

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

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE  
CO<sub>2</sub> DO SOLO EM CURTO PERÍODO SOB INFLUÊNCIA DE  
EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO**

**Elienai Ferreira da Silva**

Engenheiro Agrônomo

2016

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

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE  
CO<sub>2</sub> DO SOLO EM CURTO PERÍODO SOB INFLUÊNCIA DE  
EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO**

**Elienai Ferreira da Silva**

**Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Junior**

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).

**2016**

S586v Silva, Elienai Ferreira da  
Variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo em  
curto período sob influência de eventos de precipitação / Elienai  
Ferreira da Silva. -- Jaboticabal, 2016  
xi, 47 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2016  
Orientador: Newton La Scala Junior  
Banca examinadora: Alan Rodrigo Panosso, Glauco de Souza  
Rolim  
Bibliografia

1. Geoestatística. 2. Preparo do solo. 3. Temperatura. 4. Umidade.  
5. Respiração do solo. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências  
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.433.3:519.23

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO  
EM CURTO PERÍODO SOB INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO**

**AUTOR: ELIENAI FERREIRA DA SILVA**

**ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR**

Aprovado 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 / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO  
Departamento de Matemática / FEIS / UNESP - Ilha Solteira/SP  
Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 26 de fevereiro de 2016.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**ELIENAI FERREIRA DA SILVA** – Filho de Manoel Ferreira da Silva e Maria José Ferreira da Silva, nasceu em Porto Calvo, Alagoas no dia 19 de maio de 1987. Em agosto de 2009, ingressou no curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias – Campus de Rio Largo – AL. Foi bolsista de iniciação Científica da Embrapa e CNPq pela Embrapa Tabuleiros Costeiros da Unidade de Execução e Pesquisa em Rio Largo, Alagoas, durante o período de Janeiro de 2010 a julho de 2014. Em agosto de 2014, ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Programa de Ciências do Solo), pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – UNESP-Jaboticabal, SP. No dia 26 de fevereiro de 2016, submeteu-se a banca para defesa de Dissertação, sendo aprovado como Mestre em Agronomia.

*“Porque há esperança para a árvore, pois mesmo cortada ainda se renovará, e não cessarão seus rebentos. Se envelhecer na terra a sua raiz, e no chão morrer o seu tronco, ao cheiro das águas brotará e dará ramos como a planta nova.”*

**Bíblia Sagrada, Livro de Jó, capítulo 14 e versículo 7.**

## DEDICATÓRIA

À Deus, dedico o meu agradecimento maior, porque tem sido tudo em minha vida.

Aos meus amáveis pais, Manoel Ferreira da Silva e Maria José Ferreira da Silva, que sem o apoio incondicional deles minha formação como profissional não poderia ter sido efetivada.

Um agradecimento especial aos meus irmãos Elielma, Emanuelle, Eliel e minha linda sobrinha, Ester. A minha noiva, eterna e grande amor, Helida Moseane por superar minhas ausências, por me fazer feliz e me apoiar incondicionalmente.

**A todos, muito obrigado.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela vida, saúde e pelos milagres e livramentos de cada dia.

À Universidade Paulista Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) de Jaboticabal e ao Programa de Ciência do Solo, na pessoa do Professor Prof. Dr. José Marques Júnior, pela aceitação e confiança.

Ao meu orientador Prof. Dr. Newton La Scala Junior, pela sua disponibilidade em ter me aceitado como seu orientando durante o período do mestrado e para os próximos anos do doutorado. Agradeço pela sua amizade, respeito, orientação e dedicação que foram essenciais em tornar possível o sucesso deste trabalho.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Daniel De Bortoli Teixeira, Gener Tadeu Pereira. Como também, agradeço aos professores membros da Banca de Defesa, Glauco de Souza Rolim e Alan Rodrigo Panosso.

À doutoranda Mara Regina Moitinho, companheira do Departamento de Ciência Exatas (FCAV/UNESP), que muito contribuiu na concretização deste trabalho. Agradeço pelo apoio prestado, as suas observações e críticas foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.

À pesquisadora da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Walane Maria Pereira de Mello Ivo, minha orientadora de iniciação científica no período de graduação, pelos conselhos e incentivo em persistir no mestrado e doutorado, pela amizade e respeito ao longo desses anos.

Aos assistentes do departamento de Ciências Exatas, sendo eles: Zezé, Adriana, Shirley e Norival pelo apoio.

Aos amigos Elton da Silva Bicalho e Risely Ferraz de Almeida pela colaboração e amizade.

Aos amigos do departamento de Ciências Exatas, Clariana Valadares Xavier, Bruna de Oliveira Silva e Gustavo André de Araújo Santos.

Aos amigos Carlos Capita e Vanessa Souza pelos bons momentos de conversa.

À Usina São Martinho pela disponibilização da área.

À Capes pelo apoio financeiro.

**Meus sinceros agradecimentos.**

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Gases de efeito estufa (GEE) e alterações no clima .....	3
2.2 Emissão de CO <sub>2</sub> do solo na agricultura .....	4
2.2.1 Atividades de reforma em áreas de cana-de-açúcar .....	6
2.3 Principais fatores ambientais controladores da emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....	8
2.3.1 Temperatura, umidade e aeração do solo .....	8
2.3.2 Precipitações .....	10
2.4 Variabilidade da emissão de CO <sub>2</sub> do solo.....	11
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>13</b>
3.1 Caracterização da área de estudo .....	13
3.1.2 Atividades de reforma do canavial desenvolvidas na área .....	15
3.2 Determinação da emissão de CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade do solo .....	15
3.3 Determinação dos atributos físicos e químicos do solo .....	17
3.4 Análise dos dados.....	17
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>34</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>

## VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM CURTO PERÍODO SOB INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO

**RESUMO** – A emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) em áreas agrícolas é um processo resultante da interação de diferentes fatores, tais como as condições de clima e solo. Nesse sentido, objetivou-se, com este estudo, investigar a variabilidade espaço-temporal da FCO<sub>2</sub>, temperatura (T<sub>solo</sub>), umidade (U<sub>solo</sub>) e porosidade livre de água (PLA) do solo e suas interações, em área de reforma do canavial. O estudo foi conduzido em área de cana-de-açúcar sob reforma, na qual foi instalada malha amostral de 90 x 90 m<sup>2</sup> contendo 100 pontos espaçados entre si em 10 m. Nestes pontos foram avaliadas a FCO<sub>2</sub>, T<sub>solo</sub> e U<sub>solo</sub> em 10 avaliações ao longo de um período de 28 dias. Para as avaliações da FCO<sub>2</sub>, foi utilizado o sistema portátil LI-8100A. Concomitantemente à avaliação de FCO<sub>2</sub>, foram determinadas a T<sub>solo</sub> (termômetro integrante do sistema LI-8100A) e a U<sub>solo</sub> (aparelho TDR). A emissão de CO<sub>2</sub> e a U<sub>solo</sub> foi maior no dia 276, com maior valor médio de 4,67 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e 31,75% em função das precipitações na área de estudo. Contrariamente os menores valor médios foram observados para PLA 19,17% e para a T<sub>solo</sub> 20,90 °C. Os modelos de regressão linear utilizando somente a U<sub>solo</sub> e a PLA explicaram 85% e 80%, respectivamente, da variabilidade temporal da FCO<sub>2</sub>, indicando que ao longo do tempo, a emissão de CO<sub>2</sub> foi controlada pela variação do conteúdo de água e aeração do solo. Por outro lado, não foram encontrados modelos lineares ou quadráticos significativos ( $p > 0,05$ ) entre a FCO<sub>2</sub> e a T<sub>solo</sub>. Os modelos ajustados para descrever a variabilidade espacial da FCO<sub>2</sub>, T<sub>solo</sub>, U<sub>solo</sub> e PLA foram esféricos e exponenciais, sendo o modelo esférico predominante. Com exceção de alguns dias específicos, a partir dos mapas não foi possível a visualização de regiões características da área que indicassem um padrão de variabilidade espacial. Possivelmente o fato da amostragem ter sido conduzida em uma escala reduzida pode ter colaborado para um comportamento aleatório das variáveis no tempo. A variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade e a aeração do solo é afetada pelas precipitações na área de estudo, e pode ser dividida em três períodos: antes, durante e após as precipitações. Valores mais elevados da emissão de CO<sub>2</sub> do solo são observados durante as precipitações e menores valores antes e pós-precipitações.

**Palavras-chave:** geoestatística, preparo do solo, respiração do solo, temperatura, umidade

## SHORT-TERM SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF SOIL CO<sub>2</sub> EMISSION UNDER THE INFLUENCE OF RAINFALL EVENTS

**ABSTRACT** – Soil CO<sub>2</sub> emission (FCO<sub>2</sub>) in agricultural areas is a process that results of the interaction of different factors such as climate and soil conditions. In this sense, the aim of this study was to investigate the spatial and temporal variability of FCO<sub>2</sub>, soil temperature (T<sub>soil</sub>), soil moisture (M<sub>soil</sub>) and air-filled pore space (AFPS) and their interactions in a sugarcane field reform. This study was conducted in a 90 × 90-m sampling grid with 100 points spaced at distances of 10 m; at these points, 10 measurements were performed over a period of 28 days. In order to measure the FCO<sub>2</sub>, it was used a LI-8100A. Along with the measurements of FCO<sub>2</sub>, T<sub>soil</sub> and M<sub>soil</sub> were also measured. It was observed an increase of 78% in FCO<sub>2</sub> due to the rainfall in the study area. The linear regression models using only M<sub>soil</sub> and AFPS explained 85% and 80%, respectively, of the variability of FCO<sub>2</sub>, indicating that over the time, the emission of CO<sub>2</sub> was controlled by varying the content of water and soil aeration. The adjusted models to describe the spatial variability of FCO<sub>2</sub>, T<sub>soil</sub>, M<sub>soil</sub> and AFPS were spherical and exponential. However, the spherical model was more predominant. We did not identify spatial variability using the maps for some days. Probably this happened because we used the small scale. It can have collaborated for random behavior. The spatiotemporal variability of CO<sub>2</sub> emission, temperature, moisture and air-filled pore space was affected by rainfall in the study area. We can divide this variability in three periods: before, during and after rainfall. The higher values of CO<sub>2</sub> emissions was observed during rainfall and lower values before and after rainfall.

**Keywords:** geostatistics, soil preparation, soil respiration, temperature, moisture

## 1 INTRODUÇÃO

As altas concentrações de gases na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e os vapores de água são responsáveis pelo fenômeno conhecido como efeito estufa (LEVITUS et al., 2001; IPCC, 2007). Dentre estes gases, o CO<sub>2</sub> é o que mais contribuiu para este fenômeno nos últimos 200 anos (CERRI et al., 2007).

No Brasil, acompanhando o desenvolvimento do setor agrícola, vem a preocupação com os impactos das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de práticas inadequadas de manejo dos solos. Neste cenário os sistemas de produção com a cultura da cana-de-açúcar ganham grande destaque (LA SCALA et al., 2006; RAZAFIMBELO et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2010; PANOSSO et al., 2011; SILVA-OLAYA et al., 2013; VARGAS et al., 2014; IAMAGUTI et al., 2015).

A reforma dos canaviais geralmente é realizada a cada cinco anos, sendo um processo necessário após vários cortes consecutivos da cana-de-açúcar, os quais afetam o estado nutricional do solo com conseqüente decréscimo na produtividade da cultura (SOUZA et al., 2005). Estima-se que 722,3 mil hectares (2,9%) da área pertencente ao Estado de São Paulo foram reformados na safra 2013/14, de um total de 5.768.184 milhões de hectares (CANASAT, 2015).

Estudos têm demonstrado que as atividades envolvidas na reforma do canavial, a exemplo do preparo (SILVA-OLAYA et al., 2013; IAMAGUTI et al., 2015) e a correção do pH do solo pela calagem (MARCELO et al., 2012; SILVA et al., 2013; FIGUEIREDO et al., 2014) resultam em perdas significativas do carbono do solo, especialmente em curtos períodos. Estas atividades alteram os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como as condições de temperatura e umidade do mesmo (SALTON; MIELNICZUK, 1995; LA SCALA et al., 2006; MOITINHO et al., 2013).

As condições climáticas também são determinantes na intensidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, promovendo variações diárias nas taxas de emissão. Essas atuam diretamente sobre a temperatura e umidade do solo, fatores estes controladores do

processo de emissão, promovendo efeitos sobre a atividade microbiana e de raízes (TSAI et al., 1992; SCHLÖMER et al., 2013; XIE et al., 2015).

Precipitações após longo período de seca favorecem a atividade microbiana, enquanto em períodos mais úmidos podem provocar a expulsão total do oxigênio presente no interior do solo, dando origem a um microambiente anaeróbio (TEIXEIRA et al., 2012), uma vez que a aeração e a umidade estão inversamente relacionadas.

Assim, o estudo do sistema poroso do solo é importante para a melhor compreensão do movimento e armazenamento de água e gases no interior do mesmo (ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ et al., 2008).

O processo de emissão do gás CO<sub>2</sub> do solo para atmosfera torna-se um processo complexo por ser dependente das condições edafoclimáticas locais, como também, por apresentar grande variabilidade no espaço e no tempo. Diversos autores, utilizam-se de técnicas geoestatísticas para determinar o padrão espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> em solos desprovidos de vegetação (LA SCALA et al., 2000; HERBST et al. 2009; TEIXEIRA et al., 2011) e em áreas com vegetação (ROCHETTE et al., 1991; FANG; MONCRIEFF, 1998; XU; QI, 2001; PANOSSO et al., 2009; BRITO et al., 2010; KONDA et al., 2010).

Portanto, acredita-se que padrões distintos caracterizem a variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo ao longo do tempo e espaço, e em curtos períodos, e este padrão é reflexo das variações que ocorrem principalmente nos atributos envolvidos no processo de transporte do CO<sub>2</sub>.

Assim, objetivou-se investigar a variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura do solo, umidade e porosidade livre de água do solo, bem como suas interações em área de reforma do canavial no interior do Estado de São Paulo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Gases de efeito estufa e alterações no clima

As mudanças climáticas globais e os cenários climáticos expostos no Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) expõem a vulnerabilidade da agricultura e agroecossistemas do planeta (IPCC, 2014). As altas concentrações de gases na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e vapores d'água dão origem ao fenômeno conhecido como efeito estufa (LEVITUS et al., 2001; COSTA et al., 2006).

A evolução das altas concentrações desses gases na atmosfera iniciou nos meados do século XVIII com o advento do período da Revolução Industrial, que começou na Inglaterra. No período que antecede a Revolução Industrial (1750) a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para atmosfera era de 280 ppm (partes por milhão) e passou para 379 ppm em 2005, correspondendo acréscimo de 31% e a perspectiva é que pode atingir entre 730 a 1.020 ppm até 2100 (IPCC, 2007).

O observatório em Mauna Loa na Ilha Havai, Estados Unidos, que registra as médias diárias das emissões de CO<sub>2</sub>, divulgou que no dia 09 de novembro de 2015, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera ultrapassou os 400 ppm (SCRIPPS, 2015), fato este que possibilita cenários de aquecimento que podem elevar a temperatura até 4,8 °C, conforme relatórios do IPCC (2014).

As alterações climáticas refletiram significativamente na temperatura média da terra no ano de 2015, segundo estudos da NASA (2016), o ano de 2015 foi considerado o mais quente desde o início dos registros de temperatura na terra.

Estimativas apresentadas por pesquisadores no quarto relatório do IPCC (2007), já apontavam que a temperatura global poderia ter acréscimos de 4 °C até o final do século XXI. O Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), também indicou que todo o país deverá ficar ao menos 3 °C mais quente até o final do mesmo século. Entretanto, esse aumento será mais acentuado em algumas regiões do que em outras, sendo previstas também alterações no regime de chuvas. Neste sentido a agricultura que é apontada como

uma importante fonte emissora de gases de efeito estufa (GEE) desde os primeiros relatórios do IPCC, foi citada no RAN1 não somente por sua contribuição nas emissões, mas também como o setor que será mais afetado por causa das alterações no regime de chuvas. E mesmo que a quantidade de chuva fique inalterada, com as elevações da temperatura média anual a evapotranspiração será intensificada o que irá diminuir a disponibilidade de umidade no solo (PIVETTA, 2013).

Neste sentido, o desafio de diminuir o impacto das mudanças climáticas nos diferentes agroecossistemas, tem sido um dos principais objetivos de estudo e pesquisa da comunidade científica em geral, na busca por estratégias eficientes que permitiram meios para adaptação ou mitigação dos seus efeitos.

## **2.2 Emissão de CO<sub>2</sub> do solo na agricultura**

Diversas fontes antropogênicas contribuem para as altas concentrações de GEE na atmosfera. Dentre elas, destacam-se as práticas agrícolas, principalmente aquelas relacionadas as mudanças do uso e manejo do solo (CERRI et al., 2007; SIQUEIRA NETO et al., 2011). Cerca de 1/4 dos GEE são provenientes apenas da agricultura em nível global (LAMB et al., 2016).

De acordo com o quarto relatório do IPCC (2007) a agricultura no mundo já havia contribuído com aproximadamente 24% das emissões de CO<sub>2</sub>, 85% de N<sub>2</sub>O e, 55% de CH<sub>4</sub>. No período compreendido entre os anos de 1995 a 2010 as concentrações médias anuais de CO<sub>2</sub> obteve taxa de crescimento de 1,94 ppm em relação ao período de 1960 a 2005, tendo como média 1,46 ppm (ESRL, 2016).

No período compreendido entre os anos de 1995 a 2010 as concentrações médias anuais de CO<sub>2</sub> apresentaram taxa de crescimento de 1,94 ppm em relação ao período de 1960 a 2005, tendo como média 1,46 ppm (ESRL, 2016).

A agricultura em sua essência, entre outras atividades, é a mais dependente do clima e, conseqüentemente, a mais sensível à sua mudança. Embora contribua para as emissões de GEE e conseqüentemente com o aquecimento global, ao mesmo tempo sofre as conseqüências gerada por esse fenômeno (CORDEIRO et al., 2012).

De acordo com um estudo produzido no Brasil, pelo Observatório ABC (Agricultura de Baixo Carbono, 2015), a agropecuária brasileira tem potencial de

mitigação de GEE até o ano de 2023, dez vezes mais do que a meta estabelecida pelo Plano ABC do Ministério da Agricultura, podendo gerar acúmulo de 1,8 bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> no período de 2012 a 2023, ou seja, uma quantidade expressiva desse gás deixaria de ser emitida a atmosfera, considerando a recuperação de 15 milhões de hectares degradados até o ano de 2020.

O potencial do país em reduzir os GEE no setor agropecuário está baseado na adoção de práticas agrícolas recomendadas pelo plano ABC, tais como: recuperação de pastagens, ILP (Integração Lavoura-Pecuária), ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta), plantio direto na palha e FBN (Fixação Biológica de Nitrogênio).

O Brasil é globalmente importante para a segurança alimentar, pois é um dos maiores produtores e exportadores de culturas importantes, tais como açúcar e soja, entre outros. Essa posição de destaque agrícola mundial bem como o fato de que mais de 70% das emissões de CO<sub>2</sub> advém de práticas agrícolas inadequadas (CERRI et al., 2013), tem contribuído para posicionar o país como o 4º maior emissor mundial (IPCC, 2014).

Dentre as potencialidades agrícolas, o país é o maior produtor mundial da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) com 663 milhões de toneladas em 2015 em uma área cultivada de cerca de 9 milhões de hectare (FAOSTAT, 2014; CONAB, 2015).

Esses valores só não são maiores em razão da leve redução de área plantada no país, equivalendo a 0,6% em relação à safra anterior, como também da produtividade de cana-de-açúcar por hectare. As duas grandes regiões do país que concentram as maiores produções (Centro/Sul e Norte/Nordeste), são responsáveis por 94,7% da produção nacional, deste valor percentual, somente o Estado de São Paulo responde por 51,8%.

Acompanhando esse desenvolvimento vem a preocupação com os impactos nas emissões de CO<sub>2</sub> oriundos de atividades agrícolas de cultivo e manejo dos solos nos sistemas de produção desta cultura (LA SCALA et al., 2006; RAZAFIMBELO et al., 2006; GALDOS et al., 2009; FIGUEIREDO et al., 2010; PANOSSO et al., 2011; SILVA-OLAYA et al., 2013; BICALHO et al., 2014; IAMAGUTI et al., 2015).

Diversas medidas são propostas para conter o aumento da concentração de GEE na atmosfera, como exemplo: controle e redução de desmatamento, redução de

queimadas, substituição dos combustíveis fósseis por bicompostíveis e uso do sistema do plantio direto que potencializa o acúmulo de carbono no solo, conhecido como sequestro de carbono.

Estas ações são estratégicas no que diz respeito ao efeito mitigador das emissões de CO<sub>2</sub> especificamente quando se trata de solos, que são considerados grandes reservatórios naturais de carbono. Em uma escala global, solos de até 1 m de profundidade podem conter até 1500 GtC (gigatonelada de carbono) (BRUCE et al., 1999; MACHADO, 2005).

Estima-se que um incremento de 10% no acúmulo de carbono no solo, em escala global, anularia 30 anos de emissões de CO<sub>2</sub> de origem antropogênica (KIRSCHBAUM, 2000).

### **2.2.1 Atividades de reforma em áreas de cana-de-açúcar**

Dentre as atividades antropogênicas que manejam os solos e provocam a expulsão do CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera, encontram-se, a calagem e o preparo do solo, práticas comumente empregadas na agricultura, como por exemplo, durante as atividades de reforma dos canaviais.

A reforma dos canaviais geralmente é realizada a cada cinco anos, sendo um processo necessário após vários cortes consecutivos da cana-de-açúcar, os quais afetam o estado nutricional do solo com conseqüente decréscimo na produtividade da cultura (SOUZA et al., 2005). Estima-se que 722,3 mil hectares da área pertencente ao Estado de São Paulo foram reformados na safra 2013/14 (CANASAT, 2015).

Durante o período de reforma ocorrem perdas significativas de carbono (SILVA-OLAYA et al., 2013; IAMAGUTI et al., 2015) devido as atividades de preparo e aplicação de calagem no solo.

A calagem é utilizada para a correção da acidez do solo por meio da elevação do pH melhora a capacidade do solo em adsorver alguns nutrientes, além de promover aumento na disponibilidade de cálcio, fósforo, magnésio e matéria orgânica no solo (MOS) (BERNOUX et al., 2003). Com a aplicação de calcário aumenta-se a fração prontamente mineralizável da MOS com conseqüente aumento

da atividade microbiana e liberação de nutrientes pela sua decomposição (EKENLER; TABATABAI, 2003; PRIMAVESI, 2006).

Fuentes et al. (2006) observaram este efeito, no qual houve maior perda de C-CO<sub>2</sub> após a aplicação da calagem, pois um conjunto mais estável de MOS tornou-se disponível para a mineralização após a sua reação com o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>).

Silva et al. (2013), em estudos conduzidos em área sob conversão de citros para cana-de-açúcar, observaram que além do preparo e das precipitações ocorridas na área de estudo, a calagem foi outro fator controlador da emissão de CO<sub>2</sub> do solo. Segundo os autores houve uma emissão adicional de 42% (0,464 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>) em apenas 12 dias de estudo, de um total de 1,09 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> que teoricamente seriam emitidos dentro de um ano após a aplicação da calagem a uma taxa de 2,3 t ha<sup>-1</sup>.

Outros estudos também verificaram que a calagem foi a principal responsável pelo incremento na taxa de emissão CO<sub>2</sub> do solo para atmosfera (BERNOUX et al., 2003; CERRI et al., 2006; FUENTES et al., 2006; ALMARAZ et al., 2009; MARCELO et al., 2012).

O preparo do solo outro procedimento comum na agricultura convencional, também interfere significativamente no fluxo de CO<sub>2</sub>, uma vez que desempenha um papel fundamental na modificação da estrutura e cobertura do solo, afetando os processos bio-físico-químicos, tais como, umidade e temperatura do solo, e sistema de difusão dos gases, além de interferir na dinâmica atividade microbiana, por meio do aumento de C lábil decorrente da incorporação dos resíduos vegetais ao solo, associados a maior temperatura, umidade e aeração adequadas (SALTON; MIELNICZUK, 1995; SIX et al., 2006).

Assim, a intensidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo é influenciada pela interação destes processos (MANGALASSERY, et al., 2014; MACHADO, 2005), e observada em curtos períodos após as atividades de preparo do solo (REICOSKY et al., 1997; OMONODE et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2010; IAMAGUTI et al., 2015), isto porque, após curto período ocorre a redução das frações mais lábeis da matéria orgânica do solo e a atividade basal microbiana vai diminuindo gradualmente (SIX et al., 2006).

O efeito do preparo sobre o fluxo de CO<sub>2</sub> a longo prazo, advém das alterações ocorridas principalmente na estrutura do solo e como esta alteração influenciará os demais atributos (KESSAVALOU et al., 1998).

O solo fica mais suscetível ao processo de erosão após ser submetido a atividades de preparo, o que também contribui para maior perda de carbono (BERTOL et al., 2003). Em adição, acréscimos no fluxo de CO<sub>2</sub> são observados devido a incorporação dos resíduos vegetais ao solo, no momento do preparo (SILVA-OLAYA et al., 2013).

Tem sido relatado que até 3,5 Mg CO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup> pode ser liberado durante o preparo do solo, quando comparado a áreas de pastagens beneficiadas por permanecer por longos períodos sem preparo do solo (SILVA-OLAYA et al., 2013; MELLO et al., 2014).

## **2.3 Principais fatores ambientais controladores da emissão de CO<sub>2</sub> do solo**

### **2.3.1 Temperatura, umidade e aeração do solo**

A liberação do CO<sub>2</sub> do solo é governada principalmente pela condição de temperatura e umidade do solo e pelas atividades de preparo do solo. O preparo convencional produz elevada atividade microbiana, e esta, é regulada pela temperatura e umidade do solo.

A influência da interação do clima e alteração das propriedades do solo induzidas pelo preparo convencional produz elevada atividade microbiana, no curto período de tempo, proporcionando maior taxa respiratória e conseqüentemente maior liberação de CO<sub>2</sub> do solo. Estes processos são governados principalmente pelas condições de temperatura e umidade do solo (SÁ et al., 2001).

O solo após o preparo no sistema convencional apresenta pouca presença de resíduos de culturas anteriores, e ficam sujeitos a grandes variações térmicas diárias nas camadas superficiais, exceto quando este solo é umedecido, o que eleva sua capacidade térmica (MARTORANO et al., 2009; SIGNOR et al., 2014) e favorece atividade microbiana do solo.

Enquanto em sistemas cujo manejo proporciona maior cobertura residual na superfície do solo, a exemplo do plantio direto, esse comportamento é inverso, devido

uma barreira física (formada pela palhada da cultura) entre o solo e a atmosfera propiciando um microclima com condições mais estáveis de temperatura e auxiliando na manutenção da umidade do solo (USSIRI; LAL, 2009).

Assim, a temperatura do solo é um dos fatores mais importantes no processo de emissão de CO<sub>2</sub>, durante e entre os dias, pois seu incremento acelera a decomposição da matéria orgânica, a atividade microbiana e das raízes (SILVA-OLAYA et al., 2013).

Vários autores têm observado que maiores emissões de CO<sub>2</sub> correlacionam-se diretamente a elevações na temperatura do solo (FANG; MONCRIEFF, 1998; USSIRI, LAL, 2009; ACRECHE et al., 2013; KARHU et al., 2014). Tal relação é compreendida, uma vez que, a temperatura do solo apresenta variações diárias e sazonais, com marcada influência nos horizontes superficiais, ou seja, na região onde concentra-se a maior taxa de atividade microbiana (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; SIX et al., 2006).

A umidade do solo também é um dos fatores que regulam a respiração do solo, dentre os quais podemos citar também, o oxigênio do solo, a textura do solo, o pH e a interação destes fatores (LUO; ZHOU, 2006).

O conteúdo de umidade presente no solo é outro fator de suma importância quando da avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, a variável umidade do solo governa os processos de transporte (BALL; SMITH, 1991; KANG et al., 2003) e emissão de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera (SCHWARTZ et al., 2010), além do fato que, dependendo do conteúdo de umidade, tais processos podem ser tanto favorecidos quanto inibidos, 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).

As trocas gasosas entre o ar do solo e o atmosférico só podem se dar adequadamente em solos bem drenados, pois o caminho através do qual o CO<sub>2</sub> e o O<sub>2</sub> se movem é constituído por poros grandes e contínuos, que atingem a zona radicular (FREIRE, 2006). Ainda, solos que apresentam caracteristicamente maior percentual de macroporos, favorecem a respiração das raízes e de macro e microrganismos, pois permitem a entrada de ar no solo em maior quantidade (CAPECHE et al., 2004).

### 2.3.2 Precipitações

As condições climáticas, a exemplo das precipitações, são determinantes na intensidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, promovendo variações diárias nas taxas de emissão. Essas atuam diretamente sobre a temperatura e umidade do solo, fatores estes que controlam o processo de emissão, promovendo efeitos sobre a atividade microbiana e de raízes (TSAI et al., 1992; SIX et al., 2006).

Elevações rápidas na umidade do solo após as precipitações resultam num aumento dos fluxos de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, em decorrência da substituição do ar encontrado nos poros pela água, gerando um estímulo imediato da atividade dos microrganismos do solo em resposta à maior disponibilidade de água (SMART; PEÑUELAS, 2005).

Leon et al. (2014) em estudos conduzidos em solos com espécies vegetais arbustivas e limitação de água, observaram que as precipitações foram determinantes para o estabelecimento das relações entre a temperatura do solo e o fluxo de CO<sub>2</sub>, nos meses mais chuvosos estas variáveis eram correlacionadas positivamente. Em contrapartida nos meses de seca não eram observadas correlações significativas.

La Scala et al. (2001) avaliando a emissão de CO<sub>2</sub> após diferentes preparos do solo, verificaram a interferência da precipitação sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, onde os padrões das emissões foram alterados a curto prazo após a ocorrência de um período de chuvas.

Silva et al. (2013) também observaram que as precipitações ocorridas na área de estudo favoreceram correlações positivas da emissão de CO<sub>2</sub> com a temperatura do solo, e negativas, entre a emissão e a umidade do solo. Corroborando o estudo conduzido por Kim et al. (2010), que verificaram que o fluxo de CO<sub>2</sub> era mais intenso após precipitações, com posteriormente decaimento, até atingir valores similares no período antes dos eventos chuvosos. Ainda segundo os autores, as alterações no fluxo de CO<sub>2</sub> foram acentuadas com as precipitações, especificamente nas áreas em que práticas agrícolas de preparo do solo foram conduzidas.

Esse mesmo fenômeno foi observado por outros autores em estudos também conduzidos em área sob preparo do solo (SCHWARTZ et al., 2010; SILVA-OLAYA et al., 2103; IAMAGUTI et al., 2015), em áreas de cana-de-açúcar (PANOSSO et al.,

2009; SILVA et al., 2013; VARGAS et al., 2014; MOITINHO et al., 2015) e em áreas de floresta (DAVIDSON et al., 2000; SCHWENDENMANN et al., 2003; DILUSTRO et al., 2005; EPRON et al., 2006).

#### **2.4 Variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo**

A geoestatística proporciona analisar e efetuar a estimativa da dependência espacial dos pontos não amostrados e dos valores médios, precedidos pela estatística descritiva, e além disso possibilitam meios para que sejam efetuados mapeamentos, seja por meio da krigagem ou da cokrigagem, que por consequente permite identificar zonas específicas de manejo, fundamentais no trabalho agrícola, o que otimiza o georreferenciamento dos pontos não amostrados e amostrados em termos de qualidade física, química (MONTANARI et al., 2010; CORRÊA et al., 2015) e biológica do solo e sua correlação com o potencial produtivo do solo.

Os atributos do solo exibem grande variabilidade no espaço e tempo. Tal variabilidade é contínua ao longo das superfícies e dependente da escala (ZHAO et al., 2009), uma vez que, os atributos do solo resultam da combinação de diversas interações dos processos biológicos, químicos e físicos atuando em escalas múltiplas (PARKIN, 1993).

Ferramentas como a geoestatística têm sido utilizadas por propiciar a captura, representação e interpretação do padrão espacial das variáveis regionalizadas. Tais variáveis são conhecidas por apresentar uma componente estrutural, uma componente aleatória e um erro residual (BURROUGH, 1987).

Sendo assim o estudo da variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, fornece informações relevantes a respeito da sua distribuição espacial, ajudando a compreender a dinâmica do CO<sub>2</sub> entre o solo e a atmosfera (BRITO et al., 2009). Como também possibilita alternativas de manejo que visam minimizar o efeito da variabilidade e definir áreas específicas de manejo, buscando otimizar o sistema de produção das culturas e concretizar para agricultura eficiência, sustentabilidade e rentabilidade (SOUZA et al., 2004; TEIXEIRA et al., 2012).

Diversos autores, utilizaram de técnicas geoestatísticas para determinar as características espaciais da emissão de CO<sub>2</sub> em solos desprovidos de vegetação (LA

SCALA et al., 2000; HERBST et al. 2009; TEIXEIRA et al., 2011) e em áreas com vegetação (ROCHETTE et al. 1991; FANG; MONCRIEFF, 1998; XU; QI, 2001; PANOSSO et al., 2009; BRITO et al., 2010; KONDA et al., 2010).

Schwendenmann et al. (2003), investigando a variação espacial e temporal do fluxo de CO<sub>2</sub> em florestas, reportaram que o principal fator identificado para explicar as variações temporais no fluxo de CO<sub>2</sub> foi o conteúdo de água presente no solo. Os autores concluem que o fluxo diminuiu nos períodos em que o solo apresentava elevada umidade, provavelmente devido à menor difusão de gás e taxa de produção de CO<sub>2</sub>.

Herbst et al. (2009) utilizaram técnicas geoestatísticas para determinar características espaciais da emissão de CO<sub>2</sub> em solo desprovido de vegetação e também observaram relações entre as variabilidades da emissão de CO<sub>2</sub> e o conteúdo de água do solo.

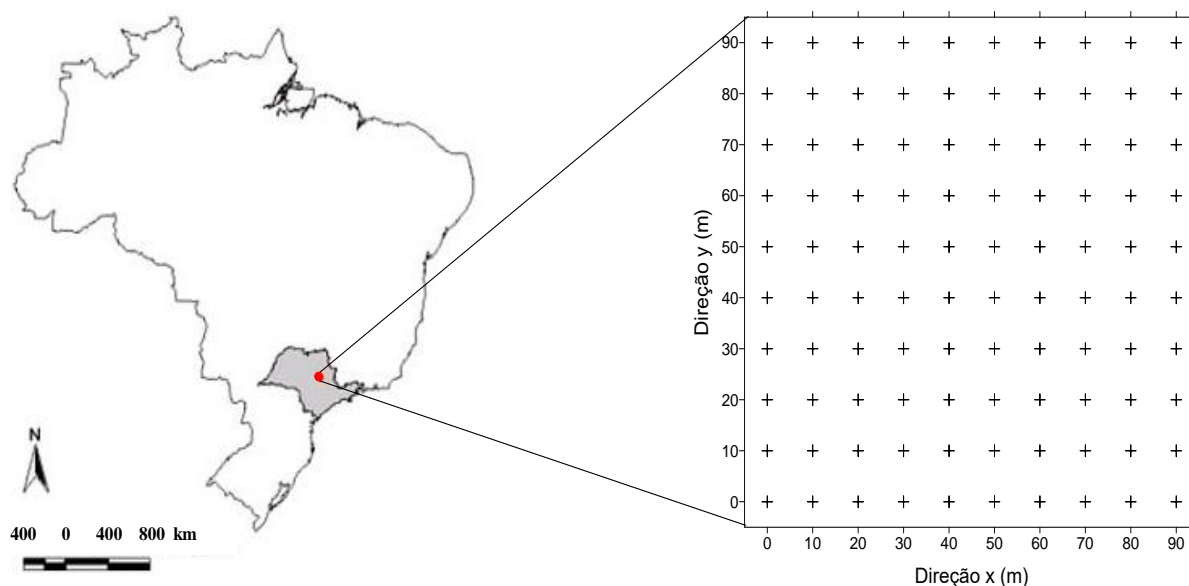
Fang e Moncrieff (1998) em estudos conduzidos em áreas de floresta, observaram que a variabilidade espacial do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo era explicada pelas variações da biomassa dos organismos vivos e mortos associados à porosidade total do solo (VTP).

Panosso et al. (2011) e Teixeira et al. (2012), em estudos desenvolvidos em áreas de cana-de-açúcar observaram que a porosidade livre de água (PLA) foi o atributo físico do solo que melhor explicou a variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Barrinha, Estado de São Paulo, em área destina a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) por mais de 35 anos, e nos últimos 8 anos o sistema de colheita é realizado de forma mecanizada sem a queima do canavial. As coordenadas centrais da área são Latitude 21° 13' S e Longitude 48° 07' O, com elevação média de 555 m acima do nível do mar (Figura 1).

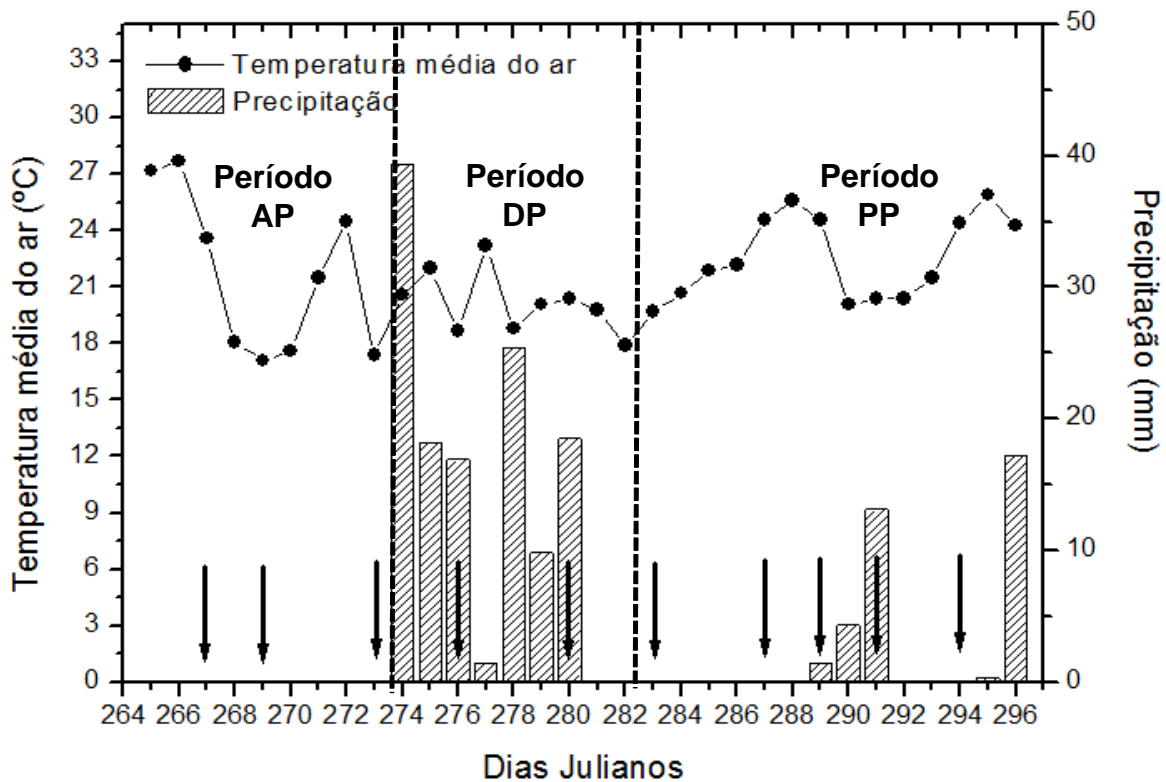


**Figura 1.** Localização da área de estudo e malha amostral.

De acordo com a classificação climática de Thornthwaite, o clima local é definido como Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica (B1rB'4a'). A temperatura média anual é de 28,9 °C e mínima de 16,8 °C. A precipitação média anual é de 1.560 mm, concentrada entre os meses de outubro e março.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (SANTOS et al., 2013), e relevo com declividades menor que 0,3%. A textura do solo é descrita na Tabela 1.

As informações sobre as precipitações encontraram-se na Figura 2 e foram extraídas de um banco de dados do acervo da Estação Meteorológica da Usina São Martinho, instalada próxima a área experimental onde este estudo foi conduzido.



**Figura 2.** Precipitação e temperatura média do ar ao longo do período de avaliação. As flechas indicam os dias, nos quais foram avaliadas: a emissão de CO<sub>2</sub>, a temperatura e a umidade do solo. Período anterior as precipitações (AP), durante as precipitações (DP) e posterior as precipitações mais intensas (PP).

Nos dias 274 e 275 ocorreram eventos de precipitações de maior volume de água no solo, totalizando acúmulo de 57,6 mm, anteriormente a avaliação do dia 276 (indicado pela flecha) e, ocorrendo após um período de 48 dias sem chuvas (Figura 2).

Cabe ressaltar que as avaliações dos dias 276 e 280 foram conduzidas no período matutino (8 às 10h50) e as precipitações ocorreram sempre no período vespertino ou noturno.

### 3.1.2 Atividades de reforma do canavial desenvolvidas na área

Previamente ao início do preparo do solo foi realizada a eliminação mecânica da soqueira de cana-de-açúcar. Esta operação foi realizada com um implemento constituído de enxadas rotativas, que em alta rotação, cortam o solo e a soqueira e os arremessam em alta velocidade contra a placa de impacto do implemento, havendo a quebra dos torrões de solo e a separação as raízes da soqueira do contato com o solo. Após a eliminação mecânica da soqueira foram realizados em sequência: calagem, gessagem e aração de grade niveladora.

Para a calagem, foi utilizado o calcário dolomítico com PRNT de 90%, a uma quantidade de 2,3 t ha<sup>-1</sup>. O gesso agrícola (CaSO<sub>4</sub>) foi aplicado a uma quantidade de 1,24 t ha<sup>-1</sup> e a passagem de grade niveladora ocorreu na profundidade de trabalho de 0,20 m.

A operação de preparo do solo constituiu-se na utilização de uma grade intermediária de arrasto de dupla ação deslocada, com 28 discos de 28" do tipo recortado, sendo 14 discos na seção dianteira e 14 na seção traseira. A largura de trabalho do implemento é de 3,5 m e a profundidade de trabalho de 0,25 m, sendo realizadas duas passadas com grade a uma velocidade média de aproximadamente 7 km h<sup>-1</sup>, a segunda imediatamente após a primeira de forma a simular o efeito da grade aradora.

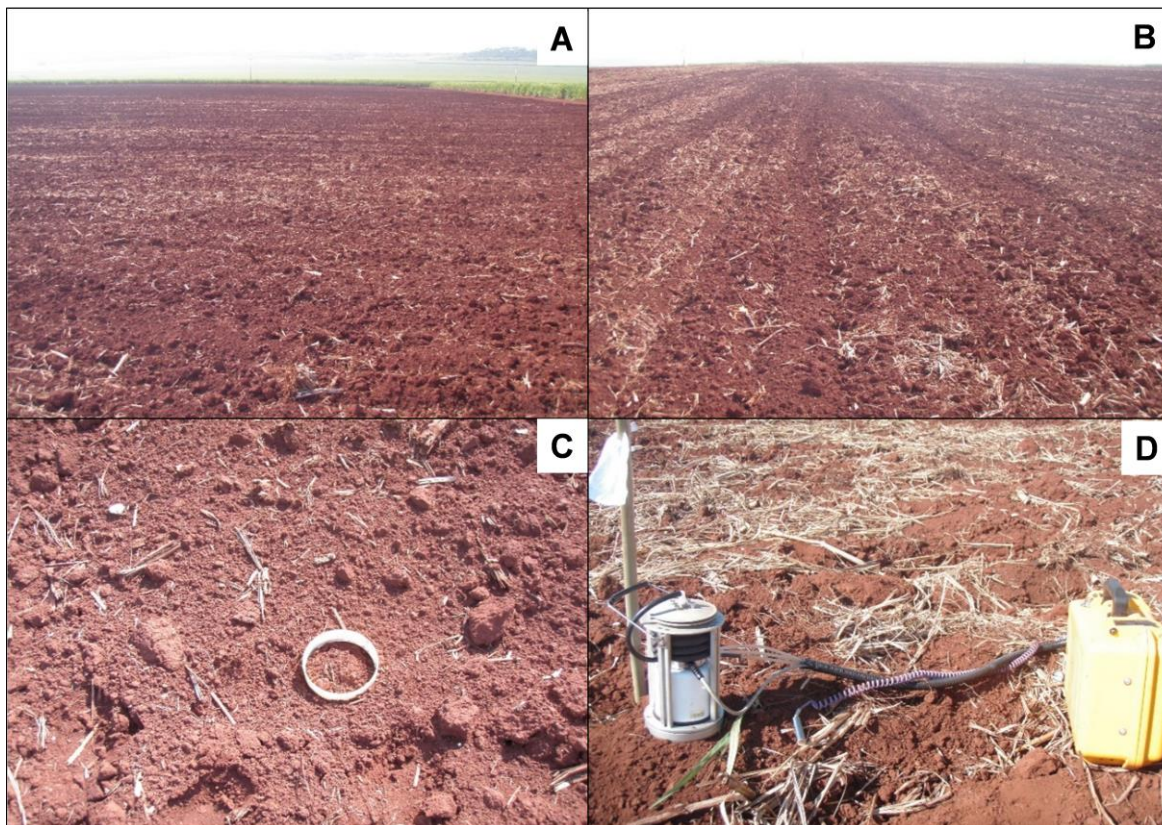
Após 25 dias do término dessas operações foi instalado um gradeado regular de 90 × 90 m contendo 100 pontos (Figura 1), com distância regulares entre os pontos amostrais de 10 m. Sob cada ponto do gradeado foram conduzidas as avaliações da FCO<sub>2</sub>, temperatura, umidade do solo.

### 3.2 Determinação da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo

Foram realizadas avaliações diárias da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>), temperatura (T<sub>solo</sub>) e umidade do solo (U<sub>solo</sub>), compreendidas num período de 28 dias (24; 26 e 30 de setembro de 2013 e 03; 07; 10; 14; 16; 18 e 21 de outubro de 2013).

Estas foram conduzidas durante o período das manhãs das 8 às 10h50. Utilizando-se da denominação do dia Juliano, as datas de avaliação correspondem aos dias: 267; 269; 273; 276; 280; 283; 287; 289; 291 e 294.

Para as avaliações da  $FCO_2$ , foi utilizado o sistema portátil LI-COR, modelo LI-8100A, que monitora por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho, as variações da concentração de  $CO_2$  no interior da câmara de solos. A câmara de solos é um sistema fechado com volume interno de 854,2  $cm^3$  e área de contato circular de 83,7  $cm^2$ , sendo acoplada sobre colares de PVC previamente inseridos em cada um dos pontos amostrais a uma profundidade de 3 cm. O fluxo de  $CO_2$  foi computado em cada ponto por um ajuste da concentração de  $CO_2$  do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após o seu fechamento. O modo de medida para a determinação da emissão de  $CO_2$  do solo levou 90 segundos em cada um dos pontos da malha amostral e a concentração de  $CO_2$  dentro da câmara foi determinada a cada 2,5 segundos.



**Figura 3.** Vista ampla da área em estudo (A); as linhas traçadas no solo indicam o sentido do cultivo (B); colar de PVC inserido no solo na área de reforma (C) e equipamento LICOR-8100A interligado a câmara de solos inserida sobre o colar de PVC.

A temperatura do solo foi monitorada por meio de um detector de temperatura que é parte integrante do sistema LI-8100A. Este consiste de uma haste de 0,0-0,20 m, inserida no solo de forma perpendicular em relação à superfície, a 0,05 m do local onde foram previamente instalados os colares de PVC pelo menos 24 horas antes da avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> do solo.

Da mesma forma, a umidade do solo foi registrada utilizando-se de um aparelho TDR – Time Domain Reflectometry (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália), constituído por uma sonda com duas hastes de 0,12 m, as quais foram inseridas no interior do solo, também a 0,05 m dos colares de PVC.

O valor da umidade do solo foi derivado a partir do tempo que uma corrente elétrica leva para percorrer a distância de 32 mm de uma haste a outra. As avaliações da  $T_{\text{solo}}$  e  $U_{\text{solo}}$  foram realizadas concomitantemente às avaliações da FCO<sub>2</sub>.

### **3.3 Determinação dos atributos físicos e químicos do solo**

Para fins de caracterização da área de estudo, ao final das avaliações da FCO<sub>2</sub>,  $T_{\text{solo}}$  e  $U_{\text{solo}}$  foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, em 10 pontos amostrais (Tabela 1), para a realização das análises químicas e físicas do solo.

Para a análise química, as amostras foram coletadas com um trado tipo holandês, sendo posteriormente secas, destorroadas e peneiradas (na peneira de 2 mm) para a determinação do teor de matéria orgânica do solo (MOS), disponibilidade de fósforo (P) e teores de K, Ca, Mg e H+Al (RAIJ, 2001), soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions do solo (CTC). Para transformar os valores de MOS em carbono orgânico total (COT), dividiu-se por 1,724. O estoque de carbono foi calculado empregando a metodologia proposta por Veldkamp (1994).

As análises granulométricas (areia, silte e argila), a densidade do solo (DS), o volume total de poros (VTP), os macroporos (Macro) e os microporos foram realizadas conforme a metodologia proposta pela Embrapa (1997).

A porosidade livre de água (PLA) foi calculada pela diferença entre porosidade total (VTP) e a fração da porosidade preenchida por água, equivalente a  $U_{\text{solo}}$  definida previamente, pela expressão  $PLA = VTP - U_{\text{solo}}$ .

**Tabela 1.** Caracterização dos atributos físicos e químicos do solo na área de reforma na profundidade de 0-0,20 m.

Atributos	Média	EPM	Atributos	Média	EPM
DS (g cm <sup>-3</sup> )	1,33	0,01	pH (CaCl <sub>2</sub> )	5,01	0,03
Macro (%)	11,08	0,48	P (mg dm <sup>-3</sup> )	28,13	3,21
Micro (%)	39,55	0,48	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,15	0,00
VTP (%)*	50,63	0,45	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,36	0,26
Argila (%)	61,58	0,48	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,21	0,06
Silte (%)	20,23	0,34	Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,19	0,03
Areia (%)	17,20	0,16	H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	49,33	1,22
COT (g dm <sup>-3</sup> )	18,66	0,34	SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,72	0,31
MOS (g dm <sup>-3</sup> )	32,17	0,34	CTC <sub>Total</sub> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,88	0,29
EstC (Mg ha <sup>-1</sup> )	45,08	0,59	V(%)	50,67	1,22

N = 10; \*N = 100; EPM = erro-padrão da média; DS = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; VTP = volume total de poros; PLA = porosidade livre de água; Argila = teor de argila; Silte = teor de silte; Areia = teor de areia total; COT = carbono orgânico total; MOS = matéria orgânica do solo; EstC = estoque de carbono do solo; pH = potencial hidrogeniônico; P = teor de fósforo disponível; K = teor de potássio trocável; Ca = teor de cálcio trocável; Mg = teor de magnésio trocável; Al = teor de alumínio; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica e V% = saturação por bases.

### 3.4 Análise dos dados

A variabilidade temporal dos dados foi classificada inicialmente por meio da estatística descritiva, calculando-se diariamente os valores de média, intervalo de confiança, desvio padrão, mínimo, máximo e coeficientes de variação.

A comparação das médias diárias da FCO<sub>2</sub>, T<sub>solo</sub>, U<sub>solo</sub> e PLA foi realizada, utilizando-se o intervalo de confiança de 95%, descrito por Gabriel (1978).

As análises de variância (ANOVA) e de correlação linear entre as variáveis foram realizadas com o auxílio do software SAS (SAS versão 9.1, SAS instituto, Cary, NC, EUA).

Posteriormente, a dependência espacial foi analisada por meio da geoestatística sob a pressuposição da hipótese intrínseca, na qual o semivariograma é estimado por:

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

em que, N(h) é o número de pares experimentais de observações Z(x<sub>i</sub>) e Z(x<sub>i+h</sub>) separados por uma distância h. O variograma experimental é representado pelo gráfico de  $\hat{\gamma}(h)$  versus h.

Aos semivariogramas experimentais, foram estimados os parâmetros de modelo teóricos permissíveis, ou seja (efeito pepita,  $C_0$ ; patamar,  $C_0 + C_1$ ; e alcance, a).

A razão entre o efeito pepita e o patamar ( $C_0 / (C_0 + C_1)$ ), expressa em porcentagem, foi utilizada para avaliar o grau de dependência espacial ou o grau de aleatoriedade espacial das variáveis estudadas, classificada como: forte ( $C_0 / (C_0 + C_1) \leq 0,25$ ), moderada ( $0,25 < (C_0 / (C_0 + C_1)) < 0,75$ ) ou fraca ( $C_0 / (C_0 + C_1) \geq 0,75$ ) (CAMBARDELLA et al., 1994). Os valores de alcance representam a distância máxima na qual há dependência espacial entre os valores de uma mesma variável.

A escolha do melhor modelo ajustado aos semivariogramas experimentais, para cada variável estuda, baseou-se na menor soma do quadrado do resíduo (SQR) e maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (WEBSTER; OLIVER, 2014).

Após a modelagem do variograma experimental, estimou-se os valores das variáveis nos locais não amostrados por meio da técnica de krigagem ordinária (KO):

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

em que,  $\hat{z}(x_0)$  é a estimativa de KO no ponto  $x_0$  não amostrado,  $z(x_i)$  são os valores vizinhos nos locais  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$  e  $\lambda_i$  são os pesos das observações associados aos valores vizinhos, os quais são calculados com base no modelo ajustado do variograma.

A modelagem do variograma e interpolação por meio da KO foi realizada utilizando o software GS+ 9.0 (Geostatistics for the Environmental Sciences versão 9.0, Gamma Design Software, Michigan, EUA). A construção dos mapas de padrões espaciais foi realizada pelo programa SURFER versão 9.11.947 (Golden Software Inc, Golden, CO, EUA).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O maior valor médio para a  $FCO_2$  ( $4,67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foi observado no dia 276 (Tabela 2 e Figura 4a), o mesmo ocorreu em relação à  $U_{\text{solo}}$  (31,75%) (Tabela 2 e Figura 4b). Contrariamente os menores valor médios foram observados para PLA (19,17%) (Figura 4d) e para a  $T_{\text{solo}}$  ( $20,90 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Tabela 2 e Figura 4c). Esses resultados expressivos observados para todas as variáveis neste dia possivelmente foram relacionados as precipitações ocorridas na área de estudo nos dias anteriores as avaliações: 274 (39,4 mm) e 275 (18,2 mm) (Figura 2). Cabe ressaltar que este acumulado de 57,6 mm (dias 274 e 275) ocorreu após um período de 48 dias sem chuvas.

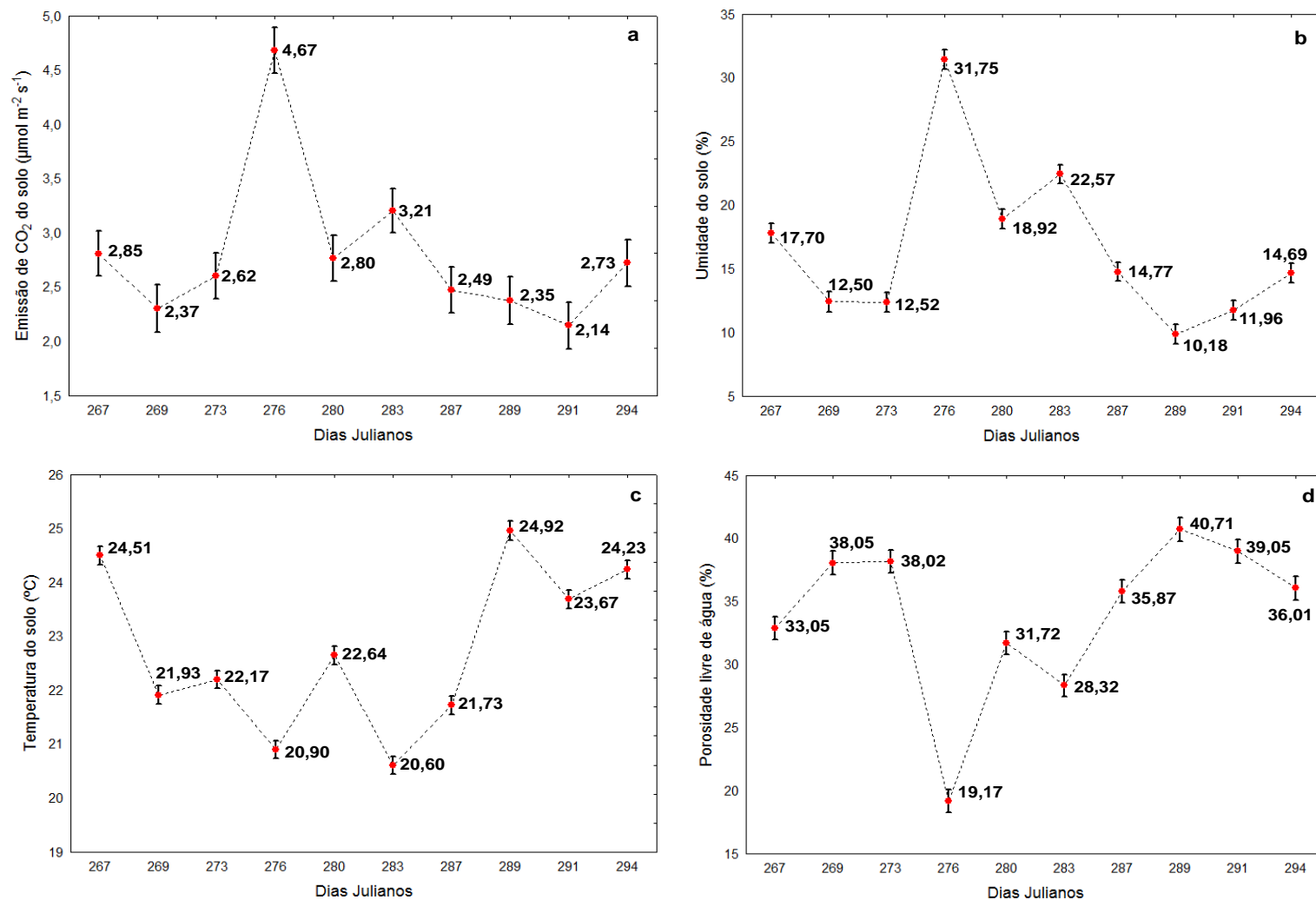
A variação nos valores médios da  $FCO_2$ ,  $U_{\text{solo}}$  e PLA pode ser dividida em três períodos, sendo estes, reflexo das precipitações na área de estudo (Figura 2). O primeiro período é caracterizado pela ausência de precipitações nos dias 267, 269 e 273. O segundo período é caracterizado pelas altas precipitações (274 a 280). O terceiro período é identificado quando terminam as precipitações mais intensas (281 a 294) e inicia-se o processo de transição do solo, inicialmente com os espaços porosos preenchidos com água para uma condição de maior aeração do solo, mais ainda úmido.

Em relação à  $FCO_2$  houve um incremento de 78% na emissão quando comparado o valor do dia 276 ao registrado anteriormente as chuvas no dia 273 ( $2,62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Ocorreram outros eventos pluviométricos entre os dias 276 a 280, sendo o maior deles no dia 278 (25,4 mm) (Figura 2). Contudo, diferentemente do observado no dia 276, a  $FCO_2$  registrada no dia 280 ( $2,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), ou seja, no intervalo que compreendeu os dias de precipitações, não diferiu dos valores médios observados nos dias anterior e posterior as chuvas, com exceção dos dias 283 e 291 (Figura 4a).

**Tabela 2.** Estatística descritiva para a emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura (T<sub>solo</sub>) e umidade do solo (U<sub>solo</sub>) na área de reforma do canavial ao longo de 10 dias de avaliações.

<b>Dia</b>	<b>Média</b>	<b>IC</b>	<b>DP</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Emissão de CO<sub>2</sub> do solo (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)</b>						
267	2,88	2,68 - 3,01	0,91	1,16	6,46	31,77
269	2,82	2,19 - 2,54	1,07	0,62	7,12	38,16
273	2,69	2,40 - 2,84	1,61	0,46	12,68	59,95
276	4,88	4,30 - 5,05	1,91	1,22	11,78	39,26
280	3,24	2,59 - 3,01	0,88	1,68	5,99	27,42
283	3,03	3,04 - 3,38	1,37	0,28	8,12	45,28
287	2,58	2,30 - 2,38	1,09	0,36	5,91	42,28
289	2,62	2,20 - 2,50	1,09	0,60	5,76	41,63
291	2,14	2,04 - 2,25	0,56	0,68	3,76	26,39
294	2,42	2,54 - 2,91	0,96	0,05	5,77	39,62
<b>Temperatura do solo (°C)</b>						
267	24,51	24,42 - 24,60	0,49	22,88	26,03	2,00
269	24,22	21,82 - 22,03	0,56	22,25	25,91	2,35
273	24,93	22,00 - 22,35	0,64	23,66	26,96	2,57
276	20,93	20,78 - 21,02	0,70	19,08	23,30	3,35
280	20,59	22,51 - 22,77	1,63	17,82	23,95	7,92
283	21,73	20,27 - 20,91	0,78	20,09	22,99	3,59
287	22,70	21,58 - 21,89	0,76	20,87	24,82	3,37
289	22,23	24,80 - 25,04	0,98	19,73	25,20	4,41
291	23,63	23,51 - 23,83	1,06	20,00	28,50	4,52
294	21,90	24,13 - 24,32	0,65	19,68	23,89	2,97
<b>Umidade do solo (%)</b>						
267	17,70	17,00 - 18,40	3,51	8,00	25,00	19,87
269	14,93	12,01 - 13,00	4,13	6,00	27,00	27,66
273	10,37	11,98 - 13,05	2,75	6,00	20,00	26,60
276	32,22	30,70 - 32,80	6,10	20,00	46,00	18,96
280	22,57	18,04 - 19,80	4,45	13,00	32,00	19,73
283	20,02	21,69 - 23,45	4,96	10,00	30,00	24,79
287	14,77	13,95 - 15,60	4,15	7,00	25,00	28,15
289	12,59	9,70 - 10,68	2,77	6,00	20,00	22,01
291	12,09	11,40 - 12,52	3,09	6,00	25,00	25,60
294	12,57	13,93 - 15,46	2,52	7,00	19,00	20,11
<b>Porosidade Livre de Água (%)</b>						
267	32,93	32,17 - 33,93	5,45	17,13	52,97	16,56
269	38,06	37,34 - 38,78	5,35	19,13	55,80	14,06
273	38,04	37,33 - 38,72	5,05	17,13	56,55	13,28
276	19,37	18,02 - 20,31	6,47	0,33	38,80	33,44
280	31,71	30,76 - 32,70	5,49	12,14	49,98	17,30
283	28,06	27,19 - 29,46	6,23	2,14	45,80	22,18
287	35,86	34,86 - 36,87	6,24	13,14	56,56	17,40
289	40,26	40,06 - 41,38	5,54	18,14	57,56	13,77
291	38,54	38,07 - 39,62	5,46	17,14	58,56	14,15
294	35,70	35,08 - 36,93	6,48	12,59	52,80	18,16

N = 100; IC = intervalo de confiança; DP = desvio-padrão; Mín. = valor mínimo observado; Máx. = valor máximo observado; CV = coeficiente de variação.



**Figura 4.** Valores médios de emissão de CO<sub>2</sub> (a), umidade (b), temperatura (c) e porosidade livre de água (d) ao longo dos dias avaliados e intervalo de 95% de confiança indicados pelas barras verticais, calculados para cada dia de avaliação.

Elevações no conteúdo de água no solo, com a ocorrência de eventos pluviométricos, favorecem a expulsão de quantidades significativas de CO<sub>2</sub> do interior do solo, devido à infiltração de água nos espaços porosos (VARELLA et al., 2004; SMART; PEÑUELAS, 2005). Além de gerar um estímulo imediato da atividade dos microrganismos do solo como resposta à maior disponibilidade de água (LINN; DORAN, 1984; SIX et al., 2006), principalmente após longo período de estiagem (SCHWENDENMANN et al., 2003; RETH et al., 2005).

No entanto após certo período a atividade microbiana do solo tende a normalizar-se e até mesmo diminuir com o solo ainda úmido (VARELLA et al., 2004). Este fato reportado pelos autores pode ajudar a compreender a queda no FCO<sub>2</sub> observada no dia 280 (Figura 4a).

Ainda, de acordo com Zanchi et al. (2003), esta queda brusca na FCO<sub>2</sub>, ocorre devido a uma camada de proteção que a água faz no solo, evitando assim a emissão de CO<sub>2</sub>. Os autores também discutem que a medida que a água vai se evaporando esta emissão vai ficando maior, pois os poros ficam livres e ocorre um reestabelecimento da atividade aeróbia microbiana.

De fato, no dia 283 compreendido no período posterior as chuvas, foi registrado o segundo maior valor médio da FCO<sub>2</sub> (3,21  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Este dia é bem representativo na identificação do processo de transição (terceiro período). Entende-se que a FCO<sub>2</sub> voltou a aumentar neste dia pois o conteúdo da U<sub>solo</sub> (22,57%) estava num intervalo que seu aumento favorece a atividade microbiana, no entanto, não limita a oxigenação do solo.

Observa-se que antes das precipitações os valores médios da FCO<sub>2</sub> variavam entre 2,37 a 2,85  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (dias 269 e 267, respectivamente), uma diferença de 0,48  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Para o período após as precipitações os valores variaram entre 2,14 a 3,21  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (dias 291 e 283, respectivamente) com diferença de 1,07  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Entretanto no período durante as precipitações, nos dias 276 e 280, os valores da FCO<sub>2</sub> variaram de 2,80 a 4,67  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  uma diferença de 1,87  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 4a).

A U<sub>solo</sub> apresentou comportamento similar à FCO<sub>2</sub>, as maiores médias foram observadas no intervalo que compreendeu o período de chuvas, nos dias: 276 (31,75%) e 280 (18,92%), e posterior às chuvas no dia 283 (22,57%) (Figura 4d).

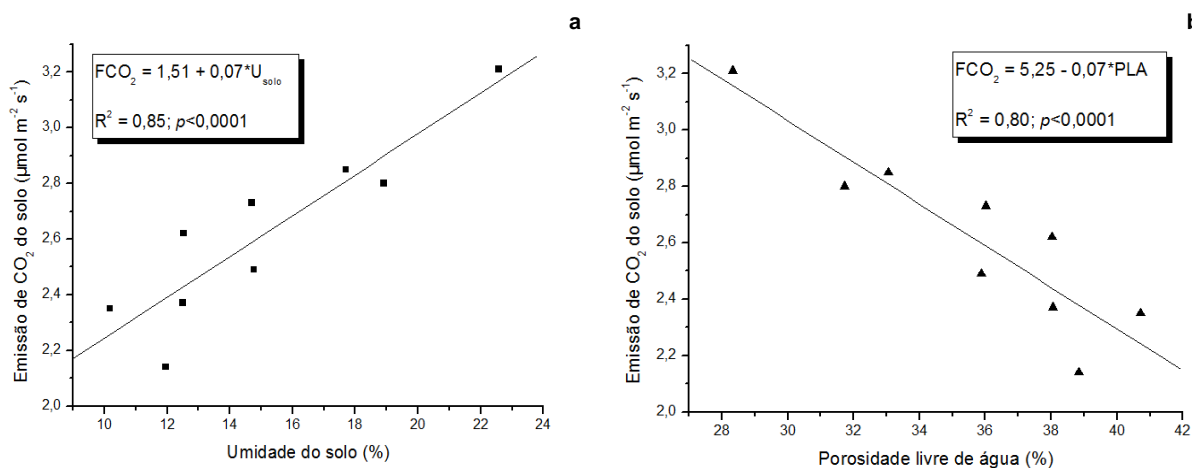
Consequentemente, os valores da PLA foram menores nestes dias: 276 (19,17%), 280 (31,72%) e 283 (28,32%) (Figura 4d).

A influência da chuva sobre a  $FCO_2$  e a  $U_{solo}$  é descrita em vários estudos (LA SCALA et al., 2006; SCHWARTZ et al., 2010; PANOSSO et al., 2011; SILVA et al., 2013; VARGAS et al., 2015; MOITINHO et al., 2015). Esses efeitos são decorrentes principalmente da interação do conteúdo de água e do espaço poroso do solo (ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ et al., 2008).

As precipitações também afetaram a variação temporal da  $T_{solo}$ , uma vez que,  $U_{solo}$  e  $T_{solo}$  se alteram simultaneamente (DING et al., 2010; IAMAGUTI et al., 2015). A  $T_{solo}$  apresentou comportamento inverso a  $U_{solo}$  neste período: dia 276 (20,90 °C); 280 (22,64 °C) e 283 (20,60 °C).

O efeito das precipitações sobre a  $T_{solo}$  também pode ser observado quando analisamos este atributo nos três períodos: antes das precipitações, a  $T_{solo}$  apresentou variação de 2,6 °C, observado pela diferença entre os dias de menor e maior valor médio, respectivamente, dia 269 (21,93 °C) e dia 267 (24,51 °C), durante as precipitações houve variação de 1,7 °C, dia 276 (20,90 °C) e dia 280 (22,64 °C), e no período posterior as precipitações a  $T_{solo}$  apresentou variação de 4,3 °C, dia 283 (20,60 °C) e dia 289 (24,92 °C).

Observando a Figura 4, nota-se similaridades nos padrões de variabilidade temporal da  $FCO_2$  (Figura 4a), da  $U_{solo}$  (Figura 4b) e da PLA (Figura 4d), indicando uma possível relação entre as variáveis. Para testar esta hipótese foi realizada a análise de correlação linear (Figura 5), na qual constatou-se que a  $FCO_2$  está associada à  $U_{solo}$  ( $R^2=0,85$ ;  $p<0,0001$ ) e a PLA ( $R^2=0,80$ ;  $p<0,0001$ ).



**Figura 5.** Regressão linear da emissão de CO<sub>2</sub>, com a umidade do solo (a) e porosidade livre de água (b) ao longo dos dias 10 dias avaliados.

As análises de regressão linear utilizando somente a  $U_{\text{solo}}$  e a PLA explicaram 85% e 80%, respectivamente, da variabilidade da  $FCO_2$ , indicando que ao longo do tempo, a emissão de CO<sub>2</sub> foi controlada pela variação do conteúdo de água e aeração do solo.

Por outro lado, não foram encontrados modelos lineares ou quadráticos significativos ( $p > 0,05$ ) entre a  $FCO_2$  e a  $T_{\text{solo}}$ , possivelmente devido à baixa variação de  $T_{\text{solo}}$  ao longo do experimento, conforme observado pelo coeficiente de variação (CV) variando de 2% (dia 267) a 8% (dia 283) (Tabela 2).

Assim, elevações no conteúdo da  $U_{\text{solo}}$  favoreceram aumentos na  $FCO_2$  (Figura 4a). Enquanto que, na ausência de umidade, quando os espaços porosos do solo estavam preenchidos somente por ar, ou seja, maior percentual da PLA, a  $FCO_2$  era inibida (Figura 4b).

As relações observadas entre a  $FCO_2$ , a  $U_{\text{solo}}$  e a PLA podem ser compreendidas, pelo fato que, o conteúdo de água presente no solo é um fator de suma importância quando da avaliação da  $FCO_2$ . A umidade do solo governa os processos de produção (EPRON et al., 2006; LAL, 2009; CARBONELL-BOJOLLO et al., 2012), transporte (BALL; SIMTH, 1991; KANG et al., 2000) e conseqüentemente, a emissão de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera (LINN; DORAN, 1984; SCHWARTZ et al., 2010). Dependendo do conteúdo da  $U_{\text{solo}}$  tais processos podem ser favorecidos ou inibidos, uma vez que afeta a atividade microbiana e a difusão de gases (LAL, 2001).

Cabe ressaltar que o solo da área de estudo encontrava-se com sua estrutura desagregada, devido ao efeito do preparo, fato este que pode ajudar a compreender as relações observadas.

Outro fator seria o predomínio da microporosidade do solo (Tabela 1) na área de estudo, uma vez que, em solos com maior proporção de microporos em relação aos macroporos, ocorre menor infiltração de água e trocas gasosas. Assim a microporosidade contribui para que o solo retenha maior quantidade de água e por mais tempo em sua superfície (FREIRE, 2006). Portanto, entende-se que a microbiota pode ter sido favorecida com este efeito propiciado por esta característica textural do solo em reter mais umidade, culminando nas elevações observadas na  $FCO_2$  e  $U_{solo}$  (Figura 4a e 4b) após eventos de precipitações, bem como as relações observadas na Figura 5a.

A razão pela qual a microbiota está sempre associada à  $FCO_2$  por meio das variações nos atributos:  $U_{solo}$ ,  $T_{solo}$  e PLA, vem do fato que, a emissão de  $CO_2$  em solos sem cobertura vegetal, a exemplo da área de estudo, é proveniente exclusivamente da atividade microbiológica, sendo esta regulada pelo estado nutricional, pH, condições adequadas de aeração, umidade e temperatura do solo (SIX et al., 2006).

Assim, as práticas de manejo convencional em áreas de reforma do canavial favorecem condições adequadas para a atividade dos microrganismos do solo, pois as atividades de preparo intensificam a taxa de degradação do carbono em virtude do rompimento dos agregados, e exposição do carbono que estava protegido no interior destes agregados, à ação microbiana (LAL, 2009; MARCELO et al., 2012; SILVA-OLAYA et al., 2013). Após as atividades de preparo do solo, aumenta-se a aeração do mesmo e, conseqüentemente a atividade aeróbia dos microrganismos do solo é intensificada (GESCH et al., 2007).

Além disso, as operações de calagem do solo durante a reforma favorecem certos atributos químicos, refletindo em seu estado nutricional, na camada mais arável e na subsuperfície. A exemplo da correção do pH do solo, que neste experimento encontrava-se na faixa ideal para o desenvolvimento dos fungos ( $pH \leq 5$ ) (Tabela 1), os principais decompositores da matéria orgânica do solo (TSAI et al., 1992; PRIMAVESI, 2006).

Valores de correlação positivos entre a  $FCO_2$  e a  $U_{solo}$  foram observados por diversos autores em estudos conduzidos sob diferentes condições edafoclimáticas (LA SCALA et al., 2006; PANOSSO et al., 2009; MORELL et al., 2010; CARBONELL-BOJOLLO et al., 2012; SILVA et al., 2013; VARGAS et al., 2014).

Além destas relações de interdependência da  $FCO_2$  com as condições edafoclimáticas locais, a dinâmica do  $CO_2$  entre o solo e a atmosfera apresenta variações significativas ao longo do tempo e espaço, mesmo em curtos períodos avaliados.

Na Tabela 2 observa-se a alta variabilidade da  $FCO_2$  por meio da amplitude entre os valores mínimos (Mín.) e máximos (Máx.), e do coeficiente de variação (CV). Para a  $FCO_2$  os valores foram considerados altos para todos os dias avaliados ( $CV > 24\%$ ).

Conforme observado neste estudo, valores elevados do CV para a  $FCO_2$  são comumente encontrados devido à alta variação desta, tanto em áreas de cultivo de cana-de-açúcar (PANOSSO et al., 2008, 2009; BRITO et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2012; BICALHO et al., 2014; MOITINHO et al., 2015), quanto em floresta (EPRON et al., 2004; TEDESCHI et al., 2006; OHASHI; GYOKUSEN, 2007).

Para a  $U_{solo}$  o CV variou de moderado ( $12\% < CV < 24\%$ ) a alto ( $CV > 24\%$ ), somente a  $T_{solo}$  apresentou baixa variabilidade ( $CV < 12\%$ ) e a PLA apresentou CV de moderado ( $12\% < CV < 24\%$ ) à alto ( $CV > 24\%$ ), conforme o critério de classificação proposto por Warrick e Nielsen (1980).

Nos casos em que os valores de CV são considerados de moderados à altos, justifica-se o uso da técnica de geoestatística, visando-se caracterizar os padrões de variabilidade espacial dos atributos estudados (PANOSSO et al., 2011).

Os modelos ajustados para descrever a variabilidade espacial da  $FCO_2$ ,  $T_{solo}$ ,  $U_{solo}$  e PLA foram esféricos e exponenciais, sendo o modelo esférico predominante (Tabela 3).

**Tabela 3.** Modelos e parâmetros estimados dos variogramas da emissão da CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>), temperatura do solo (T<sub>solo</sub>), umidade do solo (U<sub>solo</sub>) e porosidade livre de água (PLA) nos dias avaliados.

Dias	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	A (m)	SQR	R <sup>2</sup>	GDE (%)
<b>Emissão de CO<sub>2</sub> do solo (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)</b>							
267	Esf.	0,048	0,085	36,00	7,28E-05	0,77	56,17
269	Esf.	0,051	0,107	42,44	2,76E-04	0,77	48,04
273	Exp.	0,350	0,852	24,22	3,08E-03	0,88	41,11
276	Esf.	0,037	0,078	33,78	9,88E-05	0,77	47,58
280	Esf.	0,064	0,114	34,45	3,01E-04	0,67	56,59
283	EPP	0,059	0,059	-	-	-	-
287	Esf.	0,074	0,133	25,65	1,29E-04	0,68	55,59
289	Esf.	0,047	0,079	32,24	6,29E-04	0,67	59,25
291	Esf.	0,171	0,303	27,16	4,45E-04	0,79	56,57
294	Esf.	0,052	0,081	25,12	6,48E-05	0,69	64,18
<b>Temperatura do solo (°C)</b>							
267	Exp.	0,036	0,194	28,34	1,04E-04	0,96	18,83
269	Esf.	0,109	0,272	19,95	2,13E-04	0,95	40,14
273	Esf.	0,529	0,874	23,93	8,20E-03	0,71	60,57
276	Esf.	0,064	0,306	20,25	3,79E-04	0,95	20,88
280	Esf.	0,199	0,433	23,93	3,17E-04	0,94	46,16
283	EPP	2,715	2,715	-	-	-	-
287	Esf.	0,338	0,566	37,74	4,25E-04	0,98	59,82
289	Esf.	0,135	0,336	24,08	9,70E-04	0,88	40,30
291	Esf.	0,336	0,908	31,00	1,41E-03	0,98	37,00
294	Exp.	0,054	0,263	23,12	6,88E-04	0,84	20,79
<b>Umidade do solo (%)</b>							
267	Esf.	5,574	11,566	18,55	1,48	0,64	48,20
269	Esf.	3,859	5,981	31,66	0,323	0,70	64,51
273	Esf.	4,269	8,041	30,88	0,46	0,88	53,09
276	Exp.	4,987	24,07	24,6	9,83	0,73	20,72
280	Exp.	5,033	19,72	24,3	1,18	0,94	25,52
283	EPP	19,256	19,256	-	-	-	-
287	Esf.	7,819	15,339	23,73	0,921	0,72	50,97
289	Esf.	0,023	0,0568	35,72	4,22E-05	0,83	41,54
291	Esf.	4,069	8,429	24,90	0,713	0,83	48,27
294	Exp.	5,69	15,2	19,13	1,27	0,73	37,43
<b>Porosidade livre de água (%)</b>							
267	Esf.	12,99	29,52	50,31	7,57	0,93	44,01
269	Esf.	9,78	21,61	53,21	2,65	0,95	45,29
273	Esf.	7,72	17,71	30,55	1,57	0,93	43,58
276	Esf.	20,33	30,92	60,75	12	0,87	65,75
280	Esf.	16,84	23,39	33,64	5,85	0,75	72,02
283	Esf.	17,74	30,46	50,05	16,7	0,84	58,25
287	Esf.	18,45	27,36	57,11	12,1	0,79	67,43
289	Esf.	10,98	18,87	37,21	2,11	0,91	58,18
291	Esf.	10,89	19,42	41,22	0,55	0,98	56,09
294	Esf.	3,11	31,66	18,17	15,1	0,77	9,85

(N=100); GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>): Forte para valores menores que 25; Moderado para valores entre 25 e 75; e, Fraco para valores maiores que 75 (CAMBARDELLA et al., 1994). SQR: Soma de Quadrados do Resíduo; Exp= exponencial; Esf= esférico; EPP= efeito pepita puro; A= alcance (m).

Estes modelos representam fenômenos com desempenho linear próximo da origem, no entanto, os modelos exponenciais são mais bem ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala. Os modelos esféricos, por sua vez, são utilizados para descrição de propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). A maioria dos modelos ajustados apresentou altos valores de coeficiente de determinação, expressos pelos valores de  $R^2$ .

Com exceção da PLA, os demais atributos não apresentaram estrutura de variabilidade espacial (EPP) no dia 283.

Para a  $FCO_2$  o modelo esférico foi o mais ajustado (Tabela 3). A variabilidade espacial de  $FCO_2$  tem sido descrita por modelos esféricos (DASSELAAR et al., 1998; LA SCALA et al., 2000; ISHIZUKA et al., 2005; KOSUGI et al., 2007; HERBST et al., 2009; KONDA et al., 2010; BRITO et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2011) ou alternâncias entre modelos esféricos e exponenciais (LA SCALA et al., 2003; TEDESCHI et al., 2006; OHASHI; GYOKUSEN, 2007).

Para a  $FCO_2$ , os valores de alcance (A) variaram de 24,22 m (dia 273) a 42,44 m (dia 269) (Tabela 3). La Scala et al. (2000) avaliando a  $FCO_2$  em um gradeado de 100 x 100 m em solo desprovido de vegetação, obtiveram valores de alcance variando de 20,2 a 58,4 m. Teixeira et al. (2011), por sua vez, observaram em áreas com resíduos na superfície do solo, valores de alcance variando de 22,39 a 54,31 m em malha amostral de menor dimensão (60 x 60 m).

Alterações nos alcances dos modelos de variabilidade espacial de  $FCO_2$  têm sido observadas entre as estações do ano (OHASHI; GYOKUSEN, 2007), após eventos de precipitação (LA SCALA et al., 2000), e até mesmo de acordo com o tamanho da malha amostral (RAYMENT; JARVIS, 2000; KONDA et al., 2008).

A variação dos valores de alcance da  $FCO_2$  (24,22 a 42,44 m) foi semelhante à variação nos valores de alcance da  $U_{solo}$ , de 18,55 m (dia 267) a 35,72 m (dia 289).

Não foi observado valores de alcance semelhantes ao longo do período experimental entre a  $FCO_2$  (24,22 a 42,44 m) e a PLA (18,17 a 60,75 m).

Porém, ao analisar o alcance médio das variáveis percebeu-se semelhança no alcance da  $T_{solo}$  (25,81 m) e  $U_{solo}$  (25,94 m).

Teixeira et al. (2012) encontraram semelhança entre os alcances dos modelos de variograma ajustados da FCO<sub>2</sub> (25,39 e 27,02 m) e PLA (26,50 e 30,93 m) que possibilitou induzir maior correlação espacial entre elas. Ainda, os autores concluíram que a PLA foi a variável com maior influência espacial sobre a FCO<sub>2</sub>. No presente estudo não foi observado semelhança nos valores de alcances entre a FCO<sub>2</sub> e a PLA, entretanto, estas apresentaram forte associação ( $R^2=0,80$ ;  $p<0,0001$ ) quando analisadas na escala temporal (Figura 5b).

Para T<sub>solo</sub> os modelos de variabilidade espacial foram exponenciais para os dias 267 e 294 com alcances de 28,34 e 23,12 m, respectivamente. No dia 283, a T<sub>solo</sub> não apresentou EPP, enquanto para os demais dias ajustaram-se modelos esféricos.

A U<sub>solo</sub> apresentou transição de modelos observada nos três períodos: modelos esféricos antes das precipitações (267, 269 e 273), modelos exponenciais durante as precipitações (276 e 280 e 294) e modelos esféricos após as precipitações (287, 289 e 291). Esse padrão não foi observado em nenhum outro trabalho, e evidencia mais uma vez a influência das precipitações sobre os resultados observados no presente estudo.

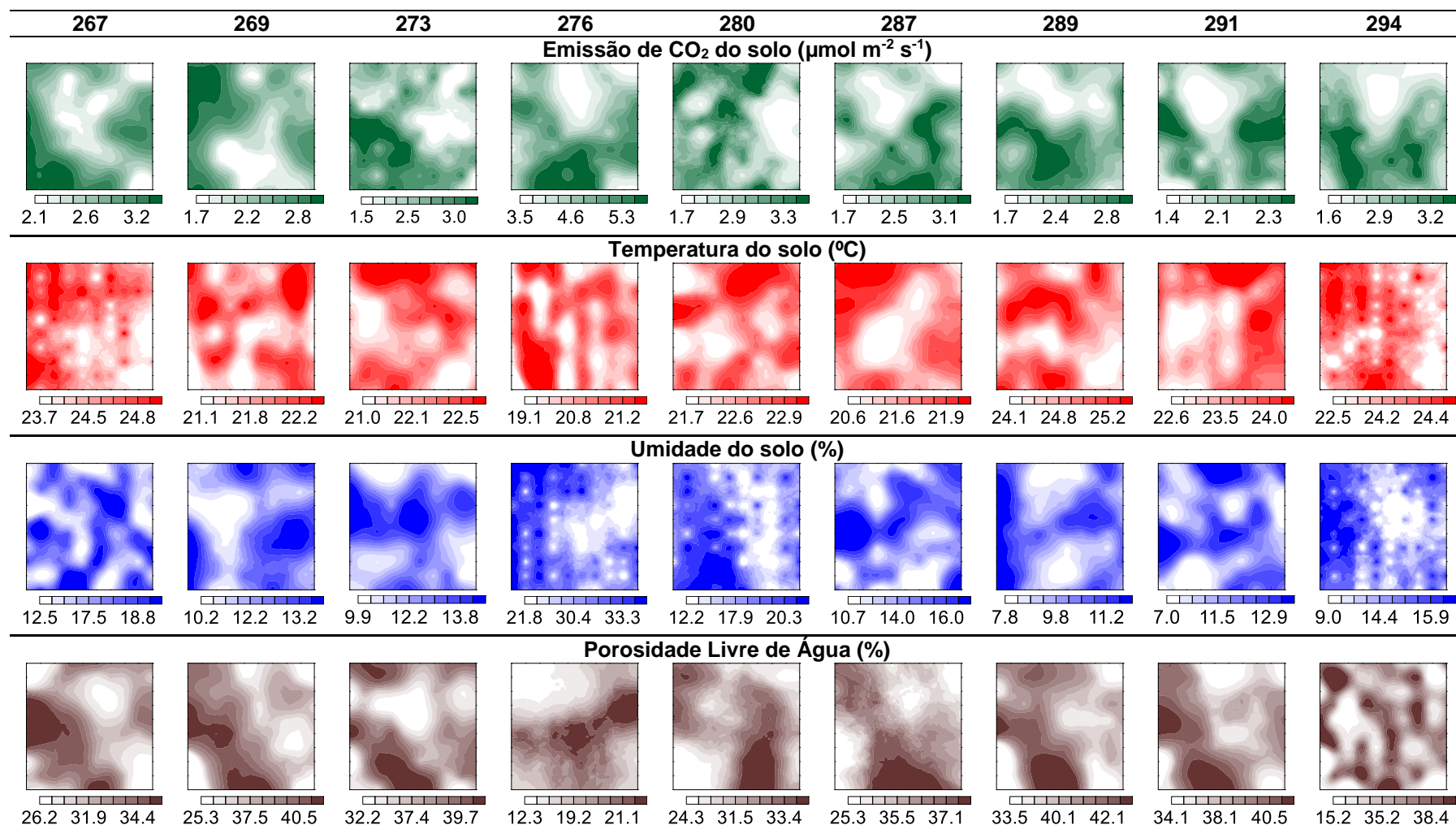
Vários autores observaram que o modelo esférico é o que melhor descreve a variabilidade da U<sub>solo</sub> (HERBST; DIEKKRÜGER, 2003; SOUZA et al., 2004; SIQUEIRA, 2006).

Somente para a PLA ajustou-se um modelo no dia 283, sendo o esférico para todos os dias avaliados.

O grau de dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo foi caracterizado segundo a classificação proposta por Cambardella et al. (1994). O GDE para a FCO<sub>2</sub> foi classificado como moderado em todos os dias avaliados. Para a T<sub>solo</sub> foi classificado como forte nos dias: 267, 276 e 294 e moderado nos demais. Já para o U<sub>solo</sub>, o GDE foi moderado para todos os dias avaliados, exceto o dia 276, o qual apresentou dependência espacial forte. Para a PLA o GDE foi classificado moderado, exceto no dia 294 (forte). Brito et al. (2010), Panosso et al. (2009) e Teixeira et al. (2012) também encontraram estruturas de moderada dependência espacial, para a FCO<sub>2</sub> em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar. Em contrapartida, Herbst et al. (2009), avaliando a FCO<sub>2</sub> em solo desprovido de vegetação determinaram estruturas com dependências variando de fraca a forte.

Os padrões espaciais (mapas) dos atributos do solo avaliados neste estudo são apresentados na Figura 6, na qual observou-se um comportamento aleatório para todos os atributos.

Para a  $FCO_2$  observou-se baixa persistência temporal no período anterior as precipitações (267 a 273), com valores mais elevados de emissão na porção esquerda dos mapas. Já para o período posterior as precipitações (287 a 294) observou-se maior persistência temporal, com valores mais elevados na parte inferior dos mapas e, menores valores na parte superior.



**Figura 6.** Mapas espaciais da emissão de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), temperatura (°C), umidade (%) e porosidade livre de água (%) nos dias avaliados.

Observou-se comportamento espaço-temporal aleatório para a  $T_{\text{solo}}$ . O mesmo foi observado em relação a  $U_{\text{solo}}$ , com exceção dos dias: 276, 280 e 294, que coincidem com o período durante as precipitações (276 e 280) e posterior as precipitações (294).

Em relação a PLA observou-se certa divisão em seu comportamento espaço-temporal também em função dos períodos, apresentando um padrão, no qual a aeração do solo é maior na parte esquerda dos mapas, visualizados nos períodos anterior (267 a 273) e posterior (287 a 291) as precipitações, e comportamento aleatório nos demais dias.

Em síntese, com exceção de alguns dias específicos, a partir dos mapas não foi possível a visualização de regiões características da área que indicassem um padrão de variabilidade espacial. Possivelmente o fato da amostragem ter sido conduzida em uma escala reduzida ( $90 \times 90$  m) pode ter colaborado para um comportamento aleatório das variáveis no tempo.

Outro fator a ser considerado diz respeito às características da área em estudo, que foi preparada para ter condições homogêneas tanto químicas quanto físicas do solo, além do fato de apresentar declividades menor que 0,3%, sendo considerada uma área totalmente plana.

O relevo é um fator importante quando da avaliação do comportamento espacial dos atributos do solo, interferindo de forma significativa principalmente nos atributos avaliados neste estudo (BRITO et al., 2009, 2010).

## 5 CONCLUSÕES

A variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade e a aeração do solo é afetada pelas precipitações na área de estudo, e pode ser dividida em três períodos: antes, durante e após as precipitações.

Valores mais elevados da emissão de CO<sub>2</sub> do solo são observados durante as precipitações e menores valores antes e pós-precipitações.

A aleatoriedade no padrão espacial dos atributos quando avaliados ao longo do tempo também é devida a homogeneidade das condições químicas e físicas do solo da área em estudo, assim como seu relevo plano, o que reforça a necessidade de estudos futuros em solos sob condições químicas e físicas mais heterogêneas, e topografia mais acentuada.

## 6 REFERÊNCIAS

ACRECHE, M. M.; PORTOCARRERO, R.; CHALCO VERA, J.; DANERT, C.; VALEIRO, A. H. Greenhouse gas emissions from green-harvested sugarcane with and without post-harvest burning in Tucumán. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 2, p. 195–199, 2014.

AL-KAYSSI, A. W. Spatial variability of soil temperature under greenhouse conditions. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 27, n. 3, p. 453–462, 2002.

ALMAGRO, M.; LÓPEZ, J.; QUEREJETA, J. I.; MARTÍNEZ-MENA, M. Temperature dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 3, p. 594–605, 2009.

ALMARAZ, J. J.; ZHOU, X.; MABOOD, F.; MADRAMOOTOO, C.; ROCHETTED, P.; MA, B. L.; SMITH, D. L. Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in Southwestern Quebec. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p.134–139, 2009.

BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; CARVALHO, M. C. S.; CERRI, C. C. CO<sub>2</sub> emissions from liming of agricultural soils in Brazil. **Global Biogeochem Cycles**, Hoboken, v. 17, n. 2, p. 1049–1052, 2003.

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.

BICALHO, E. S; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; MIRANDA, J. G. V.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability structure of soil CO<sub>2</sub> emission and soil attributes in a sugarcane area. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, n. 189, p. 206–215, 2014.

BRITO, L. F.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 19–27, 2010.

BRITO, L. F.; MARQUES JR. J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA, N. Soil CO<sub>2</sub> emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77–83, 2009.

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

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon, 1987. 193 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E.; Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1995.

CANASAT. Monitoramento da cana-de-açúcar via satélite. **Tabelas do Estado de São Paulo**. 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

CAPECHE, C. L.; MACEDO, J. R.; MELO, A. S.; ANJOS, L. H. C. **Parâmetros técnicos relacionados ao manejo e conservação do solo, água e vegetação perguntas e respostas**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2004. 16 p. (Comunicado Técnico).

CARBONELL-BOJOLLO, R. M.; REPULLO-RUIBÉRRIZ, M. A.; RODRÍGUEZ-LIZANA, A.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. Influence of soil and climate conditions on CO<sub>2</sub> emissions from agricultural Soils. **Water Air Soil Poll**, Dordrecht, v. 223, p. 3425–3435, 2012.

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.

CERRI, C. E. P.; GALDOS, M. V.; CARVALHO, J. L. N.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 361–368, 2013.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, segundo levantamento, 2015/2016. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília. Conab. Disponível em: < [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_09\\_11\\_10\\_51\\_14\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_2o\\_lev\\_-\\_15-16.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_11_10_51_14_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_15-16.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2015.

CORDEIRO, L. A. M.; ASSAD, E. D.; FRANCHINI, J. C.; SA, J. C. M.; LANDERS, J. N.; AMADO, T. J. C.; RODRIGUES, R. A. R.; ROLOFF, G.; BLEY JR, C.; ALMEIDA, H. G.; MOZZER, G. B.; BALBINO, L. C.; GALERANI, P. R.; EVANGELISTA, B. A.; PELLEGRINO, G. Q.; MENDES, T. A.; AMARAL, D. D.; RAMOS, E.; MELLO, I.; RALISCH, R. **O aquecimento global e a agricultura de baixa emissão de carbono**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012. 75 p.

CORRÊA, A. R.; MONTANARI, R.; LAURA, V. A.; MELOTTO, A. M.; SILVA, E. N. S. D.; PELLIN, D. M. P.; SANTOS, A. S. D. Aspects of the silvopastoral system correlated with properties of a typic quartzipsamment (entisol) in Mato Grosso do Sul, BRAZIL. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 438–447, 2015.

COSTA, F. S.; GOMES, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 693–700, 2006.

DASSELAAR, A. V. P. V.; CORRE, W. J.; PRIEME, A.; KLEMEDTSSON, A. K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON, L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 62, n. 3, p. 810–817, 1998.

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 and Soil**, Dordrecht, v. 281, n. 1–2, p. 339–351, 2006.

DING, W.; YU, H.; CAI, Z.; HAN, F.; XU, Z. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 3–4, p. 381–389, 2010.

EARTH SYSTEM RESEARCH – ESRL. **Recent monthly average Mauna Loa CO<sub>2</sub>**. 2016. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 26 jan. 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRI – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202, n. 1–3, p. 149–160, 2004.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 135–146, 1998.

FAOSTAT. **Food and agriculture organization of the united nations statistics division**. 2014. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R.; REICOSKY, D. C.; LA SCALA, N. Short-term CO<sub>2</sub>-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum* spp.) replanting in southern Brazil. **Global Change Biology**, Chichester, v. 7, n. 2, p. 316–327, 2014.

FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais**. Botucatu: FEPAF, 2006. 268 p.

GABRIEL, K. A. Simple method of multiple comparisons of means. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 73, n. 364, p. 724–729, 1978.

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 & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1–2, p. 156–166, 2007.

HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B. Modelling the spatial variability of soil moisture in micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 28, n. 6–7, p. 239–245, 2003.

HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J. A.; WEIHRMÜLLER, L.; VANDEBORGHT, J. Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 8, n. 3, p. 762–771, 2009.

IAMAGUTI, J. L.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D.; BICALHO, E. D. S.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. Preparo do solo e emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 497–504, 2015.

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.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – **IPCC. Climate Change 2013: Mitigation**. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva; 2014.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

ISHIZUKA, S.; ISWANDI, A.; NAKAJIMA, Y.; YONEMURA, S.; SUDO, S.; TSURUTA, H.; MURIYARSO, D. Spatial patterns of greenhouse gas emission in a tropical rainforest in Indonesia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 71, n. 1, p. 55–62, 2005.

KARHU, K.; AUFFRET, M. D.; DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; PROSSER, J. I.; SINGH, B. K.; SUBKE, J.; WOOKEY, P. A.; ÅGREN, G. I.; SEBASTIA, M.; GOURIVEAU, F.; BERGKVIST, G.; MEIR, P.; NOTTINGHAM, A. T.; SALINAS, N.; HARTLEY, I. P. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature**, London, v. 513, p. 81–84, 2014.

KESSAVALOU, A.; DORAN, J. W.; MOSIER, A. R.; DRIJBER, R. A. Greenhouse gas fluxes following tillage and wetting in a wheatfallow cropping system. **Journal of Environmental Quality**, Madison, 27, n. 5, p. 1105–1116, 1998.

KIM, D. G.; MU, S.; KANG, S.; LEE, D. Factors controlling soil CO<sub>2</sub> effluxes and the effects of rewetting in adjacent deciduous, coniferous, and mixed forests in Korea. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 42, n. 4, p. 576–585, 2010.

KIRSCHBAUM, M. U. F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? **Biogeochemistry**, Dordrecht, n. 48, n. 1, p. 21–51, 2000.

KONDA, R.; OHTA, S.; ISHIZUKA, S.; ARIA, S.; ANSORI, S.; TANAKA, N.; HARDJONO, A. Spatial structures of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> fluxes from Acacia mangium plantation soils during a relatively dry season in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, n. 12, p. 3021–3030, 2008.

KONDA, R.; OHTA, S.; ISHIZUKA, S.; HERIYANTO, J.; WICAKSONO, A. Seasonal changes in the spatial structures of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> fluxes from Acacia mangium plantation soils in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, n. 42, n. 9, p. 1512–1522, 2010.

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; LTOH, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSUO, N.; TAKANASHI, S.; OHKUBO, S.; NIK, A. R. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 147, n. 1–2, p. 35–47, 2007.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO<sub>2</sub> 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, N.; FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. On the mitigation potential associated with atmospheric CO<sub>2</sub> sequestration and soil carbon accumulation in major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, p. 775–785, 2012.

LA SCALA, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459–1462, 2000.

LA SCALA, N.; PEREIRA, G. T.; PANOSSO, A. R. Variabilidade espacial e temporal da emissão de CO<sub>2</sub> num agrossistema desprovido de vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 88–95, 2003.

LAL R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 71, p. 145–191, 2001.

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

LAMB, A.; GREEN, R.; BATEMAN, I.; BROADMEADOW, M.; BRUCE, T.; BURNEY, J.; GOULDING, K. The potential for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture. **Nature Climate Change**, London, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/doi:10.1038/nclimate2910>>.

LEVITUS, S.; ANTONOV, J. I.; WANG, J.; DELWORTH, T. L.; DIXON, K. W.; BROCCOLI, A. J. Anthropogenic warming of Earth's climate system. **Science**, Washington, v. 292, n. 5515, p. 267–270, 2001.

LEON, E.; VARGAS, R.; BULLOCK, S.; LOPEZ, E.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. Hot spots, hot moments, and spatio-temporal controls on soil CO<sub>2</sub> efflux in a water-limited ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 77, p. 12–21, 2014.

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.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005.

MANGALASSERY, S.; SJÖGERSTEN, S.; SPARKES, D. L.; STURROCK, C. J.; CRAIGON, J.; MOONEY, S. J. O. What extent can tillage lead to a reduction in greenhouse gas emissions from temperate soils? **Scientific Reports**, London, v. 4, n. 4586, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep04586>>.

MARCELO, A. V.; CORA, J. E.; LA SCALA, N. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 45–50, 2012.

MARTORANO, L. G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; FARIA, R. D.; MIELNICZUK, J.; COMIRAN, F. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 397–405, 2009.

MELLO, F. F.; CERRI, C. E.; DAVIES, C. A.; HOLBROOK, N. M.; PAUSTIAN, K.; MAIA, S. M.; CERRI, C. C. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, London, v. 4, n. 7, p. 605–609, 2014.

MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1720–1728, 2013.

MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; FERRAUDO, A. S.; LA SCALA, N. On the spatial and temporal dependence of CO<sub>2</sub> emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 127–132, 2015.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1811–1822, 2010.

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

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **NASA, NOAA Analyses Reveal Record-Shattering Global Warm Temperatures in 2015**. 2015. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

OHASHI, M.; GYOKUSEN, K. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 39, n. 5, p. 1130–1138, 2007

OLIVER, M. A.; WEBSTER, A. R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Amsterdam, v. 113, p. 56–69, 2014.

ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R.; CARBONELL BOJOLLO, R.; GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, P.; PEREA TORRES, F. Influencia de la climatología y el manejo del suelo em las emisiones de CO<sub>2</sub> em um suelo arcilloso de la veja Carmona. **Revista de Estudios Locales**, Carmona, v. 6, p. 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 CO<sub>2</sub> 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.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> 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.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR, J.; LA SCALA, N. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 227–236, 2008.

PBMC. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** – Sumário Executivo GT1. PBMC. 2013. Disponível em: <[http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/documentos-publicos/item/base-cientifica-das-mudancas-climaticas-volume-1-completo?category\\_id=7](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/documentos-publicos/item/base-cientifica-das-mudancas-climaticas-volume-1-completo?category_id=7)>. Acesso em: 30 mar. 2016.

PERON, D.; BOSC, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565–574, 2006.

PIVETTA, M. **Extremos do clima**. Revista Pesquisa FAPESP (*on line*). São Paulo, v. 16, n. 21, ago. 2013. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2013/08/13/extremos-do-clima/>>. Acesso em: 28 abr. 2015.

POWLSON, D. S.; STIRLING, C. M.; JAT, M. L.; GERARD, B. G.; PALM, C. A.; SANCHEZ, P. A.; CASSMAN, K. G. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. **Nature Climate Change**, London, v. 4, n. 8, p. 678–683, 2014.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 18 ed. São Paulo: Nobel; 2006. 549 p.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo; 2001. 285 p.

RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO<sub>2</sub> efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 35–45, 2000.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-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 Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1–4, p. 285–289, 2006.

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 CO<sub>2</sub> 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.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V. B.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1486–1499, 2001.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 313–319, 1995.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 306 p.

SCHWARTZ, R. C.; BAUMHARDT, R. L.; EVETT, S. R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 2, p. 221–229, 2010.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111–128, 2003.

SCHLÖMER, S.; FURCHE, M.; DUMKE, I.; POGGENBURG, J.; BAHR, C.; SEEGER, S.; VIDAL, A.; FABER, E. A review of continuous soil gas monitoring related to CCS – technical advances and lessons learned. **Applied Geochemistry**, London, v. 30, 148–160, 2013.

SIGNOR, D.; PISSIONI, L.; LORENTZ, M.; CERRI, C. E. PELLEGRINO. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 113–122, 2014.

SILVA, E. F.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO<sub>2</sub> emission associated with liming in area of conversion of orange for sugar cane. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, 885–898, 2013.

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

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônômico, Campinas, 2006.

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 CO<sub>2</sub> emissions from planted soil subject to elevated CO<sub>2</sub> and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 247–257, 2005.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 937–944, 2004.

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.

STEPNIEWSKI, W. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994, p.167–189.

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. **American Philosophical Society. Proceedings**, Philadelphia, v. 14, p. 55–61, 1950.

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. **Global Change Biology**, Chichester, v. 12, n. 1, p. 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 CO<sub>2</sub> emissions and related properties. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1466–1475, 2012.

TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO<sub>2</sub> emission estimated by different interpolation techniques. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 345, n. 1, p. 187–194, 2011.

TEIXEIRA, L. G.; LOPES, A.; LA SCALA, N. Temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 224–231, 2010.

TSAI, S. M.; BARAIBAR, A. V. L.; ROMANI, V. L. M. Efeitos de fatores físicos e químicos sobre os microrganismos do solo umidade e aeração. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992, p. 60–89.

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.

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 CO<sub>2</sub>, CO, NO and N<sub>2</sub>O an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications**, Hoboken, v. 14, n. 4, 221–231, 2004.

VARGAS, V. P.; CANTARELLA, H.; MARTINS, A. A.; SOARES, J. R.; CARMO, J. B.; ANDRADE, C. A. Sugarcane crop residue increases N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions under high soil moisture conditions. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 2, p. 174–179, 2014.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994.

WANG, J.; LIU, Q. Q.; CHEN, R. R.; LIU, W. Z.; SAINJU, U. M. Soil carbon dioxide emissions in response to precipitation frequency in the Loess Plateau, China. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 96, p. 288–295, 2015.

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.

XIE, S. P.; DESER, C.; VECCHI, G. A.; COLLINS, M.; DELWORTH, T, L.; HALL, A.; WATANABE, M. Towards predictive understanding of regional climate change. **Nature Climate Change**, London, v. 5, p. 921–930, 2015.