

VÁGNA DA COSTA PEREIRA

**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

P436e  
2018  
Pereira, Vágna da Costa, 1989-  
Efluxo de CO<sub>2</sub> em diferentes sistemas de cultivo / Vágna da  
Costa Pereira. – Viçosa, MG, 2018.  
xiii, 50 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Solos - Respiração. 2. Solo - Uso. 3. Mudanças  
climáticas. 4. Cerrados. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

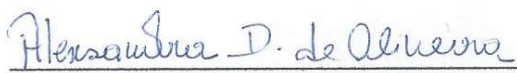
CDD 22. ed. 631.43

VÁGNA DA COSTA PEREIRA

**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO**

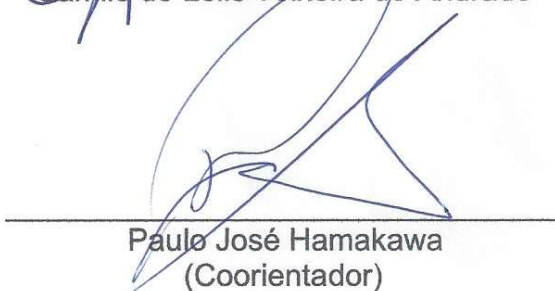
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

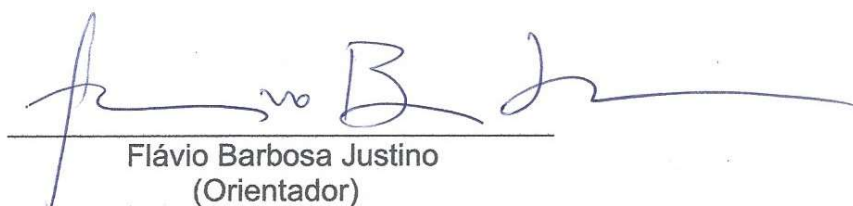
APROVADA: 28 de fevereiro de 2018.

  
Alexsandra Duarte de Oliveira

  
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

  
Miguel Marques Gontijo Neto  
(Coorientador)

  
Paulo José Hamakawa  
(Coorientador)

  
Flávio Barbosa Justino  
(Orientador)

*Dedico,*

*Aos meus pais.*

*Cicero Joaquim da Costa Neto e Francisca Maria da Costa,  
pelos ensinamentos, carinho e por todo amor doado durante toda a minha vida.*

*Ao meu irmão,*

*Vagner da Costa Pereira,*

*pela amizade, estímulo e por sempre acreditar em meus sonhos e no meu potencial.*

*A minha Vó,*

*Sebastiana Pereira (in memoriam),*

*por todo amor, carinho, dedicação e ensinamentos.*

*Ao meu querido Padrinho,*

*José Batista dos Santos (in memoriam),*

*pelos ensinamentos, carinho e por ter atuado como um pai em minha vida.*

*Aos meus amigos,*

*pela amizade, torcida e alegrias compartilhadas ao longo desses anos.*

*“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem ou que seus planos nunca vão dar certo, ou que você nunca vai ser alguém... Quem acredita sempre alcança...” (Renato Russo)*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida que me concedeu, pela saúde, sabedoria e pela maravilhosa família.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola pela oportunidade e crescimento profissional.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Flávio Barbosa Justino pela orientação, ensinamentos, amizade e confiança depositada.

Aos meus coorientadores Dr. Miguel Marques Gontijo Neto, Dr. Paulo José Hamakawa e Dr. Luiz Fernando de Carvalho Leite pela oportunidade, coorientação, profissionalismo, ensinamentos, confiança e empenho na realização deste trabalho.

Aos meus ex-orientadores Dr. José Espínola Sobrinho e Dra. Alexandra Duarte de Oliveira por todos os ensinamentos, pela força, oportunidades e amizade desde a minha graduação que me serviram como base para seguir esta trajetória acadêmica.

À Embrapa Milho e Sorgo pela infraestrutura de pesquisa e compartilhamento de dados durante a realização do experimento.

Aos colaboradores e técnicos da Embrapa Milho e Sorgo Dilherme Lucio De Oliveira e Sérgio Teixeira Guimaraes pelo auxílio na execução do presente trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade do curso e excelente estrutura de ensino e pesquisa.

Aos pesquisadores do Instituto Internacional para Análise de Sistemas Aplicados – IIASA, pela oportunidade, acolhimento e ensinamentos durante o estágio de Doutorado Sanduíche no exterior.

À CAPES, pela bolsa, e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro por meio do projeto APQ-02669/16.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para o meu crescimento pessoal e profissional, sempre dando força e estímulo para seguir em frente durante a minha trajetória acadêmica, deixo aqui os meus sinceros agradecimentos.

Muito Obrigada!

## **BIOGRAFIA**

VÁGNA DA COSTA PEREIRA, filha de Francisca Maria da Costa e Cicero Joaquim da Costa Neto, nasceu em 23 de março de 1989, na cidade de Jardim de Piranhas, Rio Grande do Norte.

Em Março de 2008 iniciou o curso de Agronomia, pela Universidade Federal Rural do Semiárido, localizada na cidade de Mossoró no Rio Grande do Norte. Durante quatro anos, participou de atividades de iniciação científica e projetos de pesquisa na qualidade de bolsista, na área de agrometeorologia. Graduou-se no segundo semestre de 2012.

Em Novembro de 2012, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em nível de mestrado, submetendo-se à defesa de tese em Fevereiro de 2014.

Em Março de 2014, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da UFV, com período de doutorado sanduíche no Instituto Internacional para Sistemas Aplicados em Laxenburg, Áustria, submetendo-se à defesa de tese em 28 de Fevereiro de 2018.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	ix
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xii
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	6
<b>CAPÍTULO I</b> .....	11
<b>EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA</b> .....	11
<b>1.1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	14
1.2.1 Área Experimental e Condições Meteorológicas .....	14
1.2.2 Tratamentos, Manejo Agrônomo e Delineamento Estatístico .....	15
1.2.3 Medições do Efluxo de CO <sub>2</sub> , Temperatura e Umidade do solo .....	17
1.2.4 Amostragem e análise de solo .....	18
1.2.5 Análises estatísticas .....	19
<b>1.3 RESULTADOS</b> .....	20
1.3.1 Efluxo de CO <sub>2</sub> do solo diário e variáveis climáticas .....	20
1.3.2 Impactos da mudança do uso do solo e da rotação de culturas no efluxo de CO <sub>2</sub> e propriedades do solo .....	25
<b>1.4 DISCUSSÃO</b> .....	31
1.4.1 Efluxo de CO <sub>2</sub> do solo em diferentes sistemas de cultivos .....	31
1.4.2 Fatores bióticos que controlam o FCO <sub>2</sub> do solo.....	34
<b>1.5 CONCLUSÃO</b> .....	36
<b>1.6 AGRADECIMENTOS</b> .....	36
<b>1.7 REFERÊNCIAS</b> .....	37
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	50



## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

**Fig. 1** – Média diária da temperatura e precipitação diária durante o período de Novembro 2015 à Outubro de 2016 (17/11/2015–27/10/2016). O acumulado de precipitação e número de dias chuvosos durante a estação chuvosa foram os seguintes: 808,80 mm e 102 dias com chuva.

**Fig. 2** – Representação esquemática dos sistemas de produção agrícola em monocultura, consórcios, rotações e cerrado nativo durante a safra agrícola 2015/2016.

**Fig. 3** – Sistema de medição do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo sob sistema de plantio direto por sensor de infravermelho (IRGA), durante a safra agrícola 2015/2016, Sete Lagoas, MG, Brasil.

**Fig. 4** – Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em sistemas de monoculturas, consórcio, rotações e vegetação nativa. Pontos são Média  $\pm$  s.e. **(a)** [Milho (n = 42), Santa Fé (n = 42), Soja (n = 42), Piatã (n = 42) e Cerrado (n = 42)], **(b)** [S/SF (n = 39), SF/S (n = 39), P/SF (n = 39), SF/P (n = 39) e Cerrado (n = 42)], durante a estação de crescimento e após a colheita de Novembro 2015 a Outubro 2016.

**Fig. 5** – Espaço poroso saturado por água (EPSA) e Temperatura do Solo (T<sub>solo</sub>) em sistemas de monoculturas, consórcio, rotações e vegetação nativa. Pontos são Média  $\pm$  s.e. **(a)** [Milho (n = 42), Santa Fé (n = 42), Soja (n = 42), Piatã (n = 42) e Cerrado (n = 42)], **(b)** [S/SF (n = 39), SF/S (n = 39), P/SF (n = 39), SF/P (n = 39) e Cerrado (n = 42)], durante a estação de crescimento e após a colheita de Novembro 2015 a Outubro 2016.

**Fig. 6** – Valores acumulados de emissão de CO<sub>2</sub> do solo  $\pm$  e,s durante a estação de crescimento (154 dias) e após a colheita (191 dias) em diferentes sistemas de cultivo.

**Fig. 7** – Variação sazonal de **(a)** Estoque de carbono orgânico do solo (EstC), **(b)** Nitrogênio orgânico total (NT) e **(c)** relação C/N, durante a estação de crescimento (154 dias) e após a colheita (191 dias) em diferentes sistemas de cultivo.

**Fig. 8** – Análise de componentes principais de atributos do solo em diferentes sistemas de cultivo. Correlação entre os atributos do solo (Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo FCO<sub>2</sub>, carbono da biomassa microbiana CBM, respiração basal do RB, carbono orgânico do solo COS, nitrogênio orgânico total NT, quociente microbiano  $q_{MIC}$ , quociente metabólico  $q_{CO_2}$ , relação C/N, pH do solo, densidade aparente do solo D<sub>s</sub>, matéria orgânica do solo MOS, temperatura do solo do T<sub>solo</sub>, espaço poroso saturado por água EPSA e componentes principais, projeções PC1 e PC2, de acordo com os sistemas de cultivo (M; SF; S; P; S/SF; SF/S; P/SF; SF/P e C).

## LISTA DE ABREVIATURAS

- C – Carbono
- CBM – Carbono da Biomassa Microbiana
- CH<sub>4</sub> – Metano
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono
- COS – Carbono Orgânico do Solo
- Ds - Densidade do solo
- EPSA – Espaço poroso saturado por água EPSA
- EstC – Estoque de carbono orgânico total do solo
- FCO<sub>2</sub> – Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo
- GEE – Gases do Efeito Estufa
- iLF – Integração Lavoura-Floresta
- iLP – Integração Lavoura-Pecuária
- iLPF – Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
- iPF – Integração Pecuária-Floresta
- MOS – Matéria Orgânica do Solo
- N – Nitrogênio
- N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso
- NT – Nitrogênio Total
- qCO<sub>2</sub> – Quociente Metabólico
- qMic – Quociente Microbiano
- RBS – Respiração Basal do Solo
- SPD – Sistema de Plantio Direto
- Tsolo – Temperatura do Solo
- US – Umidade do Solo (US)

## RESUMO

PEREIRA, Vágna da Costa, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Efluxo de CO<sub>2</sub> em diferentes sistemas de cultivo**. Orientador: Flávio Barbosa Justino. Coorientadores: Paulo José Hamakawa, Miguel Marques Gontijo Neto e Luiz Fernando Carvalho Leite.

Nas últimas décadas, a substituição de extensas áreas de cobertura original do Cerrado por outros usos, vem ocorrendo num ritmo acelerado e certamente todo este processo de substituição da vegetação tem contribuído para o aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Neste sentido, para entender melhor os fatores que influenciam a dinâmica de carbono do solo (COS) e as emissões de CO<sub>2</sub> do solo em sistemas agrícolas de diferentes níveis de complexidade, medimos a respiração do solo em diferentes tipos de uso da terra para avaliar o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) do solo em sistema de plantio direto no Cerrado Brasileiro. Os resultados das medições da respiração do solo mostraram que o FCO<sub>2</sub> médio diário foi caracterizado por valores abaixo de 32 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Durante a estação de crescimento, foram observados fluxos cumulativos que variaram entre 75 e 91 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> em sistemas de monocultura e consórcio e de 83,9 a 134,9 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, entre os sistemas de rotação. No cerrado nativo verificou-se um fluxo cumulativo de 97,7 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Este período coincidiu com a estação chuvosa, onde verificou-se que os maiores fluxos de CO<sub>2</sub> ocorreram após os eventos de precipitação. Houve uma correlação positiva entre o espaço poroso saturado por água (EPSA) e FCO<sub>2</sub>. O período após a colheita caracterizou-se por fluxos menores e cumulativos com valores entre 12,6 e 26,7 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> em sistemas de monocultura e consórcio, 15,6 e 21,1 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> entre sistemas de rotação e 27,0 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> no Cerrado. O fluxo acumulativo de CO<sub>2</sub> do solo diminui entre as estações de crescimento e após a colheita em aproximadamente 59% em monoculturas e consórcios, 80% nos sistemas de rotação e 56% no cerrado. Os sistemas de rotação acumularam menores quantidades de FCO<sub>2</sub> (4,2 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>) quando comparados aos sistemas de monocultura (4,5 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>), enquanto o cerrado acumulou 4,9 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Contudo, os resultados obtidos desse estudo sugerem que o uso dos sistemas

com rotação cultural se destacam como alternativas mais sustentáveis para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera. Além disso, a adoção do sistema de plantio direto promove melhorias na qualidade do solo e sequestro de carbono ao longo dos anos, contribuindo com o aumento da produtividade dos sistemas agropecuários.

## ABSTRACT

PEREIRA, Vágna da Costa, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Soil CO<sub>2</sub> efflux in different cropping systems**. Adviser: Flávio Barbosa Justino. Co-advisers: Paulo José Hamakawa, Miguel Marques Gontijo Neto and Luiz Fernando Carvalho Leite.

In the last decades, the substitution of extensive areas of native Cerrado for other uses mainly agricultural areas has been occurring at accelerated pace, and certainly this whole vegetation substitution process has contributed to the increase of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere, especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Thus, to better understand the factors that influence soil carbon dynamics (SOC) and soil CO<sub>2</sub> efflux emissions (FCO<sub>2</sub>) in alternative farming systems, we measured soil respiration to evaluate the soil FCO<sub>2</sub> under no-tillage system in the Brazilian Cerrado. The results of soil respiration measurements showed that daily mean FCO<sub>2</sub> was characterized by values below 32 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. During the growing season, highest cumulative fluxes observed were between 75 and 91 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> in monoculture and intercropping systems and 83.9 to 134.9 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, among the rotation systems. The native Cerrado showed cumulative measures of 97.7 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>. This period coincided with the rainy season, where it was verified that the higher CO<sub>2</sub> fluxes occurred after precipitation events. There was a positive correlation between water-filled pore space (WFPS) and FCO<sub>2</sub>. The period after harvest, it was characterized by smaller and cumulative fluxes with values between 12.6 and 26.7 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> in monoculture and intercropping systems, 15.6 and 21.1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> between rotation systems and 27.0 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> in the Cerrado. Cumulative soil CO<sub>2</sub> efflux reduce between growing seasons and after harvest by approximately 59% in monocultures and intercropping, 80% in rotation systems and 56% in Cerrado. Rotation systems were able to accumulate the lowest FCO<sub>2</sub> (4.2 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>) compared to monoculture systems that accumulated around 4.5 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> and the Cerrado that accumulated 4.9 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. This study showed that the uses of rotation systems stand out as sustainable alternatives to mitigate CO<sub>2</sub> emissions at the soil-atmosphere interface. In addition, the adoption of the no-tillage system can promote improvements in soil quality and carbon

sequestration over the years, which may contribute to the long-term increase in productivity of agricultural systems.

## INTRODUÇÃO GERAL

No âmbito das mudanças climáticas globais, compreender o papel dos gases de efeito estufa (GEEs) na interface solo-atmosfera é essencial. Essa temática tomou maiores proporções na década de 1990 e início da década de 2000, quando foram quantificados aumentos expressivos nas concentrações de dióxido de carbônico (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) na atmosfera. A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, aumentou de 280 para 400 ppm desde 1800, como consequência da emissão de combustíveis fósseis, desmatamento e mudanças no uso da terra, e está projetado para atingir 700 ppm até o final deste século (Le Quéré et al., 2013). Esse valor é histórico, já que pesquisas mostram que a última vez em que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera chegou a um nível tão alto foi há mais de três milhões de anos.

No Brasil, as emissões de GEE atingiram aproximadamente 2.28 Gt CO<sub>2</sub>.eq em 2016, com aumento de 9% entre os anos de 2015 e 2016, causado principalmente pelo desmatamento e expansão das fronteiras agrícolas nas regiões do Cerrado e Amazônia, seguido das atividades agrícola e pecuária que tem participação expressiva no PIB brasileiro (SEEG, 2017). Essas atividades são referências no cenário global no suprimento da demanda por várias *commodities* tais como as culturas do milho e da soja e do setor de energia que ocupa a terceira posição devido ao papel da energia hidrelétrica e da biomassa renovável (SEEG, 2017).

Em 2015, as emissões mundiais de GEEs somavam cerca de 53 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e. Neste cenário, o Brasil contribuiu com cerca de 2 Gt CO<sub>2</sub>.eq (3,9% das emissões mundiais), colocando o país como o sétimo maior emissor mundial, atrás da China, com 23%, dos Estados Unidos, com 12,9% e da União Europeia (28 países), com 7,4% (SEEG, 2017). Contudo, em 2010 o governo brasileiro lançou o Plano para uma Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC), com o objetivo específico de “promover a adoção de sistemas agrícolas sustentáveis e práticas que podem reduzir as emissões de GEEs e melhorar a eficiência e resiliência das comunidades rurais e atividades agrícolas” (Cooper et al., 2013).



O desafio de melhorar a produção de alimentos, fibras e energia para as próximas décadas está ligado ao estabelecimento de sistemas com baixas externalidades ambientais e resiliente a mudanças climáticas (Godfray et al., 2010; Rockstrom et al., 2009). Além disso, a intensificação de sistemas agrícolas integrados que incluem plantas arbóreas como elemento do agroecossistema, pode exercer papel importante para a mitigação do desmatamento e das emissões de GEEs (Burney et al., 2010). Kichel et al. (2014) relatam que os sistemas integrados têm por objetivo maximizar a utilização dos ciclos biológicos das plantas, animais, e seus respectivos resíduos, assim como efeitos residuais de corretivos e nutrientes. Esses autores afirmam ainda que os sistemas integrados de produção visam também minimizar e aperfeiçoar a utilização de agroquímicos, com aumento da eficiência no uso de máquinas, equipamentos e mão-de-obra, gerar emprego, renda, melhorar as condições sociais no meio rural, redução dos riscos climáticos, mercadológicos e impactos ao meio ambiente.

Segundo Balbino et al. (2011) os sistemas integrados podem ser classificados, basicamente, em quatro grandes grupos de produção: Integração Lavoura-Pecuária (iLP) ou Agropastoril; Integração Pecuária-Floresta (iPF) ou Silvipastoril; Integração Lavoura-Floresta (iLF) ou Silviagrícola e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) ou Agrossilvipastoril. Cada um destes grandes processos pode ser subdividido em quatro situações distintas quanto a sua implantação, adequando-se as criações e cultivos mais promissores a cada agroecossistema e situação local dos produtores, tais como: aquela em que a agricultura é introduzida nas áreas de pastagens; aquela em que a pastagem é introduzida nas áreas de lavouras de grãos; e aquela em que o componente florestal é introduzido nas áreas de pastagens ou nas de lavouras (Kichel et al., 2014; Zimmer et al., 2012).

Com base no plano ABC, o Brasil divulgou o detalhamento das ações de mitigação e adaptação às mudanças do clima para o setor agropecuário e o seu compromisso voluntário de redução entre 36,1% e 38,9% das emissões de GEE projetadas para 2020, estimando o volume de redução em torno de um bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (t CO<sub>2</sub>-eq –

resultado da multiplicação das toneladas emitidas de GEEs pelo seu potencial de aquecimento global) (BRASIL, 2012). Nesse contexto, estudos sobre mudanças do uso da terra demonstram que, com o aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera, tem-se buscado realizar práticas mitigadoras que intensifiquem a síntese e a retenção da matéria orgânica no solo, contribuindo assim para o sequestro de carbono.

Estudos recentes demonstram que do total de fluxos de carbono presente no ecossistema a respiração do solo é um dos maiores e representa cerca de 10%, sendo até 10 vezes maior que o fluxo de carbono proveniente das emissões de gases derivados de combustíveis fósseis (Atarashi-andoha et al., 2012, Taneva & González-Meler, 2011; Vargas et al., 2011).

A respiração microbiana pode ser estimulada quando se adiciona uma fonte de carbono no solo. Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de GEE, dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (IPCC, 2001). Contudo, sistemas de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais e a retenção de Carbono (C) no solo se constituem como alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno biológico de CO<sub>2</sub> atmosférico e mitigação do aquecimento global (Costa et al., 2008; Zanatta et al. 2007; Bayer et al., 2006). Entretanto, práticas de preparo do solo em que ocorre maior contato entre o solo e os resíduos, com conseqüente aumento da temperatura do solo, favorecem a decomposição da matéria orgânica e contribuem para maiores efluxos de CO<sub>2</sub> do solo (Siqueira Neto et al., 2009; Baretta et al., 2014).

Os mecanismos da respiração do solo podem sofrer influência também de fatores abióticos, tais como, temperatura e umidade do solo. Com isso, o efluxo de CO<sub>2</sub> torna-se, dependente da variabilidade temporal e espacial destas variáveis, que exercem forte influência no processo de decomposição microbiana, independentemente do manejo do solo adotado.

O estoque de carbono orgânico total do solo (EstC), tem se destacado como fator biótico importante para melhor compreensão dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo. A quantificação deste parâmetro torna-se essencial, podendo inferir na redução da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Han et al. (2016) afirmam que práticas de manejo que contribuem para a entrada de C

no solo é a maneira mais eficiente para o sequestro de Carbono Orgânico do Solo (COS). Esses autores relataram, ainda, em seu estudo que as condições climáticas são um dos principais fatores que impulsionam a taxa de acúmulo e sequestro de COS.

As taxas de sequestro de carbono no solo em ecossistemas agrícolas e restaurados podem variar de 0 a 15 g C m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> em regiões secas e quentes (Armstrong et al., 2003), e de 10 a 100 g C m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> em climas úmidos e frios (West & Post, 2002). Estes valores podem continuar por 20 a 50 anos por meio de usos contínuos de práticas recomendadas para o manejo adequado do solo e, em seguida, diminuir quando o conteúdo de carbono do solo atinge o estado de equilíbrio (Luo & Zhou, 2006).

Dessa forma, a utilização de práticas conservacionistas, tais como o sistema de plantio direto (SPD) pode ser considerado uma atividade com potencial para sequestrar carbono no solo, pois favorece o aporte de resíduos vegetais, tanto na superfície quanto no perfil do solo pelas raízes, que podem aumentar os estoques de carbono, principalmente na fração particulada (Bartz et al., 2013; Siqueira Neto et al., 2009). Nesse contexto, o sistema de SPD, diferente dos outros tipos de sistemas de manejo do solo, como o cultivo mínimo e preparo convencional é a melhor opção para a manutenção e melhoria dos atributos do solo e podem contribuir para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera (Figueiredo et al. 2018; Barreta et al., 2014). Entretanto, sistemas de cultivo que são caracterizados pelo intenso revolvimento do solo e pelo uso de elevadas quantidades de adubos químicos e pesticidas, contribuem, mais intensamente, para as perdas de C e conseqüentemente produzem taxas elevadas de efluxo de CO<sub>2</sub> (Bartz et al., 2013).

Siqueira Neto et al. (2009) avaliando a rotação de culturas no sistema plantio direto (SPD) em Tibagi (PR) com potencial para sequestrar C no solo, verificaram que o tempo de adoção do SPD promoveu o aumento no estoque de C no solo. O estudo demonstrou que para os tratamentos com 12 anos, observou-se um estoque médio de 35,6 t ha<sup>-1</sup> de C, enquanto para os tratamentos com 22 anos o estoque médio foi de 55,0 t ha<sup>-1</sup> de C, constatando-se assim aumento de 19,4 t ha<sup>-1</sup> de C em 10 anos de SPD que representou um sequestro líquido de CO<sub>2</sub> próximo a 6,0 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Estudos recentes demonstram que em pastagens bem manejadas, em geral, a acumulação de C pode ser observada, enquanto que em pastagens degradadas são verificadas perdas de C (Carvalho et al., 2010; Salton et al 2011). Carvalho et al. (2014) avaliando o sistema de integração lavoura-pecuária (iLP) como uma estratégia para reduzir as emissões de GEEs provenientes do solo no Cerrado brasileiro, observaram que a implantação do sistema de iLP mostrou-se eficiente no sequestro de carbono do solo.

Contudo, essas informações ainda são incipientes quando se busca resultados que avaliam o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em diferentes sistemas de manejo, tais como, monocultura, rotação e sucessão. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a contribuição desses sistemas nas emissões de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera em um experimento de longa duração no Cerrado brasileiro. Os resultados dessa pesquisa podem direcionar produtores, pesquisadores e tomadores de decisão sobre medidas técnicas de forma a contribuir na mitigação das mudanças climáticas. O estudo poderá contribuir gerando métricas dos efluxos de CO<sub>2</sub> do solo, aprimorando os inventários nacionais e o plano ABC.

## REFERÊNCIAS

Almagro, M., López, J., Querejeta, J. I., Martínez-Mena, M. 2009. Temperature dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*. 41:594-605. doi:10.1016/j.soilbio.2008.12.021

Armstrong, R. D., Millar, G., Halpin, N. V., Reid, D. J.; Standley, J. 2003. Using zero tillage, fertilizers, and legume rotations to maintain productivity and soil fertility in opportunity cropping systems on shallow vertisol. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 43:141-153. doi: 10.3923/ijss.2015.1.16

Atarashi-Andoha, M., J. Koarashia, S. Ishizuka, and K. Hirai. 2012. Seasonal patterns and control factors of CO<sub>2</sub> effluxes from surface litter, soil organic carbon, and root-derived carbon estimated using radiocarbon signatures. *Agric. and Forest Meteorol.* 152:149–158. doi:10.1016/j.agrformet.2011.09.015

Balbino, L. C., Cordeiro, L. A. M., Porfirio-da-Silva, V., Moraes, A., Martinez, G. B., Alvarenga, R. C., Kichel, A. N., Fontaneli, R. S., Santos, H. P., Franchini, J. C., Galeranl, P. R. 2011. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46. doi: 10.1590/S0100-204X201100100000

Baretta, D., M. L. C. Bartz, I. A. Fachini, R. Anselmi, T. Zortéa, and C. R. D. Maluche-Baretta. 2014. Soil fauna and its relation with environmental variables in soil management systems. *Revist. Ciênc. Agron.* 45:871-879. doi: 10.1590/S1806-66902014000500002

Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., Pavinato, A., Dieckow, J. 2006. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, 86:237-245. doi:10.1016/j.still.2005.02.023

BRASIL. 2012. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). MAPA/ACS.<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/planoabc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf/> (acessado 15 jan. 2018).

Burney, J.A., Davis, S.J., Lobell, D.B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A. 107:12052–12057. doi: 10.1073/pnas.0914216107

Carvalho, J. L. N., Avanzi, J.C., Silva, M. L. N., Mello, C. R., Cerri, C. E. P. 2010. Potencial de seqüestro de carbono em diferentes biomas do Brasil: uma revisão de literatura. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34:277-289. doi:10.1590/S0100-06832010000200001

Carvalho, J. L.N., Raucci, G. S., Frazao, L. A., Cerri, C.E.P., Bernoux, M., Cerri, C. C. 2014. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. Agriculture, Ecosystems & Environment. 183:167–175. doi:10.1016/j.agee.2013.11.014

Cooper P.J. M., Capiello, S., Vermeulen, S. J., Campbell, B. M., Zougmore, R., Kinyangi, J. 2013. Largescale implementation of adaptation and mitigation actions in agriculture. CCAFS Working Paper no. 50. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark. Available online at: [www.ccafs.cgiar.org](http://www.ccafs.cgiar.org).

Costa, F. S., Bayer, C., Zanatta, J. A., Mielniczuk, J. 2008. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:323-332. doi:10.1590/S0100-06832008000100030

Han, P., Zhang, W., Wang, G., Sun, W., Huang, Y., 2016. Changes in soil organic carbon in croplands subjected to fertilizer management: a global meta-analysis. *Sci. Rep.* 6:27199. doi:10.1038/srep27199

Figueiredo, C. C., Oliveira, A. D., Santos, I. L., Ferreira, E. A. B., Malaquias, J. V., et al. 2018. Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment.* 618:1572-1582. doi: /10.1016/j.scitotenv.2017.09.333

Godfray, H.C.J., Beddington, J. R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. 2010. *Science*, 327: 812–818. doi: 10.1126/science.1185383

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Climate change 2001: The scientific basis.* Cambridge University Press. 881. Cambridge, U.K.

Kichel, A. N., Costa, J. A. A., Almeida, R. G., Paulino, V. T. *Sistemas de Integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) - Experiências no BRASIL.* 2014.

*Boletim de Indústria Animal*, 71:94-105.

Le Quéré, C., Peters, G.P., Andres, R.J., et al.: Global carbon budget 2013. 2013. *Journal of Earth System Science. Data Discuss.* 6:689-760. doi.org/10.5194/essd-6-235-2014

Luo, Y & Zhou, X. 2006. *Soil Respiration and the Environment.* Academic Press/Elsevier, San Diego, CA, USA. doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50000-0

Parton, W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole, D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal.* 51:1173-1179. doi:10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x

PBMC, 2014: Mitigação das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 3 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Bustamante, M. M. C., Rovere E.L.L, (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 463 pp.

Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., et al., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461:472–475. doi:10.1038/461472a

Salton, J.C., Mielniczuk, J., Bayer, C., Fabrício, A.C., Macedo, M.C.M., Broch, D.L. 2011. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 46:1349–1356. doi:10.1590/S0100-204X2011001000031.

SEEG, Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 2017. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/>> (Acessado em 18 março 2018).

Siqueira Neto, M., Piccolo, M.C., Scopel, E., Costa Junior, C., Cerri, C.C. & Bernoux, M. 2009. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. *Acta Scientiarum Agronomy*. 31:709-717. doi:10.4025/actasciagron.v31i4.792.

Taneva, L., Gonzalez-Meler, M. A. 2011. Distinct patterns in the diurnal and seasonal variability in four components of soil respiration in a temperate forest under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Biogeosciences*, 8:3077–3092. doi:10.5194/bg-8-3077-2011

Vargas, R., Carbone, M. S., Reichstein, M., Baldocchi, D. D. 2011. Frontiers and challenges in soil respiration research: from measurements to model-data integration. *Biogeochemistry*. 102:1-13. doi:10.1007/s10533-010-9462-



West, T. O. & Post, W. M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*. 66:1930-1946. doi: 10.3334/CDIAC/tcm.002

Williams, J.R., Singh, V.P., 1995. The EPIC model. *Computer Models of Watershed Hydrology*. pp. 909–1000

Zanatta, J.A., Bayer, C.; Dieckow, J., Vieira, F.C.B. & Mielniczuk, J. 2007. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil & Tillage Research*, 94:510-519. doi:10.1016/j.still.2006.10.003

# CAPÍTULO I

## EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

### 1.1 INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado possui grande diversidade biológica, é o segundo maior da América do Sul, ocupando uma área de aproximadamente 204 milhões de hectares, cerca de 25% de todo o território brasileiro (MCTI, 2017; Redo et al., 2013). Nas últimas quatro décadas, quase um milhão de km<sup>2</sup> foram convertidos em áreas agrícolas, principalmente, de 1990 a 2011 (Lapola et al., 2013; Bustamante et al., 2014). Recentemente, foram identificados que 80 milhões de hectares do Cerrado estão sob diferentes usos da terra, cerca de 39,5% da sua área total (Beuchle et al., 2015; MMA, 2015). Essa intensa substituição de áreas de vegetação nativa, por outros usos, tem contribuído para o aumento dos gases do efeito estufa (GEEs) na atmosfera, sobretudo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), com incremento absoluto entre os anos de 2014-2015 de 2,3 ppm (WMO, 2016; Santos et al., 2016; Carvalho et al., 2014; Galford et al., 2013).

O mais recente relatório de inventário nacional, que reportam as emissões históricas do Brasil entre os anos de 1990 e 2014, demonstrou que no bioma Cerrado, as mudanças de uso do solo, causadas principalmente pelo desmatamento, degradação ou conversão da vegetação natural para uso agrícola, emitiram cerca de 89,6 Gg CO<sub>2</sub>.eq, representando cerca de 34,12% do total de emissões do país (MCTI, 2016). Contudo, o Brasil tem se destacado como grande produtor mundial de grãos e, nos últimos anos, vem substancialmente evoluindo. Durante a safra agrícola 2015/2016, cerca de 189,3 milhões de toneladas de grãos foram produzidas e as culturas do milho e da soja foram responsáveis por aproximadamente 37% e 51% de toda a produção nacional de grãos, sendo a região sudeste a terceira maior produtora representando cerca de 8% (CONAB, 2016). Entretanto, em 2014 a agricultura foi o segundo setor de maior impacto, contribuindo com cerca de 33% das emissões líquidas de CO<sub>2</sub> (MCTI, 2016).

No âmbito das mudanças climáticas globais, o atual modelo de produção agrícola brasileiro, tem se destacado como grande emissor de GEEs, e a transição desse modelo para um de baixa emissão de carbono é urgente. Entretanto, a crescente demanda mundial por alimentos, pressionando cada vez mais a expansão da agropecuária, tem contribuído para maiores taxas de desmatamento, expansão de novas fronteiras agrícolas, mudanças do uso da terra e, conseqüentemente, incremento anual da emissão de GEEs.

As emissões causadas por atividades antrópicas, principalmente provenientes do setor agrícola, tem sido um tema bastante discutido, com destaque para regiões do Cerrado brasileiro, em função da sua aptidão para agropecuária (Bustamente et al., 2012). Diante disso, o governo brasileiro implementou uma política nacional de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas, o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), que prevê uma redução entre 36,1% e 38,9% nas emissões de GEEs até 2020 (BRASIL, 2015). Assim, dentre as ações de mitigação de emissão de GEEs no Brasil até 2020, inclui a redução do desmatamento do Cerrado (redução de 104 Tg CO<sub>2</sub>-eq), recuperação de pastagens degradadas (redução de 83 a 104 Tg CO<sub>2</sub>-eq), aumento dos sistemas de integração lavoura-pecuária (redução de 18 a 22 Tg CO<sub>2</sub>-eq) e cultivo mínimo, com uso do sistema de plantio direto (16 a 20 Tg CO<sub>2</sub>-eq) (BRASIL, 2015).

Emissões de GEEs por meio de manejos agropecuários, pecuária e mudança no uso da terra, são responsáveis por cerca de 1/3 do total das emissões antrópicas e 4/5 delas estão localizados nos países em desenvolvimento (Valin et al., 2013). Dessa forma, os solos agrícolas podem atuar como fonte ou dreno de carbono no solo, dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (IPCC, 2001; Sainju et al., 2014). Carvalho et al. (2014) estudando o sistema de integração lavoura-pecuária como uma estratégia para reduzir as emissões de GEE provenientes do solo no Cerrado brasileiro, observaram que a implantação do sistema de iLP mostrou-se eficiente no sequestro de carbono do solo. A utilização de sistemas integrados apresenta-se como alternativa a adaptação a mudança climática. Zimmer et al. (2012) relatam que com manejo

adequado das culturas e pastagens, os sistemas integrados podem proporcionar substanciais aumentos na produção, principalmente quando ocorre recuperação de áreas degradadas ou pouco produtivas.

A respiração do solo (RS) é considerada uma fonte significativa de CO<sub>2</sub> dos ecossistemas terrestres e libera anualmente cerca de 60 Gt C ano<sup>-1</sup> do solo, dos quais 24 Gt C ano<sup>-1</sup> são provenientes de solos de florestas tropicais (Kim et al., 2017; Giardina et al., 2014; IPCC, 2007). A RS é dependente principalmente da respiração autotrófica produzida pelas raízes das plantas, atividade microbiana e decomposição da matéria orgânica do solo (respiração heterotrófica) (Liu et al., 2016; Yu et al., 2015; Silva Júnior et al., 2013).

A compreensão desses fatores torna-se essencial, pois está diretamente relacionada à produção de CO<sub>2</sub> do solo e pode prever as consequências do aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico e as mudanças climáticas no ecossistema (Haugwitz et al., 2014). Por outro lado, o estoque de carbono orgânico do solo é o maior componente do ciclo global do carbono e podem atuar identificando a qualidade e a sustentabilidade do solo, o que influencia significativamente o processo de sequestro de carbono nos ecossistemas (Zhang & Ni, 2017; Mazzilli et al., 2014). O carbono orgânico do solo (COS) é sensível ao manejo de culturas e mudanças no uso da terra, que afetam o equilíbrio e a decomposição a longo prazo (Elsgaard et al., 2012). Assim, a quantificação dos estoques de COS em diferentes tipos de sistemas agrícolas e ecossistemas torna-se essencial e pode ser usado para inferir sobre fatores que contribuem para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> para atmosfera.

A adoção de práticas de conservação do solo é vista como uma alternativa viável para garantir a sustentabilidade da terra agrícola (Bartz et al., 2014, Hungria et al., 2009). Nesse contexto, o sistema de plantio direto (SPD) promove um maior acúmulo de resíduos vegetais, em quantidade e qualidade diversificada pela rotação e consórcio utilizados em cada região agrícola, o que resulta na formação de vários compostos orgânicos. Estudos recentes demonstraram que o uso do plantio direto confirma a baixa emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) em função da diminuição das práticas de plantio reduzindo o distúrbio do solo e melhorando a atividade microbiana (Zhang &

Ni, 2017; Chaplot et al., 2015; Carvalho et al., 2014). Embora, Powlson et al. (2014) relatam que o uso do sistema de plantio direto buscando potenciais de mitigação agrícola é muito otimista, o que levaria a expectativas irrealistas sobre o uso desta tecnologia e pode atuar favorecendo a emissão de GEE e não como alternativa à mitigação.

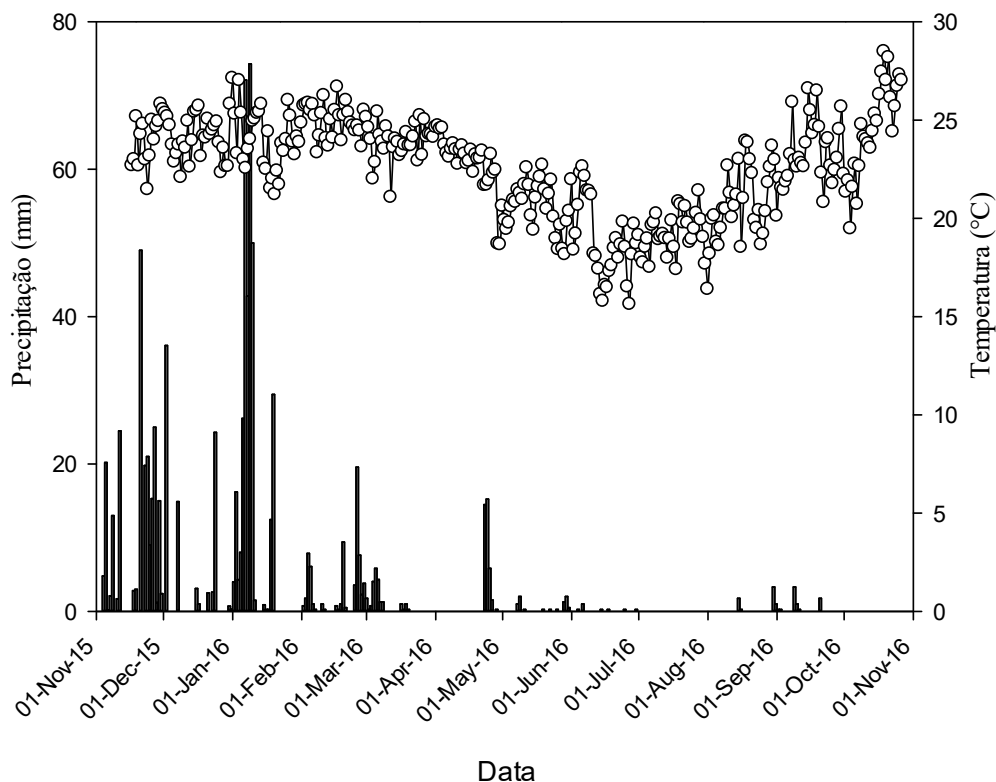
Nossa hipótese é que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo é sensível à conversão da vegetação nativa em agroecossistemas e que o uso de sistemas integrados, promove perdas menores nos estoques de carbono do solo e maior potencial de resiliência em áreas que sofreram mudanças do uso da terra. O objetivo principal deste estudo foi quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> nos agroecossistemas sob diferentes sistemas de cultivo (monocultura - MN, Consórcio - CS e rotação - RT) e vegetação nativa de Cerrado. Além disso, os objetivos específicos foram: 1) comparar as estimativas FCO<sub>2</sub> do solo entre os diferentes sistemas e 2) investigar a dependência das taxas de efluxo de CO<sub>2</sub> na superfície do solo com as variáveis micrometeorológicas e a atividade microbiana.

## **1.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **1.2.1 Área Experimental e Condições Meteorológicas**

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos de um experimento de longa duração realizado em uma área de arranjos produtivos, com rotação e consorciação de lavouras-pastagem, para região do Cerrado, pertencente à Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG (19° 28'S; 44° 15'W e 732m). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, ou seja, típico de savana, com inverno seco e temperaturas médias inferiores próximas a 16°C e médias superiores acima de 28°C, com chuvas que se concentram de novembro a março com média próxima a 200 mm (Ferreira & Souza, 2011).

A Figura 1 mostra a temperatura média do ar e precipitação diária de novembro de 2015 a outubro de 2016, período que engloba a coleta de dados. O solo da área experimental é classificado como latossolo vermelho, A moderado, textura argilosa, fase cerrado subcaducifólio, relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2014).



**Fig. 1** – Média diária da temperatura e precipitação diária durante o período de Novembro 2015 à Outubro de 2016 (17/11/2015–27/10/2016). O acumulado de precipitação e número de dias chuvosos durante a estação chuvosa foram os seguintes: 808,80 mm e 102 dias com chuva.

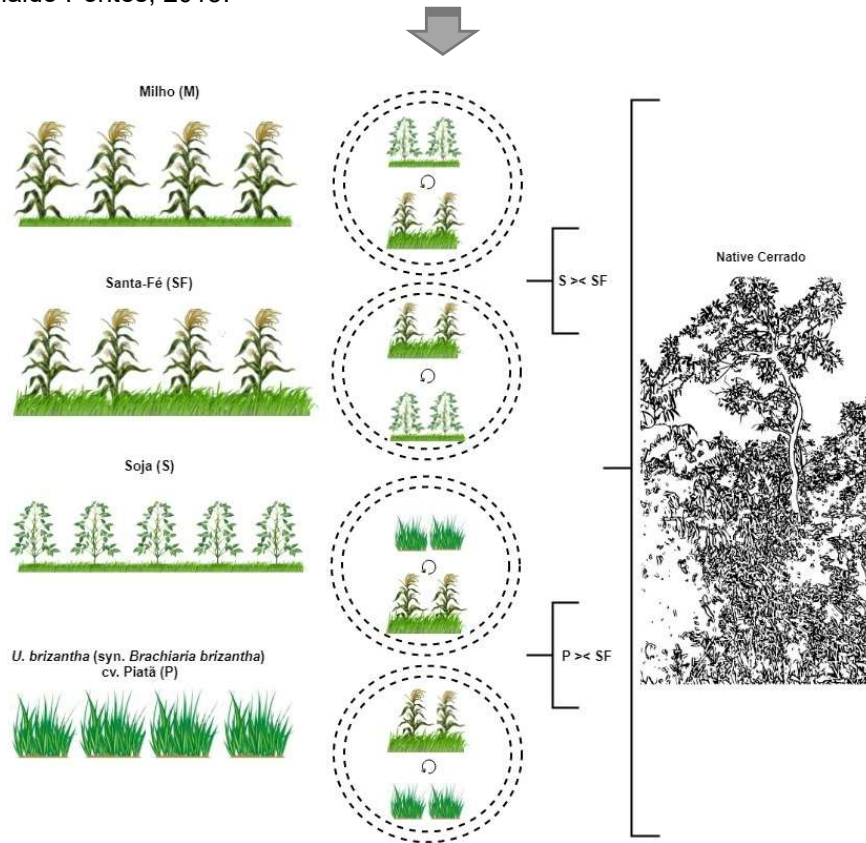
### 1.2.2 Tratamentos, Manejo Agrônômico e Delineamento Estatístico

O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados, no esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Foram avaliadas parcelas de 120 m<sup>2</sup> (12 x 10 m) com 9 tratamentos (M - Milho solteiro em monocultivo; SF - Santa-Fé (Milho consorciado com forrageira *Urochloa brizantha* cv. Piatã; S - Soja em monocultivo; P - Pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Piatã em monocultivo; S/SF e SF/S - Soja e Santa-Fé em rotação anual; P/SF e SF/P - Sequência Pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Piatã e Santa-Fé em rotação anual e C - Solo sob cerrado nativo (referência para parâmetros do solo), para análises comparativas de parâmetros de qualidade do solo (Fig. 2). O plantio do milho

e da soja durante a safra 2015/2016 foi realizado em 11/11/2015 e 12/11/2015 sob sistema de plantio direto. As características físicas e químicas do solo de todas as parcelas experimentais são mostrados na Tabela 1.



Fonte: Arnaldo Pontes, 2015.



**Fig. 2** – Representação esquemática dos sistemas de produção agrícola em monocultura, consórcios, rotações e cerrado nativo durante a safra agrícola 2015/2016.

**Tabela 1.** Atributos físicos e químicos do solo da área experimental na profundidade de 0-20 cm.

Parâmetro	Sistema de Cultivo								
	*M	SF	S	P	S/SF	SF/S	P/SF	SF/P	C
pH (H <sub>2</sub> O)	5,8	5,9	6,0	6,3	5,7	5,8	6,0	5,9	5,8
P (mg L <sup>-1</sup> )	14,8	42,2	15,5	7,2	12,6	22,9	13,2	21,9	3,2
K(mg L <sup>-1</sup> )	276,6	287,6	82,5	57,2	188,1	142,4	65,6	56,4	34,7
Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,7	4,1	5,55	5,2	4,6	4,3	4,6	3,7	3,1
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,9	0,9	1,01	1,2	1,0	0,8	1,0	0,8	0,4
H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	6,1	6,6	4,60	4,2	6,0	5,8	4,5	5,1	7,3
CTC (cmolc dm <sup>-3</sup> )	11,3	12,3	11,4	10,7	12,1	11,3	10,3	9,7	10,9
V (%)	45,6	46,0	59,7	60,6	50,1	49,1	56,4	47,6	33,0
MO (%)	4,0	4,5	4,50	4,7	3,9	3,9	4,5	3,7	6,2
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,8
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	120	120	120	120	120	120	120	120	127
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	110	110	110	110	110	110	110	110	113
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	770	770	770	770	770	770	770	770	760

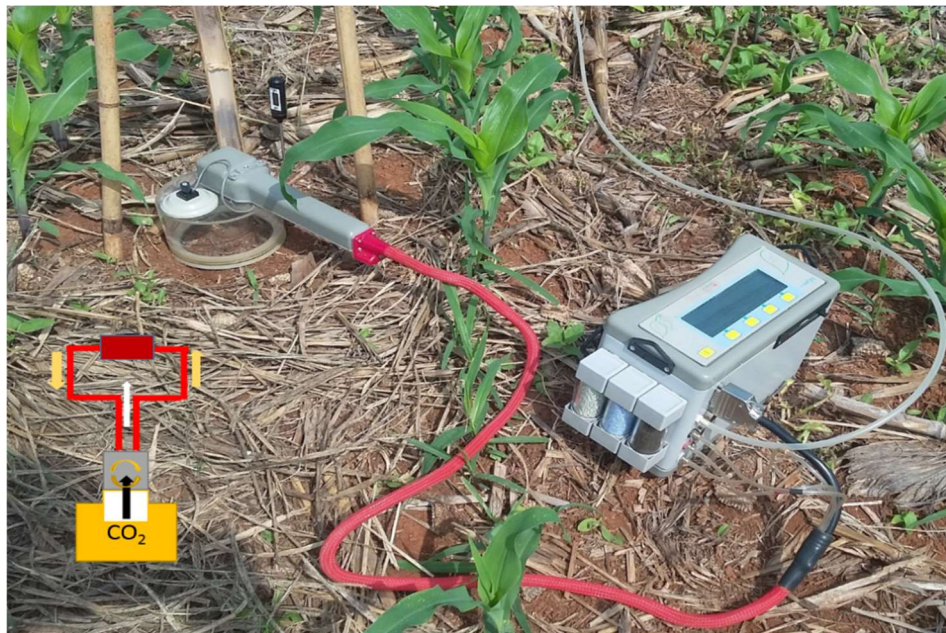
\*M - Milho; SF - Santa-Fé; S - Soja; P - Pastagem; S/SF e SF/S - Soja e Santa-Fé em rotação anual; P/SF e SF/P - Sequência Pastagem de Piatã e Santa-Fé em rotação anual e C - Solo sob cerrado nativo.

### 1.2.3 Medições do Efluxo de CO<sub>2</sub>, Temperatura e Umidade do solo

O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, umidade do solo (US) e temperatura do solo (T<sub>solo</sub>) foram determinados durante a safra agrícola 2015/2016, entre os meses de novembro de 2015 e outubro de 2016, compreendendo as estações chuvosa e seca. Foram inseridos 36 colares em toda a área experimental (4 em cada tratamento). Os colares foram confeccionados em aço inoxidável (13 cm de diâmetro interno e 9 cm de altura) e inseridos a 7 cm de profundidade e 2 cm acima da superfície do solo. A área delimitada pelo colarinho foi de 97,5 cm<sup>2</sup> e o volume do exaustor de solo (com a intrusão de colarinho em conta) foi 968 cm<sup>3</sup>, compreendendo um volume total de solo de 1163 cm<sup>3</sup>. As medições do FCO<sub>2</sub> consistiram na utilização de um sistema fechado dinâmico que absorve o CO<sub>2</sub> proveniente do solo, sendo posteriormente analisado por infravermelho, com o sensor Infra Red Gas Analyzer (IRGA) LCSD-010/S, acoplado ao sistema portátil LCPRO+ da ADC BioScientific (Fig. 3). Todas as medições foram realizadas em campanhas quinzenais, entre às 07:00 e 12:00h, antes e durante o desenvolvimento da cultura agrícola e cerrado nativo. A câmara do IRGA foi colocada na superfície do solo e foram realizadas 20 leituras para cada



tratamento (Fig. 3), sendo 5 a cada 30 segundos, considerando quatro repetições, mais 20 leituras em área de Cerrado, totalizando 180 medidas que foram gravadas no registrador de dados do IRGA.



**Fig. 3** – Sistema de medição do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo sob sistema de plantio direto por sensor de infravermelho (IRGA), durante a safra agrícola 2015/2016, Sete Lagoas, MG, Brasil.

A temperatura do solo (°C) foi medida pontualmente no mesmo momento que o FCO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), a uma profundidade de 5 cm, por meio de um termômetro digital tipo espeto com faixa de medição entre -45°C e 230°C. A umidade do solo (%) foi determinada por meio do método gravimétrico a partir de amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm no mesmo momento da coleta do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo.

#### **1.2.4 Amostragem e análise de solo**

Amostras de solo foram coletadas em cada parcela a uma profundidade de 0-10, 10-20 e 20-40. As amostras compostas foram formadas misturando 9 subamostras simples, coletadas em três pontos dentro da parcela, sendo realizadas duas coletas entre linhas e uma entre plantas. Todas as amostras foram posteriormente colocadas em latas metálicas e enviadas ao

laboratório de Física do Solo da Embrapa Milho e Sorgo onde foi determinada a umidade gravimétrica do solo. O teor gravimétrico de água do solo foi determinado após as amostras passarem por secagem em estufa a 105°C por 48h, até peso constante. Para determinação da densidade do solo (Ds) foram coletadas amostras indeformadas de solos em anéis concêntricos utilizando-se amostrador tipo Uhland. De posse desses resultados, foram calculados a percentagem de espaço poroso saturado por água (EPSA), usando a seguinte fórmula:  $EPSA (\%) = (\text{umidade gravimétrica} (\%) \times \text{densidade do solo}) / \text{total de porosidade do solo} \times 100$ ; onde:  $\text{total de porosidade do solo} = [1 - (\text{densidade de massa} / 2.65)]$ , com 2.65 [g cm<sup>-3</sup>] a densidade assumida das partículas de solo.

O carbono orgânico do solo (COS) e Nitrogênio total (NT), foram analisados de acordo com Embrapa (1997). O Carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado conforme metodologia proposta por Vance et al. (1987), usando um fator de correção de 0,38 (Wardle, 1994). A respiração basal do solo (RBS - evolução de CO<sub>2</sub>) foi estimada por meio de amostras de solo pré-incubado para um período de 10 dias (Jenkinson & Powlson, 1976). De posse dos dados de CBM e COS, foi possível determinar o quociente microbiano ( $q_{Mic}$ ) com a equação proposta por Sparling (1992). O quociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) foi calculado por meio da relação entre a RBS e o CBM (Anderson & Domsch, 1993).

### **1.2.5 Análises estatísticas**

Os dados de efluxos de CO<sub>2</sub> do solo foram submetidos a análise de variância para verificar a ocorrência de diferenças amostrais nos diferentes sistemas, considerando quatro repetições (anéis), distribuídos aleatoriamente dentro de cada parcela. Os fluxos diários de CO<sub>2</sub> foram analisados considerando a média entre os valores medidos em todas as repetições, assumindo uma medida de efeito aleatório. As análises foram realizadas utilizando o software SAS versão 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) e as médias comparadas por meio do teste de Tukey-Kramer ao nível de 5% de probabilidade. A Análise de Componentes Principais foi utilizada como técnica de análise multivariada, por meio do software RStudio

versão 1.0.136 (RStudio Inc., Northern Ave, Boston, USA), para distinção dos sistemas em função dos atributos químicos, físicos e microbiológicos do solo.

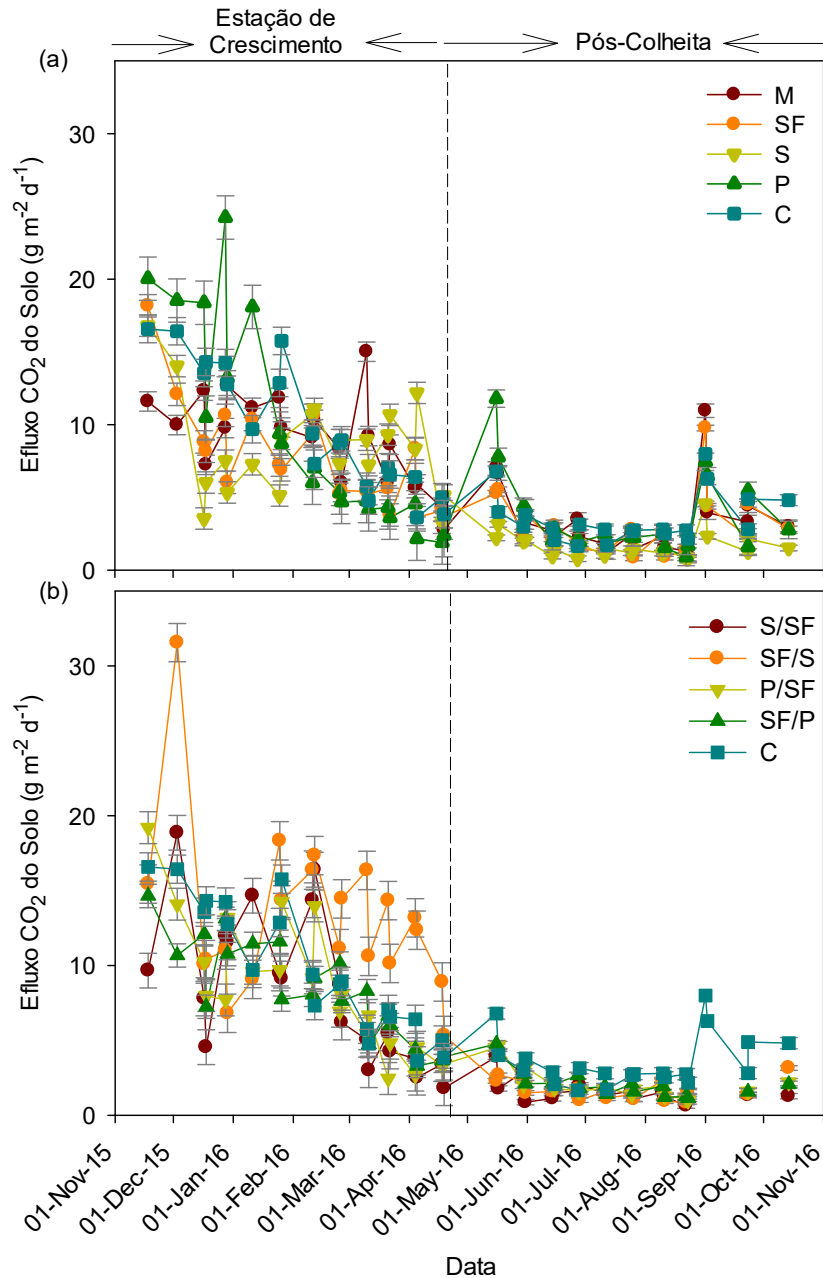
## 1.3 RESULTADOS

### 1.3.1 Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo diário e variáveis climáticas

A variação diária do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) para os sistemas de monoculturas, consórcio e rotações foi caracterizada por valores abaixo de 32 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. A maior média de emissões ocorreu durante a estação de crescimento e diminuiu após a colheita (Fig. 4a, b). Estes valores foram menores em todas as parcelas, permanecendo até o plantio da nova colheita agrícola. O FCO<sub>2</sub> em monoculturas e sistemas de consórcio foi de 0,7 e 24,2 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Fig.4a) e de sistemas de rotação entre 0,6 a 31,6 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Fig.4b). A *Urochloa brizantha* cv. Piatã mostrou valores 38%, 25% e 31% maiores que o milho, Santa-Fé e Soja, respectivamente (Fig. 4a). O FCO<sub>2</sub> diário foi fortemente influenciado durante a transição das estações chuvosa e seca, bem como entre os tipos de uso do solo no período avaliado (345 dias) (Tabela 2). Além disso, verificou-se entre os sistemas de rotação que o FCO<sub>2</sub> de SF/S foi superior em aproximadamente 60%, 61% e 46% quando comparado aos sistemas S/SF, P/SF e SF/P, respectivamente.

**Tabela 2.** Média ± DP diário do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em sistemas de monocultura, consórcio, rotação e vegetação nativa, de Novembro 2015 a Outubro 2016 em Sete Lagoas, Brasil.

Tratamento	Uso do solo	Efluxo de CO <sub>2</sub> do Solo (g CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	
		Estação de Crescimento	Pós-Colheita
C	Vegetação Nativa	9.7 ± 4.3	3.3 ± 2.4
M	Monocultura	8.9 ± 3.1	2.9 ± 2.1
SF	Consórcio	7.6 ± 3.5	1.7 ± 0.9
S	Monocultura	8.5 ± 3.4	3.6 ± 2.7
P	Monocultura	9.1 ± 6.8	1.6 ± 0.8
S/SF	Rotação	8.2 ± 4.9	1.7 ± 0.6
SF/S	Rotação	13.2 ± 5.4	2.1 ± 1.0
P/SF	Rotação	8.4 ± 4.5	2.1 ± 0.9
SF/P	Rotação	8.3 ± 3.3	3.5 ± 1.7



**Fig. 4** – Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em sistemas de monoculturas, consórcio, rotações e vegetação nativa. Pontos são Média ± s.e. **(a)** [Milho (n = 42), Santa Fé (n = 42), Soja (n = 42), Piatã (n = 42) e Cerrado (n = 42)], **(b)** [S/SF (n = 39), SF/S (n = 39), P/SF (n = 39), SF/P (n = 39) e Cerrado (n = 42)], durante a estação de crescimento e após a colheita de Novembro 2015 a Outubro 2016.

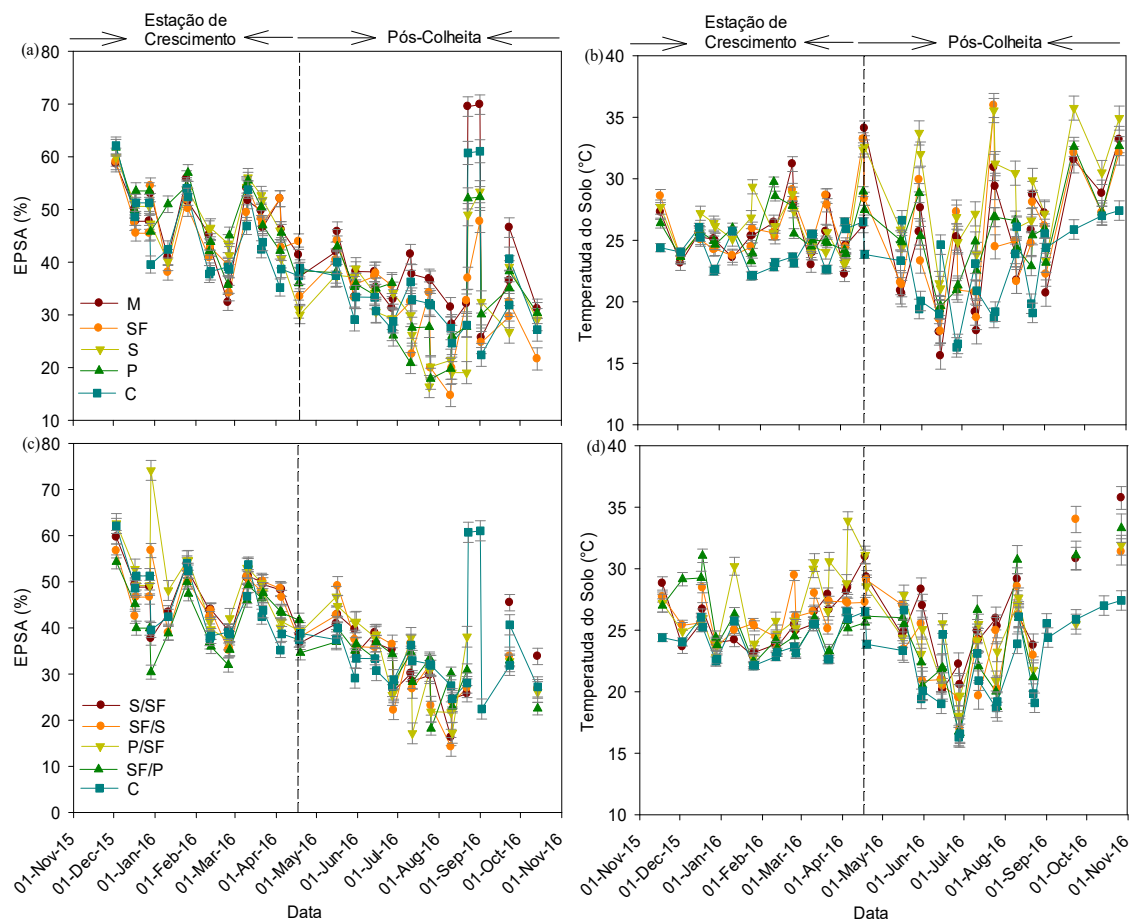
Os resultados do efluxo de CO<sub>2</sub> em escala diária para todos os diferentes sistemas agrícolas demonstraram, ainda, que os valores de respiração do solo medidos no sistema de rotação anual SF/S foi superior em 19%, quando comparado com a área de referência (cerrado nativo). Esses resultados podem estar relacionados ao fato de que durante a fase de desenvolvimento da cultura, foi realizada uma adubação de cobertura com 250 kg/ha de ureia, que pode ter contribuído para o pico de emissão no sistema SF/S aos 22 após o plantio (Figura 4). A emissão de CO<sub>2</sub> pode ser ainda afetada pela qualidade e quantidade de resíduos das culturas, além disso sistemas de culturas com leguminosas e adubação nitrogenada em gramíneas, elevam a quantidade de nitrogênio (N) disponível no solo e podem atuar como combustível para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> do solo. Os resultados mostraram ainda, que para os demais sistemas, os valores médios das emissões de CO<sub>2</sub> do solo foram inferiores à área de vegetação nativa (C), sendo verificados, -23% para sistema SF/S e S, -21% para o sistema SF, -17% para SF/P e P/SF, -8% para M e 3% para P.

Dentre os fatores que atuam no controle da variabilidade de emissão de CO<sub>2</sub> do solo, a temperatura e umidade do solo destacam-se como fatores abióticos importantes. Com isso, neste estudo, verificou-se que o aumento do espaço poroso saturado por água (EPSA) normalmente estimula a atividade microbiana no solo e conseqüentemente causa aumento no FCO<sub>2</sub> do solo. No Cerrado brasileiro, a precipitação é altamente sazonal e concentrada principalmente entre novembro e abril, respectivamente. Em nosso estudo, observou-se que o EPSA variou de 69,9 a 16,4% entre monoculturas e sistemas de consórcio e 74,2 a 14,6% entre os sistemas de rotação (Fig. 5a; 5c). Os valores mais baixos do EPSA foram observados no sistema de rotação P/SF e Soja em monocultura.

Mudanças sazonais na temperatura média do solo (T<sub>solo</sub>) foram observadas entre os sistemas. Em sistemas de monoculturas e consórcio a T<sub>solo</sub> variou entre 36 e 15,6°C (Fig. 5b), enquanto em sistemas de rotação 35,8 e 16,6°C (Fig. 5d). A maior temperatura média do solo foi observada sob soja em monocultura (27,3°C), que mostrou aumento ao longo do tempo, principalmente após a colheita, quando o solo se encontrava exposto e com resíduos culturais em decomposição. No entanto, as médias mais

baixas foram observadas na vegetação nativa (23,2°C), em condições de solo totalmente protegidas por serrapilheira, o que também contribuiu para a manutenção da US.

As maiores magnitudes do FCO<sub>2</sub> do solo ocorreram após um evento de precipitação de 49 mm (3/12/2015), com aumentos de 15,4 para 31,6 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (16,1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e de 9,7 para 18,9 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (9,2 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) entre os sistemas de rotação SF/S e S/SF, respectivamente (Fig. 1b). No entanto, neste mesmo mês ocorreu outro evento de 36,1 mm (14/12/2015) que contribuiu para aumentos de 7,2 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (M), 8,2 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (SF), 6 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (S) e 10,5 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (P) em monoculturas e sistemas de consórcio (Fig.1a) e de 8 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e (SF/P) 7,2 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (P/SF) nos sistemas de rotação cultural (Fig. 1b). No mesmo período, observou-se ainda que os FCO<sub>2</sub> do solo apresentaram aumento de 14,3 CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> em Cerrado nativo (Fig. 1a). O EPSA variou entre 40 e 62%, reafirmando a hipótese de que altas taxas de fluxos de CO<sub>2</sub> podem ocorrer quando o solo apresenta aumentos no conteúdo de água, o que favorece a atividade microbiana.



**Fig. 5** – Espaço poroso saturado por água (EPSA) e Temperatura do Solo (Tsolo) em sistemas de monoculturas, consórcio, rotações e vegetação nativa. Pontos são Média  $\pm$  s.e. **(a)** [Milho (n = 42), Santa Fé (n = 42), Soja (n = 42), Piatã (n = 42) e Cerrado (n = 42)], **(b)** [S/SF (n = 39), SF/S (n = 39), P/SF (n = 39), SF/P (n = 39) e Cerrado (n = 42)], durante a estação de crescimento e após a colheita de Novembro 2015 a Outubro 2016.

A correlação de Pearson foi utilizada para comparar a influência de fatores ambientais no FCO<sub>2</sub> do solo (Tabela 3). A T<sub>solo</sub> não apresentou influência significativa nas emissões de CO<sub>2</sub> do solo em quase todos os sistemas, com exceção do sistema de Soja em monocultivo que foi significativamente correlacionado com FCO<sub>2</sub> ( $p < 0,05$ ) ( $r = -0,318$ ;  $p < 0,0403$ ). No entanto, relação significativa entre o FCO<sub>2</sub> do solo e EPSA foi encontrada para todos os sistemas de cultivo, com maiores correlações para

S ( $r = 0,714$ ,  $p < 0,0001$ ) e P/SF ( $r = 0,719$ ,  $p < 0,0001$ ), respectivamente. Os resultados sugeriram que, sob mudança de uso do solo e condições climáticas semelhantes ao desse estudo, o FCO<sub>2</sub> pode ser altamente influenciado pelo EPSA quando comparado a Tsolo.

**Tabela 3.** Coeficientes de correlação de Pearson entre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo e as variáveis climáticas em sistemas de monoculturas, consórcio, rotações e vegetação nativa ( $p < 0,05$ ).

Sistemas de Cultivo	Efluxo de CO <sub>2</sub> do Solo	
	Temperatura do Solo	EPSA
C	0,091 <sup>ns</sup> (n = 42 ; p < 0,5670)	0,636* (n = 41; p < 0,0001)
M	0,019 <sup>ns</sup> (n = 42; p < 0,9070)	0,576* (n = 41; p < 0,0001)
SF	0,053 <sup>ns</sup> (n = 42; p < 0,7380)	0,676* (n = 41; p < 0,0001)
S	-0,318* (n = 42; p < 0,0403)	0,714* (n = 41; p < 0,0001)
P	-0,006 <sup>ns</sup> (n = 42; p < 0,9690)	0,592* (n = 41; p < 0,0001)
S/SF	-0,254 <sup>ns</sup> (n = 38; p < 0,1230)	0,555* (n = 37; p < 0,0001)
SF/S	0,245 <sup>ns</sup> (n = 38; p < 0,1390)	0,684* (n = 37; p < 0,0001)
P/SF	0,064 <sup>ns</sup> (n = 38; p < 0,7010)	0,719* (n = 36; p < 0,0001)
SF/P	0,215 <sup>ns</sup> (n = 38; p < 0,1960)	0,540* (n = 37; p < 0,0001)

<sup>ns</sup> Não significativo e \* Significativo para  $< 0,05$ , respectivamente,

### 1.3.2 Impactos da mudança do uso do solo e da rotação de culturas no efluxo de CO<sub>2</sub> e propriedades do solo

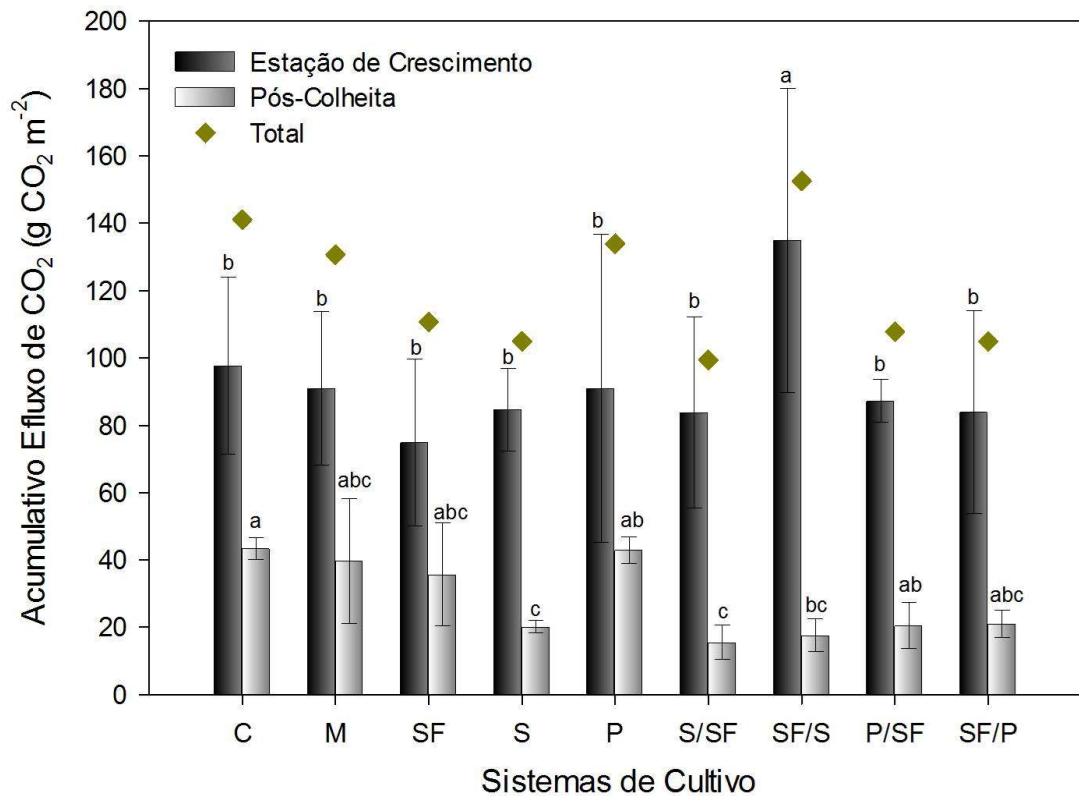
Com base nos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, as emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> foram significativamente maiores durante a estação de crescimento (período de 154 dias), quando comparado ao período após a colheita (período de 191 dias). O cumulativo de CO<sub>2</sub> no período de crescimento para os tratamentos com monoculturas e consórcio (M, SF, S e P), foram estimados em 91, 75, 84,7 e 91 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, não sendo verificadas diferenças significativas entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ; Fig,6), Entretanto, neste mesmo período os sistemas de rotação anual (S/SF, SF/S, P/SF e SF/P), apresentaram cumulativos de CO<sub>2</sub> estimados em 83,9, 134,9, 87,3 e 83,9 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>. Verificou-se que o sistema de rotação SF/S apresentou diferença significativa em relação aos demais sistemas e impactou a emissão cumulativa de CO<sub>2</sub> ( $p < 0,05$ ; Fig. 6), sendo superior em até 38%. As emissões de CO<sub>2</sub> pela vegetação de cerrado nativo foi significativamente



superior (97,7 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>) entre 23 a 7% (p < 0,05; Fig. 6), exceto quando comparado com o sistema de rotação SF/S, que emitiu mais CO<sub>2</sub> do solo que o cerrado nativo.

Em contrapartida, após a colheita (período de 191 dias), o valor acumulado de CO<sub>2</sub> do solo foi significativamente inferior em todos os tratamentos, quando comparados aos observados na estação de crescimento. Pode-se observar na Fig. 6 que, entre as monoculturas e consórcio, apenas os sistemas com M e SF não diferiram entre si estatisticamente (p < 0,05). Neste mesmo período, o valor acumulado de emissão de CO<sub>2</sub> do solo foi estimado em 39,7, 35,7, 20,3 e 42,9 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, para os sistemas M, SF, S e P, respectivamente. Estes valores são superiores e estatisticamente diferentes dos observados nos sistemas de rotação, onde os valores acumulados de emissões de CO<sub>2</sub> foram: 15,6; 17,7; 20,5 e 21,1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, para S/SF, SF/S, P/SF e SF/P, respectivamente.

As maiores emissões de CO<sub>2</sub> durante este período estiveram relacionadas principalmente à rápida decomposição da matéria orgânica do solo e pequenas alterações nos fatores microclimáticos, que podem causar grandes variações no efluxo de CO<sub>2</sub>. Os resultados deste estudo mostraram ainda que, após a colheita o valor acumulado do FCO<sub>2</sub> no solo do cerrado nativo foi de 43,4 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, sendo este valor superior entre 1% (P) e 64% (S/SF) quando comparado aos sistemas com monoculturas e rotação de culturas. O FCO<sub>2</sub> acumulado na estação de crescimento mostrou a seguinte ordem: SF/S > C > M = P > P/SF > S > S/SF > SF/P > SF. As emissões da estação de crescimento foram superiores em até 87% quando comparadas ao período após a colheita. No entanto, após a colheita, quando a área estava em pousio, as emissões de CO<sub>2</sub> continuaram, porém com valores menores. Este período coincidiu com a estação seca quando houve redução da umidade e aumento da temperatura do solo, fatores que desfavoreceram a atividade microbiana. Assim, neste período as emissões de CO<sub>2</sub> do solo apresentaram a seguinte ordem entre os sistemas: C > P > M > SF > SF/P > P/SF > S > SF/S > S/SF.



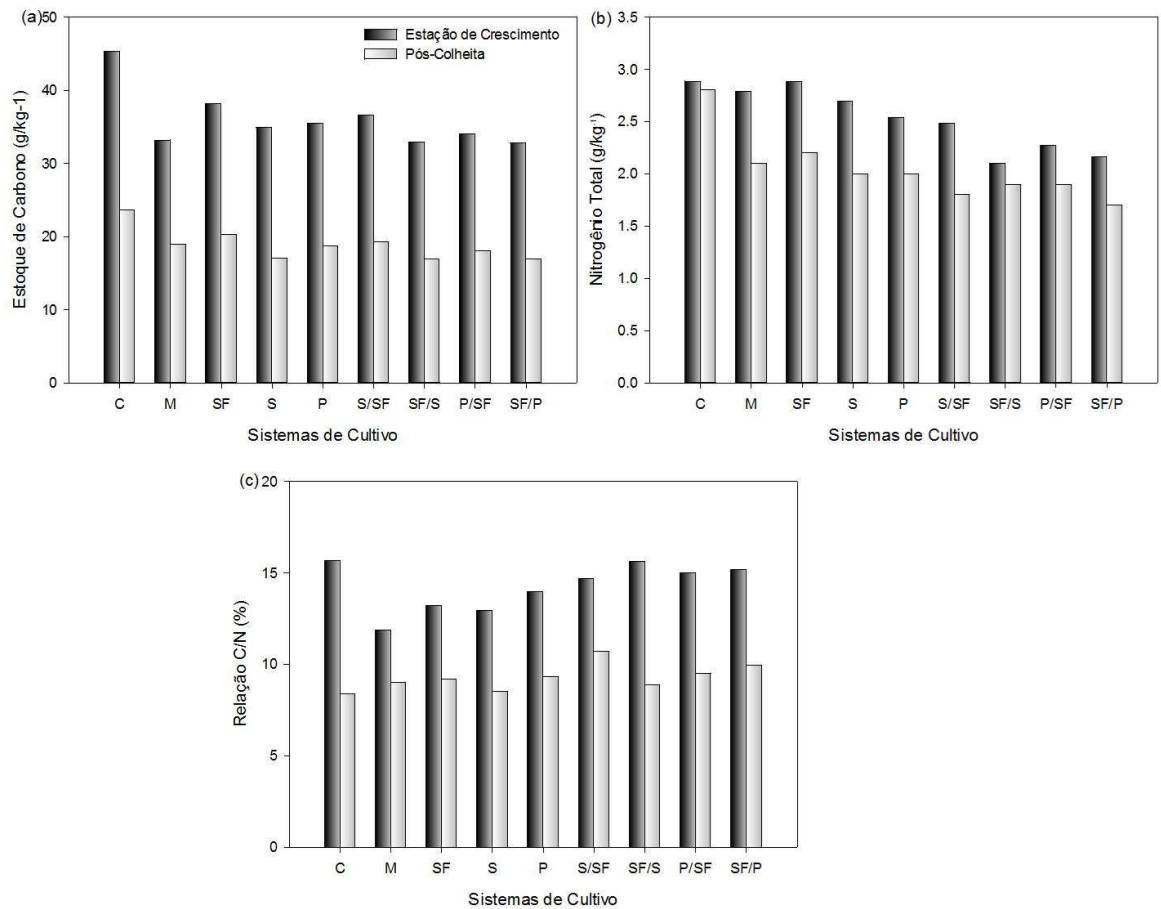
**Fig. 6** – Valores acumulados de emissão de CO<sub>2</sub> do solo ± e,s durante a estação de crescimento (154 dias), após a colheita (191 dias) e total (345 dias) em diferentes sistemas de cultivo.

Os estoques de carbono orgânico do solo (EstC) (Fig.7a), nitrogênio total (NT) (Fig.7b) e especialmente a relação C/N (Fig. 8c), observado durante toda a estação de crescimento, contribuíram para o aumento do FCO<sub>2</sub> do solo. Neste período, os níveis de EstC variaram entre 32,8 e 45,3 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. O EstC da vegetação nativa foi superior aos sistemas agrícolas entre 15,1 e 27,8%. Além disso, essa variação do EstC a 0-10 cm de profundidade mostrou que todos os sistemas atuaram como fonte de emissão de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera quando comparados ao cerrado nativo. Entretanto, as menores perdas de EstC foram verificadas durante o período após a colheita, quando o conteúdo de EstC variou entre 16,9 e 23,6 g kg<sup>-1</sup>. Esses resultados demonstraram que a ausência de palhada sob o solo promoveu um menor consumo de CO<sub>2</sub> pelos sistemas agrícolas, comparada à condição inicial, quando as plantas estavam em pleno

desenvolvimento e havia maior aporte de material vegetal sob o solo. Contudo, o EstC acumulado entre as duas estações seguiu a ordem: C > SF > S/SF > P > S > P/SF > M > SF/P > SF/S.

Durante a estação de crescimento, o teor de NT variou de 2,8 a 2,1 g kg<sup>-1</sup> e de 2,8 a 1,7 g kg<sup>-1</sup> após a colheita (Fig. 7b). Os níveis de N (alto ou baixo) influenciam a entrada de carbono no solo e podem inibir a atividade biológica, limitando o processo de umidificação, especialmente quando os níveis atuais são baixos. No entanto, altas relações C/N foram verificadas durante a estação de crescimento nos sistemas de rotação e cerrado nativo (Fig. 8c). Neste período, a relação C/N variou entre 11,9 e 15,7%, alcançando valores mais baixos durante a pós-colheita de 10,7 e 8,4%, respectivamente. A distinção entre os dois períodos pode ser atribuída a uma maior proporção de material lignificado (caules e sabugo de milho) nos sistemas de rotação em que a palha foi derivada do milho e dos restos culturais de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Piatã. Além disso, fatores como a heterogeneidade e maior quantidade de resíduos adicionados inicialmente influenciaram diretamente na obtenção de altos valores de C/N durante a estação de crescimento.

Para distinção dos sistemas de uso do solo avaliados neste trabalho, utilizou-se a análise de componentes principais (PCA), onde foram gerados dois componentes (PC1 e PC2) para os atributos físicos (Ds, EPSA, Tsolo), químicos (pH, COS, NT e MOS) e biológicos do solo (CBM, qMIC, qCO<sub>2</sub>, RBS e FCO<sub>2</sub>) considerando todo o período em que foi realizado o estudo (Fig.7). Análise dos resultados da PCA permitiram observar que os diferentes sistemas de manejo do uso do solo, formaram quatro grupos, que tendem a se distinguir no diagrama em função da similaridade das variáveis estudadas. O primeiro grupo compreende o sistema em monocultivo (P) e consórcio (SF); o segundo foi representado por monocultivo com S e sistema de rotação anual P/SF; S/SF, o terceiro representado pelo C e o quarto compreende os sistemas de rotação SF/P e SF/S, e M em monocultivo.

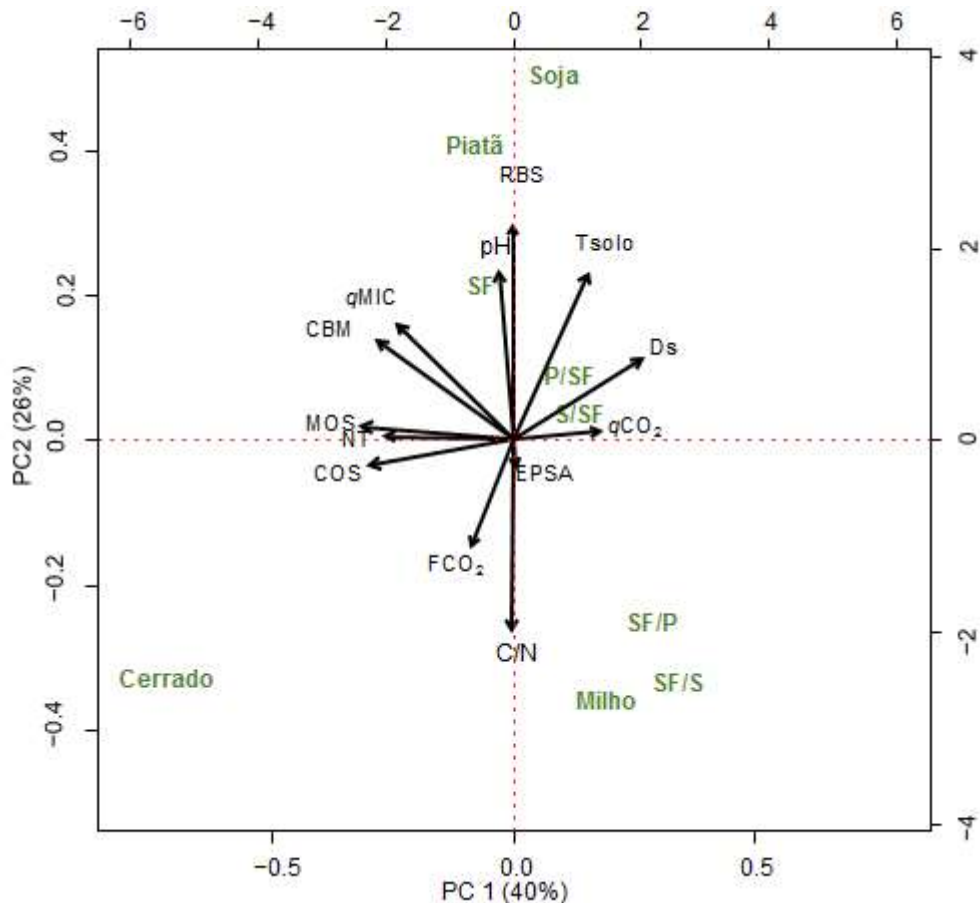


**Fig. 7** – Variação sazonal de **(a)** Estoque de carbono orgânico do solo (EstC), **(b)** Nitrogênio orgânico total (NT) e **(c)** relação C/N, durante a estação de crescimento (154 dias) e após a colheita (191 dias) em diferentes sistemas de cultivo.

O PC1 explicou 40% da variância total e PC2 26% (Fig. 8), Os dois componentes representaram aproximadamente 66% da variância total. O PC1 foi caracterizado pelo maior número de propriedades do solo, referente à variação original que incluiu, COS, CBM, NT,  $qMIC$ ,  $qCO_2$ , MOS e Ds. O PC2 foi melhor caracterizado pelos fatores:  $FCO_2$ , RB, C:N, pH, T<sub>solo</sub> e EPSA, que representam a variância restante.

Os sistemas Piatã e Santa-Fé apresentaram o maior número de associações, incluindo atributos químicos e biológicos do solo (pH, RBS,  $qMIC$ , CBM e MOS) (Fig. 8). Os efeitos desses sistemas sob os atributos do solo constituem uma resposta importante à qualidade dos agroecossistemas. Os atributos  $qCO_2$ , T<sub>solo</sub> e Ds foram sensíveis aos sistemas sob Soja e

rotação anual P/SF e S/SF. As variáveis T<sub>so</sub> e D<sub>s</sub> afetam diretamente a atividade microbiana, bem como a saída de CO<sub>2</sub> como final por produto desta atividade (Fig. 8). O cerrado nativo foi associado aos valores de FCO<sub>2</sub>, COS e NT. A resposta desses parâmetros ao meio ambiente mostra que, quando os ecossistemas nativos são alterados por atividades antrópicas, o equilíbrio dinâmico é quebrado e, normalmente, as entradas de C e N são menores do que as saídas, o que leva à redução da quantidade e modificação da qualidade de MOS. Assim, os ecossistemas nativos tornam-se mais sensíveis às práticas de manejo em relação aos outros.



**Fig. 8** – Análise de componentes principais de atributos do solo em diferentes sistemas de cultivo. Correlação entre os atributos do solo (Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo FCO<sub>2</sub>, carbono da biomassa microbiana CBM, respiração basal do RB, carbono orgânico do solo COS, nitrogênio orgânico total NT, quociente microbiano qMIC, quociente metabólico qCO<sub>2</sub>, relação C/N, pH do solo, densidade aparente do solo D<sub>s</sub>, matéria orgânica do solo MOS,

temperatura do solo do T<sub>solo</sub>, espaço poroso saturado por água EPSA e componentes principais, projeções PC1 e PC2, de acordo com os sistemas de cultivo (M; SF; S; P; S/SF; SF/S; P/SF; SF/P e C).

Outros sistemas tais como M, SF/S e SF/P estiveram associados a uma relação EPSA e C/N. Esses resultados nos permite observar que o uso de sistemas de consórcio, diversifica a composição vegetal e os resíduos culturais, proporcionando maior sustentabilidade do solo. Além disso, pode-se inferir que sistemas de rotação que incluem gramíneas tais como a *Urochloa brizantha* cv. Piatã podem apresentar melhores condições para manter a umidade do solo e desenvolvimento radicular. Contudo, quando utilizados no SPD esses sistemas apresentam material vegetal considerados de alta relação C/N, com lenta taxa de decomposição, o que permite manter a MOS fisicamente protegida e inacessível aos microrganismos, isso garante maior permanência do COS, com implicações positivas como a menor emissão de CO<sub>2</sub> e melhoria da estrutura do solo.

## **1.4 DISCUSSÃO**

### **1.4.1 Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em diferentes sistemas de cultivos**

Os diferentes tipos de manejo e cobertura do solo influenciam diretamente a quantidade de matéria orgânica do solo (MOS) a transformação microbiana. As emissões de CO<sub>2</sub> são totalmente dependentes da qualidade do solo. Nossos resultados mostraram maiores taxas de emissões de CO<sub>2</sub> em monoculturas e consórcio em relação aos sistemas de rotação cultural. Esses resultados podem estar associados à alta atividade microbiana que contribui para o aumento da taxa de decomposição da MOS devido à exposição a microrganismos de resíduos e suas enzimas. Estudos relataram aumentos nas taxas de respiração do solo quando ocorreu mudança do uso da terra e houve condições favoráveis à atividade microbiana (Lv et al., 2016; Galford et al., 2013; Zhang et al., 2013; Zhao et al., 2012).

No estudo de Buysse et al. (2016), a emissão de FCO<sub>2</sub> do solo entre os campos de milho ( $13,53 \pm 7,0$  g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e pastagens ( $18,55 \pm 8,17$  g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) foram influenciadas pelo carbono orgânico do solo, US e mudanças no uso da terra e diversidade na rotação de culturas. Esses autores relatam ainda que o processo de variação, produção e transporte do CO<sub>2</sub> no solo também está relacionado às características edafoclimáticas. Esses resultados são importantes para avaliar como os diferentes sistemas e ecossistemas agrícolas se comportam em relação à emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Estudos anteriores também relataram uma diferença entre as emissões de CO<sub>2</sub> do solo sob uma floresta de transição Amazônia-Cerrado ( $20,83 \pm 2,50$  g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e pastagens ( $18,82 \pm 1,94$  g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) localizadas no norte de Mato Grosso, Brasil (Pinto-Junior et al., 2009). Este estudo indicou que o FCO<sub>2</sub> esteve associado às chuvas da região, apresentando maiores valores durante a estação chuvosa e valores mais baixos na estação seca.

Assim, as mudanças na precipitação afetam as emissões de CO<sub>2</sub> do solo, especialmente quando há uma redução da água do solo, que pode ser observada a partir do espaço poroso saturado por água (EPSA). Alguns estudos relataram que a alta variação apresentada pela US foi fator determinante para a atividade microbiana do solo e, portanto, influenciou efetivamente o processo do FCO<sub>2</sub>, (Iamaguti et al., 2015; Wagle & Kakani, 2014; Teixeira et al., 2011; Moitinho et al., 2013). A influência desse fator no FCO<sub>2</sub> do solo ocorre principalmente quando há uma redução da água do solo, fazendo com que os agentes de decomposição diminuam suas atividades como mecanismo de defesa (Metcalf et al., 2010). Assim, a vegetação começa a investir em mudanças na morfologia do sistema radicular, como uma estratégia adicional para aumentar a absorção de água e reduzir a área específica das folhas para restringir a perda de água. A relação entre o rápido aumento das emissões de CO<sub>2</sub> após eventos de precipitação ou de irrigação e o consequente aumento do teor de água em solos secos tem sido descrita por outros estudos (Jenerette et al., 2008; Beare et al., 2009; Zhang et al., 2011).

Linn & Doran (1984) relatam que a aeração do solo é um fator limitante para a atividade microbiana, o processo aeróbio declina

rapidamente quando os valores de EPSA estão acima de 60%. No entanto, esses autores também relatam que valores entre 30 e 60% contribuem para uma relação linear entre os processos aeróbicos e EPSA. Neste estudo, apenas 5% (M e SF/P) e 2% (P) dos valores de EPSA foram superiores a 60%, enquanto no cerrado nativo, esses valores atingiram 7%. Não houve valores de EPSA superiores a 60% nos outros tratamentos.

A mudança da tendência diária da Tsolo também pode afetar o FCO<sub>2</sub>. A relação entre a Tsolo e as emissões de CO<sub>2</sub> também foi descrita por muitos estudos (Zhou et al., 2015; Tucker, 2014; Atarashi-Andoha et al., 2012). Liebig et al. (2013), encontraram uma correlação positiva entre FCO<sub>2</sub> e Tsolo ( $r = 0,71$ ;  $p \leq 0,01$ ). Outros estudos também demonstram uma dependência do FCO<sub>2</sub> com a Tsolo quando o modelo exponencial proposto por Van't Hoff (1898) foi usado para determinar a Q<sub>10</sub>, indicando quanto da respiração do solo aumenta quando há um aumento de 10°C na Tsolo (Gomes et al., 2016; Yu et al., 2015; Shi et al., 2014). Vale ressaltar que o fator que regula as condições temperadas é a temperatura e isso pode ter contribuído para obter uma forte correlação positiva entre esses fatores.

Na região amazônica, Silva et al. (2016) relataram que o FCO<sub>2</sub> foi sensível às mudanças da Tsolo e a correlação também foi negativa entre essas variáveis ( $r = -0,26$ ;  $P < 0,003$ ). No estudo em questão, a Tsolo mostrou pouca influência nas emissões de CO<sub>2</sub> do solo em áreas sob monocultura, consórcio, sistemas de rotação e condições do cerrado nativo. Trabalhos anteriores sugerem que, quando as variações sazonais da temperatura do solo são pequenas, como em regiões tropicais, a US deve ser testada e levada em consideração como um índice mais efetivo para estimar variações sazonais nas taxas de respiração do solo (Kosugi et al., 2007). Em nosso estudo, a variação diária de FCO<sub>2</sub> foi significativamente correlacionada com EPSA em todos os sistemas de cultivo, sugerindo que este tenha sido o principal fator abiótico de controle do FCO<sub>2</sub> do solo nesses sistemas. Esse fator pode ser explicado pela sazonalidade pluviométrica das condições tropicais que são reguladoras desses processos. Nossos resultados estão de acordo com os relatados por Chavez et al. (2009) ( $r = 0,79$ ,  $p < 0,0004$ ), que avaliou o efluxo de CO<sub>2</sub> em um latossolo típico no sistema de plantio direto no sul do Brasil e verificou que houve correlação



linear positiva entre EPSA e FCO<sub>2</sub>. Outros estudos também relatam a interação entre fatores abióticos e FCO<sub>2</sub> ( $p \leq 0,05$ ) com a diminuição da respiração do solo em condições de alta temperatura e solo seco e resultado oposto observado em condições úmidas do solo (Garten et al., 2009).

Resultados semelhantes foram observados por Wagle & Kakani (2014), que avaliaram o efeito da US sobre as emissões de FCO<sub>2</sub> do solo e observaram que a taxa de FCO<sub>2</sub> aumentou rapidamente com o aumento da disponibilidade de água em níveis mais baixos de US, manteve-se relativamente constante próximo da faixa US ideal e começou a diminuir quando a US atingiu níveis mais elevados. Com isso, os resultados desse estudo corroboram com as três fases da resposta da respiração do solo a umidade do solo, mencionadas na literatura: (1) a atividade metabólica aumenta com a disponibilidade de água em solos secos (Howard & Howard, 1993), (2) a respiração do solo apresenta uma baixa resposta a US na faixa próxima a ideal e (3) deficiências de oxigênio limitam a respiração aeróbica em solo muito úmido (Skopp et al., 1990). Contudo, o conhecimento da contribuição relativa da US para a variação do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, tanto em escalas sazonais, como anuais, é particularmente importante em regiões onde mudanças profundas nos padrões de precipitação são esperadas (Kishimoto-Mo et al., 2015).

#### **1.4.2 Fatores bióticos que controlam o FCO<sub>2</sub> do solo**

No presente estudo, verificou-se que todos os sistemas apresentaram perdas de carbono durante as duas estações, com valores inferiores ao cerrado nativo. Esses resultados podem estar relacionados à influência das práticas de manejo, o que pode ter contribuído para a mineralização da MOS e, conseqüentemente, maiores emissões de FCO<sub>2</sub>. De acordo com Neves et al. (2004), o menor teor de carbono orgânico do solo em pastagens agrícolas e florestais está diretamente relacionado ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub>. Sob plantio direto, os maiores níveis de COS podem ser observados até 20 cm de profundidade e estão relacionados à maior contribuição da biomassa e à redução no uso de implementos agrícolas, o que favorece o aumento da MOS e diminui a decomposição do material orgânico fisicamente protegido

nos agregados do solo (Jantalia et al., 2007). No entanto, a implementação de sistemas de integração lavoura-pecuária pode promover melhorias na qualidade dos atributos do solo ao longo dos anos, tendendo a uma estabilização do sistema. Os resultados deste estudo, em diferentes sistemas de uso da terra, também pode refletir o status de carbono anual, considerando sequestro e emissão. Álvaro-Fuentes et al. (2007), avaliou as emissões de CO<sub>2</sub> induzidas pelo tipo de manejo do solo e relatam que as diferenças acumuladas na quantidade de CO<sub>2</sub> emitida foram geradas por meio de diferentes condições para a atividade microbiana do solo, desde a colheita até o plantio direto.

Indicadores microbiológicos da qualidade do solo foram utilizados neste estudo para detectar possíveis mudanças ambientais e biológicas em função do manejo do solo adotado. Estudos recentes relataram a importância do uso da análise multivariada para identificar a sensibilidade dos indicadores de qualidade do solo às mudanças nos sistemas de uso da terra (Fiener et al., 2012; Graf et al., 2012; Li et al., 2011). Xavier et al. (2006), avaliando o CBM e a fração leve da matéria orgânica do solo em sistemas agrícolas orgânicos e convencionais, mostraram que há um  $qMIC$  maior em pastagens quando comparado com culturas agrícolas. Glaeser et al. (2010) relatam que esses resultados indicam o aumento de nutrientes no sistema de pastagem através do CBM, que apresenta um longo período de tempo no solo e pode atuar como fator direto para o sequestro de carbono do solo. No entanto, nas circunstâncias em que o CBM está sob algum fator de estresse (deficiência nutricional, acidez, etc.), a capacidade de usar carbono é reduzida (Wardle, 1994). Este tipo de informação permite a adaptação de estratégias de recuperação de áreas degradadas (Muniz et al., 2011). O  $qCO_2$  foi a variável que melhor interpretou a taxa de respiração do solo por unidade de CBM e quando o CBM se torna mais eficiente na utilização dos recursos do agroecossistema, menos carbono é perdido como CO<sub>2</sub> pela respiração e uma maior proporção de carbono é incorporada aos tecidos microbianos (Cunha et al., 2011). Valores mais baixos de  $qCO_2$  indicam agroecossistemas mais estáveis e a substituição de vegetação nativa acelera a decomposição de resíduos com aumento do valor de  $qCO_2$  (Silva et al., 2007).

Em geral, os resultados obtidos neste estudo mostram que a contribuição individual de cada atributo microbiano se mostrou eficiente para distinguir os sistemas de uso do solo. Além disso, a análise multivariada mostrou o potencial dos atributos do solo como indicadores sensíveis da mudança de uso da terra.

## **1.5 CONCLUSÃO**

Os sistemas de rotação (S/SF; SF/S; P/SF; SF/P) apresentaram menores emissões de CO<sub>2</sub> (4,2 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) em relação ao solo sob monocultura (M; S e P) e consórcio (SF) (4,5 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e vegetação nativa de cerrado (4,9 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) durante a safra agrícola 2015/2016. Em geral, as baixas emissões ocorreram durante o período de pousio influenciado principalmente pelo baixo teor de água do solo (US) e decomposição dos resíduos da cultura (MOS), que aliada a outros fatores, pode inibir os processos aeróbicos. Nossos resultados mostram que os atributos de qualidade do solo foram sensíveis aos diferentes sistemas de uso da terra e a análise dos componentes principais contribuiu para compreender as diferenças e semelhanças entre os sistemas de monocultura, consórcio, rotações e vegetação nativa de cerrado. Os sistemas de rotação anual S/SF, SF/S, P/SF e SF/P, podem ser utilizados como estratégias para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera, além de ser uma alternativa de interesse para a produção agrícola sustentável e consolidação de uma Economia de Baixas Emissões de Carbono na Agricultura (Programa ABC). Práticas e tecnologias como essas podem reduzir as emissões de gases do efeito estufa e simultaneamente ser mais conservativo aliado a incrementos na produtividade.

## **1.6 AGRADECIMENTOS**

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa ao primeiro autor e pelo financiamento do projeto em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; ao Centro Nacional de Milho e Sorgo pela infraestrutura para o desenvolvimento desta

pesquisa; aos técnicos da Embrapa Milho e Sorgo pela ajuda na coleta dos dados de campo; e ao Laboratório de Plantas Daninhas da Universidade Federal de Viçosa, pela ajuda nas análises microbiológicas.

## 1.7 REFERÊNCIAS

Álvaro-Fuentes, J., C. Cantero-Martínez, M. V. López, and J. L. Arrúe. 2007. Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil & Till. Resear.* 96:331-341. doi:10.1016/j.still.2007.08.003

Atarashi-Andoha, M., J. Koarashia, S. Ishizuka, and K. Hirai. 2012. Seasonal patterns and control factors of CO<sub>2</sub> effluxes from surface litter, soil organic carbon, and root-derived carbon estimated using radiocarbon signatures. *Agric. and Forest Meteor.* 152:149–158. doi:10.1016/j.agrformet.2011.09.015

Baretta, D., M. L. C. Bartz, I. A. Fachini, R. Anselmi, T. Zortéa, and C. R. D. Maluche-Baretta. 2014. Soil fauna and its relation with environmental variables in soil management systems. *Revist. Ciênc. Agron.* 45:871-879. doi: 10.1590/S1806-66902014000500002

Bartz, M. L. C., G. C. Brown, M. G. Rosa, O. Klauberg Filho, S. W. James, T. Decaens, and D. Barreta. 2014. Earthworm richness in land-use systems in Santa Catarina, Brazil. *App. Soil Ecol.* 83:59-70. doi:10.1016/j.apsoil.2014.03.003

Beare, M. H., E. G. Gregorich, and P. ST-Georges. 2009. Compaction effects on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biol. & Bioch.* 41:611-621. doi:10.1016/j.soilbio.2008.12.024

Blake, G. R., and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. In: A. Klute, editor, *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd. ed. Madison, WI. p.363-375.

BRASIL. 2012. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). MAPA/ACS.<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/planoabc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf/> (accessed 10 apr. 2017).

Buragienė, S., E. Sarauskis, K. Romaneckas, A. Sakalauskas, A. Uzupis, and E. Katkevicius. 2011. Soil temperature and gas (CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>) emissions from soils under different tillage machinery systems. *J. of Food, Agric. & Envir.* 9:480-485.

Bustamante, M. M. C., L. A. Martinelli, J. P.H.B. Ometto, J. B. Carmo, V. Jaramillos, M. Gavitos, P. Araujo, and A. T. A. Austin, T. Perez, and S. Marquina. 2014. Innovations for a sustainable future: rising to the challenge of nitrogen greenhouse gas management in Latin America. *C. Opin. in Envir. Sust.* 9:73-81. doi:10.1016/j.cosust.2014.09.002

Bustamante, M. M. C., G. B. Nardoto, A. S. Pinto, J. C. F. Rezende, F. S. C. Takahashi, and L. C. G. Vieira. 2012. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. *Brazilian J. of Biol.* 72:655-671. doi:10.1590/S1519-69842012000400005

Buyse, P., C. R. Flechard, Y. Hamon, and V. Viaud, 2016. Impacts of water regime and land-use on soil CO<sub>2</sub> efflux in a small temperate agricultural catchment. *Biogeochemistry.* 130: 267–288. doi:10.1007/s10533-016-0256-y

Carvalho, J.L.N., G. S. Raucci, L. A. Frazao, C. E. P. Cerri, M. Bernoux, and C. C. Cerri. 2014. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. *Agric. Ecosyst. & Envir.* 183:167–175. doi:10.1016/j.agee.2013.11.014

Chaplot, V., K. Bdalla, M. Alexis, H. Bourennane, F. Darboux, P. Dlamini, P. Everson, C. Mchunu, D. Muller-Nedebock, M. Mutema, K. Quenea, H.

Thenga, and P. Chivenge. 2015. Surface organic carbon enrichment to explain greater CO<sub>2</sub> emissions from short-term no-tilled soils. *Agric. Ecosys. & Envir*, 203:110–118. doi:10.1016/j.agee.2015.02.001

Chavez, L. F., T. J. C. Amado, C. Bayer, N. La Scala Jr, L. F. Scobar, J. Fiorin, and B. Campos. 2009. Carbon dioxide efflux in a Rhodic Hapludox as affected by tillage systems in southern Brazil. *Revis. B. de Ciênc. do Solo*. 33:325-334.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2016. Observatório Agrícola.

[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_07\\_29\\_15\\_12\\_51\\_boletim\\_graos\\_julho\\_2016.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_07_29_15_12_51_boletim_graos_julho_2016.pdf). (Accessed 12 apr. 2017).

Cunha, E. Q., L. F. Stone, J. A. A. Moreira E. P. B. Ferreira, A. D. Didonet, and W. M. Leandro. 2011. Sistemas de preparo de solo e culturas de cobertura na produção orgânica de milho e feijão. I - Atributos físicos do solo. *Revis. B. de Ciênc. do Solo*, 35:589-602. doi: 10.1590/S0100-06832011000200029

Elsgaard, L., C. M. Gorres, C. C. Hoffmann, G. Blicher-Mathiesen, K. Schelde, and S. O. Petersen. 2012. Net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *Agric. Ecosys. & Envir*. 162:52-67. doi:10.1016/j.agee.2012.09.001

EMBRAPA. 1997. Manual de métodos de análise de solo. 2nd. EMBRAPA-CNP. 212. Rio de Janeiro, RJ.

EMBRAPA. 2014. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Distrito Federal.

Fiener, P., V. Dlugos, and W. Korres. 2012. Schneider. Spatial variability of soil respiration in a small agricultural watershed - Are patterns of soil

redistribution important?. *Catena*. 94:3-16. doi:  
org/10.1016/j.catena.2011.05.014

Galford, G., B. Soares-Filho, and C. E. P. Cerri. 2013. Prospects for land-use sustainability on the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. *Philos. T. R. Society*. 368:1-5. doi.org/10.1098/rstb.2012.0171

Garten, C. T., A. T. Classen, and R. J. Norby. 2009. Soil moisture surpasses elevated CO<sub>2</sub> and temperature as a control on soil carbon dynamics in a multi-factor climate change experiment. *Plant Soil*. 19:85-94. doi:10.1007/s11104-008-9851-6

Genro, T. C. M., B. M. Faria, J. Rossetto, L. Cezimbra, L. J. Savian, P. C. Faccio, C. Bayer, A. Berndt, M. A. P. Silva, M. J. I. Yokoo, L. L. Cardoso, P. P. A. Oliveira, L. B. S. Volk, and G. Azevedo. 2014. Desempenho e emissão de metano de Novilhos Hereford em pastagem nativa usada em diferentes níveis de intensificação. *Anuario Hereford & Braford, Bagé* 6 (201):192-197.

Giardina, C. P., Litton, C. M., Crow, S. E., Asner, G. P. 2014. Warming-related increases in soil CO<sub>2</sub> efflux are explained by increased below-ground carbon flux. *Nature Climate Change*, 4(9), 822–827. doi: 10.1038/nclimate2322

Glaeser, D. F.; F. M. Mercante, M. A. M. Alves, R. F. Silva, and O. M. Komori. 2010. Biomassa microbiana do solo sob sistemas de manejo orgânico em cultivos de café. *Ensaio e Ciência*. 14:103-114.

Gomes, L. C., I. M. Cardoso, E. S. Mendonça, R. B. A. Fernandes, V. S. Lopes, and T. S. Oliveira. 2016. Trees modify the dynamics of soil CO<sub>2</sub> efflux in coffee agroforestry systems. *Agric. and Forest Meteorol.* 224:30-39. doi:10.1016/j.agrformet.2016.05.001

Graf, A., M. Herbst, L. Weihermüller, J. A. Huisman, N. Prolingheuer, L. Bornemann, and H. Vereecken. 2012. Analyzing spatiotemporal variability of

heterotrophic soil respiration at the field scale using orthogonal functions. *Geoderma*. 181:91-101. doi:10.1016/j.geoderma.2012.02.016

Grossi, M. C., F. B. Justino, C. L. T. Andrade, E. A. Santos, R. A. Rodrigues, and L. C. Costa. 2013. Modeling the impact of global warming on the sorghum sowing window in distinct climates in Brazil. *Europ. J. of Agron.* 51:53-64. doi:10.1016/j.eja.2013.07.002

Haugwitz, M. S., L. Bergmark, A. Priemé, S. Christensen, C. Beier, and A. Michelsen. 2014. Soil microorganisms respond to five years of climate change manipulations and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> in a temperate heath ecosystem. *Plant Soil*. 374:211-222. doi:10.1007/s11104-013-1855-1

Howard, D.M., Howard, P.J.A. 1993. Relationships between CO<sub>2</sub> evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biol Biochem*. 25:1537–1546. doi: 10.1016/0038-0717(93)90008-Y

Hungria, M., J. C. Franchini, O. Brandão-Junior, G. Kaschuk, and R. A. Souza. 2009. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil tillage and two crop-rotation systems. *Appl. Soil Ecol*. 42:288-296. doi:10.1016/j.apsoil.2009.05.005

Iamaguti, J. L., M. R. Moitinho, D. B. Teixeira, E. S. Bicalho, A. R. Panosso, and N. La Scala. 2015. Preparo do solo e emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área canavieira. *Rev. Br. de Eng. Agr. e Amb*. 19:497-504. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press. 881. Cambridge, U.K.

IPCC, 2007. *Climate change (2007). The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.



Jantalia, C. P., D. V. S. Resck, B. R. J. Alves, L. Zotarelli, S. Urquiaga, and R. M. Boddey. 2007. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. *Soil Till. Resear.* 95:97-109. doi:10.1016/j.still.2006.11.005

Jenerette, G. D., R. L. Scott, and T. E. Huxman. 2008. Whole ecosystem metabolic pulses following precipitation events. *Func. Ecology.* 22:924-930. doi: 10.1111/j.1365-2435.2008.01450.x

Jenkinson, D.S., and D. S. Powlson. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-V:A. method for measuring soil biomass. *Soil Biol & Bioch.* 8:209-213. doi:10.1016/0038-0717(76)90005-5

Kichel, A. N., J. A. A. Costa, R. G. Almeida, and V. T. Paulino. 2014. Sistemas de Integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF)- Experiências no BRASIL. *B. de Ind. Anim.* 71:94-105. doi: 10.17523/bia.v71n1p94

Kim, D-G., S. Mu, S. Kang, and D. Lee. 2010. Factors controlling soil CO<sub>2</sub> effluxes and the effects of rewetting on effluxes in adjacent deciduous, coniferous, and mixed forests in Korea. *Soil Biol. & Bioch.* 42:576-585. doi:10.1016/j.soilbio.2009.12.005

Kim, D., Lee, M., & Seo, E. 2017. Improvement of Soil Respiration Parameterization in a Dynamic Global Vegetation 9 Model and Its Impact on the Simulation of Terrestrial Carbon Fluxes. *Biogeosciences Discuss..* doi:10.5194/bg-2016-549.

Kishimoto-Mo., A. W., S. Yonemura, M. Uchida, M. Kondo, S. Murayama, and H. Koizumi. 2015. Contribution of soil moisture to seasonal and annual variations of soil CO<sub>2</sub> efflux in a humid cool-temperate oak-birch forest in central Japan. *Ecol. Resear.* 30:311-325. doi: 10.1007/s11284-015-1254-6

Kosugi, Y., T. Mitani, M. Ltoh, S. Noguchi, M. Tani, N. Matsuo, S. Takanashi, S. Ohkubo, and A. R. Nik. 2007. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agr. and Forest. Meteor.* 147:35-47. doi:10.1016/j.agrformet.2007.06.005

Lapola, D. M., L. A. Martinelli, C. A. Peres, J. P. H. B. Ometto, M. E. Ferreira, C. A. Nobre, A. P. D. Aguiar, M. M. C. Bustamante, M. F. Cardoso, M. F.; M. H. Costa, C. A. Joly, C.A, C. C. Leite, P. Moutinho, G. Sampaio, B. B. N. Strassburg, and I. C. G. Vieira. 2013. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. *Nat. Clim. Change.* 4:27-35. doi:10.1038/nclimate2056

LI, Y., L. Wang, W. Zhang, H. Wang, X. Fu, and Y. Le. 2011. The variability of soil microbial community composition of different types of tidal wetland in Chongming Dongtan and its effect on soil microbial respiration. *Ecol. Eng.*, 37:1276-1282. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.03.024

Liebig, M. A., S. L. Kronberg, J. R. Hendrickson, X. Doug, and J. R. Gross. 2013. Carbon dioxide efflux from long-term grazing management systems in a semiarid region. *Agr. Ecosys. and the Envir.* 164:137-144. doi:10.1016/j.agee.2012.09.015

Linn, D. M., and J.W. Doran. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science.Soc. of Amer. J.* 48:1267-1272. doi:10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x

Liu, B., C. Mou, G. Yan, L. Xu, S. Jiang, Y. Xing, and Q. Wang. 2016. Annual soil CO<sub>2</sub> efflux in a cold temperate forest in northeastern China: effects of winter snowpack and artificial nitrogen deposition. *Scient. Rep.* 6:1-9. doi: 10.1038/srep18957

Lv, L. G., Z. P. Wu, J. X. Wang, S. H. Wu, and S. L. Zhou. 2016. Soil carbon dioxide efflux responds to land-use changes in the sub-urban regions of

Nanjing, China. *App. Ecol. and Envir. Resear.* 14:21-32.  
doi:10.15666/aeer/1403\_021032

Mazzilli, S. R., A. R. Kemanian, O. R. Ernst, R. B. Jackson, and G. Pineiro. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *S. Biol. and Bioch.* 75:273-281.  
doi:10.1016/j.soilbio.2014.04.005

Metcalfe. D. B., R. Lobo-do-Vale, M. M. Chaves, J. P. Maroco, L. E. O. C. Aragão, Y. Malhi, A. C. L. Costa, A. P. Braga, P. H. L. Gonçalves, J. A. Silva Junior, M. C. Costa, S. S. Almeida, C. Campbell, V. Hurry, M. Williams, and P. Meir. 2010. Impacts of experimentally imposed drought on leaf respiration and morphology in an Amazon rain forest. *Func. Ecol.* 24:524-533.  
doi:10.1111/j.1365-2435.2009.01683.x

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2016. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2nd Ed. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília, Brazil. [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0235/235580.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf). (Accessed 16 de Mar. 2017).

Moitinho, M. R., M. P. Padovan, A. R. PanossO, and N. La Scala. 2013. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. *Rev. Br. de Ciênc. do Solo.* 37:1720-1728.  
doi:10.1590/S0100-06832013000600028.

Muniz, L. C., B. E. Madari, J. B. F. Trovo, I. S. L. Cantanhede, P. L. O. A. Machado, T. Cobucci, and A. F. S. França. 2011. Soil biological attributes in pastures of different ages in a crop-livestock integrated system. *Pesq. Agro. Br.* 46:1262-1268. doi:10.1590/S0100-204X2011001000021

Neves, C. M. N., M. L. N. Silva, and N. Curi. 2004. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional e cerrado nativo na região noroeste de Minas Gerais. *Ciênc. e Agrot.* 28:1038-1046. doi: 10.1590/S1413-70542004000500010

Panosso, L. A. A., D. P. Ramos, and M. Brandão. 2002. Solos do campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro. [CD]. CNPS, Rio de Janeiro, RJ.

Pinto-Junior, O. B., L. Sanches, A. C. Dalmolin, and J. S. Nogueira. 2009. Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amaz.* 39:813-821. doi: 10.1590/s0044-59672009000400009

Powlson, D. S., C. M. Stirling, M. L. Jat, B. G. Gerard, C. A. Palm, P. A. Sanchez, and K. G. Cassman. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation, *Nat. Clim. Change.* 4:678–683. doi: 10.1038/nclimate2292

Pumpanen, J., H. Ilvesniemi, M. Perämäki, and P. Hari. 2003. Seasonal patterns of soil CO<sub>2</sub> efflux and soil air CO<sub>2</sub> concentration in a Scots pine forest: comparison of two chamber techniques. *Glob. Change Biol.* 9:371-382. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00588.x

Redo, D., T. M. Aide, and M. L. Clark. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. *J. Land Use Sci.* 8:123-153. doi:10.1080/1747423X.2012.667448

Sainju, U. M., W. B. Stevens, T. Caesar-Tonthat, M. A. Liebig, and J. Wang. 2014. Net global warming potential and greenhouse gas intensity influenced by irrigation, tillage, crop rotation and nitrogen fertilization, *J. of Env. Quality*, 43:777–788. doi: 10.2134/jeq2013.10.0405

Shi, W. Y., M. J. Yan, J. G. Zhang, J. H. Guan, and S. Du. 2014. Soil CO<sub>2</sub> emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. *Atm. Envir.* 88:74-82. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.066

Signor, D., L. L. M. Pissioni, and C. E. P. Cerri. 2014. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. *Bragantia*. 73:113-122. doi: 10.1590/brag.2014.019

Silva Júnior, J. A., A. C. L. Costa, P. V. Azevedo, R. F. Costa, D. B. Metcalfe, P. H. L. Gonçalves, A. P. Braga, Y. Malhi, L. E. O. C. Aragão, and P. Meir. 2013. Fluxos de CO<sub>2</sub> do solo na floresta nacional de caxiuanã, pará, durante o experimento Esecaflor/LBA. *Rev. Br. Meteor.* 28:85-94. doi: 10.1590/S0102-77862013000100009

Silva, C. M., S. S. Vasconcelos, M. M. Oliveira Junior, C. J. C. Bispo, O. R. Kato, A. C. Silva Junior, and D. C. Castellani. 2016. Variação temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. *Ver. Acta Amaz.* 46:1-12. doi: 10.1590/1809-4392201500193

Silva, M.B., H. J. Kliemann, P. M. Silveira, and A. C. Lanna. 2007. Atributos biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. *Pesq. Agrop. Brasileira*. 42:1755-1761. doi: 10.1590/S0100-204X2007001200013

Skopp, J., Jawson, M.D., Doran, J.W. 1990. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Sci Soc Am J.* 54: 1619–1625. doi: 10.2136/sssaj1990.03615995005400060018x

Tateno R., N. Tokuchi, N. Yamanaka, S. Du, K. Otsuki, T. Shi- Mamura, Z. D. Xue, S. Q. Wang, and Q. C. Hou. 2007. Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black locust plantation and an indigenous oak forest near Yan'an on the Loess Plateau, China. *Forest Ecol. and Manag.* 241:84–90. doi:10.1016/j.foreco.2006.12.026

Teixeira, L. G., A. Fukuda, A. R. Panosso, A. Lopes, and N. La Scala. 2011. Soil CO<sub>2</sub> emission as related to incorporation of sugarcane crop residues and

aggregate breaking after rotary tiller. *Eng. Agrícola*. 31:1075-1084. doi: 10.1590/S0100-69162011000600005

Tucker, C. 2014. Reduction of air-and liquid water-filled soil pore space with freezing explains high temperature sensitivity of soil respiration below 0°C. *Soil Biol. Bioch.* 78:90–96. doi:10.1016/j.soilbio.2014.06.018

Ussiri, D.A.N., and R. Lal. 2009. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an Alfisol in Ohio. *Soil and Till. Res.*104:39–47. doi:10.1016/j.still.2008.11.008

Valin, H.; P. Havlík, A. Mosnier, M. Herrero, E. Schmid, and M. Obersteiner. 2013. Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: trade-offs or synergies between mitigation and food security?. *Env. Res. Letters*. 8:1-9. doi:10.1088/1748-9326/8/3/035019

Vance, E. D., P. C. Brookes, and D. S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. & Bioch.* 19:703-707. doi:10.1016/0038-0717(87)90052-6

Van't Hoff, J. H. 1898. *Lectures on Theoretical and Physical Chemistry*. Part I. Chemical Dynamics (translated by R.A. Lehfeldt), Edward Arnold, London, U.K. p. 224-229.

Wagle, P., and V. G. Kakani. 2014. Confounding Effects of Soil Moisture on the Relationship Between Ecosystem Respiration and Soil Temperature in Switchgrass. *Bio. Research*. 7:789-798. doi: 10.1007/s12155-014-9434-8

WMO. World Meteorological Organization. 2016. Greenhouse Gas Bulletin. [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG\\_Bulletin\\_No.12\\_en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_No.12_en.pdf). (Accessed 12 mar 2016).

Xavier, F.A.S, S. M. F. Maia, T. S. Oliveira, and E. S. Mendonça. 2006. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibipaiaba – CE. *Rev. Br. de Ciênc. do Solo*, 30:247-258. doi:10.1590/S0100-06832006000200006.

Yu, Y., C. Zhao, Z. Zhao, B. Yu, and T. Zhou. 2015. Soil respiration and the contribution of root respiration of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in arid region. *Acta Ecol. Sin.* 35:17–21. doi: 10.1016/j.chnaes.2015.04.001

Zimmer, A. H., R. G. Almeida, D. J. Bungenstab, and A. N. Kichel. 2012. Integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: histórico e perspectivas para o desenvolvimento sustentável. In: VII Congresso Latinoamericano de Sistemas Agroflorestais para a Produção Pecuária Sustentável. 8-10 nov. CATIE/CIPAV, Belém, PA.

Zhang , G. S., and Z. W. Ni. 2017. Winter tillage impacts on soil organic carbon, aggregation and CO<sub>2</sub> emission in a rainfed vegetable cropping system of the mid–Yunnan plateau, China. *Soil & Till. Resear.* 165:294-301. doi: 10.1016/j.still.2016.09.008

Zhang, T., Y. F. LI, S. X. Chang, P. K. Jiang, G. M. Zhou, J. J. Zhang, and J. Liu. 2013. Responses of seasonal and diurnal soil CO<sub>2</sub> effluxes to land-use change from paddy fields to Lei bamboo (*Phyllostachys praecox*) stands. *Atm. Envir.* 77:856-64. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.011

Zhang, H., X. Wang, Z. Feng, J. Pang, F. Lu, Z. Ouyang, H. Zheng, W. Liu, and D. Hui. 2011. Soil temperature and moisture sensitivities of soil CO<sub>2</sub> efflux before and after tillage in a wheat field of Loess Plateau, China. *J. of Envir. Sciences.* 23:79-86. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60376-2

Zhao, R. Q., X. J. Huang, T. Y. Zhong, and X. W. Chuai. 2012. Carbon storage and fluxes of different land use types in Nanjing. *J. of Soil and W. Conserv.* 26:164-170. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.011

Zhou, Z., M. Xu, F. Kang, and O. J. Sun. 2015. Maximum temperature accounts for annual soil CO<sub>2</sub> efflux in temperate forests of Northern China. *Sci. Reports.* 5:1-10. doi: 10.1038/srep12142



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo avaliando o efluxo de CO<sub>2</sub> em diferentes sistemas de cultivos agrícolas no Cerrado Brasileiro demonstrou que a utilização dos sistemas de rotação, promoveram menores perdas de CO<sub>2</sub> por meio da respiração do solo, em relação aos sistemas de monocultura e vegetação nativa de cerrado durante a safra agrícola 2015/2016. Com isso, os sistemas de rotação tornam-se importantes tipos de arranjos produtivos que podem ser utilizados como estratégias para mitigar emissões de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera.

A adoção de práticas sustentáveis de manejo do solo tais como o plantio direto, podem proporcionar melhorias dos atributos de qualidade do solo, bem como ser eficiente no sequestro de carbono pelo solo. Acredita-se que os sistemas integrados com plantio direto podem contribuir para balanços positivos de C e N e com potencial de mitigação de GEEs; métricas quantificadas com base em evidências científicas podem ser utilizadas em políticas públicas sobre as mudanças climáticas globais e dados complementares para as políticas públicas atuais e futuras no âmbito do Plano ABC do Governo Federal e temas afins.

Contudo, sugere-se que novas pesquisas sejam realizadas com o objetivo de avaliar outros tipos de sistema agrícolas, pois isso poderá contribuir para o entendimento das alterações causadas pela mudança do uso da terra a longo prazo e para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo do solo para adaptação as mudanças climáticas.