estão em expansão e sendo foco de vários estudos que indicam o potencial da cana-de-açúcar como meio para a captura do CO₂ atmosférico e sequestro de carbono no solo (Ronquim, 2007). Em adição, com a adoção do sistema de manejo sob colheita de cana crua, o fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera é reduzido (Panosso et al., 2009a, 2009b; La Scala et al., 2012), contribuindo, também, para que quantidades significativas de carbono sejam armazenadas nas camadas mais superficiais do solo (Razafimbelo et al., 2006; De Resende et al., 2006; Galdos et al., 2009).

A produção de CO₂ no interior do solo está diretamente relacionada à atividade biológica, como a respiração de raízes e a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) pela atividade microbiana, influenciada pela temperatura e pela umidade do solo (Epron et al., 2006; Lal, 2009). No interior do solo, o CO₂ movimenta-se por dois mecanismos: deslocamento de uma zona de maior concentração para outra de menor (difusão) e por fluxo de massa, quando o gás se move junto com o ar em que se encontra misturado, seguindo um gradiente de pressão, variando em função de textura, estrutura e teor de umidade do solo (Ball & Simth, 1991). Por outro lado, a emissão de CO₂ de solos agrícolas é resultante de interações entre propriedades biológicas, químicas e físicas do solo, como o teor de matéria orgânica (Lal, 2009), populações de microrganismos e densidade do sistema radicular (Duiker & Lal, 2000; Longdoz et al., 2000), densidade do solo (Teixeira et al., 2012; Xu & Qi, 2001), pH do solo (Fuentes et al., 2006; Reth et al., 2005), teor de fósforo disponível (Duah-Yentumi et al., 1998; Nordgren, 1992), textura (Dilustro et

al., 2005), capacidade de troca catiônica (La Scala et al., 2000), teor de magnésio (Xu & Qi, 2001), preenchimento de água nos poros (Smart & Peñuelas, 2005), temperatura do solo (Ussiri & Lal, 2009; Silva-Olaya et al., 2013) e umidade do solo (La Scala et al., 2001).

Do carbono presente no solo em sua forma orgânica, uma parte considerável encontra-se na MOS (Carvalho et al., 2010). Durante a decomposição desta, os microrganismos utilizam o carbono de que necessitam para seu metabolismo e o restante é perdido por respiração na forma de CO_2 (Six et al., 2006). Portanto, a comunidade microbiana é um fator-chave na dinâmica da MOS, controlando a disponibilidade de nutrientes, a liberação ou o acúmulo de carbono no solo. Neste contexto, a relação C/N, por ser uma importante reguladora da decomposição da MOS, fornece informações sobre seu estado de humificação (Luchese et al., 2002). Ou seja, dependendo dos valores dessa relação, pode-se determinar se a atividade microbiológica é mais ou menos intensa (Sousa, 2003). Lamparter et al. (2003), estudando o efeito simultâneo de parâmetros físicos e químicos do solo na estabilização da MOS, observaram que a taxa de mineralização de carbono decresceu com a diminuição do pH e o aumento da relação C/N. A razão lignina pelo nitrogênio é colocada como fator controlador da dinâmica da MOS (Parton et al., 1987), porém a utilização mais comum é a relação C/N como indicador desse potencial de mineralização (Potter & Klooster, 1997).

É também muito conhecido que variáveis como a temperatura e a umidade do solo possuem grande influência sobre o fluxo de CO_2 do solo para a atmosfera (Duiker & Lal, 2000). A temperatura do solo afeta diretamente a atividade microbiana e a respiração das raízes (Silva-Olaya et al., 2013). De acordo com Davidson et al. (2000), a taxa de respiração do solo aumenta, seguindo um modelo exponencial, explicando por que maiores emissões são observadas em regiões de clima tropical.

O processo de respiração também é afetado pelo conteúdo de umidade presente no solo, que pode tanto favorecer como inibir a produção de CO_2 , uma vez que afeta a atividade microbiana e a difusão de gases (Lal, 2001). Esses efeitos são decorrentes principalmente da interação do conteúdo de umidade e do espaço poroso do solo (Ordóñez-Fernández et al., 2008). A concentração de CO_2 nos poros do solo é significativamente maior do que na atmosfera, na ordem de 10 a 100 vezes

(Moreira & Siqueira, 2006). Elevações no conteúdo de água no solo, com a ocorrência de eventos pluviométricos, favorecem a expulsão de quantidades significativas de CO₂ do interior do solo, devido à infiltração de água nos espaços porosos (Varella et al., 2004; Smart & Peñuelas, 2005).

Diante do exposto, o objetivo do estudo foi investigar as relações entre os atributos do solo e o processo de emissão de CO₂ do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar.

2.2 Material e Métodos

O estudo foi conduzido na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO), em Dourados-MS, localizada a 22° 14' latitude sul, 54° 49' longitude e 452 m acima do nível do mar, num Latossolo Vermelho distroférico típico e textura muito argilosa (152; 104 e 744 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente) (Embrapa, 2006). A área apresenta um relevo plano com declives de aproximadamente 3%. Segundo a classificação de Thornthwaite, o clima local pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena ou nenhuma deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 48% da evapotranspiração anual. A temperatura média anual varia de 20 °C a 22 °C, com as médias dos meses mais frios e mais quentes oscilando, respectivamente, de 15 °C a 19 °C e de 23 °C a 26 °C. A precipitação média anual é de 1.550 mm, sendo novembro, dezembro e janeiro o trimestre mais chuvoso (Amaral et al., 2000).

O plantio da cana-de-açúcar ocorreu no dia 28 de novembro de 2009, composto por uma mistura de cultivares (RB 93-5744; RB 72-454; RB 93-5608; RB 85-5113 e SP 83-2847) plantadas em subparcelas próximas. O delineamento experimental adotado (5 x 4) compreende 5 tratamentos (cultivares), com cada unidade experimental composta por quatro linhas de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,2 m entre as linhas, totalizando 3.000 m² de área plantada. A adubação foi realizada aplicando 2 t ha⁻¹ de composto orgânico no sulco de plantio, imediatamente abaixo dos colmos da cana. Anteriormente ao plantio da cana, a área foi cultivada com adubos verdes, principalmente a aveia-preta (*Avena stringosa*), sendo este o primeiro plantio com a cultura da cana-de-açúcar na área em estudo.

Para as avaliações, foram marcados 60 pontos e inseridos colares de PVC ao longo da área experimental, com espaçamento de 5 m entre os colares, na linha de plantio da cana-de-açúcar. Foram 10 dias de avaliações compreendidos num período de 20 dias (15; 16; 19; 21; 22; 26; 27 e 30 de setembro de 2011, e 03 e 04 de outubro de 2011), no horário matutino, das 8 às 10 h. Utilizando-se da denominação do dia Juliano, essas datas correspondem a 258; 259; 262; 264; 265; 269; 270; 273, 276 e 277 de 2011.

A emissão de CO₂ do solo (FCO₂) foi registrada utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska EUA. Esse sistema consiste em uma câmara fechada, acoplada sobre os colares anteriormente inseridos no solo, nos pontos estudados. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA Infrared Gas Analyzer). Concomitantemente às leituras de emissão de CO₂, foram conduzidas avaliações da temperatura do solo (Ts) na camada de 0-20 cm de profundidade, utilizando-se de um termômetro (termistor portátil), que é parte integrante do sistema ao qual a câmara para solos é acoplada. A umidade do solo (Us) foi avaliada em todos os pontos, utilizando-se de 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.

Ao final das avaliações, foram realizadas coletas de solo em cada ponto amostral (total de 60 pontos), na camada de 0-20 cm de profundidade, para as análises de rotina: saturação por bases (V%), soma de bases (SB), potencial hidrogeniônico (pH), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), capacidade de troca catiônica (CTC) e acidez potencial (H+Al), conforme método proposto pela Embrapa (1997). As análises de carbono orgânico total (COT) foram realizadas no aparelho Total Organic Carbon Analyser, TOC-V, da marca Shimadzu, acoplado ao Solid Sample Module, modelo SSM-5000 A, da marca Shimadzu, pertencente ao Laboratório de Solos, Plantas e Corretivos da Embrapa Agropecuária Oeste. Para transformar os valores de COT em matéria orgânica (MO), multiplica-se por 1,72. A análise de nitrogênio total do solo foi realizada pelo método de Kjeldahl. Neste método, o N é convertido em sulfato de amônio pela oxidação com uma mistura de CuSO₄, H₂SO₄ e Na₂SO₄. Posteriormente, em meio alcalino, o sulfato de

amônio convertido da matéria orgânica libera amônia que, em câmara de difusão, é complexada em solução de ácido bórico contendo indicador misto, sendo finalmente determinado por acidimetria (H_2SO_4 ou HCl) (Embrapa, 1997).

Para a análise física do solo: densidade do solo (D_s), macroporosidade (macro), microporosidade (micro) e VTP (volume total de poros) foram realizadas coletas com estrutura indeformada por meio de anéis de aço com bordas cortantes e volume interno de 50 cm^3 , sendo as coletas realizadas próximas aos pontos amostrados nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade (Embrapa, 1997). A porosidade livre de água (PLA) foi calculada pela diferença entre a fração da porosidade preenchida por água, determinada pela U_s e o volume total de poros (VTP).

Os dados foram analisados, inicialmente, por meio da estatística descritiva (média, erro-padrão da média, máximo, mínimo e coeficiente de variação). A análise de componentes principais foi utilizada para reduzir o número de variáveis e visualizar as propriedades que melhor interagem com a emissão de CO_2 do solo. Os autovetores (componentes principais) são novas variáveis, gerados por combinações lineares das variáveis originais, construídos com os autovalores da matriz de covariância (Hair et al., 2005). Para a interpretação do significado de cada componente principal, foram utilizados o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes das funções lineares, como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável. Somente coeficientes maiores ou iguais a 0,50, em valor absoluto, foram considerados para a interpretação. Os componentes principais discriminam amostras que possuem propriedades específicas. Após padronização dos dados (média nula e variância unitária), as análises foram processadas no programa Statistica 7.0 (StatSoft. Inc. Tulsa, OK, EUA). Foram considerados os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2). A primeira componente principal retém a maior quantidade da variância original, enquanto a segunda, a maior quantidade possível remanescente (Hair et. al, 2005). As análises de correlação e de regressão linear foram realizadas para se determinar o grau de relacionamento entre as variáveis analisadas.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo

A média da emissão de CO₂ do solo durante o período de estudo variou de 1,89 a 2,32 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nos dias 258 e 276, respectivamente (Quadro 1). Os valores observados foram similares aos reportados por outros autores em estudos conduzidos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar (Panosso et al., 2008; Brito et al., 2009). O valor médio da FCO₂ aumentou entre os dias 270 e 277, coincidindo com precipitações registradas nos dias 269 (27,8 mm), 274 (7,8 mm) e 275 (0,2 mm). La Scala et al. (2001) verificaram a interferência da precipitação sobre os fluxos de CO₂ do solo, onde os padrões das emissões foram alterados a curto prazo após a ocorrência de um período de chuvas. O mesmo fenômeno foi observado por Panosso et al. (2009a), quando as emissões atingiram valores tão altos quanto 5,11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ após eventos chuvosos.

Elevações rápidas na umidade do solo com o advento das precipitações resultam num aumento dos fluxos de CO₂ para a atmosfera, em decorrência da substituição do ar encontrado nos poros pela água, gerando um estímulo imediato da atividade dos microrganismos do solo como resposta à maior disponibilidade de água (Linn & Doran, 1984; Smart & Peñuelas, 2005). A Us apresentou grandes variações ao longo do período de estudo (8,00 % a 32,22 %), nos dias 259 e 270, respectivamente (Quadro 1), sendo que a média mais elevada (32,22 %) foi registrada após eventos chuvosos, um aumento de 50% quando comparada à média do dia anterior. Conforme foram observadas variações na FCO₂ após esses eventos, foi realizada a análise de correlação entre as variáveis, na qual, foram constatados índices de correlação linear, positivo e significativo ($r = 0,66$; $p < 0,05$), entre as médias diárias da FCO₂ e Us, indicando que a umidade do solo afetou as taxas de emissão de CO₂ do mesmo. Por outro lado, não foram observados índices de correlação significativos ($p > 0,05$), entre a emissão de CO₂ do solo e a Ts ao longo do período experimental. A baixa variabilidade da Ts (mínimo de 18,2 °C para o dia 269 e máximo de 21,0 °C para o dia 273) ao longo do período estudado, possivelmente, contribuiu para a ausência de correlação entre a FCO₂ e a Ts.

Quadro 1. Estatísticas descritivas da emissão de CO₂ (FCO₂), temperatura e umidade do solo, durante o período de estudo.

Dia	FCO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)				Temperatura (°C)				Umidade (%)			
	Média	DP	EP	CV	Média	DP	EP	CV	Média	DP	EP	CV
258	1,89	0,70	0,09	37,04	19,11	1,92	0,25	10,05	8,69	3,39	0,44	39,01
259	1,92	0,70	0,09	36,46	19,50	0,55	0,07	2,82	8,00	1,80	0,23	22,50
262	1,97	0,71	0,09	36,04	20,13	0,42	0,05	2,09	10,66	2,66	0,35	24,95
264	2,05	0,79	0,10	38,54	19,55	0,50	0,06	2,56	15,39	4,84	0,63	31,45
265	2,02	0,74	0,10	36,63	18,43	0,58	0,08	3,15	14,25	3,59	0,47	25,19
269	1,96	0,85	0,11	43,37	18,24	0,79	0,10	4,33	21,69	3,57	0,46	16,46
270	2,16	0,97	0,13	44,91	18,44	0,75	0,10	4,07	32,22	8,37	1,09	25,98
273	2,25	0,99	0,13	44,00	21,07	0,71	0,09	3,37	17,08	3,21	0,42	18,79
276	2,32	0,99	0,13	42,67	20,30	0,67	0,09	3,30	24,14	4,53	0,59	18,77
277	2,11	0,80	0,10	37,91	20,03	0,64	0,08	3,20	20,12	3,54	0,46	17,59

N = 10; DP = Desvio-Padrão; EP = Erro-Padrão da média; CV = Coeficiente de Variação (%).

O coeficiente de variação (CV) para a Us variou de médio (CV < 24%) a alto (CV > 24%), segundo o critério de classificação proposto por Warrick & Nielsen (1980). Para a FCO₂, o CV é considerado alto para todos os dias de estudo. Entretanto, os valores de CV referentes à FCO₂ são similares àqueles observados em áreas de floresta (Epron et al., 2004; Tedeschi et al., 2006) e de cultivo de cana-de-açúcar (Panosso et al., 2008, 2009b). La Scala et al. (2003), avaliando a variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ em solo desprovido de vegetação, encontraram valores menores do CV (20,3% a 28,7%) para esta propriedade. Brito et al. (2009), em estudos desenvolvidos no interior de São Paulo, em áreas de cana-de-açúcar, avaliaram o efeito de diferentes posições topográficas e atributos do solo na FCO₂ e encontraram valores altos para a FCO₂ (CV=55,21%) e umidade do solo (CV=28,68%), e ao contrário deste estudo, valores médios referentes à temperatura do solo (CV=16,43%).

2.3.2 Dependência linear simples entre emissão de CO₂ e propriedades físicas e químicas do solo

A média geral ao longo de 10 dias de estudo da FCO₂ igual a 2,08 μmol m⁻² s⁻¹, Ts igual a 19,48 °C e Us igual a 17,20 % (Quadro 2), foram similares aos valores obtidos por Panosso et al. (2009a), em estudos conduzidos em áreas de cana-de-açúcar sob sistema de colheita de cana crua. Na análise de correlação linear simples, foi observada uma relação negativa entre a FCO₂ e a umidade do solo (r =

- 0,29; $p < 0,05$) (Quadro 3), contrariando o reportado quando feita a mesma análise somente com as médias diárias das duas variáveis. Entre a FCO₂ e Ts, essa relação continuou não sendo significativa ($p > 0,05$).

Neste estudo, as propriedades do solo: pH, Ca, Mg, H+Al, K, CTC, V%, SB e Ds, não foram relacionadas ($p > 0,05$) com a FCO₂ (Quadro 3). Entretanto, algumas dessas propriedades como: o pH, H+Al, CTC, V%, SB e Ds, de certa forma, são reguladores da MOS (Primavesi, 2006; Ronquim, 2010), atuando na ciclagem e na retenção de nutrientes no solo, na taxa de agregação e na dinâmica da água do solo (Roscoe et al., 2006), na limitação ao crescimento microbiano e em sua taxa de respiração (Nordgren, 1992; Scheu, 1993; Duah-Yentumi et al., 1998). Ou seja, como a MOS é um elemento básico no processo de decomposição do carbono pelos microrganismos, essas propriedades do solo, atuando sobre a MOS, também atuariam sobre a FCO₂.

Partindo destas observações, e considerando-se que, neste estudo, a FCO₂ e a MOS foram positivamente correlacionadas ($r = 0,67$; $p < 0,001$) (Quadro 3). A caracterização das propriedades químicas e físicas do solo na área experimental é importante para o entendimento da influência destas propriedades sobre a dinâmica da MOS e, conseqüentemente, na taxa de respiração do solo.

Os valores médios observados em relação ao pH (6,10) e H+Al (44,14 mmolc dm⁻³) indicam baixa acidez do solo (Quadro 2). Silva-Olaya et al. (2013), investigando a emissão de CO₂ do solo em áreas sob diferentes manejos do solo e da cultura de cana-de-açúcar, obtiveram resultados similares quando avaliaram esses atributos nas camadas mais superficiais do solo (0-10 e 10-20 cm).

O pH pode afetar a quantidade e a diversidade de microrganismos no solo. Os fungos têm seu desenvolvimento favorecido em ambientes com valores de pH < 5; por outro lado, as bactérias são mais adaptadas a ambientes com valores de pH entre 6 e 8 (Primavesi, 2006). A disposição e a toxicidade de nutrientes minerais também estão relacionadas ao pH do solo (Fuentes et al., 2006). Epron et al. (2006), em estudos desenvolvidos em solo de floresta tropical, observaram um coeficiente de correlação negativo entre a FCO₂ e as propriedades: pH do solo ($r = - 0,42$; $p < 0,05$) e umidade do solo ($r = - 0,67$; $p < 0,05$).

O teor de fósforo (P) disponível no solo foi diretamente correlacionado à FCO₂ ($r = 0,28$; $p < 0,05$) (Quadro 3). O fósforo é um elemento químico relacionado com a atividade microbiana do solo, podendo ser considerado um fator limitante à dinâmica da intensidade dessa atividade, devido a sua importância no metabolismo dos microrganismos (Nordgren, 1992; Duah-Yentumi et al., 1998). Nordgren (1992) encontrou uma forte correlação ($r = 0,99$; $p < 0,01$) entre a taxa de respiração do solo e a adição de fósforo no solo. O autor concluiu que a falta deste elemento no solo pode impedir o crescimento dos microrganismos.

Quadro 2. Estatísticas descritivas da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo, juntamente com as propriedades físicas e químicas do solo.

Propriedade	Média	DP	EP	Mínimo	Máximo	CV (%)
FCO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)*	2,08	0,84	0,03	0,24	6,49	40,38
Ts (°C)*	19,48	1,22	0,05	15,70	24,50	6,26
Us (%)*	17,20	8,31	0,34	3,00	49,00	48,31
pH (H ₂ O)	6,10	0,15	0,02	5,80	6,41	2,46
H+Al (mmolc dm^{-3})	44,14	7,33	0,95	30,12	61,77	16,61
Mg (mmolc dm^{-3})	19,07	2,79	0,35	14,50	28,00	14,63
Ca (mmolc dm^{-3})	55,54	6,89	0,89	42,50	79,00	12,41
K (mmolc dm^{-3})	4,74	2,19	0,28	1,47	9,59	46,20
P (mg dm^{-3})	20,14	7,46	0,96	9,95	47,95	37,04
SB (mmolc dm^{-3})	79,35	9,76	1,26	60,36	109,88	12,30
CTC (mmolc dm^{-3})	123,49	6,82	0,88	108,60	151,29	5,52
V (%)	64,09	6,01	0,78	49,46	77,08	9,38
MOS (g dm^{-3})	27,60	2,26	0,29	20,80	31,98	8,19
C/N	12,83	2,12	0,27	9,11	18,44	16,52
Ds (g cm^{-3})	1,32	0,08	0,01	1,17	1,48	6,06
Macro (%)	17,54	3,54	0,46	9,01	24,70	20,18
Micro (%)	37,36	5,71	0,74	25,63	49,07	15,28
VTP (%)	54,90	4,28	0,55	45,80	66,34	7,80
PLA (%)	37,71	4,36	0,56	28,91	49,24	11,56

N = 60, (*) N = 10 × 60. DP = Desvio-Padrão; EP = Erro-Padrão; CV = Coeficiente de Variação (%); FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; pH = potencial hidrogeniônico; Ca = cálcio trocável; Mg = magnésio trocável; H+Al = acidez potencial; K = potássio trocável; P = fósforo; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; MOS = matéria orgânica do solo; C/N = relação carbono/nitrogênio do solo; Ds = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; VTP = volume total de poros; PLA = porosidade livre de água.

A capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V%) também são importantes propriedades relacionadas à MOS. A CTC representa a capacidade do solo de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da MOS e da fertilidade do solo, por um longo período (Ronquim, 2010). A saturação por bases

(V%) é outra propriedade do solo que também interage de forma complexa com a matéria orgânica, sendo um indicador das condições gerais referentes à fertilidade do solo, e geralmente, consideram-se férteis solos com valores de $V\% \geq 50\%$. Neste estudo, o valor médio de V% foi igual a 64,09%, indicando boa fertilidade do solo na área onde foi conduzido o experimento (Quadro 2).

Para Resck (1998), os fatores resultantes na emissão de CO_2 do solo são oriundos das seguintes interações: condição química do solo favorável, maior CTC do solo e maior quantidade de biomassa vegetal e microbiana. La Scala et al. (2000) observaram que o padrão das emissões de CO_2 do solo foi influenciado pela CTC do solo, carbono total, teor de óxidos de ferro (Fe), além de eventos climáticos, como a ocorrência de chuvas na área de estudo. Porém, não encontraram correlação linear significativa entre a FCO₂ e demais propriedades edáficas avaliadas (pH, textura e V%).

Em estudos desenvolvidos em áreas de cana-de-açúcar, no interior de São Paulo, Teixeira et al. (2012) observaram índice de correlação negativa ($r = -0,41$; $p < 0,01$) entre a FCO₂ e a densidade do solo (Ds). Segundo os autores, a Ds, juntamente com a porosidade livre de água (PLA) afetam diretamente o transporte de gás no interior do solo, tanto na entrada do oxigênio necessário para a realização da atividade dos microrganismos aeróbicos, quanto na saída do CO_2 , como subproduto final dessa atividade. Como observado no Quadro 2, o valor da Ds ($1,32 \text{ g cm}^{-3}$) indica que o solo da área em estudo apresenta uma densidade média. Contudo, neste estudo, a Ds não foi correlacionada à FCO₂ ($p > 0,05$). Em adição, a PLA apresentou relação positiva e significativa com a FCO₂ ($r = 0,71$, $p < 0,001$) (Quadro 3). O sistema poroso é importante no estudo do solo, pois é através dos poros que o fluxo de água e as trocas gasosas ocorrem. Qualquer alteração neste atributo físico do solo contribui para modificar o fluxo de água e ar, afetando os processos bioquímicos que ocorrem no solo (Klein & Libord, 2002).

O valor da relação C/N igual a 12,83 (Quadro 2), corrobora ao observado em solos agrícolas (Santos, 2007; Dorodnikov et al., 2011; Ngao et al., 2012; Wick et al., 2012). A FCO₂ apresentou correlação negativa com a relação C/N do solo ($r = -0,75$; $p < 0,001$), indicando, portanto, que elevados valores de relação C/N resultam em menores taxas de degradação do carbono orgânico, e vice-versa (Longdoz et al.,

2000; Norby et al., 2001; Vesterdal et al., 2008), refletindo, assim, nas taxas de respiração do solo (Khomik et al., 2006; Dorodnikov et al., 2012). Possivelmente, essa forte relação entre a FCO₂ e a C/N é resultante da variabilidade da relação C/N do solo, observada pelo CV (16,52%) (Quadro 2), que por sua vez pode ter influência do aporte residual das diferentes cultivares na área de estudo. Tendo em vista esta possibilidade, foi determinado o CV da relação C/N do solo nas subparcelas de cada cultivar: RB 93-5744 (19,48%), RB 72-454 (13,02%), RB 93-5608 (16,96%), RB 85-5113 (14,98%) e SP 83-2847 (14,01%).

Quadro 3. Coeficiente de correlação linear simples entre a emissão de CO₂ do solo (FCO₂) e as propriedades físicas e químicas do solo.

Propriedade	r	Propriedade	r
Ts	0,20	CTC	0,08
Us	-0,29*	V%	0,22
pH	0,16	MOS	0,67*
H+Al	-0,21	C/N	-0,75*
Mg	0,20	Ds	0,16
Ca	0,22	Macro	0,06
K	0,01	Micro	-0,11
P	0,28*	VTP	0,59*
SB	0,21	PLA	0,71*

* Valores significativos do coeficiente de correlação ($p < 0,05$).

2.3.3 Dependência multivariada entre emissão de CO₂ e propriedades físicas e químicas do solo

Os resultados da análise de componentes principais podem ser observados na Figura 1 e Quadro 4. O plano bidimensional (Figura 1) gerado com os dois primeiros componentes principais CP1 e CP2 responde por 57,19% (40,12% em CP1 e 17,07% em CP2) da variabilidade contida no conjunto de variáveis originais. Panosso et al. (2012), investigando a relação das propriedades do solo e a emissão de CO₂ em áreas de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, encontraram resultados semelhantes (36,6% em CP1, 17,7% em CP2, e 12,5% em CP3).

As propriedades FCO₂, PLA, MOS, Ts, C/N e Us caracterizaram CP1 (Figura 1). O feixe composto pelas propriedades FCO₂, PLA, MOS e Ts age de forma contrária ao feixe composto pelas propriedades C/N e Us, ou seja, quando o valor de qualquer variável de um feixe aumenta o valor de qualquer outra variável do outro feixe que encontra-se na direção oposta diminui. Dentro de cada feixe, as

propriedades possuem o mesmo sinal, indicando que, quando o valor de uma propriedade aumenta, o valor de outra propriedade também aumenta.

A umidade do solo (Us) e a temperatura do solo (Ts) foram as propriedades com menor poder discriminatório, enquanto as propriedades, emissão de CO₂ do solo (FCO₂), matéria orgânica do solo (MOS), relação C/N e porosidade livre de água (PLA) são aquelas com maior poder discriminatório em CP1 (Quadro 4).

A MOS, a relação C/N e a PLA apresentaram associação com a FCO₂ (Figura 1). Foi possível observar que a FCO₂ apresenta relação direta com a MOS e a PLA, e inversa (indireta) com a relação C/N do solo.

A variabilidade do segundo componente principal (CP2) foi, em ordem de importância, devida às variáveis: soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e acidez potencial (H+Al). Essas variáveis estão associadas, porém mostraram ser independentes da emissão de CO₂ do solo (FCO₂).

A relação direta apontada no plano bidimensional entre a CTC e a SB é compreendida, uma vez que são propriedades relacionadas. A CTC de um solo representa a quantidade total de cátions retidos à sua superfície em condição permutável (Ca + Mg + K + H + Al). Um solo fértil apresenta a maior parte de sua CTC ocupada por cátions essenciais, ou seja, por bases (Ca + Mg + K). Em adição, a relação inversa, observada entre CTC e H+Al, deve-se ao fato de que, se grande parte da CTC estiver ocupada por cátions que apresentam potencial tóxico (H + Al), o solo é considerado pobre (Ronquim, 2010).

Quadro 4. Correlação entre cada propriedade (variável) e um componente principal.

Variável	CP1 (40,12%)*	CP2 (17,07%)
Emissão de CO ₂ do solo (FCO ₂)	-0,82	0,36
Matéria orgânica do solo (MOS)	-0,79	0,14
Porosidade livre de água (PLA)	-0,77	0,28
Relação C/N do solo (C/N)	0,77	-0,39
Temperatura do solo (Ts)	-0,53	-0,20
Umidade do solo (Us)	0,50	-0,12
Soma de bases (SB)	-0,56	-0,81
Capacidade de troca catiônica (CTC)	-0,32	-0,64
Acidez potencial (H+Al)	0,44	0,50

* Valor referente à porcentagem da variabilidade do conjunto original dos dados retida pelos respectivos componentes principais.

Li et al. (2011), investigando diferentes comunidades microbianas e seu efeito sobre a variabilidade da respiração basal do solo em áreas úmidas, observaram que a análise de componentes principais possibilitou agrupar as comunidades de microrganismos que ocasionavam aumentos na taxa da respiração do solo, associando-as com o conteúdo de água no solo e com a salinidade da área onde foram encontradas.

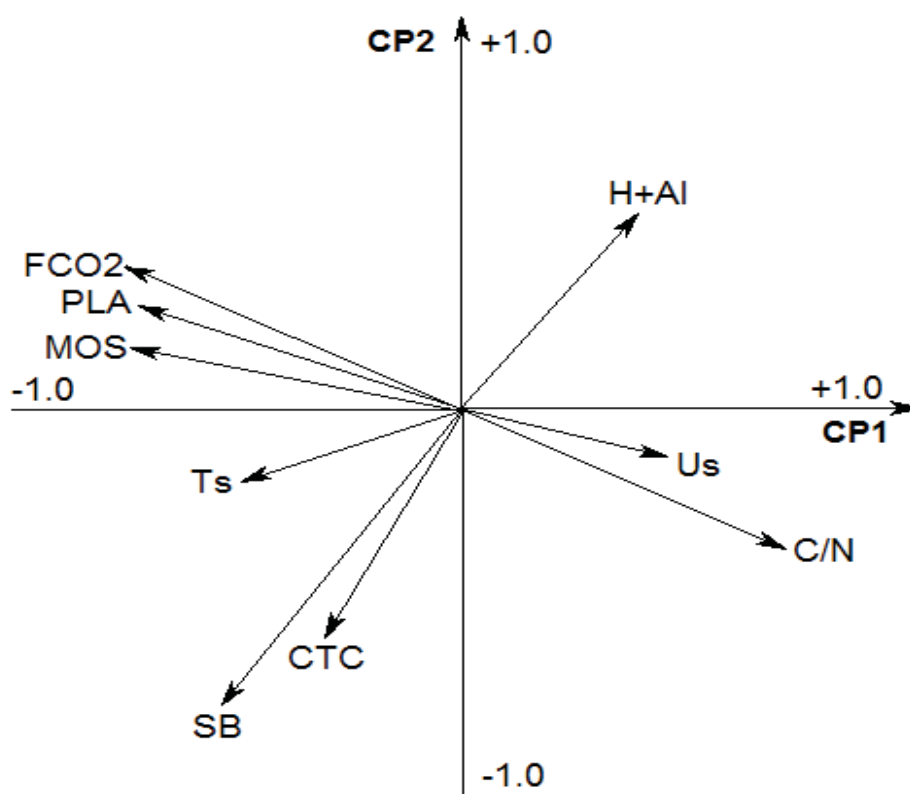


Figura 1. Gráfico dos componentes principais CP1 e CP2, contendo as variáveis: emissão de CO_2 do solo (FCO2); temperatura do solo (Ts); umidade do solo (Us); acidez potencial (H+Al); soma de bases (SB); capacidade de troca catiônica (CTC); matéria orgânica do solo (MOS); porosidade livre de água (PLA) e relação carbono/nitrogênio do solo (C/N).

Graf et al. (2012), utilizando a análise de componentes principais (PCA) para extrair os padrões mais importantes (funções ortogonais empíricas) da variabilidade espaçotemporal da FCO2 em solos sem vegetação, observaram que, na escala espacial, o fluxo de CO_2 foi claramente relacionado com a umidade e propriedades físicas do solo; por outro lado, a temperatura do solo foi o fator mais importante referente à variação temporal da respiração do solo.

Fiener et al. (2012), em estudos conduzidos em uma microbacia hidrográfica com produção agrícola, investigando a variabilidade espacial da respiração do solo e as propriedades correlacionadas, observaram que o primeiro componente principal (CP1) agregou a maior informação das variáveis em estudo referentes ao: fluxo de CO₂, umidade do solo, carbono orgânico, nitrogênio e relação C/N. Já CP2 agregou as informações referentes à densidade do solo e as variáveis relacionadas à erosão das camadas superficiais do solo.

Giuffré et al. (2006) utilizando a análise multivariada de dados com o objetivo de discriminar os indicadores de qualidade do solo em áreas sob plantio direto, no Pampa argentino, observaram que as principais variáveis selecionadas pela análise de componentes principais foram o teor de carbono orgânico total, o estoque de carbono nas camadas superficiais do solo, a taxa de respiração do solo e o pH. Os autores concluem que a técnica empregada foi importante, também, para se determinar a sensibilidade destas propriedades a mudanças de uso da terra.

2.3.4 Dependência linear simples entre as propriedades correlacionadas nos componentes principais

A Figura 2 apresenta as análises de regressão linear entre as propriedades com maior representação relacionadas à FCO₂ observadas no gráfico de componentes principais. O valor do coeficiente de determinação ($r^2 = 0,45$ $p < 0,0001$) entre a FCO₂ e a MOS, indica que, 45% da variabilidade da FCO₂ podem ser explicadas pela MOS (Figura 2a). Wick et al. (2012), avaliando relações existentes entre as propriedades do solo e as emissões de CO₂ e óxido nitroso (N₂O), observaram que a matéria orgânica disponível explicou 60% da variabilidade espacial da emissão de CO₂; ao contrário do N₂O, as emissões de CO₂ foram afetadas positivamente pelo substrato disponível. Esse comportamento é esperado, uma vez que grande parte do carbono orgânico presente no solo se encontra na forma de MOS (Carvalho et al., 2010), justificando a importância dessa propriedade como fonte primária de energia da qual os microrganismos do solo se utilizam durante o processo metabólico e oxidação do carbono orgânico (CO) a dióxido de carbono (CO₂). Contudo, esse processo depende, principalmente, das condições de temperatura e umidade do solo, teor de carbono orgânico e potencial de

decomposição do carbono presente no solo pelos microrganismos (Reicosky & Lindstrom, 1993). Assim, partindo das considerações dos autores, foi realizada a análise de correlação linear entre o teor de MOS, Us, Ts e relação C/N do solo, na qual foi constatada a relação existente entre as propriedades. A MOS apresentou uma relação negativa com a umidade do solo ($r = - 0,37$; $p < 0,0001$) e com a relação C/N ($r = - 0,57$; $p < 0,0001$), e positiva com a temperatura do solo ($r = 0,28$; $p < 0,05$). As Figuras 2b e 2c apresentam, respectivamente, os coeficientes de determinação da PLA e da relação C/N do solo em função da FCO₂. Observa-se que 50% da variabilidade da FCO₂ podem ser explicadas pela PLA e 56% pela relação C/N do solo.

Khomik et al. (2006), investigando as variações espaçotemporais da respiração do solo em áreas de floresta, no Canadá, observaram que 51% da variabilidade de FCO₂ foram explicadas pela relação C/N do solo. Ngao et al. (2012) em estudos também desenvolvidos em solos de floresta, observaram um coeficiente de determinação mais expressivo ($r^2 = 0,74$; $p < 0,05$) entre o fluxo de CO₂ e a relação de C/N do solo. Os autores destacam a necessidade de se considerar, especialmente, diferentes fatores do solo, tais como a C/N e a densidade na estimativa da FCO₂ em escala de floresta.

A relação C/N do solo exerce forte influência no fluxo de CO₂, uma vez que, dependendo de seus valores (alta ou baixa), a C/N pode dificultar ou facilitar a decomposição da MOS. O teor de nitrogênio (N) também é um fator importante, este elemento, pode aumentar ou diminuir a entrada de carbono no solo, baixo teor de nitrogênio inibe a atividade biológica, limitando o processo de humificação (Santos, 2007).

Para Wick et al. (2012), as propriedades do solo, especialmente as que influenciam a porosidade (macro e micro), ajudam a explicar as emissões de gases de efeito estufa, em especial o CO₂. Neste sentido, a alta e significativa relação observada entre a FCO₂ e a PLA ($r = 0,71$; $p < 0,05$) (Quadro 3), confirmada pelo coeficiente de determinação (Figura 2b), indicam a importância da inclusão do sistema poroso do solo no estudo da variabilidade da FCO₂.

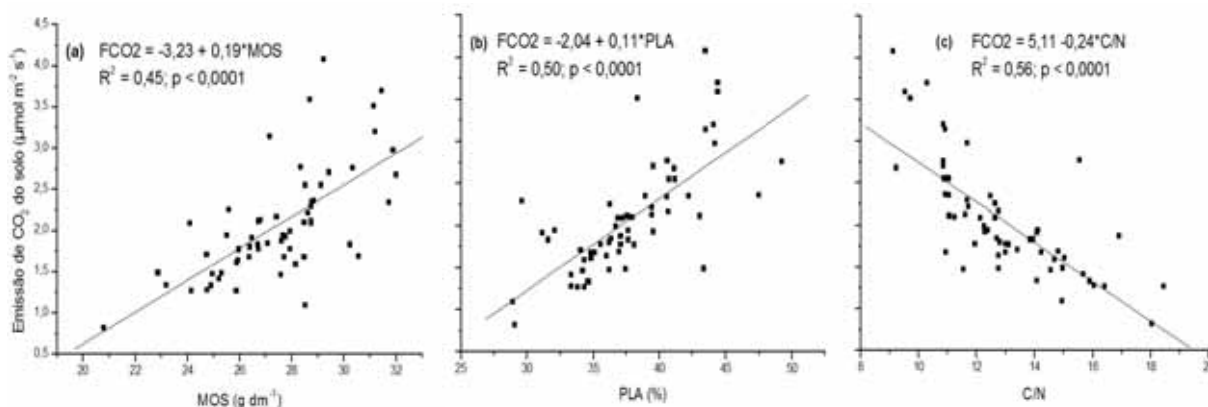


Figura 2. Análise de regressão linear entre a emissão de CO₂ do solo e o teor de matéria orgânica do solo (a), porosidade livre de água (b) e relação C/N do solo.

Teixeira et al. (2012) observaram uma relação fraca ($r = 0,27$), porém significativa ($p < 0,01$) entre a FCO₂ e a PLA. No entanto, quando os valores estimados espacialmente foram considerados, a PLA passou a ser a principal variável responsável pelas características espaciais da respiração do solo.

2.4 Conclusões

1. Neste estudo, conduzido em áreas de cana-de-açúcar sob sistema de manejo de cana crua, a emissão de CO₂ do solo foi correlacionada à matéria orgânica do solo, ao volume total de poros, ao teor de fósforo disponível no solo, à porosidade livre de água, à umidade e à relação C/N do solo.
2. As mais expressivas associações ocorreram de forma direta entre a emissão de CO₂ do solo, a matéria orgânica do solo e a porosidade livre de água, e de forma indireta, ou inversa entre a relação C/N do solo e a emissão de CO₂ do solo.

2.5 Literatura Citada

AMARAL, J.A.M.; MOTCHI, E.P.; OLIVEIRA, H.; FILHO, A.C.; NAIME, U.J. & SANTOS, R.D. Levantamento semidetalhado dos solos do Campo Experimental de Dourados da Embrapa Agropecuária Oeste, município de Dourados-MS. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 68p.

BALL, B.C. & SMITH, K.A. Gas movement. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E., eds. Soil analysis: Physical methods. New York, Marcel Dekker, 1991. p. 511-549.

BRITO, L.F.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. & LA SCALA, N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. Sci. Agric., 66:77-83, 2009.

CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; MELO, C.R. & CERRI, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 34:277-290, 2010.

CONAB, 2012. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2012. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília. Conab. Disponível: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_05_09_11_59_boletim_cana_portugues_-_agosto_2012_2o_lev.pdf Safra 2010/2011>. Acesso em: 31 out. 2012.

DAVIDSON, E.A.; VERCHOT, L.V.; CATTÂNIO, H.; ACKERMAN, I.L. & CARVALHO, E.M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern amazonia. Biogeochemistry, 48:53-69, 2000.

DE RESENDE, A.S.; XAVIER, R.P.; DE OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R. & BODDEY, R.M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugarcane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. Plant & Soil, 281:339-351, 2006.

DORODNIKOV, M.; KUZYAKOV, Y.; FANGMEIER, A. & WIESENBERG, G.L.B. C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric CO₂: Turnover vs. Stabilization. Soil Biol. Biochem., 43:579-589, 2011.

DILUSTRO, J.J.; COLLINS, B.; DUNCAN, L. & CRAWFORD, C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. Forest. Ecol. Manag., 204:87-97, 2005.

DUAH-YENTUMI, S.; RONN, R. & CHRISTENSEN, S. Nutrients limiting microbial growth in a tropical forest soil of Ghana under different management. Appl. Soil Ecol., 8:19-24, 1998.

DUIKER, S.W. & LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. Soil Till. Res., 54:21-30, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2006. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

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. *J. Trop. Ecol.*, 22:565-574, 2006.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINTANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J.M.; BERBIGIER, P. & HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. *Forest. Ecol. Manag.*, 202:149-60, 2004.

FIENER, P.; DLUGO, V.; KORRES, W. & SCHNEIDER, K. Spatial variability of soil respiration in a small agricultural watershed - Are patterns of soil redistribution important? *Catena*, 94:3-16, 2012.

FUENTES, J.P.; BEZDICEK, D.F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S. & SMITH, J.L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. *Soil Till. Res.*, 88:123-131, 2006.

GALDOS, M.V., CERRI, C.C. & CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, 153:347-352, 2009.

GIUFFRÉ, L.; ROMANIUK, R.; CONTI, M.E. & BARTOLONI, N. Multivariate evaluation by quality indicators of no-tillage system in Argiudolls of rolling pampa (Argentina). *Biol. Fert. Soils*, 42:556-560, 2006.

GRAF, A.; HERBST, M.; WEIHERMÜLLER, L.; HUISMAN, J.A.; PROLINGHEUER, N.; BORNEMANN, L. & VEREECKEN, H. Analyzing spatiotemporal variability of heterotrophic soil respiration at the field scale using orthogonal functions. *Geoderma*, 181-182:91-101, 2012.

HAIR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E. & TATHAM, R.L. *Análise Multivariada de dados*. 5ª Ed. Porto Alegre, RS, 2005. 688 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

KLEIN, V.A. & LIBORD, L.P. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:857-867, 2002.

KHOMIK, M., ARAIN, M.A. & MCCAUGHEY, J.H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest. *Agr. Forest. Meteorol.*, 140:244–256, 2006.

LAMPARTER, A.; BACHMANN, J.; GOEBEL, M.O. & WOCHE, S.K. Carbon mineralization in soil: Impact of wetting–drying, aggregation and water repellency. *Geoderma*, 150:324–333, 2009.

LA SCALA, N.; DE FIGUEIREDO, E.B.; PANOSSO, A.R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Braz. J. Biol.*, 72:1-11, 2012.

LA SCALA, N.; PANOSSO, A.R. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ num latossolo desprovido de vegetação. *Eng. Agric.*, 23:88-95, 2003.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; MARQUES JR, J. & PEREIRA, G.T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brasil. *Soil Till. Res.*, 62:163-166, 2001.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & CORÁ, J.E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biol. Biochem.*, 32:1459-1462, 2000.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur. J. Soil Sci.*, 60:158–169, 2009.

LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.*, 71:145-191, 2001.

LI, Y.; WANG, L.; ZHANG, W.; WANG, H.; FU, X. & LE, Y. The variability of soil microbial community composition of different types of tidal wetland in Chongming Dongtan and its effect on soil microbial respiration. *Ecol. Eng.*, 37:1276–1282, 2011.

LINN, D.M. & DORAN, J.W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1267-1272, 1984.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M. & AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed Forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Glob. Change Biol.*, 6:907-917, 2000.

LUCHESE, E.B.; FAVERO, L.O.B. & LENZI, E. *Fundamentos da Química do Solo Teoria e Prática*. 2. ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 2002. 159p.

MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2. ed. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. 729p.

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. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 139:167–173, 2010.

NGAO, J.; EPRON, D.; DELPIERRE, N.; BRÉDA, N.; GRANER, A. & LONGDOZ, B. Spatial variability of soil CO₂ efflux linked to soil parameters and ecosystem characteristics in a temperate beech forest. *Agr. Forest. Meteorol.*, 154–155:136–146, 2012.

NORBY, R.J.; COTRUFO, M.F.; INESON, P.; O'NEILL, E.G. & CANADELL, J.G. Elevated CO₂, litter chemistry, and decomposition: a synthesis. *Oecologia*, 127:153–165, 2001.

NORDGREN, A. A method for determining microbially available N and P in an organic soil. *Biol. Fert. Soils*, 13:195–199, 1992.

ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R.; CARBONELL BOJOLLO, R.; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, P. & PEREA TORRES, F. Influencia de la climatología y el manejo del suelo en las emisiones de CO₂ en un suelo arcilloso de la vega de Carmona. *Carex*, 6:2339-2354, 2008.

PANOSSO, A.R.; PERILLO, L.I.; FERRAUDO, A.S.; PEREIRA, G.T.; MIRANDA, J.G.V. & LA SCALA, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production area. *Soil Till. Res.*, 124:8-16, 2012.

PANOSSO, A.R.; MARQUES, J.; MILORI, D.M.B.P.; FERRAUDO, A.S.; BARBIERI, D.M.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. *Soil Till. Res.*, 111:190–196, 2011.

PANOSSO, A.R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slashand-burn managements. *Soil Till Res.*, 105:275-282, 2009a.

PANOSSO, A.R.; RIBEIRO, C.E.R.; ZANINI, J.R.; PAVANI, L.C.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. *Semin-Ciênc. Agrar.*, 30:1017-1034, 2009b.

PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J. & LA SCALA JR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. *Eng. Agríc.*, 28:227-236, 2008.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V. & OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Am. J.*, 51:1173-1179, 1987.

POTTER, C.S. & KLOOSTER, S.A. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: response to changes in vegetation quality and biomass allocation. *Tellus*, 49:1-17, 1997.

PRIMAVESI, A. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. 18. ed. São Paulo: Nobel, 2006. 541 p.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRE´-LARROUY, M.C.; DE LUCA, E.F.; LAURENT, J.Y.; CERRI, C.C. & FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 115:285–289, 2006.

REICOSKY, D.C. & LINDSTROM, N.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.*, 85:1237-1245, 1993.

RESCK, D.V.S. Agricultural intensification systems and their impact on soil and water quality in the Cerrados of Brazil. In: LAL, R. ed. *Soil quality and agricultural sustainability*. Chelsea: Ann Arbor Press, 1998. p. 288-300.

RETH, S.; MARKUS, R. & FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – A modified model. *Plant Soil*, 268:21-33, 2005.

RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2010, 26 p.

RONQUIM, C.C. Dinâmica espaçotemporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas no nordeste do Estado de São Paulo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2007, 52 p.

ROSCOE, R.; BODDEY, R.M. & SALTON, J.C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M. & SALTON, J.C. ed. *Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas. Modelagem matemática e métodos auxiliares*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 304p. 2006.

SANTOS, E. Carbono, Nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa, Antonina – PR. 2007. 104 f. Dissertação em Agronomia (Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCHEU, S. Analysis of the microbial nutrient status in soil microcompartments; earthworm feces from a basalt–limestone gradient. *Geoderma*, 56:575–586, 1993.

SILVA-OLAYA, A.M.; CERRI, C.E.P.; LA SCALA JR., N.; DIAS, C.T.S. & CERRI, C.C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.*, 8:1-8, 2013.

SIX, J.; FREY, S.D.; THIES, R.K. & BATTEN, K.M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:555-569, 2006.

SMART, D.R. & PEÑUELAS, J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. *Appl. Soil Ecol.*, 28:247-57, 2005.

SOUSA, S.G.A. Produção e Decomposição de Serrapilheira de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial, Rio Barigui, Araucária, PR. 2003. 127 f. Tese em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2003.

TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P.L. & BORGHETTI, M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. *Glob. Change Biol.*, 12:110–121, 2006.

TEIXEIRA, 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:1466-1475, 2012.

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 Till. Res.*, 104:39-47. 2009.

VARELLA, R.F.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PINTO, A.S.; KISSELLE, K.W.; SANTOS, R.V.; BURKE, R.A.; ZEPP, R.G. & VIANA, L.T. Soil fluxes of CO₂, CO, NO and N₂O an old pasture and from native savanna in Brazil. *Ecol. Eppl.*, 14:221-231, 2004.

VESTERDAL, L., SCHMIDT, I.K., CALLESEN, I., NILSSON, L.O. & GUNDERSEN, P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest. Ecol. Manag.*, 255:35–48, 2008.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. ed. *Applications of Soil Physics*. New York: Academic Press, 1980. p. 319:344.

WICK, A.F.; PHILLIPS, R.L.; LIEBIG, M.A.; WEST, M. & LEE DANIELS, W. Linkages between soil micro-site properties and CO₂ and N₂O emissions during a simulated thaw for a northern prairie Mollisol. *Soil Biol. Biochem.*, 50:118-125, 2012.

XU, M. & QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Glob. Change Biol.*, 7:667-677, 2001.

CAPÍTULO 3 – Emissão de CO₂ do solo sob efeito do preparo e resíduos da colheita em áreas de cana-de-açúcar

Resumo

O solo é um dos principais compartimentos de carbono no ecossistema terrestre, capaz de armazenar quantidades expressivas desse elemento, e, portanto, a compreensão dos fatores que contribuem para as perdas de CO₂ em solos agrícolas é fundamental para determinar estratégias de redução das emissões desse gás e ajudar a mitigar o efeito estufa adicional. O objetivo do estudo foi investigar o efeito do preparo do solo e da deposição de resíduos da cultura da cana-de-açúcar na emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo, durante a reforma do canavial, ao longo de um período de 15 dias de estudo. Os manejos avaliados foram: sem preparo do solo e mantendo os resíduos da colheita sobre a superfície do solo (SPCR); sem preparo do solo e sem resíduo (SPSR) e com preparo do solo e sem resíduo (CPSR). A menor média de emissão de CO₂ do solo (FCO₂) foi observada no manejo SPCR (2,16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), quando comparado aos manejos SPSR (2,90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e CPSR (3,22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), indicando que as maiores umidades e menores variações da temperatura do solo, observadas em SPCR, foram os fatores responsáveis por tal diminuição. Durante o período de estudo, a menor média diária da FCO₂ foi registrada em SPCR (1,28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e a maior, em CPSR (6,08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), após a ocorrência de chuvas. A menor perda de C-CO₂ do solo foi observada no manejo SPCR (367,23 kg de C-CO₂ ha⁻¹), diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos manejos: SPSR (501,75 kg de C-CO₂ ha⁻¹) e CPSR (534,84 kg de C-CO₂ ha⁻¹). A umidade do solo foi a variável que apresentou valores mais diferenciados entre os manejos, sendo positivamente correlacionada ($r = 0,55$, $p < 0,05$) com as variações temporais da emissão de CO₂ nos manejos SPCR e CPSR. Em adição, a temperatura do solo diferiu ($p < 0,05$) somente no manejo SPCR (24,3 °C), quando comparada aos manejos SPSR (26,3 °C) e CPSR (26,5 °C), sugerindo que, para as condições deste estudo, o resíduo da cana-de-açúcar retido sobre a superfície propiciou uma temperatura do solo em média 2 °C mais amena.

Termos de indexação: respiração do solo, manejo da cana-de-açúcar, temperatura e umidade do solo.

Summary: *CO₂ emission from soil on effect of preparation of harvest waste in areas of cane sugar*

The soil is a major carbon pools in terrestrial ecosystem, capable of storing large quantities of this element, and therefore, understanding the factors that contribute to the loss of CO₂ in agricultural soils is critical to determining strategies for reducing emissions of this gas and help mitigate the greenhouse effect further. The aim of this study was to investigate the effect of tillage and crop residue deposition of cane sugar into the soil CO₂ emission, temperature and soil moisture during the renovation of sugarcane field, over a period of 15 days study. The managements were evaluated: no tillage and retained crop residues on the soil surface (SPCR); without tillage and without residue (SPSR) and with soil preparation and without residue on soil surface (CPSR). The lowest mean soil CO₂ emission (FCO₂) was observed in the management SPCR (2.16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) compared to the managements SPSR (2.90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and CPSR (3.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), indicating that the highest and lowest humidity variations of soil temperature, observed in SPCR were the factors responsible for this decrease. During the studied period, the lowest mean daily FCO₂ was registered in SPCR (1.28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), and the largest in CPSR (6.08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), after the occurrence rainfall. A lower loss of induced by tillage CO₂ from soil was observed in the management SPCR (367.23 kg of CO₂-C ha⁻¹), differing significantly ($p < 0.05$) of managements: SPSR (501.75 kg of C-CO₂ ha⁻¹) and CPSR (534.84 kg of CO₂-C ha⁻¹). Soil moisture was the variable that most values differentiated between managements, being positively correlated ($r = 0.55$, $p < 0.05$) with the temporal variations of CO₂ emission us management SPCR and CPSR. In addition, the soil temperature differed ($p < 0.05$) only in management SPCR (24.3 °C) when compared with managements SPSR (26.3 °C) and CPSR (26.5 °C), suggesting that for the conditions of this study, the residue of sugar cane retained on the surface of soil provides a of soil temperature up to 2 °C lower.

Index terms: *soil respiration, management of cane sugar, temperature and soil moisture.*

3.1 Introdução

Devido às sérias mudanças climáticas, como modificações nos regimes de chuvas e elevações na temperatura da biosfera terrestre, decorrentes principalmente da emissão de gases do efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O), estudos sugerindo estratégias para redução desses gases na atmosfera e mitigação do aquecimento global estão cada vez mais em foco (Cerri et al., 2009; Lal et al., 2011; De Figueiredo, 2012). Dentre esses gases, o CO_2 é o que mais contribuiu para o efeito estufa adicional nos últimos 200 anos, devido à grande quantidade emitida na atmosfera (IPCC, 2007). Algumas práticas agrícolas, como mudanças do uso do solo, a exemplo de conversão de vegetação natural para pastagem e agricultura, além de manejos do solo com intensa atividade de preparo estão intimamente relacionadas a tais emissões (Roscoe et al., 2006; Dendooven et al., 2012; Carbonell-Bojollo et al., 2012).

No Brasil cerca de 75% das emissões de CO_2 são provenientes das atividades agrícolas (Cerri et al., 2009). De acordo com dados da Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2012), o País vem destacando-se mundialmente por ser o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp), com produção estimada em 596,63 milhões de toneladas de cana moída na safra de 2012/2013. A área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra de 2012/2013 está estimada em 8.527,8 mil hectares. São Paulo é o maior Estado produtor, com 51,82% da área plantada, sendo o Estado do Mato Grosso do Sul o quinto do ranking nacional, com 554,29 mil hectares cultivados com cana-de-açúcar (6,5%).

Diante do crescimento acelerado desse setor e da grande preocupação com os impactos oriundos de práticas de cultivo e manejo dos solos para uso agrícola, estudos diversos têm-se concentrado nos sistemas de produção da cana-de-açúcar (La Scala et al., 2006; Panosso et al., 2009a; Silva-Olaya et al., 2013).

A cultura da cana-de-açúcar tem a capacidade de retirar da atmosfera e incorporar em sua fitomassa uma grande quantidade de CO₂, em torno de 100 t ha⁻¹ ano⁻¹, o equivalente acerca de 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ de carbono. Se parte desse carbono ficar acumulada no solo através da matéria orgânica por um longo período, o sistema passa a funcionar como coletor líquido para o sequestro de CO₂ atmosférico, auxiliando na mitigação do efeito estufa (Ronquim, 2007).

Sistemas de plantio em que os resíduos culturais são retidos sobre o solo, aumentam significativamente o teor de carbono nas camadas mais superficiais deste, quando comparados aos sistemas com preparo convencional (Canellas et al., 2010), em média 5 vezes mais carbono é acumulado no solo, devido à adoção do sistema de plantio em que os resíduos são mantidos sobre o solo (Dendooven et al., 2012). Em adição, a reforma do canavial reduz o potencial de sequestro de carbono neste manejo (La Scala et al., 2012), uma vez que a perturbação física do solo durante este período acarretará na perda do carbono armazenado no solo, devido ao aumento da oxidação da matéria orgânica e a perdas por erosão (Galdos et al., 2009).

As intensas atividades de preparo do solo aumentam, inicialmente, as taxas de emissão de CO₂ do solo para a atmosfera, pois com o rompimento dos agregados do solo, parte do carbono anteriormente protegido em seu interior é exposta à ação microbiana, tornando-o mais suscetível à mineralização (Reicosky & Archer, 2007; Schwartz et al., 2010). Após as operações de preparo, aumenta-se a aeração do solo e, conseqüentemente, ocorre maior acessibilidade ao oxigênio, necessário para a microbiota (La Scala et al., 2006; Gesch et al., 2007), principal responsável pela decomposição da matéria orgânica do solo (Graham et al., 2006; Lou et al., 2011). Variações estacionais com elevações na temperatura do solo e do ar e umidade do solo também oferecem condições propícias para a atividade dos microrganismos do solo, intensificando a taxa de degradação da matéria orgânica (Silva-Olaya et al., 2013).

Além desse efeito, no processo de emissão de CO₂, o transporte do gás do interior do solo até a superfície é governado pela equação de difusão, que por sua vez também é influenciada, em primeira ordem, por alterações na temperatura e na umidade do solo (Kang et al., 2003). E considerando que tanto a umidade quanto a

temperatura apresentam grande variação espaçotemporal e relação direta com as condições climáticas locais (Panosso et al., 2009a), a caracterização do fluxo de CO₂ do solo é um dos grandes desafios da comunidade científica devido às incertezas relacionadas a essas medidas. Dentro deste contexto, o objetivo do trabalho foi investigar o efeito da palha e do preparo do solo sobre as emissões de CO₂, temperatura e umidade do solo durante a reforma do canavial, em áreas de cana-de-açúcar, no município de Dourados-MS.

3.2 Material e Métodos

O estudo foi conduzido na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO), em Dourados-MS, localizada a 22° 14' latitude sul, 54° 49' longitude e 452 m de altitude, num Latossolo Vermelho distroférico típico textura muito argilosa (152; 104 e 744 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente). A área apresenta um relevo plano com declives de aproximadamente 3% (Embrapa, 2006). Segundo a classificação de Thornthwaite, o clima local pode ser definido como B₁rB'₄a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena ou nenhuma deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 48% da evapotranspiração anual. A temperatura média anual varia de 20 °C a 22 °C, com as médias dos meses mais frios e mais quentes oscilando, respectivamente, de 15 °C a 19 °C e de 23 °C a 26 °C. A precipitação média anual é de 1.550 mm, sendo novembro, dezembro e janeiro o trimestre mais chuvoso (Amaral et al., 2000).

O plantio da cana-de-açúcar ocorreu no dia 28 de novembro de 2009. A área experimental foi composta por uma mistura das variedades (RB 93-5744; RB 72-454; RB 93-5608; RB 85-5113 e SP 83-2847) espaçada de 1,2 m entre as linhas, totalizando 3.000 m² de área plantada. A adubação foi realizada aplicando 2 t ha⁻¹ de composto orgânico no sulco de plantio, imediatamente abaixo dos colmos da cana. Anteriormente ao plantio da cana, a área foi cultivada com aveia-preta (*Avena stringosa*).

A operação de colheita da cana foi realizada manualmente e sem queima do canavial, entre os dias 21 e 25 de novembro de 2011. Após a colheita da cana, a área foi dividida em três parcelas experimentais de 25 × 40 m, constituindo os

seguintes manejos: sem preparo do solo e com resíduos da colheita retidos sobre a superfície do solo (SPCR); sem preparo do solo e sem resíduos (SPSR), e com preparo do solo e sem resíduo (CPSR).

O preparo do solo ocorreu no dia 27 de novembro de 2011, composto por uma subsolagem, com um subsolador de sete hastes e profundidade de descompactação de 40 cm. Na sequência, foram realizadas duas gradagens com grade aradora de 16 discos de 32", na profundidade de 20 cm, para o revolvimento do solo.

A palha remanescente da colheita da cana-de-açúcar correspondeu a 13,5 t MS (massa seca) ha⁻¹, com uma altura próxima a 15 cm de massa seca deixada sobre o solo.

A emissão de CO₂ do solo foi registrada utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska EUA. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA Infrared Gas Analyzer). Este é acoplado sobre colares de PCV previamente inseridos no solo. Concomitantemente às leituras de emissão de CO₂, foram conduzidas avaliações da temperatura do solo na camada de 0-20 cm de profundidade, utilizando-se de um termômetro (termistor portátil), que é parte integrante do sistema ao qual a câmara para solos é acoplada. A umidade do solo foi também medida em todos os pontos, utilizando-se de 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.

Em cada parcela experimental, foram inseridos 10 colares de PVC para as avaliações da emissão de CO₂ do solo (FCO₂), sendo a temperatura do solo (Ts) e a umidade do solo (Us) também investigadas adjacentes a tais colares. Foram 15 dias de avaliações compreendidos entre os dias 28 de novembro e 14 de dezembro de 2011, no horário matutino das 8 às 10 h. Utilizando-se da denominação do dia Juliano, essas datas correspondem a 332 - 343 e 346 - 348 de 2011. Informações referentes às precipitações ocorridas na área, durante o período experimental, foram extraídas de um conjunto de dados pertencentes ao acervo da Estação

Agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados-MS, localizada próxima ao local onde o experimento foi conduzido.

Os dados foram analisados, inicialmente, por meio da estatística descritiva (média, erro-padrão da média, máximo, mínimo e coeficiente de variação). A análise de variância foi realizada em delineamento inteiramente casualizado, no esquema de medidas repetidas no tempo. Inicialmente, foi realizado o teste de esfericidade da matriz de variâncias e covariâncias entre tempos. A hipótese de esfericidade das matrizes de variância e covariância não foi rejeitada para todas as variáveis estudadas. A comparação de médias foi realizada, utilizando-se do teste de Tukey, ao nível de significância de 5% de probabilidade. As análises de variância e de correlação linear entre as variáveis foram realizadas, utilizando o sistema SAS (SAS versão 9.1, SAS instituto, Cary, NC, EUA). As emissões acumuladas de CO₂ do solo, durante todo o período de estudo, foram estimadas pelo método da área abaixo das curvas de emissão, utilizando o software R (R Development Core Team, 2011).

3.3 Resultados e Discussão

A média \pm erro-padrão da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) no manejo SPCR ($2,16 \pm 0,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) indicam que esta foi 34% ($p < 0,05$) inferior àquela registrada no manejo SPSR ($2,90 \pm 0,15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); assim, pode-se inferir que a retirada da palha residual da cana-de-açúcar favoreceu maiores emissões de CO₂ em relação àquela com a presença da palha, no período estudado (Quadro 1). Panosso et al. (2011), caracterizando a FCO₂ em áreas de cana crua e queimada, observaram emissões de $2,07 \pm 0,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no sistema de cana crua equivalente a uma emissão 32% inferior àquela do sistema de cana queimada, valores semelhantes aos observados no presente estudo. A manutenção dos resíduos da cultura da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo pode favorecer certas propriedades do solo, como, por exemplo, redução da temperatura e manutenção do teor de água do solo (Ussiri & Lal, 2009), a baixa densidade do solo (Tominaga et al., 2002), as taxas de infiltração e estabilidade de agregados (Graham & Haynes, 2006), além de proporcionar, em algumas ocasiões, um significativo aumento no teor da matéria orgânica do solo (Canellas et al., 2010).

Outros autores, estudando a emissão de CO₂ do solo em áreas de cana-de-açúcar com colheita de cana crua, também observaram que a FCO₂ é significativamente menor no sistema de manejo onde os resíduos são deixados sobre o solo (La Scala et al., 2006; Panosso et al., 2009a; De Figueiredo, 2012; Silva-Olaya et al., 2013), sendo este, também, o manejo que contribuiu para que maiores quantidades de carbono sejam armazenadas nas camadas mais superficiais do solo (Canellas et al., 2010; La Scala et al., 2012; Thorburn et al., 2012). De Resende et al. (2006), estimam que a manutenção em torno de 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca dos resíduos da cana-de-açúcar poderia resultar em acúmulo de carbono no solo.

Quadro 1. Estatísticas descritivas da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo nos diferentes manejos: SPCR (Sem Preparo Com Resíduo), SPSR (Sem Preparo Sem Resíduo) e CPSR (Com Preparo Sem Resíduo).

Tratamento	Média	DP	EP	Mínimo	Máximo	CV (%)
Emissão de CO₂ do solo (μmol m⁻² s⁻¹)						
SPCR	2,16 b	0,66	0,06	0,54	4,26	30,55
SPSR	2,90 a	1,59	0,15	0,19	11,89	54,83
CPSR	3,22 a	1,87	0,17	0,81	13,10	58,07
Temperatura do solo (°C)						
SPCR	24,28 b	0,76	0,07	22,90	29,00	3,13
SPSR	26,26 a	1,05	0,10	23,70	29,64	4,00
CPSR	26,54 a	1,53	0,14	23,34	31,54	5,76
Umidade do solo (% de volume)						
SPCR	44,13 a	9,04	0,83	27,00	67,00	20,48
SPSR	36,13 b	12,31	1,13	19,00	58,00	34,07
CPSR	27,50 c	8,58	0,79	14,00	66,00	31,20

N = 150; DP = Desvio-Padrão; EP = Erro-Padrão da média; CV = Coeficiente de Variação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Entretanto, alguns estudos reportam que a incorporação desses resíduos ao solo, é uma prática que pode aumentar a taxa de emissão de CO₂ do solo para a atmosfera, uma vez que, com a incorporação, aumenta-se a área de contato do solo com os resíduos. Este efeito, somado à maior aeração, ao aumento na temperatura do solo e à diminuição da umidade, decorrentes do processo de revolvimento, facilitam o acesso microbiano ao material orgânico (Tominaga et al., 2002; Roscoe et al., 2006; De Figueiredo, 2012; Silva-Olaya et al., 2013).

No manejo CPSR, o valor médio da FCO₂ foi de $3,22 \pm 0,17 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ou seja, 49% superior àquele observado no manejo SPCR ($2,16 \pm 0,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Por outro lado, o efeito do preparo do solo sobre a FCO₂ pode ser determinado quando as emissões provenientes dos manejos CPSR e SPCR são comparadas. Não houve diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as médias de FCO₂ para esses manejos, indicando que o efeito do preparo do solo, como fator isolado, não influenciou o aumento nas taxas de emissão de CO₂ do solo (Quadro 1), durante o período estudado, sendo a retirada dos resíduos o fator determinante para os maiores valores médios registrados nestes manejos.

Na análise de variância de medidas repetidas no tempo para a emissão de CO₂ do solo, foi indicado efeito não significativo ($p = 0,2940$) da interação entre os tratamentos e o tempo (dias de avaliação). Portanto, a FCO₂ apresentou padrão similar de variabilidade temporal quando os três sistemas de manejo foram comparados.

Na Figura 1, são apresentadas as médias diárias da FCO₂, temperatura e umidade do solo durante o período avaliado. Embora variações na FCO₂ tenham sido observadas nos três manejos, após as precipitações na área de estudo, quando comparadas as médias da emissão de CO₂ do solo, observa-se que o manejo CPSR foi mais sensível às variações no teor de água no solo, apresentando os maiores valores médios diários após eventos pluviométricos.

O primeiro evento foi registrado no dia 336 ($6,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), representando um aumento de 70%, quando comparado à média da emissão do dia anterior ($3,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sendo que, no dia 334, ocorreu uma chuva de 10,2 mm na região, após um período de 12 dias sem chuvas. O segundo maior valor foi observado no dia 342 ($4,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ocorrendo após a uma precipitação acumulada nos dias 342; 339 e 340, totalizando 33,2 mm (Figura 1a).

Varella et al. (2004) observaram resultados semelhantes em estudos desenvolvidos em solos com pastagens, onde o fluxo de CO₂ oscilou entre $1,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para $6,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ depois da adição artificial de água no solo por simulação de chuvas.

Panosso et al. (2009a), em estudos conduzidos em área de cana queimada, no interior de São Paulo, também observaram aumento significativo na FCO₂ após

uma precipitação de 21 mm. Morell et al. (2010), estudando o efeito de curto prazo de chuvas sobre o fluxo de CO₂, em diferentes sistemas de manejo do solo, observaram que a FCO₂ foi significativamente maior nos sistemas de cultivo mínimo e plantio direto, quando comparados sistemas de preparo convencional do solo, dentro de um período de três dias depois da chuva. Carbonell-Bojollo et al. (2012), investigando a influência de condições de solo e clima nas emissões de CO₂, em três localidades no sul da Espanha, verificaram que a umidade teve um efeito claro sobre a dinâmica de decomposição da matéria orgânica do solo, o que determinou aumentos na quantidade de CO₂ emitido para a atmosfera; assim, os meses com maior pluviosidade e temperaturas mais amenas (próximas a 20 °C) favoreceram a rápida decomposição de resíduos orgânicos no solo.

A desestruturação física do solo, associada ao preparo, pode também ter influenciado as maiores médias diárias da FCO₂, principalmente nos primeiros dias após o preparo (dias 332 a 337), (Figura 1a). Aumentos na FCO₂ induzido pelo preparo têm sido associados à intensidade do preparo do solo, sendo um fator determinante da variabilidade temporal do fluxo de CO₂ do solo em períodos curtos (Morell et al., 2010; La Scala et al., 2008, 2009).

Em estudos desenvolvidos na cidade de Indiana (EUA), em áreas com longo histórico de rotação com culturas de soja e milho sobre diferentes manejos do solo, incluindo o plantio direto e preparo convencional (aiveca e gradagens), Omonode et al. (2007) verificaram que as emissões de CO₂ do solo foram maiores imediatamente após as operações de preparo, com drástica diminuição 72 horas após esses eventos.

Além desses efeitos, o preparo deixa o solo suscetível ao processo de perda de solo e nutriente pela erosão, o que resulta, assim, em maior perda de carbono (Martínez-Mena et al., 2012). A retirada dos resíduos de palha da superfície do solo acelera este processo (Gaiser et al., 2008). Em adição, a manutenção dos resíduos eleva a rugosidade do solo, sendo associada à baixa movimentação, favorece um controle mais eficaz da erosão hídrica, pois dissipa a energia da chuva e, em parte, da enxurrada, protegendo a superfície do solo do selamento (Martins Filho et al., 2009).

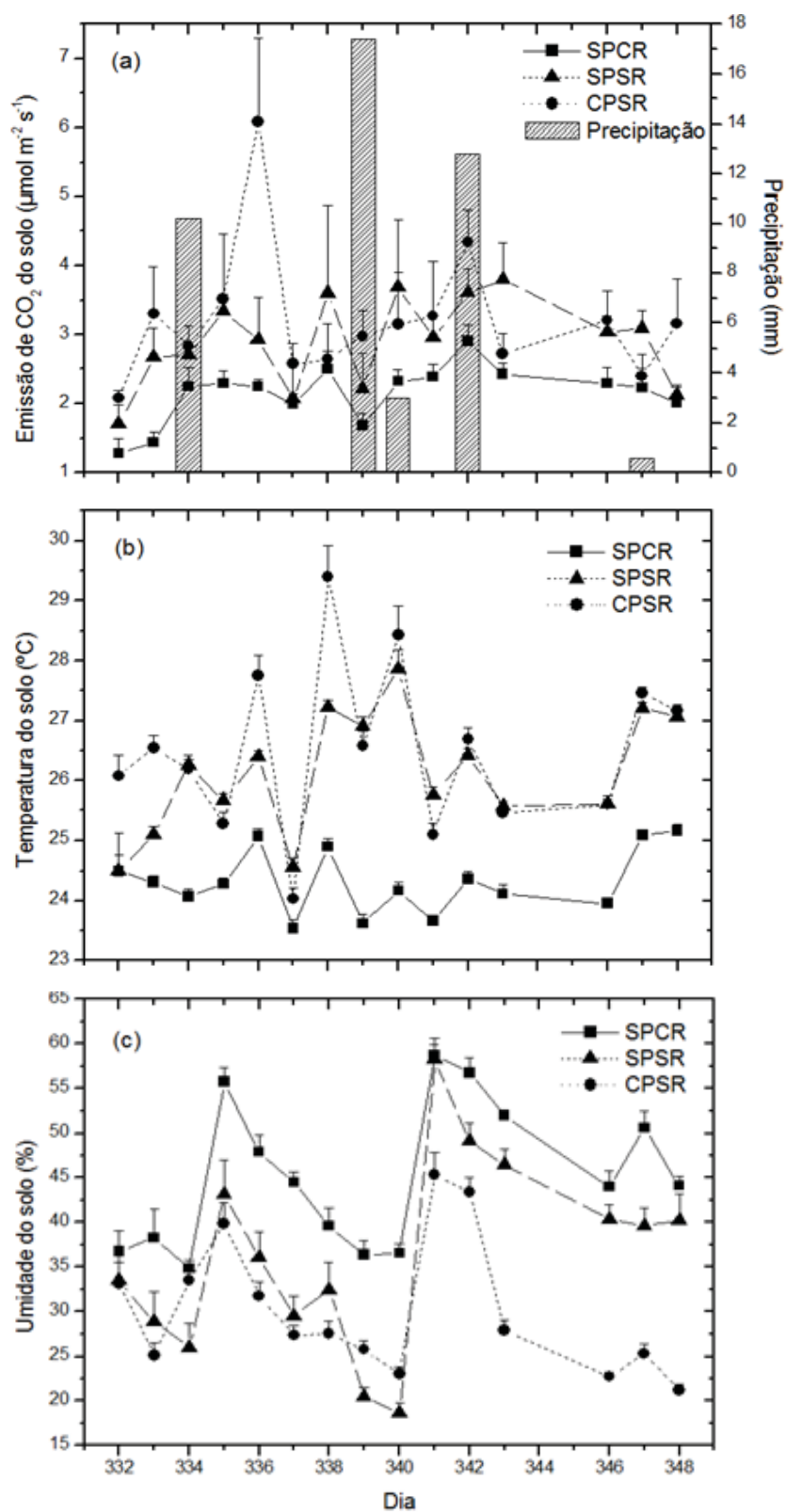


Figura 1. Emissão de CO₂ do solo e precipitações ocorridas no período de estudo (a), temperatura (b) e umidade do solo (c) com metade do erro-padrão nos diferentes manejos: sem preparo do solo e com resíduo (SPCR), sem preparo e sem resíduo (SPSR) e com preparo e sem resíduo (SPCR).

As variações da temperatura e da umidade do solo, como resultados das precipitações pluviométricas, afetam significativamente as taxas de emissões de CO₂ (Morell et al., 2010), sendo que este processo é mais acentuado em solos onde as práticas agrícolas de manejo promovem a quebra de sua estrutura física, facilitando a infiltração de água no interior do solo (Sainju et al., 2008).

A temperatura do solo (Ts) no manejo SPCR apresentou o valor médio de 24,2 °C, valor significativamente inferior ($p < 0,05$) àqueles observados para SPSR e CPSR, com 26,2 e 26,5 °C, respectivamente (Quadro 1).

O efeito do resíduo da cana-de-açúcar sobre os menores valores médios e diários referentes à Ts são observados quando comparados os manejos SPCR e SPSR, na qual mais uma vez o manejo SPCR se destacou, apresentando menores variações durante o período de estudo, variando entre 23 e 25 °C, uma vez que, no manejo SPSR, estes valores estão entre 24 e 28 °C (Figura 1).

Dependendo da quantidade e da distribuição da cobertura vegetal no solo, a temperatura da superfície pode ser reduzida em até 4 °C; com uma cobertura de aproximadamente 70%, a taxa de evaporação do solo se reduz para cerca de 25% (Lou et al., 2011). O efeito proporcionado pela cobertura do solo na redução da Ts é um fator controlador da emissão de CO₂, uma vez que a atividade microbiana é acelerada com aumentos na temperatura do solo, e, conseqüentemente, a taxa de mineralização do carbono é maior (Ussiri & Lal, 2009).

No manejo CPSR, a Ts variou entre 24 e 29,5 °C, embora este manejo tenha registrado inicialmente as maiores médias entre os manejos avaliados; e nos cinco últimos dias de medições, seus valores médios diários ficaram próximos aos registrados no manejo SPSR. A elevação inicial da Ts, possivelmente, está relacionada ao preparo do solo.

La Scala et al. (2006), investigando a emissão de CO₂ do solo em áreas de cana-de-açúcar sobre diferentes sistemas de manejo no interior do Estado de São Paulo, também observaram valores de temperatura média do solo 2,5 °C mais elevada no sistema onde o solo sofreu preparo.

Silva-Olaya et al. (2013), em estudo semelhante desenvolvido no nordeste de São Paulo, avaliando diferentes manejos e preparos do solo durante a reforma do canavial observaram nos 10 dias iniciais de avaliações valores levemente superiores

da Ts, coincidindo com a realização do preparo do solo e eventos pluviométricos na área.

Para a temperatura e umidade do solo, a análise de variância indicou significância ($p < 0,0001$) da interação entre os manejos e o tempo, portanto o padrão de variabilidade temporal não foi o mesmo para os manejos.

A umidade média do solo (U_s) foi a propriedade que apresentou maior variabilidade temporal nos três manejos ($p < 0,0001$), e a maior média de umidade do solo foi observada no manejo SPCR (44,13%), seguido pelo SPSR (36,13%) e CPSR (27,50%) (Quadro 1). A manutenção de resíduos de colheita na superfície do solo preserva a umidade do solo, proporcionando um isolamento térmico (Ussiri & Lal, 2009), reduzindo as temperaturas máximas diárias e elevando as temperaturas mínimas, em relação a solos sem cobertura vegetal (Tominaga et al., 2002). Pelas mesmas razões, nota-se que o menor valor médio da U_s registrada no CPSR está possivelmente relacionado com o preparo do solo e sua subsequente aeração, pois alterações em sua estrutura física acarretam mudanças na evapotranspiração (Schwartz et al., 2010), afetando o regime de temperatura e acelerando o processo de secagem do solo (Silva-Olaya et al., 2013).

A análise de correlação linear entre a FCO₂ e a U_s foi utilizada para avaliar a possível relação entre as variáveis FCO₂ e U_s (Figura 2). Foi observado um índice de correlação positivo e significativo ($r = 0,55$; $p < 0,05$), entre essas variáveis, nos manejos SPCR e CPSR, e valor não significativo ($p < 0,10$) para o manejo SPSR. Estes resultados corroboram aqueles obtidos por La Scala et al. (2006) em estudo semelhante, onde a relação entre a FCO₂ e a U_s foi descrita por função linear com $r = 0,57$ no sistema de plantio direto e $r = 0,59$ no sistema de preparo convencional do solo. Os autores ressaltam que, devido à grande variação apresentada pela umidade do solo, ela torna-se um fator determinante da intensidade da atividade microbológica e, portanto, contribui efetivamente para o processo de emissão de CO₂ do solo para a atmosfera. Panosso et al. (2009b) também observaram correlação linear positiva e significativa entre a emissão e a umidade do solo logo após irrigação artificial, em solos desprovidos de vegetação. O evento do molhamento do solo acarreta aumento imediato de seis e até dez vezes no fluxo de CO₂ do solo (Calderón & Jackson, 2002; Smart & Peñuelas, 2005).

De acordo com Ordóñez-Fernández et al. (2008), a umidade do solo pode favorecer ou inibir a produção de CO₂ no interior deste, e um determinado conteúdo de água no solo maximiza a atividade microbiana, mas, em excesso, haverá limitação à difusão de oxigênio pelos poros, pois os espaços porosos são ocupados pela água. A transição do solo seco para o úmido aumenta o fluxo de CO₂ logo nas primeiras horas, porém após determinado tempo tende a normalizar-se e até a diminuir essa emissão com o solo ainda úmido (Varella et al., 2004).

Os resultados do presente estudo indicam que o teor de água no solo, durante o experimento, variou dentro de um intervalo em que seu aumento resultou em aumento na atividade microbiana sem, contudo, limitar a oxigenação do solo.

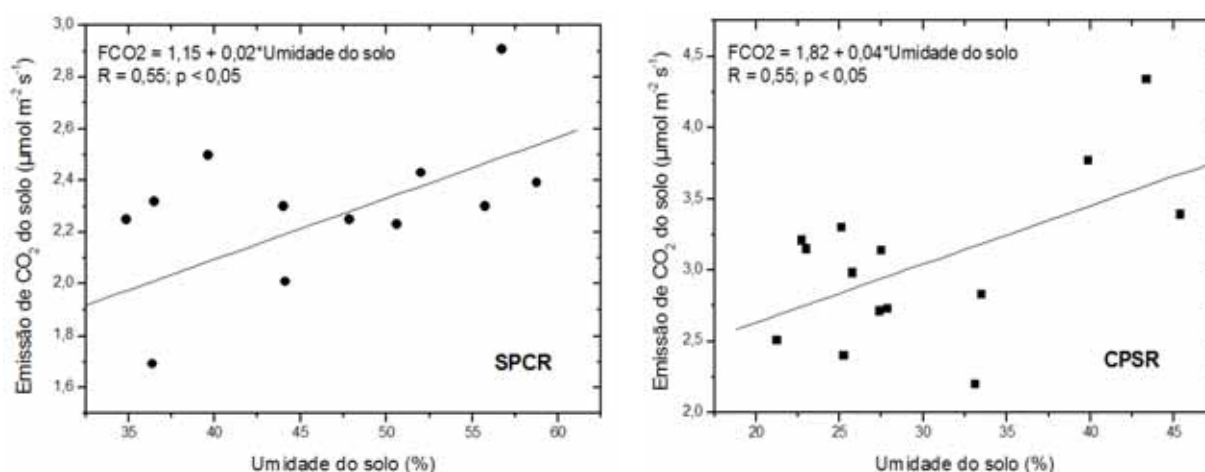


Figura 2. Correlação linear entre emissão de CO₂ e a umidade do solo nos manejos: sem preparo e com palha (SPCR), e com preparo e sem palha (CPSR).

As análises de regressão linear entre a FCO₂ e a Ts, para cada um dos manejos avaliados, não foram significativas ($p < 0,10$), pois a baixa variabilidade da Ts verificada pelo coeficiente de variação (Quadro 1), possivelmente, contribuiu para a ausência de correlação entre as duas variáveis. Ao contrário deste estudo, Ni et al. (2012), investigando a emissão de CO₂ do solo sobre cultivo intensivo de milho, num período de 141 dias de estudo, no nordeste da China, verificaram que o fluxo de CO₂ foi significativamente correlacionado à temperatura do solo ($R^2 = 0,95$, $p = 0,027$), mas não à umidade do solo.

Ussiri & Lal (2009), em experimentos de longo prazo, conduzidos em solos sobre cultivo de milho em diferentes sistemas de manejo do solo, observaram uma

forte relação da temperatura do solo com o fluxo de CO_2 em manejos onde o preparo do solo foi mais intenso. Lou et al. (2011) também relatam forte influência da temperatura do solo e do ar no fluxo de CO_2 do solo. Elevações na temperatura do solo afetam a atividade metabólica dos microrganismos e a respiração das raízes, ocasionando aumentos na FCO_2 e decréscimo do carbono estocado no solo (Kang et al., 2003).

Os valores obtidos da emissão total de CO_2 durante os 15 dias de estudo, nos diferentes manejos avaliados, demonstram que o sistema de manejo sem preparo e com resíduos culturais da cana (SPCR) foi responsável pela menor perda de CO_2 do solo ($134,65 \text{ g CO}_2 \text{ m}^2$), diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos manejos: SPSR ($183,98 \text{ g CO}_2 \text{ m}^2$) e CPSR ($196,11 \text{ g CO}_2 \text{ m}^2$) (Figura 3).

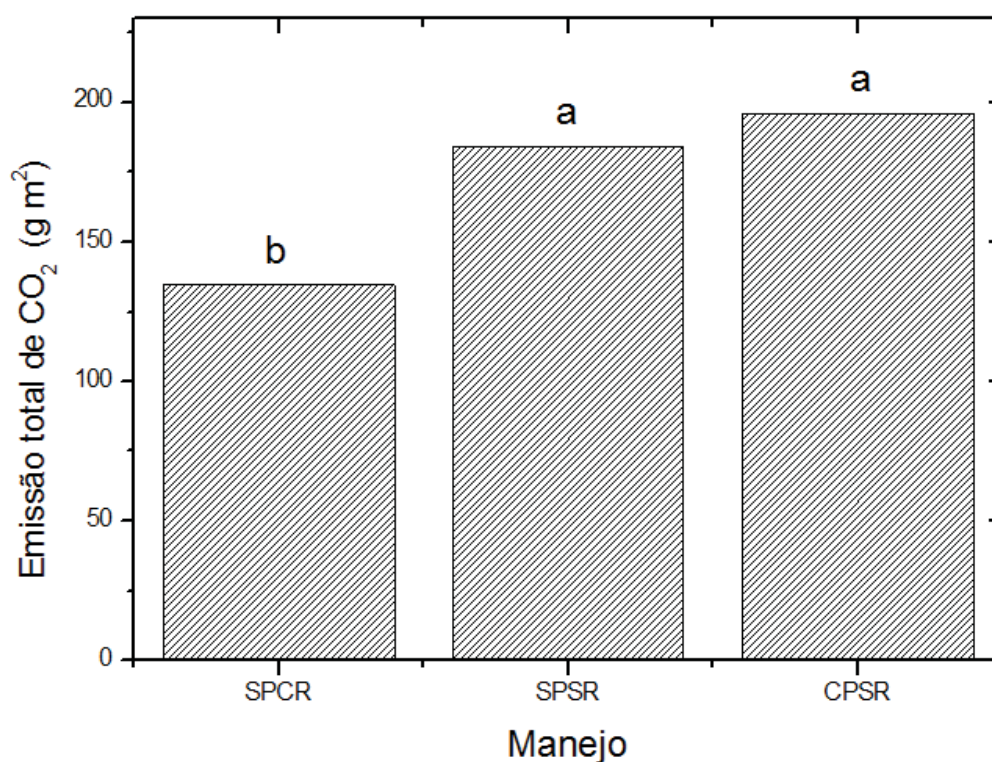


Figura 3. Emissão total de CO_2 (g m^2) nos diferentes manejos avaliados em 15 dias de estudo. Valores médios com a mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Comparando somente o efeito do preparo do solo entre os manejos SPSR e CPSR, observam-se valores muito semelhantes, indicando que, para as condições deste estudo, o preparo do solo não induziu a grandes perdas de carbono. Ao

contrário deste estudo, vários autores reportaram a forte influência dessa prática de manejo nas perdas de carbono por erosão e em forma de CO₂ emitido para a atmosfera (La Scala et al., 2006; Roscoe et al., 2006; Reicosky & Archer, 2007; Gesch et al., 2007; Martínez-Mena et al., 2012).

Em adição, comparando-se os manejos SPCR e SPSR, foram emitidos do solo para a atmosfera 49,33 g CO₂ m² em 15 dias de medidas, devido à simples retirada da palha da superfície do solo. De Figueiredo (2012), em estudo semelhante, observou que a retirada da palha durante a reforma do canavial, resultou em emissões adicionais de 252,4 kg CO₂ ha⁻¹, ou seja, emissões tão grandes quanto à queima prévia da palha anterior à colheita. Neste sentido, o autor discute que o efeito benéfico sobre as menores emissões de GEE com a eliminação da queimada em áreas de cana-de-açúcar pode ser anulado ao se retirar a palha remanescente da superfície do solo. Galdos et al. (2009), comparando os sistemas de colheita de cana queimada com cana crua, no Sudeste do Brasil, também observaram menores emissões no sistema de cana crua, considerando o sequestro de carbono no solo.

3.4 Conclusões

1. Os resultados deste estudo indicam que, manejos mais conservacionistas do solo em áreas de cana-de-açúcar com a manutenção dos resíduos sobre sua superfície é uma prática agrícola eficiente para a redução das emissões de CO₂ do solo. A cobertura vegetal propiciada pela palhada da cultura auxilia na preservação da umidade e favorece as menores temperaturas no interior do solo.
2. O preparo do solo como fator isolado não influenciou em maiores taxas de emissão de CO₂ do solo. Os resultados mais expressivos referentes a elevações na emissão de CO₂ e temperatura do solo foram observados quando a palha residual foi retirada do solo.

3.5 Literatura Citada

AMARAL, J.A.M.; MOTCHI, E.P.; OLIVEIRA, H.; FILHO, A.C.; NAIME, U.J. & SANTOS, R.D. Levantamento semidetalhado dos solos do Campo Experimental de Dourados da Embrapa Agropecuária Oeste, município de Dourados-MS. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 68p.

CANELLAS, L.P.; BUSATO, J.G.; DOBBS, L.B.; BALDOTTO, M.A.; RUMJANEK, V.M. & OLIVARES, F.L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. *Eur. J. Soil Sci.*, 61:375–383, 2010.

CALDERÓN, F.J. & JACKSON, L.E. Rototillage, disking, and subsequent irrigation: effects on soil dynamics, microbial biomass, and carbon dioxide efflux. *J. Environ. Qual.*, 31:752-58, 2002.

CARBONELL-BOJOLLO, R.M.; REPULLO-RUIBÉRRIZ, M.A.; RODRÍGUEZ-LIZANA, A. & ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. Influence of soil and climate conditions on CO₂ emissions from agricultural Soils. *Water Air Soil Poll.*, 223:3425–3435, 2012.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J. & BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. *Sci. Agric.*, 66:831-843, 2009.

CONAB, 2012. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2012. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília. Conab. Disponível: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_05_09_11_59_boletim_cana_portugues_-_agosto_2012_2o_lev.pdf Safra 2010/2011>. Acesso em: 31 out. 2012.

DE FIGUEIREDO, E.B. Balanço de gases de efeito estufa e emissões de CO₂ do solo nos sistemas de colheita da cana-de-açúcar manual queimada e mecanizada crua. 2012. 111 f. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

DE RESENDE, A.S.; XAVIER, R.P.; DE OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R. & BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugarcane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. *Plant Soil*, 281:339–351, 2006.

DENDOOVEN, L.; GUTIÉRREZ-OLIVA, V.F.; PATIÑO-ZÚÑIGA, L.; RAMÍREZ-VILLANUEVA, D.A.; VERHULST, N.; LUNA-GUIDO, M.; MARSCH, R.; MONTES-MOLINA, J.; GUTIÉRREZ-MICELI, F.A. & GOVAERTS, B. Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Sci. Total Environ.*, 431:237–244, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2006. 412p.

GAISER, T.; STAHR, K.; BILLEN, N. & MOHAMMAD, M.A.R. Modeling carbon sequestration under zero tillage at the regional scale. I. The effect of soil erosion. *Ecol. Model.*, 218:110-120, 2008.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C. & CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, 153:347–352, 2009.

GESCH, R.W.; REICOSKY, D.C.; GILBERT, R.A. & MORRIS, D.R. Influence of tillage and plant residue management on respiration of a Florida Everglades Histosol. *Soil Till. Res.*, 92:156-166. 2007.

GRAHAM, M.H. & HAYNES, R.J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microbial community in the row and inter-row of sugarcane under burning and trash retention. *Soil Biol. Biochem.*, 38:21–31, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

KANG, S.; DOH, S.; LEE, D.; LEE, D.; JIN, V. L. & KIMBALL, J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biol.*, 9:1.427-1.437, 2003.

LA SCALA, N.; DE FIGUEIREDO, E.B. & PANOSSO, A.R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Braz. J. Biol.*, 72:775-785, 2012.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.W. & REICOSKY, D.C. Short-term temporal changes of bare soil CO₂ fluxes after tillage described by first-order decay models. *Eur. J. Soil Sci.*, 60:258–264, 2009.

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 Till. Res.*, 91:244-248, 2006.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur. J. Soil Sci.*, 60:158–169, 2009.

LAL, R.; DELGADO, J.A.; GROFFMAN, P. M.; MILLAR, N.; DELL, C. & ROTZ, A. Management to mitigate and adapt to climate change. *J. Soil Water Conserv.*, 66:276-285, 2011.

LOU, Y.; LIANG, W.; XU, M.; ELE, X.; WANG, Y. & ZHAO, K. Straw coverage alleviates seasonal variability of the topsoil microbial biomass and activity. *Catena*, 86:117-120, 2011.

MARTÍNEZ-MENA, M.; LÓPEZ, J.; ALMAGRO, M.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V.; ORTIZ, R. & BOIX-FAYOS, C. Organic carbon enrichment in sediments: Effects of rainfall characteristics under different land uses in a Mediterranean área. *Catena*, 94:36–42, 2012.

MARTINS FILHO, M.V.; LICCIOTI, T.T.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J. & SANCHEZ, R.B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Eng. Agric.*, 29:8-18, 2009.

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. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 139:167–173, 2010.

OMONODE, R.A.; VYN, T.J.; SMITH, D.R.; HEGYMEGI, P. & GA'I, A. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. *Soil Till. Res.*, 95:182-195, 2007.

ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R.; CARBONELL BOJOLLO, R.; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, P. & PEREA TORRES, F. Influencia de la climatología y el manejo del suelo en las emisiones de CO₂ en un suelo arcilloso de la vega de Carmona. *Carel*, 6:2339-2354, 2008.

PANOSSO, A.R.; MARQUES JR, J.; MILORI, D.M.B.P.; FERRAUDO, A.S.; BARBIERI, D.M.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. *Soil Till. Res.*, 111:190–196, 2011.

PANOSSO, A.R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA JR, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. *Soil Till. Res.*, 105: 275-282, 2009a.

PANOSSO, A.R.; RIBEIRO, C.E.R.; ZANINI, J.R.; PAVANI, L.C.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. *Semin-Ciênc. Agrar.*, 30:1.017-1.034, 2009b.

PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J. & LA SCALA JR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. *Eng. Agric.*, 28:227-236, 2008.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRE'-LARROUY, M.C.; DE LUCA, E.F.; LAURENT, J.Y.; CERRI, C.C. & FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 115:285–289, 2006.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

REICOSKY, D.C. & ARCHER, D.W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil Till. Res.*, 94:109-121, 2007.

RONQUIM, C.C. Dinâmica espaçotemporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas no nordeste do Estado de São Paulo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2007, 52 p.

ROSCOE, R.; BODDEY, R.M. & SALTON, J.C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M. & SALTON, J.C. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas. Modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 304p. 2006.

SAINJU, U.M.; JABRO, J.D. & STEVENS, W.B. Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by irrigation, tillage, cropping system, and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.*, 37:98–106, 2008.

SCHWARTZ, R.C.; BAUMHARDT, R.L. & EVETT, S.R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil Till. Res.*, 110:221–229, 2010.

SILVA-OLAYA, A.M.; CERRI, C.E.P.; LA SCALA JR., N.; DIAS, C.T.S. & CERRI, C.C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.*, 8:1-8, 2013.

SMART, D.R. & PEÑUELAS, J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. *Appl. Soil Ecol.*, 28:247-57, 2005.

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; COLLINS, K. & ROBERTSON, F.A. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil Till. Res.*, 120:99-111, 2012.

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 sugarcane field. *Aust. J. Soil Res.*, 40:605–614, 2002.

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 Till. Res.*, 104:39-47. 2009.

VARELLA, R.F.; BUSTAMANTE, M.M. C.; PINTO, A.S.; KISSELLE, K.W.; SANTOS, R.V.; BURKE, R.A.; ZEPP, R.G. & VIANA, L. T. Soil fluxes of CO₂, CO, NO and N₂O an old pasture and from native savanna in Brazil. *Ecol. Eppl.*, 14:221-231, 2004.