

CARLA REGINA PINOTTI
Engenheira Agrônoma

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂ DO
SOLO EM ÁREA DE EUCALIPTO NO CERRADO DO MATO GROSSO
DO SUL**

Ilha Solteira

2017

CARLA REGINA PINOTTI

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂ DO
SOLO EM ÁREA DE EUCALIPTO NO CERRADO DO MATO GROSSO
DO SUL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP - Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso

Orientador

Prof. Dr. Rafael Montanari

Prof. Dr. Mario Luiz Teixeira de Moraes

Co-orientadores

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P657v Pinotti, Carla Regina.
Variabilidade espaço-temporal da emissão de CO₂ do solo em área de eucalipto no cerrado do Mato Grosso do Sul / Carla Regina Pinotti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
56 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2017

Orientador: Alan Rodrigo Panosso

Co-orientador: Rafael Montanari

Co-orientador: Mario Luiz Teixeira de Moraes

Inclui bibliografia

1. Geoestatística. 2. Efeito estufa. 3. Mudanças climáticas. 4. Manejo do solo. 5. Eucalyptus.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Variabilidade espaço-temporal da emissão de CO_2 de solo em área de eucalipto no Cerrado do Mato Grosso do Sul.

AUTORA: CARLA REGINA PINOTTI

ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORIENTADOR: RAFAEL MONTANARI

COORIENTADOR: MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA,
especialidade: SISTEMAS DE PRODUÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO
Departamento de Matemática / UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Ilha Solteira, 06 de julho de 2017.

DEDICO...

Aos meus pais Luiz Carlos Pinotti e Marcia Regina Pivetta Pinotti, pelo amor incondicional e pela paciência. Por terem feito o possível e o impossível para me oferecerem a oportunidade de estudar em Ilha Solteira por todos esses anos, acreditando e respeitando minhas decisões e nunca deixando que as dificuldades acabassem com os meus sonhos, pelos quais enfrento os obstáculos da vida sempre na esperança de vencer, e poder retribuir o que me deram com tanto esforço.

Ao meu irmão Fernando Henrique Pinotti, pela amizade, incentivo e companheirismo.

Aos meus avós Antonieta Apis Pinotti “in memorian”, Olimpio Pinotti, Mercedes Morceli Pivetta e Pedro Pivetta “in memorian”.

OFEREÇO...

Ao meu amigo e namorado Matheus Elache Rosa, pela dedicação, apoio incondicional e parceria no enfrentamento das dificuldades durante esses 8 anos de convívio, sempre me incentivando e não permitindo que eu desistisse, nada disso seria possível sem você ao meu lado...

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde, paz e proteção concedidas nestes anos de estudo e 27 anos de vida.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso, pela confiança, incentivo e muita paciência durante este período de orientação, manifesto minha gratidão pela grande contribuição em minha vida profissional e pessoal nestes dois anos de convivência, foi uma grande oportunidade e um privilégio para mim.

Aos meus co-orientadores, Prof. Dr. Mário Luiz Teixeira de Moraes, pela disponibilização da área estudada, e ao Prof. Dr. Rafael Montanari pela amizade e conhecimentos compartilhados.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em especial à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, por proporcionar excelentes condições de aprendizado aos alunos da instituição.

Aos professores da Pós-Graduação pelos incentivos e ensinamentos, são exemplos de pessoas que conciliam profissionalismo, responsabilidade para com o ensino, pesquisa e extensão, além de grande disponibilidade aos discentes.

À todos os familiares, tios, tias e primos que torceram e acreditaram na conclusão deste curso, muito obrigada.

À minha amiga Hellen Wilson, pelo companheirismo e amizade desde o início da graduação. Pelas ótimas histórias vividas e por ajudar a tornar a vida acadêmica muito mais divertida. Às amigas que o mestrado me trouxe, Joziane Fialho, Daniele Zulian e Priscila Casado pelos momentos de estudo e diversão e a Maria Elisa por toda ajuda em campo. A todos os colegas da faculdade que convivi, e que de uma forma ou de outra participaram da minha formação, nunca serão esquecidos.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE pelo suporte durante o período de avaliação do experimento, principalmente ao José Cambuim.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior CAPES pela concessão da bolsa e a FAPESP (Processo nº 2016/03861-5).

“Ninguém vai bater mais forte que a vida. Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar lutando. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”

(Rocky Balboa)

RESUMO

A cultura do eucalipto fornece insumos para a indústria madeireira, siderúrgica e de celulose e papel, tendo um enorme potencial para estocar carbono atmosférico na biomassa aérea e no solo ajudando a mitigar o efeito estufa. Porém, poucos trabalhos têm estudado como as emissões de CO₂ do solo (FCO₂) em áreas de plantio de eucalipto variam no espaço. Sendo assim objetivou-se caracterizar os padrões de variabilidade espaço temporal da FCO₂ em área de floresta plantada de eucalipto no baixo cerrado no estado do Mato Grosso do Sul, por meio de técnicas geoestatísticas. O estudo foi conduzido em área de Eucalipto na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), localizada no município de Selvíria-MS, durante os meses de outubro e novembro de 2015. A FCO₂ foi registrada por meio do sistema LI-COR (LI-8100), a temperatura do solo (Ts) foi registrada por meio de termômetro de haste e a umidade do solo (Us) foi determinada por meio de um equipamento de TDR. O experimento foi conduzido em uma malha amostral de 100 × 100 m contendo 102 pontos amostrais. Os resultados indicaram diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias de FCO₂ do mês de outubro ($4,21 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e novembro ($6,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), devido maior condição de umidade do solo proporcionado pelas precipitações pluviais mais frequentes durante o mês de novembro. Aproximadamente 73% da variação temporal da FCO₂ foi explicada pelo modelo: $\text{FCO}_2 = 13,23 - 0,48\text{Ts} - 0,039 \text{Us}^2 + 0,037 \text{Ts} \times \text{Us}$ ($F=5,40$; $p=0,039$). Os modelos ajustados aos variogramas para FCO₂ foram predominantes esféricos e gaussianos. Os valores de alcance variaram de 18,01 m (29 outubro) a 35,01 m (18 novembro). Os padrões de variabilidade espaço-temporal de FCO₂ ao longo do tempo formaram dois grupos distintos identificados pela análise de agrupamento hierárquica, um para cada mês de avaliação. De maneira geral, foram observados coeficientes de correlação negativo e significativo ($p < 0,05$) entre os padrões espaciais de FCO₂ e Us principalmente no mês de novembro, em condições de maiores precipitações. Por outro lado, no mês de outubro, em condição de solo mais seco, foram observados coeficientes de correlação linear positivos e significativos ($p < 0,05$) entre FCO₂ e Us. Os resultados indicam que a Us é o fator limitante para FCO₂ em áreas de floresta de eucalipto no cerrado do Mato Grosso do Sul.

Palavras chave: Geoestatística. Efeito estufa. Mudanças climáticas. Manejo do solo. *Eucalyptus*.

ABSTRACT

The eucalyptus crop provides inputs for the timber, steel and pulp and paper industries, and has an enormous potential to store atmospheric carbon in the aerial biomass and soil, helping to mitigate the greenhouse effect. However few works have studied how soil CO₂ emissions vary in space in areas of eucalyptus plantations. The objective of this work was to characterize spatiotemporal variability patterns of soil CO₂ emission in eucalyptus plantation forest in cerrado in the state of Mato Grosso do Sul, using geostatistical techniques. The experiment was conducted in the Fazenda de Ensino e Pesquisa, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), located in the Selvíria city -MS. The soil CO₂ emission was measured by the LI-COR system (LI-8100), the soil temperature was recorded using a stem thermometer and the soil moisture was determined using a TDR equipment. The experiment was conducted in a 100 × 100 m grid containing 102 sample points. The results indicate a significant difference ($p < 0.05$) between the mean of FCO₂ of the month of October ($4.21 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and November ($6.16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), due to the greater soil moisture condition provided by the more frequent precipitations during the month of november. Approximately 73% of the temporal variability of FCO₂ was explained by the model: $\text{FCO}_2 = 13.23 - 0.48T_s - 0.039 U_s^2 + 0.037 T_s \times U_s$ ($F=5.40$; $p=0.039$). The fitted models to the variograms for FCO₂ were predominant spherical and Gaussian. Range values ranged from 18.01 m (29 October) to 35.01 m (18 November). The spatio-temporal variability patterns of FCO₂ over time formed two distinct groups identified by hierarchical clustering analysis, one for each month of evaluation. In general, were observed coefficients correlation negative and significant ($p < 0.05$) between the spatial patterns of FCO₂ and U_s mainly in the month of november, in conditions of greater precipitations. On the other hand, in October, in the condition of drier soil, were observed coefficients correlation linear positive and significant ($p < 0.05$) between FCO₂ and U_s . The results indicate that U_s is the limiting factor for FCO₂ in eucalyptus plantation forest in the cerrado of the MS.

Keywords: Geostatistic. Greenhouse effect. Climate changes. Soil management. *Eucalyptus*.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização geográfica da área total de *Eucalyptus camaldulensis* e da área avaliado na FEPE (FEIS-UNESP), localizada em Selvíria MS.....21
- Figura 2.** Câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (a), sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (b), TDR - Hydrosense system, para avaliação da umidade do solo (c) e sensor de temperatura de haste (d)22
- Figura 3.** Área de *Eucalyptus camaldulensis*, na FEPE (FEIS- UNESP), localizada em Selvíria-MS e representação da malha amostral usada para caracterizar a variabilidade espacial das variáveis estudadas.....23
- Figura 4.** Precipitação pluvial durante o período de avaliação do experimento na área de *Eucalyptus camaldulensis*, na FEPE (FEIS - UNESP), localizada em Selvíria-MS.....23
- Figura 5.** Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico evidenciando a formação de dois grupos conforme o mês de avaliação (a) e representação da distância euclidiana entre os dias de avaliação (b).....27
- Figura 6.** Variabilidade temporal de (a) emissão de CO₂ do solo e temperatura do solo; (b) emissão de CO₂ no solo e umidade do solo; durante os dias de avaliação.....28
- Figura 7.** Análise de regressão entre a emissão de CO₂ do solo e a temperatura do solo (a) e a emissão de CO₂ do solo e a umidade do solo (b)32
- Figura 8.** Valores médios de emissão de CO₂ do solo observados e preditos pelo modelo combinado com a temperatura e a umidade do solo, ao longo do período de avaliação em floresta de eucalipto, Selvíria, MS; RMSE=0,35.....32
- Figura 9.** Variogramas experimentais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade do solo (%) nos dias 02, 06, 08 e 14 de outubro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....37
- Figura 10.** Variogramas experimentais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade do solo (%) nos dias 22 e 29 de outubro e 05 e 10 de novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....38
- Figura 11.** Variogramas experimentais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade do solo (%) nos dias 18 e 25 de novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....39

Figura 12. Padrão espacial da emissão de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (% volume) nos dias 02 a 29 de outubro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....	40
Figura 13. Padrão espacial da emissão de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (% volume) nos dias 05 a 25 de novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....	41
Figura 14. Variogramas experimentais e padrões espaciais da emissão de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (%) em outubro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....	43
Figura 15. Variogramas experimentais e padrões espaciais da emissão de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (%) em novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva da emissão de CO ₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para os dias estudados em área de eucalipto na cidade de Selvíria, MS, no ano 2015.....	29
Tabela 2. Estatística descritiva da temperatura do solo (°C), para os dias estudados em área de eucalipto na cidade de Selvíria, MS, no ano 2015.....	30
Tabela 3. Estatística descritiva da umidade do solo (%), para os dias estudados em área de eucalipto na cidade de Selvíria, MS, no ano de 2015.	31
Tabela 4. Modelos e estimativas dos parâmetros ajustados aos variogramas experimentais para a emissão de CO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) para os dias estudados no ano de 2015, em área de eucalipto em Selvíria, MS.	36
Tabela 5. Modelos e estimativas dos parâmetros ajustados aos variogramas experimentais para a emissão de CO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) para os dois períodos estudados (outubro e novembro) de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Gases de Efeito Estufa e Efeitos Climáticos.....	14
2.2	Emissão de CO₂ do Solo na Agricultura.....	15
2.3	Emissão de CO₂ e a sua Relação com a Temperatura e Umidade do Solo	17
2.4	Variabilidade Espacial da Emissão de CO₂ do Solo	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1	Área experimental	20
3.2	Determinação da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo	21
3.3	Análise estatística dos dados	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial, as concentrações atmosféricas de CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano) e N₂O (óxido nitroso) atingiram novas máximas no ano de 2015, com CO₂ atingindo a concentração de $400,0 \pm 0,1$ ppm, CH₄ de 1845 ± 2 ppb e N₂O de $328,0 \pm 0,1$ ppb, valores que representam, respectivamente, 144, 256 e 121% dos níveis pré-industriais. Além disso a forçante radiativa oriunda de gases do efeito estufa (GEE) de vida longa na atmosfera aumentou cerca de 37%, com o CO₂ responsável por cerca de 80% desse aumento (WMO, 2015). Cerca de $\frac{1}{4}$ dos GEE são provenientes apenas da agricultura em nível global (LAMB et al., 2016). No Brasil, aproximadamente 75% das emissões de CO₂ são provenientes das atividades agrícolas (CERRI et al., 2009).

A conversão de áreas de florestas, cerrados e campos para áreas agrícolas ou pastagem, diminuem o teor de matéria orgânica nos solos tropicais e subtropicais devido às consequências de curto e longo prazo dos distúrbios ocasionados pelas operações de preparo do solo, associados aos baixos níveis de adição de material orgânico (SARTORI et al., 2006). O processo de perda de carbono do solo para a atmosfera é chamado de emissão de CO₂ do solo (FCO₂), ou respiração do solo, resultante da atividade microbiana e respiração das raízes, sendo considerada a segunda maior fonte de CO₂ para atmosfera, perdendo apenas para os oceanos.

A respiração do solo é determinada por um conjunto de fatores, tais como a temperatura e a umidade do solo (EPRON et al., 2004; KOSUGI et al., 2007; PANOSSO et al., 2009), propriedades físicas (DILUSTRO et al., 2005), químicas (LA SCALA et al., 2000; RETH et al., 2005) e biológicas (FANG et al., 1998). No processo de emissão de CO₂, particularmente, o transporte do gás do interior do solo até a superfície é governado pela equação de difusão, que por sua vez é influenciada, em primeira ordem, por alterações na temperatura e umidade do solo (KANG et al., 2003).

Em 2014, os 7,74 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil foram responsáveis pelo estoque de aproximadamente 1,69 bilhão de toneladas de dióxido de carbono (t CO₂), representando incremento de 1,2% em relação a 2013. Os plantios de eucalipto ocupam 5,56 milhões de hectares da área de árvores plantadas no Brasil, o que representa 71,9% do total, e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul com 803.699 hectares representando 14,5% (IBÁ, 2015). De acordo com alguns estudos, o eucalipto tem um maior potencial para estocar

carbono atmosférico na biomassa aérea e no solo, principalmente quando associado à pastagem ou culturas anuais e, especialmente, na conversão de terras degradadas em terras produtivas e de fontes de energia renováveis (LA SCALA et al., 2012).

Ainda, segundo os mesmos autores, as plantações de eucalipto associadas com pastagens degradadas, onde as perdas de carbono no solo são de até $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, podem absorver até $28 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ajudando a mitigar o efeito estufa. Contudo, ainda são poucos os trabalhos que têm estudado fatores relacionados à dinâmica do carbono do solo em áreas em crescimento de eucalipto do Brasil, como na região do baixo Cerrado do Mato Grosso do Sul.

A despeito de todos os esforços, os fatores ambientais e atributos do solo que controlam a magnitude de FCO_2 continuam a ser de difícil separação e interpretação. As razões para essa dificuldade podem ser decorrentes das numerosas interações entre tais variáveis, em combinação com diferentes escalas de variação no espaço e no tempo (LA SCALA et al., 2009; GRAF et al., 2012; ALLAIRE et al., 2012; BICALHO et al., 2014).

Trabalhos recentes têm observado grande variação espacial de FCO_2 (PANOSSO et al., 2009; BRITO et al., 2010; HERBST et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2011; PANOSSO et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2013). A descrição da variabilidade espacial de FCO_2 tem fornecido, por meio de técnicas como a krigagem ordinária (KO), estimativas de valores em regiões não amostradas nas áreas experimentais (LEWICKI et al., 2005). A KO objetiva fornecer a melhor estimativa de uma variável no local não amostrado (BASARIR et al., 2010). A krigagem ordinária (KO), tem sido o algoritmo adotado na maioria dos estudos sobre emissão de CO_2 do solo (ROCHETTE et al., 1991; LA SCALA et al., 2000; OHASHI e GYOKUSEN, 2007; KONDA et al., 2008; PANOSSO et al., 2009; BRITO et al., 2010), sendo reconhecida como o método mais favorável para estimativa espacial univariada (HENGL et al., 2004).

A hipótese do trabalho é que a análise da estrutura de atributos como temperatura e a umidade do solo auxiliam na caracterização das relações espaço-temporais da emissão de CO_2 do solo em áreas de eucalipto, conceitualmente consideradas as principais controladoras do fluxo de CO_2 do solo para a atmosfera. Portanto, o objetivo do trabalho foi caracterizar os padrões espaço-temporais da emissão de CO_2 do solo, por meio de técnicas geoestatísticas e estudar as suas relações com a temperatura e a umidade do solo em floresta de eucalipto no baixo Cerrado do Mato Grosso do Sul.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gases de Efeito Estufa e Efeitos Climáticos

As altas concentrações de gases na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e vapores d'água dão origem ao fenômeno conhecido como efeito estufa (LEVITUS et al., 2001; COSTA et al., 2006). No período compreendido entre os anos de 1995 a 2010 as concentrações médias anuais de CO_2 apresentaram taxa de crescimento de 1,94 ppm em relação ao período de 1960 a 2005, tendo como média 1,46 ppm (ESRL, 2016).

As alterações climáticas refletiram significativamente na temperatura média da Terra, segundo estudos da NASA (2016), o ano de 2016 foi considerado o mais quente desde o início dos registros de temperatura, sendo o terceiro ano consecutivo em que o recorde global de temperatura é quebrado, a temperatura da Terra ficou 0,99°C acima da média do século XX.

O Primeiro Relatório de Avaliação Nacional que compõe o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) estimou um aumento sistemático de temperatura do ar próximo à superfície terrestre que varia de aproximadamente 2 °C (no cenário de baixa emissão) à 4 °C (no cenário de alta emissão), até o final do século XXI (PBMC, 2014). De acordo com as projeções futuras, a temperatura poderá subir em todos os biomas brasileiros, e embora a agricultura tenha sido apontada como uma importante fonte emissora de GEE para a atmosfera, o setor agrícola será também, o mais afetado devido às elevações na temperatura e alterações no regime de chuvas (PIVETTA, 2013). Os solos são considerados importantes reservatórios naturais de carbono. Em uma escala global, solos de até 1 m de profundidade podem conter até 1.500 Gt C (SCHARLEMANN et al., 2014), o que corresponde a duas vezes mais que a quantidade de carbono presente na atmosfera (720 Pg) e a três vezes mais que a presente na biota terrestre (LAL, 2004). De acordo com os relatórios do IPCC (2014) as mudanças no uso e manejo do solo são responsáveis por aproximadamente um quarto das emissões globais de GEE, que incluem o desmatamento, emissões de metano na agropecuária e de óxido nitroso em solos fertilizados.

O Brasil é importante mundialmente para a segurança alimentar, sendo um dos principais produtores e exportadores de *commodities* agrícolas essenciais, como açúcar e soja. Essa posição de destaque e o fato de que 75% das emissões de CO_2 advém de atividades

agrícolas (CERRI et al., 2007), tem contribuído para colocar o país entre os maiores emissores mundiais de gases de efeito estufa (IPCC, 2014).

A demanda mundial de alimentos deverá aumentar 100% até 2050 (TILMAN et al., 2011), aumentando também a demanda por novas áreas agrícolas e recursos naturais. Vermeulen et al. (2012) concluem que o aumento da temperatura e da probabilidade de inundações vão desafiar a capacidade dos agricultores para armazenar com segurança e distribuir alimentos.

Para mitigar a emissão de CO₂ e reduzir a contribuição da agricultura na emissão de gases do efeito estufa, as estratégias mais eficientes consistem na diminuição da queima de combustíveis fósseis, minimização do desmatamento e queimadas, manejo adequado do solo, e por fim, na maximização do sequestro de carbono no solo (VARGAS et al., 2014; WANG et al., 2015). Neste contexto, a meta é de reduzir o impacto das mudanças climáticas na agricultura, sendo um dos principais objetivos da pesquisa e estudo científico, buscando métodos eficientes que permitam meios para adequação ou mitigação dos seus efeitos.

2.2 Emissão de CO₂ do Solo na Agricultura

No Brasil, a agricultura é apontada como uma grande fonte emissora de CO₂ para a atmosfera, destacando-se, as mudanças do uso e manejo do solo com a conversão de vegetação natural para a agricultura e pecuária (CERRI et al., 2013). O elemento carbono pode ser encontrado no solo sob duas formas: carbono orgânico (matéria orgânica do solo) e carbono inorgânico (carbonatos) (MACHADO, 2005).

As florestas tropicais são essenciais ao ciclo do carbono global porque elas estocam 20–25% do carbono terrestre global (BERNOUX et al., 2002). Cerca de 76 a 84% do fluxo de CO₂ total na floresta amazônica pode estar vindo do solo, o que representa globalmente uma grande fração para atmosfera, cujas maiores contribuições provêm de florestas tropicais e subtropicais (RAICH et al., 2002). O CO₂ do ar atmosférico absorvido durante o processo de fotossíntese é armazenado pelas plantas arborizadas na forma de carbono na madeira e outros tecidos até sua morte e decomposição, e posteriormente liberado como CO₂, CH₄, ou mesmo pode ser incorporado no solo como substâncias orgânicas (OKUMURA et al., 2015).

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

O fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera é o resultado da decomposição da serapilheira, da respiração da raiz, da decomposição das raízes mortas, da respiração fúngica e da respiração microbiana do solo, o que torna muito difícil a separação das diferentes fontes de CO₂ (KUZYAKOV, 2006). No solo, a decomposição do material vegetal morto por fungos e bactérias, e a respiração das raízes de plantas vivas, devolvem a maior parte do carbono anteriormente capturado por fotossíntese, à forma de CO₂ o qual é emitido à atmosfera (BRADY, 1989). Nos continentes, o maior reservatório de carbono está nos solos, que contêm estimados 1.500 Pg C; a atmosfera contém aproximadamente 750 Pg C; e, estima-se que 560 Pg C estejam estocados na cobertura vegetal sendo que cerca de 75% deste total se encontram estocados em florestas e mais especificamente aproximadamente 50% encontram-se em florestas tropicais (GRACE, 2004; DIAS, 2006). Por outro lado, estima-se, que os 7,8 milhões de hectares de área de plantio florestais no Brasil são responsáveis pelo estoque de aproximadamente 1,7 bilhão de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) – medida utilizada para comparar as emissões dos vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global de cada um. Além das remoções e estoques de carbono das árvores plantadas, o setor gera e mantém reservas de carbono da ordem de 2,48 bilhões de toneladas de CO₂ eq e em 5,6 milhões de hectares na forma de Reserva Legal (RL), Áreas de Proteção Permanente (APP) e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN), (IBÁ 2016). Dessa forma, a vegetação e o solo agem como reservatórios temporários de carbono. Apesar da temperatura e da umidade serem consideradas os principais determinantes das emissões de CO₂ do solo e suas variações temporais (XU; QI, 2001), diversos outros fatores influenciam o padrão das emissões de CO₂ do solo, incluindo: atributos do solo como porosidade, drenagem, teor de carbono orgânico do solo, populações de microrganismos e densidade do sistema radicular (LONGDOZ et al., 2000).

A mudança do uso do solo causado pela conversão de florestas em pastagens ou em áreas agrícolas modifica a cobertura e consequentemente o conteúdo de carbono no solo. O equilíbrio entre o carbono retido e o perdido no solo é afetado pela mudança do uso do solo até que um novo “equilíbrio” seja retomado (GUO; GIFFORD, 2002).

Várias medidas são recomendadas para conter o aumento da emissão de GEE na atmosfera, como por exemplo: controle e redução de desmatamento, redução de queimadas, substituição dos combustíveis fósseis por bicomcombustíveis e uso do sistema do plantio direto que potencializa o acúmulo de carbono no solo, conhecido como sequestro de carbono.

2.3 Emissão de CO₂ e a sua Relação com a Temperatura e Umidade do Solo

A produção de CO₂ no solo varia com fatores climáticos, principalmente a temperatura do ar e do solo, e o conteúdo de água no mesmo (DAVIDSON et al., 2000). A temperatura do solo é um dos fatores mais importantes no processo de emissão de CO₂, durante e entre os dias, pois seu incremento acelera a decomposição da matéria orgânica, a atividade microbiana e das raízes (SILVA OLAYA et al., 2013).

Alguns autores têm observado que as emissões de CO₂ correlacionam-se diretamente a elevações na temperatura do solo (USSIRI, LAL, 2009; ACRECHE et al., 2014; KARHU et al., 2014). Tal relação é compreendida, uma vez que, a temperatura do solo apresenta variações diárias e sazonais, com marcada influência nos horizontes superficiais do solo, ou seja, na região onde concentra-se a maior taxa de atividade microbiana (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; SIX et al., 2006). Por sua vez a umidade do solo pode tanto favorecer como inibir a produção de CO₂, havendo teoricamente uma umidade ótima que maximiza a respiração. Dessa forma tem sido observado que o conteúdo de umidade do solo afeta os processos de respiração, alto conteúdo de umidade proporciona ótimas condições para atividade microbiana, incrementa o consumo do oxigênio microbiano e a produção e emissão de CO₂ do solo.

A aeração e a umidade estão inversamente relacionadas pelo movimento de substituição do ar e da água (CHEN et al., 2010). Outros autores também observaram relação positiva entre a emissão de CO₂ e a umidade do solo (PANOSSO et al., 2009; MORELL et al., 2010). Entretanto, esses efeitos da umidade sobre a FCO₂ foram mais acentuados quando decorrentes de eventos de precipitação (PANOSSO et al., 2011; WANG et al., 2015). Durante e até mesmo num curto período após os eventos de precipitação, ocorre a expulsão física do CO₂ dos poros do solo, pelo preenchimento por água (CHEN et al., 2010).

Contudo, cabe ressaltar que os fatores ambientais flutuam e, portanto, seus efeitos sobre a emissão de CO₂ também possuem grande variação (HU et al., 2011), pois estão associados ao manejo do solo (preparo, ausência ou presença de cobertura vegetal) e até mesmo com suas características texturais, uma vez que a respiração do solo é mais sensível a alterações bruscas no teor de água, em solos argilosos do que em solos arenosos (KAINIEMI, 2014).

Dilustro et al. (2005) estudando os efeitos da umidade e textura do solo na emissão de CO₂ do solo, em florestas de pinheiros, verificaram que, em solo de textura argilosa, a

emissão de CO₂ do solo foi maior (3,96 mmol m⁻² s⁻¹) quando comparado ao solo arenoso (2,71 mmol m⁻² s⁻¹). Diversos outros fatores influenciam o padrão das emissões de CO₂ do solo, incluindo: atributos do solo como porosidade, drenagem, teor de carbono orgânico do solo, populações de microrganismos e densidade do sistema radicular (LONGDOZ et al., 2000). Não há um determinante único desse processo, mas a magnitude dessas diferenças, em condições edafoclimáticas específicas, depende direta ou indiretamente do manejo do solo (RESCK et al., 2008).

2.4 Variabilidade Espacial da Emissão de CO₂ do Solo

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

Os fluxos de CO₂ do solo são extremamente variáveis no espaço e no tempo, devido à heterogeneidade do sistema e da dinâmica dos fatores que os controlam, dentre eles a taxa de produção de CO₂ no solo, gradientes de temperatura e as propriedades físicas do solo (DIAS, 2006).

A estrutura espacial dos atributos do solo é afetada por inúmeros fatores de uma forma altamente complexa devido à covariação espacial e temporal entre os fatores influenciadores (FÓTI et al., 2016).

Xu e Qi (2001), em estudos conduzidos em áreas *Pinus ponderosa* concluíram que as propriedades do solo, como: biomassa microbiana, teor de matéria orgânica, densidade do solo e teor de magnésio trocável, foram as melhores variáveis para a modelagem da variabilidade espacial da emissão de CO₂ do solo. Fang et al. (1998), avaliando a variabilidade espacial da respiração do solo também em áreas de floresta, observaram que a variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo pode ser explicada pelas variações da biomassa dos organismos vivos e mortos associados à porosidade total do solo.

Em adição, muito da variabilidade pode ser causada ainda pelo uso e manejo dos solos e, como consequência, as propriedades do solo podem exibir variabilidade espacial em macro,

meso e microescalas (PANOSSO et al., 2008). A atividade autotrófica e heterotrófica é afetada por fatores bióticos e abióticos em diferentes graus, causando variabilidade temporal e espacial na respiração do solo (RUEHR E BUCHMANN, 2010; CHEN et al., 2011).

A temperatura do solo (T_s) é geralmente o fator mais importante que influencia as mudanças sazonais na respiração do solo pois aumenta a atividade heterotrófica e autotrófica durante as estações mais quentes, (DEFOREST et al. 2006; RUEHR; BUCHMANN 2010). No entanto a temperatura do solo muitas vezes não explica a variação espacial da respiração do solo dentro das florestas (VANDE WALLE et al., 2007; GENG et al., 2012).

Schwendenmann et al. (2003), investigando a variação espacial e temporal do fluxo de CO_2 em florestas, reportaram que o principal fator identificado para explicar as variações temporais no fluxo de CO_2 foi o conteúdo de água presente no solo. Os autores concluem que o fluxo diminuiu nos períodos em que o solo apresentava elevada umidade, provavelmente devido à menor difusão de gás e taxa de produção de CO_2 .

Fatores como planta e solo, por outro lado, podem afetar diretamente a variabilidade espacial da respiração do solo dentro de uma floresta. A atribuição de fotossintatos às raízes aumentam a respiração autotrófica; exsudatos radiculares aumentam a respiração heterotrófica dentro da rizosfera; e a quantidade e a qualidade da serapilheira aumentam a respiração heterotrófica em camadas superficiais do solo (BAHN et al., 2010; METCALFE et al., 2011).

Fatores edáficos abaixo do solo também exercem influência espacial sobre a respiração do solo, como a umidade do solo, pH, densidade aparente e carbono do solo (VANDE WALLE et al., 2007; FÓTI et al., 2014). Alguns autores discutem que um problema adicional em se modelar a emissão de CO_2 com a temperatura e a umidade do solo, decorre do fato de que essas podem covariar, tornando-se impossível separar os seus efeitos sobre a emissão de CO_2 do solo (SCHWENDENMANN et al., 2003; SAVVA et al., 2013).

Segundo BRITO et al. (2009), a caracterização da variabilidade espacial da emissão de CO_2 , por meio da geoestatística, fornece informações relevantes a respeito da sua distribuição espacial, ajudando a compreender a dinâmica do CO_2 entre o solo e a atmosfera. As propriedades envolvidas nos processos de produção e transporte de CO_2 também possuem grande variabilidade espacial, o que torna complexa a tarefa de explicar as variações espaciais da emissão de CO_2 . Apesar de todos os esforços, ainda existem grandes incertezas na quantificação de emissão de CO_2 em áreas agrícolas e a sua relação com fatores ambientais e variáveis físicas e químicas do solo que controlam sua magnitude e estrutura de variação espaço-temporal (GRAF et al., 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

A pesquisa foi conduzida em área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS - UNESP), localizada no município de Selvíria-MS, à margem direita do rio Paraná, com coordenadas 20° 22' 31'' de latitude Sul e 51° 24' 12'' e de longitude Oeste, com 363 m acima do nível do mar (Figura 1). O clima da região foi classificado como C1dAa' pelo sistema de Thornthwaite (ROLIM et al., 2007), indicando uma região sub-úmido seco, sem excedentes hídricos, megatérmico com evapotranspiração no verão menor que 48% da evapotranspiração anual, temperatura média anual de 23,5 °C e precipitação pluvial média anual de 1.300 mm, com período de maior concentração entre os meses de setembro a junho, invernos secos de junho a agosto. A vegetação original encontrada na área foi descrita como cerrado típico, com predomínio de formas arbustivas em solo profundo, pouco fértil. O solo foi classificado conforme Santos et al. (2013) como Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, A moderado (Haplic Acrustox), com declive de 0,025 m m⁻¹. A área até a década de 1970, possuía um solo recoberto por vegetação nativa do Bioma Cerrado, sendo que no ano 1978 foi desmatada e passou a ser conduzida com culturas anuais até 1986. Após esse período, no dia 26 de abril de 1986, foi instalada uma população de base de *Eucalyptus camaldulensis* sob o espaçamento de 4 × 4 m (Figura 1). As mudas matrizes foram produzidas no viveiro da Companhia Energética de São Paulo (CESP), em Ilha Solteira, SP.

Figura 1. Localização geográfica da área total de *Eucalyptus camaldulensis* e da área avaliada na FEPE (FEIS- UNESP), localizada em Selvíria-MS.



Fonte: Google Earth (2016).

3.2 Determinação da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo

A emissão de CO₂ do solo (FCO₂) foi registrada por meio do sistema LI-COR (LI-8100). Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara (Figura 2a) por meio de espectroscopia na região do infravermelho (Figura 2b). A câmara para solos apresenta volume interno de 854,2 cm³ com área de contato circular de 83,7 cm². Essa câmara foi colocada sobre colares de PVC com diâmetro de 10 cm, previamente inseridos no solo em cada ponto amostral na profundidade de 3 cm. O fluxo de CO₂ foi computado em cada ponto por um ajuste da concentração de CO₂ do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após o fechamento da mesma. Uma vez a câmara fechada, o modo de medida levou 1 min 30 s, em cada ponto, para a determinação de FCO₂, onde a concentração de CO₂ dentro da câmara foi determinada a cada 2,5 s.

A temperatura do solo (Ts) foi registrada por meio de sensor de temperatura de haste de 11 cm (Figura 2 d) inserido no interior do solo a 5 cm do local onde foram previamente instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de CO₂. A umidade do solo (Us) foi

determinada por meio de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry - Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália - Figura 2 c). O aparelho de TDR é constituído por uma sonda, apresentando duas hastes de 12 cm, que devem ser inseridas no interior do solo a aproximadamente 5 cm dos colares de PVC. Um pulso de energia eletromagnética de alta frequência é produzido com o objetivo de polarizar as moléculas de água do solo na extensão necessária para medir a permissividade dielétrica. O tempo de viagem da energia eletromagnética ao longo das hastes (sondas) é dependente da permissividade dielétrica. Os sinais de alta frequência são transformados em uma saída de onda quadrada com uma frequência proporcional à umidade do solo, portanto, a medição reflete o teor médio de água ao longo do comprimento das sondas.

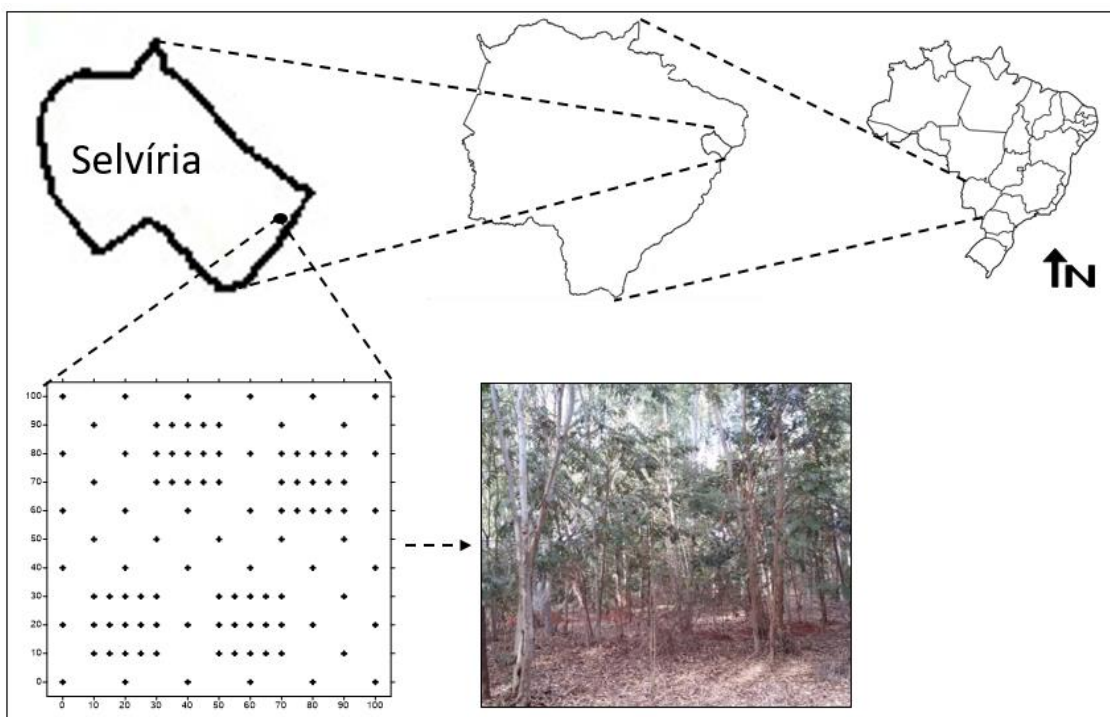
Figura 2. Câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (a), sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (b), TDR - Hydrosense system, para avaliação da umidade do solo (c) e sensor de temperatura de haste (d).



Fonte: Elaboração da própria autora.

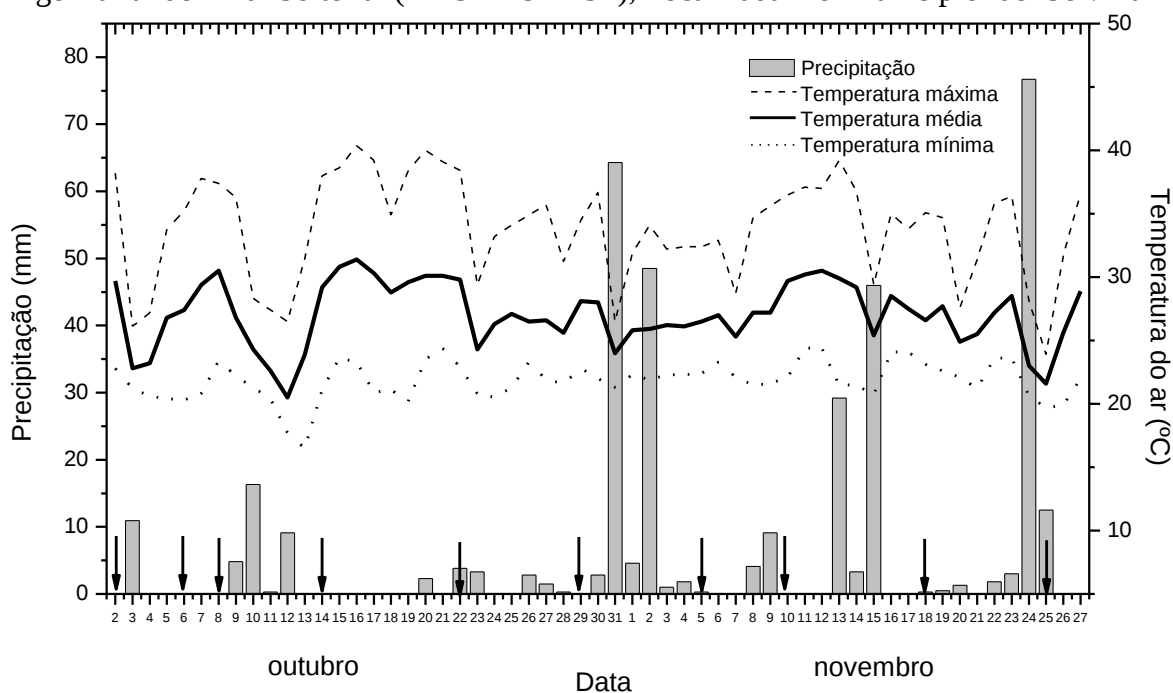
No dia 01 de outubro de 2015, foi instalada uma malha de 100×100 m contendo 102 pontos amostrais com distâncias mínimas de separação entre pontos de 5 m (Figura 3). As avaliações de FCO₂, Ts e Us foram realizadas no período de 02 de outubro a 25 de novembro de 2015, durante o período da manhã entre 7 e 10 h, totalizando 10 dias de leituras (02, 06, 08, 14, 22 e 29 de outubro e 05, 10, 18 e 25 de novembro). Os dias de precipitação e os dias em que foram avaliadas a emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em floresta de eucalipto constam na Figura 4.

Figura 3. Área de *Eucalyptus camaldulensis*, na FEPE (FEIS- UNESP), localizada em Selvíria-MS e representação da malha amostral usada para caracterizar a variabilidade espacial das variáveis estudadas.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 4. Precipitação pluvial durante o período de avaliação do experimento na área de *Eucalyptus camaldulensis*, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS - UNESP), localizada no município de Selvíria-MS.



Nota: * Setas indicam os dias de avaliação da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo.

Fonte: Elaboração da própria autora.

3.3 Análise estatística dos dados

Inicialmente foi realizado o agrupamento dos padrões de variabilidade da emissão de CO₂ do solo, a partir dos 10 dias de avaliação dessa variável, por meio da análise de agrupamento hierárquica. Primeiramente foi realizada a padronização dos dados de FCO₂, de modo que cada dia apresentou média zero e variância unitária. O objetivo da padronização foi a minimização das diferenças entre os grupos, estabelecendo assim, o mesmo peso nos cálculos do coeficiente de similaridade entre os pontos amostrais, para a minimização do efeito da variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo (HAIR et al., 2005; VAL et al., 2008). A análise de agrupamento é um método de escolha de um coeficiente de semelhança para a classificação dos dias de avaliação em grupos, de forma que estes sejam exclusivamente homogêneos (semelhantes) dentro de um grupo, e entre vários grupos, sejam heterogêneos entre si (grupos dissimilares). O coeficiente de semelhança utilizado foi a distância euclidiana. O método de agrupamento hierárquico consiste em realizar o cálculo da distância entre os pontos amostrais, para dividi-los em grupos de forma que estes gradualmente se associem, e que no decorrer de cada associação todos os objetos estejam em um único grupo. Neste trabalho o método de agregação de classe utilizado foi o algoritmo de Ward e o resultado da análise de agrupamento por método hierárquico foi apresentado na forma gráfica de dendrograma para identificação de agrupamentos dos dias estudados.

Posteriormente os resultados foram apresentados em termos da estatística descritiva (média, mediana, erro-padrão da média, mínimo, máximo e coeficientes de variação, assimetria e curtose). A hipótese da diferença entre as médias de FCO₂, Ts e Us observadas nos diferentes períodos de avaliação (outubro de novembro - indicados pela análise de agrupamento), foi testada por meio do teste t de *Student* pareado, ao nível de 5% de probabilidade. Nesta etapa da condução das análises, a variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo foi descrita a partir de suas relações com a temperatura e umidade do solo por meio das análises de regressão linear e não linear. Foram testados modelos lineares, quadráticos e combinados (interação da temperatura e umidade do solo). O diagnóstico para a análise de modelos lineares foi realizado a partir do cálculo dos resíduos estudentizados, para o estudo da normalidade dos resíduos e da presença de valores discrepantes (outliers e valores influentes).

A variabilidade espacial (magnitude e direção) foi analisada utilizando a modelagem do variograma experimental, que tem como base a teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000), o qual é estimado por:

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

Em que $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h , $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no ponto x_i e $Z(x_i+h)$ é o valor da variável Z no ponto x_i+h . Os variogramas experimentais de todas as variáveis foram calculados para as quatro direções (0° , 45° , 90° e 135°) para a determinação de uma possível anisotropia. Para análise variográfica das variáveis que não apresentaram estacionariedade foi conduzida a retirada de tendência, por meio de um ajuste de uma superfície em função das coordenadas x e y .

Os variogramas experimentais foram ajustados pelos seguintes modelos teóricos: exponencial (2), esférico (3) e gaussiano (4).

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{a} \right) \right] \right\}; h > 0 \quad (2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 \leq h \leq A_0 \quad \text{então} \quad \hat{\gamma}(h) = C_0 + C; h \geq a \quad (3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h^2}{a} \right) \right] \right\}; 0 < h < d \quad (4)$$

sendo d a máxima distância na qual o variograma foi definido, C_0 corresponde ao efeito pepita; C_0+C ao patamar e a ao alcance do variograma (VIEIRA, 2000).

A escolha do melhor modelo ajustado aos variogramas utilizados no método da krigagem ordinária foi realizada por meio da validação cruzada. O processo de validação cruzada, que consiste na remoção de cada observação pertencente ao conjunto de dados com subsequente estimativa do seu valor, pelo método de interpolação (krigagem ordinária), foi utilizado para a verificação da confiabilidade do modelo matemático ajustado. O modelo escolhido foi aquele que melhor estimou os valores observados, ou seja, aquele que produziu uma equação de regressão linear entre os valores observados, em função dos valores estimados o mais próximo da bissetriz (intercepto igual a zero e coeficiente angular igual a um) (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Para validação externa, 10% dos dados originais (CERRI et al., 2004; TEIXEIRA et al., 2011) foram retirados da malha amostral antes do início da modelagem do variograma. Posteriormente foram comparados com os valores estimados pela krigagem ordinária (KO) naqueles locais.

Os parâmetros dos modelos ajustados aos variogramas experimentais foram utilizados na estimativa dos atributos estudados em locais não amostrados por meio da técnica de krigagem ordinária. Nesse processo as estimativas foram feitas a partir da equação:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

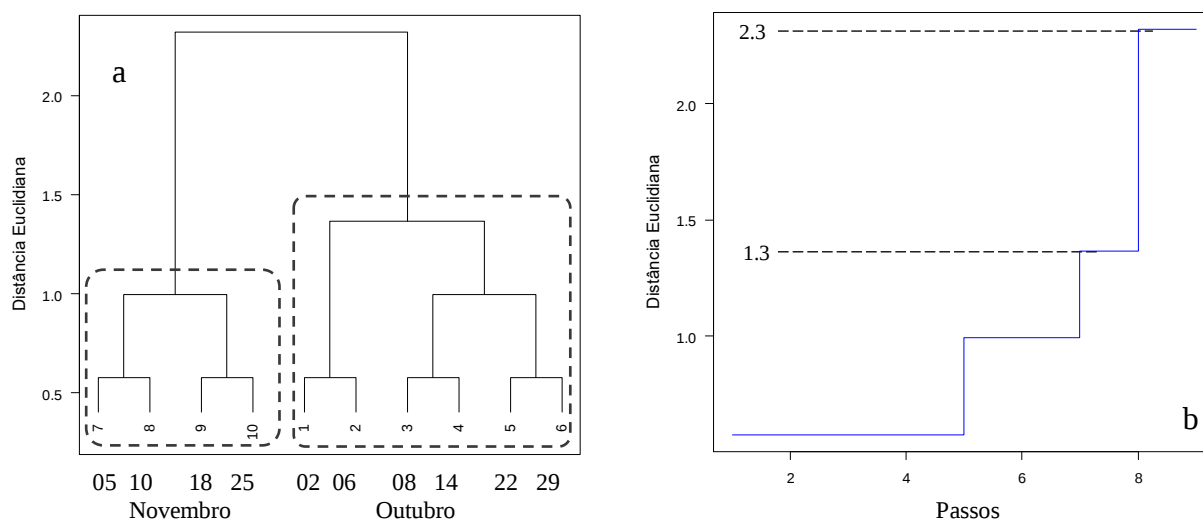
sendo Z^* , o valor a ser estimado no ponto não amostrado x_0 ; N , o número de valores medidos $Z(x_i)$ envolvidos na estimativa e λ_i os pesos associados a cada valor medido $Z(x_i)$.

Após construção dos mapas de padrões espaciais, eles foram utilizados na análise de correlação linear de Pearson, ao nível de 5% de probabilidade (estatística t de *Student*), para examinar a influência dos padrões de variabilidade espacial de Ts e Us, nos valores locais de FCO₂. Todas as análises do presente estudo foram realizadas por meio do programa R, de domínio público (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O dendrograma obtido pela análise de agrupamento hierárquico é apresentado na Figura 5 a. A obtenção de variações expressivas nos valores de distância euclidiana entre os dias estudados, para a variável FCO_2 , representam uma divisão de grupos. No presente trabalho foram observadas a variação de 1,3 para 2,3 (Figura 5 b) dividindo os dias de avaliação em dois grupos muito bem definidos, um contendo as observações realizadas durante o mês de outubro e outro contendo as observações realizadas no mês de novembro de 2015. Tal resultado evidencia o padrão de similaridade de FCO_2 para observações dentro do mesmo mês, oriunda provavelmente devido as diferenças nas precipitações ocorridas no período de estudo. Assim, a produção dos mapas médios de FCO_2 , Ts e Us foi realizada considerando os meses de estudo, ao invés de todo o período de avaliação.

Figura 5. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico evidenciando a formação de dois grupos conforme o mês de avaliação (a) e representação da distância euclidiana entre os dias de avaliação (b).

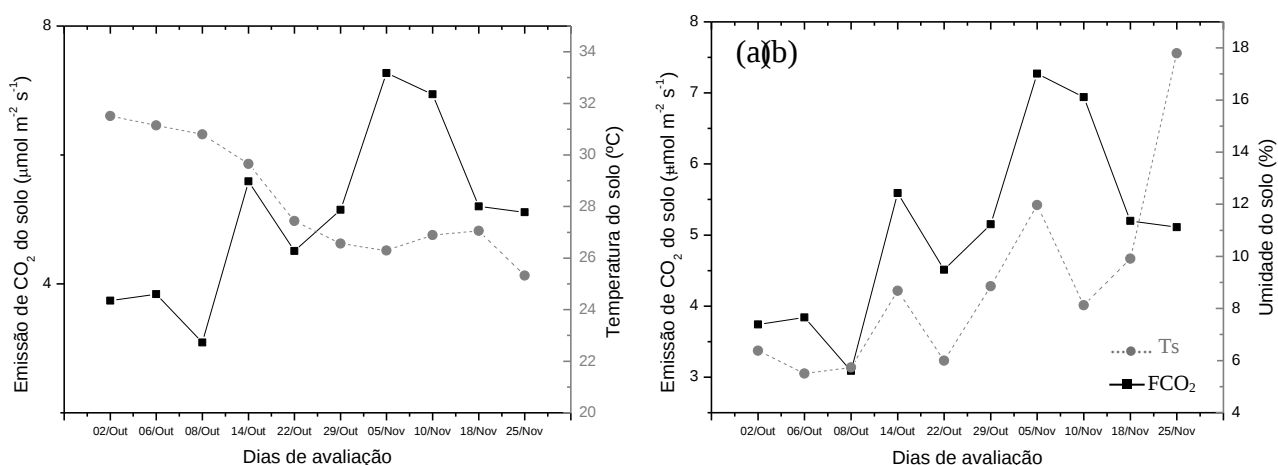


Fonte: Elaboração da própria autora.

A variação temporal de emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo nos dias avaliados consta na Figura 6, enquanto as estatísticas descritivas dessas mesmas variáveis são apresentadas nas Tabelas 1 a 3. A emissão média de CO_2 do solo apresentou variações ao longo dos dias estudados (Figura 6). A maior média de emissão de CO_2 do solo ocorreu no dia 05 de novembro, emitindo $7,27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto a menor média de emissão de CO_2 do solo ocorreu no dia 08 de outubro apresentando valor de $3,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, fato este que pode

estar relacionado às condições climáticas, como a temperatura e as precipitações mais recorrentes no mês de novembro (Figura 4). Almeida (2010) em áreas de mata atlântica no Rio de Janeiro encontrou valores de emissão de CO₂ que variaram entre 3,26 a 9,00 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com os maiores fluxos observados nos meses de maior precipitação. A maior média de emissão de CO₂ do solo (5,59 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) no mês de outubro, ocorreu no dia 14, cuja leitura foi realizada após um período de maior umidade do solo, devido à precipitação acumulada de 30,5 mm ocorridas entre os dias 9 e 13 de outubro. Dias (2006), estudando áreas de floresta nativa na Amazônia, também constatou variação sazonal dos fluxos em resposta às mudanças de temperatura e precipitação; semelhante ao presente estudo, os valores variaram de 2,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 6,09 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com maiores fluxos encontrados na estação chuvosa.

Figura 6. Variabilidade temporal de (a) emissão de CO₂ do solo e temperatura do solo; (b) emissão de CO₂ no solo e umidade do solo; durante os dias de avaliação.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Como a emissão de CO₂ do solo é fortemente dependente da umidade do solo (HOWARD; HOWARD, 1993) justifica-se então o aumento da emissão de CO₂ do solo ocorrido no dia 14 de outubro. A influência da chuva sobre a emissão de CO₂ e a umidade do solo é descrita em muitos estudos (VARGAS et al., 2014; MOITINHO et al., 2015; SILVA, 2016), sendo seus efeitos decorrentes principalmente da interação do conteúdo de água e do espaço poroso do solo (ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ et al., 2008). No entanto Epron et al. (2004) não observaram efeito da precipitação pluvial sobre a emissão de CO₂ do solo em plantação de eucalipto em solo arenoso. As variações de FCO₂ após a ocorrência de chuvas podem também estar associadas as variações de outras propriedades do solo como variações nos valores da biomassa microbiana, respiração radicular e variações na granulometria da

área, principalmente quanto aos teores de argila do solo (XU ; QI, 2001). D'Andréa et al. (2011) observaram que os fatores abióticos do ambiente (temperatura e umidade) não foram os principais determinantes da emissão de CO₂ do solo em regiões tropicais com cafeeiros, entretanto, os fatores bióticos (plantas e microbiota do solo) foram os que condicionaram as emissões de CO₂ do solo, nestes ecossistemas.

Observa-se que as médias de emissão de CO₂ do solo para os períodos estudados (outubro e novembro) apresentaram diferença significativa pelo teste *t-Student* ao nível de 5% de probabilidade, sendo que outubro apresentou média de 4,21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e novembro apresentou média de 6,16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tabela 1). Porém, o aumento da emissão de CO₂ do solo após precipitações só é verdadeira até o ponto de saturação da água quando os fluxos de CO₂ tendem a diminuir, pois essas condições favorecem o desenvolvimento da anaerobiose, retardando a decomposição da matéria orgânica e reduzindo a difusão de CO₂ para a atmosfera (KNOWLES et al., 2015).

Tabela 1. Estatística descritiva da emissão de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para os dias estudados em área de eucalipto na cidade de Selvíria, MS, no ano 2015.

Avaliações	Média	Med	EP	Min	Max	CV	Q3	Q1	Assim	Curt
02 out	3,74	3,25	0,25	1,71	8,25	39,44	4,38	2,70	1,37	0,08
06 out	3,84	3,53	0,27	1,27	9,18	40,72	4,59	2,92	1,29	0,11
08 out	3,09	3,08	0,19	1,07	5,94	36,28	3,66	2,32	0,48	0,01
14 out	5,59	5,64	0,31	2,19	11,05	32,72	6,54	4,41	0,68	0,05
22 out	4,51	4,53	0,22	1,93	7,12	28,76	5,29	3,65	0,10	<0,01
29 out	5,15	4,97	0,34	2,29	11,62	38,68	6,30	3,79	1,10	0,08
Outubro	4,21 b	4,00	0,12	1,04	8,56	27,70	3,48	4,80	1,03	0,03
05 nov	7,27	7,37	0,38	2,90	12,66	30,12	8,55	6,10	0,25	0,02
10 nov	6,94	6,71	0,35	3,03	12,76	29,66	7,55	6,05	0,93	0,07
18 nov	5,20	4,84	0,34	1,72	10,38	37,72	6,18	4,00	0,93	0,03
25 nov	5,11	5,09	0,27	2,57	10,37	30,69	5,79	4,22	0,94	0,09
Novembro	6,16 a	6,02	0,16	2,85	12,64	25,78	5,27	6,81	1,15	0,03

Nota: *Med* Mediana; *EP* Erro padrão da média; *Min* Mínimo; *Max* Máximo; *CV* Coeficiente de Variação (%); *Q1* primeiro quartil; *Q3* terceiro quartil; *Assim* Coeficiente de Assimetria; *Curt* Coeficiente de Curtose.

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração da própria autora.

As médias de temperatura do solo variaram de 31,51 °C, observada no dia 02 de outubro, a 25,32 °C, registrada no dia 25 de novembro (Tabela 2 e Figura 6), valores estes que estão dentro de uma faixa ótima para o desenvolvimento dos microrganismos do solo, não comprometendo assim as reações químicas ali presentes (PANOSSO, 2009). Nota-se que as médias de temperatura do solo para os períodos estudados, apresentaram diferença significativa pelo teste *t-Student* ao nível de 5% de probabilidade, enquanto outubro apresentou média de 28,62 °C e em novembro a média foi de 26,33 °C (Tabela 2).

Tabela 2. Estatística descritiva da temperatura do solo (°C), para os dias estudados em área de eucalipto na cidade de Selvíria, MS, no ano 2015.

Avaliações	Média	Med	EP	Min	Max	CV	Q3	Q1	Assim	Curt
02 out	31,51	31,51	0,03	31,19	31,88	0,48	31,61	31,43	0,23	0,01
06 out	31,15	31,05	0,05	30,84	31,53	1,08	31,25	31,06	0,22	0,02
08 out	30,80	30,79	0,06	30,04	31,61	1,19	31,00	30,54	0,23	<0,01
14 out	29,65	29,65	0,06	28,90	30,47	1,24	29,86	29,40	0,22	-0,01
22 out	27,44	27,50	0,05	26,90	27,90	0,98	27,60	27,23	-0,26	-0,01
29 out	26,56	26,60	0,04	26,10	27,10	0,82	26,70	26,40	-0,10	0,02
Outubro	28,62 a	28,63	0,02	28,19	29,07	0,71	28,48	28,75	-0,01	<0,01
05 nov	26,29	26,30	0,05	25,70	26,80	1,03	26,50	26,10	-0,44	<0,01
10 nov	26,89	26,90	0,05	26,30	27,50	1,15	27,10	26,80	-0,44	0,01
18 nov	27,06	27,10	0,07	25,90	27,70	1,42	27,30	26,90	-0,65	0,04
25 nov	25,32	25,40	0,06	24,30	25,90	1,44	25,58	25,10	-0,65	0,02
Novembro	26,33 b	26,33	0,02	25,50	26,95	0,92	26,23	26,45	-0,47	0,02

Nota: *Med* Mediana; *EP* Erro padrão da média; *Min* Mínimo; *Max* Máximo; *CV* Coeficiente de Variação (%); *Q1* primeiro quartil; *Q3* terceiro quartil; *Assim* Coeficiente de Assimetria; *Curt* Coeficiente de Curtose.

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração da própria autora.

Os valores de umidade do solo variaram de 5,5%, observado no dia 06 de outubro até 17,79% registrado no dia 25 de novembro de 2015 (Tabela 3 e Figura 6). As variações temporais da umidade do solo foram associadas as variações de precipitação ocorridas na área no período de avaliação. Deve-se ressaltar que o mês de novembro apresentou maiores ocorrências de precipitação, sendo observado um total de 244 mm, quando comparado ao mês de outubro, com um total de 122,5 mm, no entanto o maior volume de chuva em outubro ocorreu no dia 31 com 65 mm, precipitação está que seria acumulada para leituras no mês de novembro. De acordo com a Tabela 3 pode-se verificar que as médias de umidade do solo apresentaram diferença significativa pelo teste *t-Student* ao nível de 5% de probabilidade, quando comparadas entre outubro e novembro, observando médias de 7,12% e 12,42% respectivamente.

Tabela 3. Estatística descritiva da umidade do solo (%), para os dias estudados em área de eucalipto na cidade de Selvíria, MS, no ano de 2015.

Avaliações	Média	Med	EP	Min	Max	CV	Q3	Q1	Assim	Curt
02 out	6,38	6,00	0,17	3,00	8,00	15,44	7,00	6,00	-0,86	0,11
06 out	5,50	6,00	0,24	3,00	8,00	25,81	6,75	4,00	-0,44	-0,02
08 out	5,74	6,00	0,29	2,00	9,00	29,52	7,00	5,00	-0,39	-0,01
14 out	8,68	9,00	0,25	6,00	12,00	16,72	9,75	8,00	-0,03	<0,01
22 out	6,00	6,00	0,26	2,00	9,00	25,29	7,00	5,00	-0,61	0,02
29 out	8,85	9,00	0,32	5,00	12,00	20,83	10,00	8,00	-0,57	-0,01
Outubro	7,12 b	7,00	0,09	4,33	9,33	13,38	6,50	7,83	-0,27	<0,01
05 nov	11,97	11,00	0,42	7,00	19,00	20,62	13,00	10,25	0,76	0,04
10 nov	8,12	8,00	0,33	6,00	14,00	23,83	8,00	7,00	1,53	0,09
18 nov	9,91	10,00	0,31	7,00	13,00	18,14	11,00	9,00	0,21	-0,02
25 nov	17,79	18,00	0,52	13,00	24,00	17,16	20,00	15,25	0,30	-0,01
Novembro	12,42 a	12,13	0,18	9,50	19,25	14,40	11,25	13,25	1,13	0,02

Nota: *Med* Mediana; *EP* Erro padrão da média; *Min* Mínimo; *Max* Máximo; *CV* Coeficiente de Variação (%); *Q1* primeiro quartil; *Q3* terceiro quartil; *Assim* Coeficiente de Assimetria; *Curt* Coeficiente de Curtose.

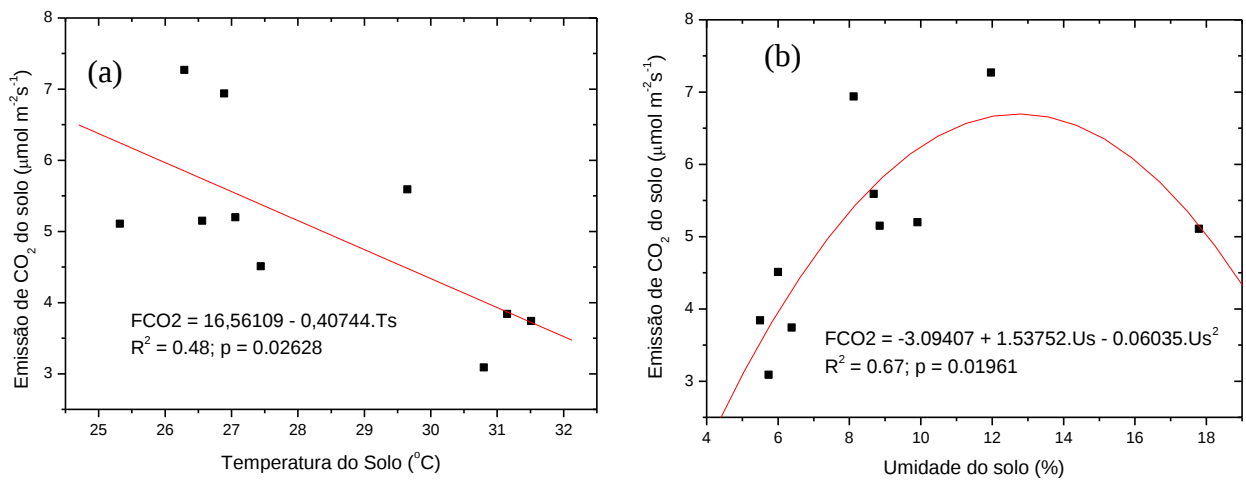
Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração da própria autora.

A análise de regressão entre a emissão de CO₂ do solo e a temperatura do solo, ao longo dos dias estudados, indicou uma relação negativa entre essas variáveis ($R^2=0,48$; $p<0,05$), (Figura 7a), de forma que, ao longo do tempo, variações de 1 °C na temperatura do solo refletiram em uma diminuição de aproximadamente 0,41 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dessa forma a temperatura do solo explicou 48% da variação temporal da emissão de CO₂ do solo. As relações lineares têm sido frequentemente usadas para descrever a relação entre a respiração do solo e a temperatura do solo (EPRON et al., 1999; REY et al., 2002). A temperatura do solo exerceu uma forte influência sobre a respiração do solo em plantações de *Pinus* tropicais na Flórida (FANG et al., 1998), enquanto que não ocorreu em pastagens ou em áreas de florestas no leste da Amazônia (DAVIDSON et al., 2000).

A análise de regressão entre a emissão de CO₂ do solo e a umidade do solo, ao longo dos dias indicou que a umidade também influenciou as variações temporais de emissão de CO₂, ($R^2=0,67$; $p<0,05$), (Figura 7b), explicando ao redor de 67% da variação temporal da emissão de CO₂ do solo, sendo o melhor resultado obtido para uma relação quadrática entre FCO₂ e Us, sendo semelhante ao obtido em estudo de Epron et al. (2004). Os resultados indicam que a umidade do solo favoreceu a emissão de CO₂ até o valor de aproximadamente 12%. Após tal valor a umidade do solo influenciou negativamente a FCO₂, possivelmente devido a obstrução da macro porosidade do solo pela molécula de água, diminuindo o coeficiente de difusão do gás no interior do solo.

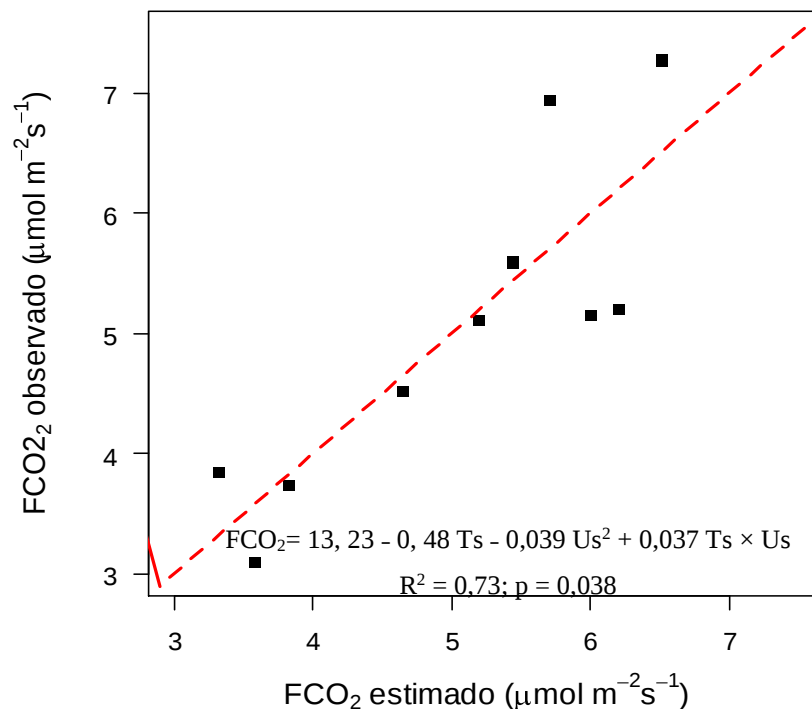
Figura 7. Análise de regressão entre a emissão de CO₂ do solo e a temperatura do solo (a) e a emissão de CO₂ do solo e a umidade do solo (b).



Fonte: Elaboração da própria autora.

O modelo combinado entre a temperatura e a umidade do solo promoveu um valor de coeficiente de determinação igual a 0,73, indicando que 73% ($F=5,40$; $p=0,039$) da variabilidade temporal de FCO_2 pode ser explicada por um modelo contendo a temperatura do solo, a umidade do solo ao quadrado e a interação entre a temperatura e a umidade do solo, $T_s \times U_s$ (Figura 8).

Figura 8. Valores médios de emissão de CO₂ do solo observados e preditos pelo modelo combinado com a temperatura e a umidade do solo, ao longo do período de avaliação em floresta de eucalipto, Selvíria, MS; RMSE=0,35.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Os parâmetros apresentaram-se diferentes de zero pelo teste *t Student* ao nível de 10% de probabilidade. Resultados semelhantes foram observados por outros autores. Epron et al. (2004) obteve um valor de RMSE de 0,40 sendo que no presente estudo foi verificado um RMSE de 0,35. Em áreas agrícolas e de floresta, a resposta da emissão de CO₂ às condições de temperatura e umidade do solo, varia tanto espacialmente quanto temporalmente (SAVVA et al., 2013; KONCZ et al., 2015).

Um estudo em florestas europeias evidenciou que a produtividade florestal também exerce influência sobre a respiração do solo do que os fatores climáticos (JANSSENS et al., 2001) e sua descoberta foi avaliada através de experimentos de manipulação de serapilheira na China, onde verificou-se que a respiração do solo era mais sensível às mudanças no volume de serapilheira do que aos fatores climáticos (XU et al., 2013).

Os coeficientes de variação da emissão de CO₂ do solo, variaram de um mínimo de 28,76% a um máximo de 40,72% (Tabela 1), resultados próximos ao encontrado por Shi e Jin (2016) onde os CV variaram de 30 a 50%, estudo esse realizado em florestas de pinheiro na China. Da mesma forma, na região central da Itália, em área de floresta de carvalho, o CV da respiração do solo variou entre 31 e 48% (TEDESCHI et al., 2006). Adotando o critério de classificação para o coeficiente de variação proposto por Warrick e Nielsen (1980), são classificados como altos (>24%), valores médios (12% < CV < 20%) e classificados como baixos (CV<12%). A emissão de CO₂ do solo foi a variável que apresentou os maiores valores de CV, sendo classificados como altos (Tabela 1). Os coeficientes de variação da umidade do solo foram classificados como médios para os dias 02 e 14 de outubro (15,44 e 16,72 %) e 18 e 25 de novembro (18,14 e 17,16%), e classificados como altos para os demais dias avaliados (Tabela 3). A temperatura do solo apresentou coeficientes de variação baixos para todo o período estudado, sendo a variável com os menores coeficientes de variação (0,48 a 1,44 %), (Tabela 2).

Assim, com base no CV, a variação espacial da temperatura do solo foi menor do que para a emissão de CO₂ do solo, sugerindo um efeito mínimo da temperatura sobre a variação espacial da emissão de CO₂ (PANOSSO, 2009). Os resultados deste estudo foram semelhantes aos encontrados por Epron et al. (2004) que estudando os aspectos da variabilidade espacial da respiração do solo em plantação de eucalipto encontraram valores de CV entre 25 a 50%. Schwendenmann et al. (2003) em estudo semelhante em solos de floresta tropical, observaram valores de CV entre 35 e 45%. Valentini et al. (2008), em seu estudo em floresta de transição amazônica, obteve a média de fluxo de CO₂ do solo de $7,50 \pm 0,51 \mu\text{mol}$

$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e o coeficiente de variação obtido foi 32%.

Apenas o coeficiente de variação não é suficiente para a comparação entre os fluxos de CO_2 de diferentes estudos, em parte, devido à falta de padronização no esquema experimental, como o tamanho e a forma da área, o número de pontos amostrais e o seu arranjo espacial (FANG et al., 1998). Nos casos em que os valores de CV são considerados de moderados à altos, justifica-se o uso da técnica de geoestatística, visando-se caracterizar os padrões de variabilidade espacial dos atributos estudados (PANOSSO et al., 2011).

Os parâmetros dos variogramas estimados para emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo para cada um dos dias estudados são apresentados na Tabela 4 e Figuras 9 a 11. Os modelos de variogramas ajustados para emissão de CO_2 do solo foram predominantes esféricos e gaussianos, exceto no dia 22 de outubro que o modelo ajustado foi exponencial (Tabela 4). Modelos esféricos representam fenômenos com desempenho linear próximo da origem, no entanto, os modelos exponenciais são mais bem ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala. Os modelos esféricos, por sua vez, são utilizados para descrição de propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

A maioria dos modelos ajustados apresentaram altos valores de coeficiente de determinação, que são expressos pelos valores de R^2 do ajuste dos variogramas. Para a emissão de CO_2 do solo, os valores de alcance (a) variaram de 18,01 m (29 out) a 35,01 m (18 nov) (Tabela 4 e Figura 12 e 13). La Scala et al. (2000), avaliando a FCO_2 em um gradeado de 100×100 m em solo desprovido de vegetação, obtiveram valores de alcance variando de 20,2 a 58,4 m. Alterações nos alcances dos modelos de variabilidade espacial de emissão de CO_2 do solo têm sido verificados entre estações do ano (OHASHI; GYOKUSEN, 2007), após ocorrências de precipitação (LA SCALA et al., 2000), e até mesmo devido ao tamanho da malha amostral (RAYMENT; JARVIS, 2000; KONDA et al., 2008).

Para temperatura do solo os modelos de variabilidade espacial foram gaussianos para os dias 08 e 14 de outubro com alcances de 13,60 e 18,27 m, respectivamente (Tabela 4 e Figura 9). No dia 05 de novembro a temperatura do solo apresentou efeito pepita puro, e observa-se que para o dia 10 de novembro o modelo ajustado foi exponencial com alcance de 33,31 m (Figura 10), entretanto para os demais dias avaliados, os modelos ajustados foram esféricos. Observa-se que os valores de alcance variaram de 15,82 a 38,70 m nos dias 02 de outubro e 25 de novembro (Tabela 4).

A umidade do solo, de acordo com a Tabela 4, apresentou predominantemente modelos esféricos (2, 6, 22 e 29 de outubro e 10 e 18 de novembro) e exponenciais apenas nos dias 8 e 14 de outubro e 25 de novembro, apresentando efeito pepita puro no dia 05 de novembro (Figura 10). Alguns autores verificaram que o modelo esférico é melhor modelo que descreve a variabilidade da umidade do solo (SOUZA et al., 2004; SIQUEIRA, 2006). Para umidade do solo os valores de alcance (a) encontrados foram de 11,82 m (6 out) a 33,26 m (8 out) (Figura 9).

Tabela 4. Modelos e estimativas dos parâmetros ajustados aos variogramas experimentais para a emissão de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (%) para os dias estudados no ano de 2015, em área de eucalipto em Selvíria, MS.

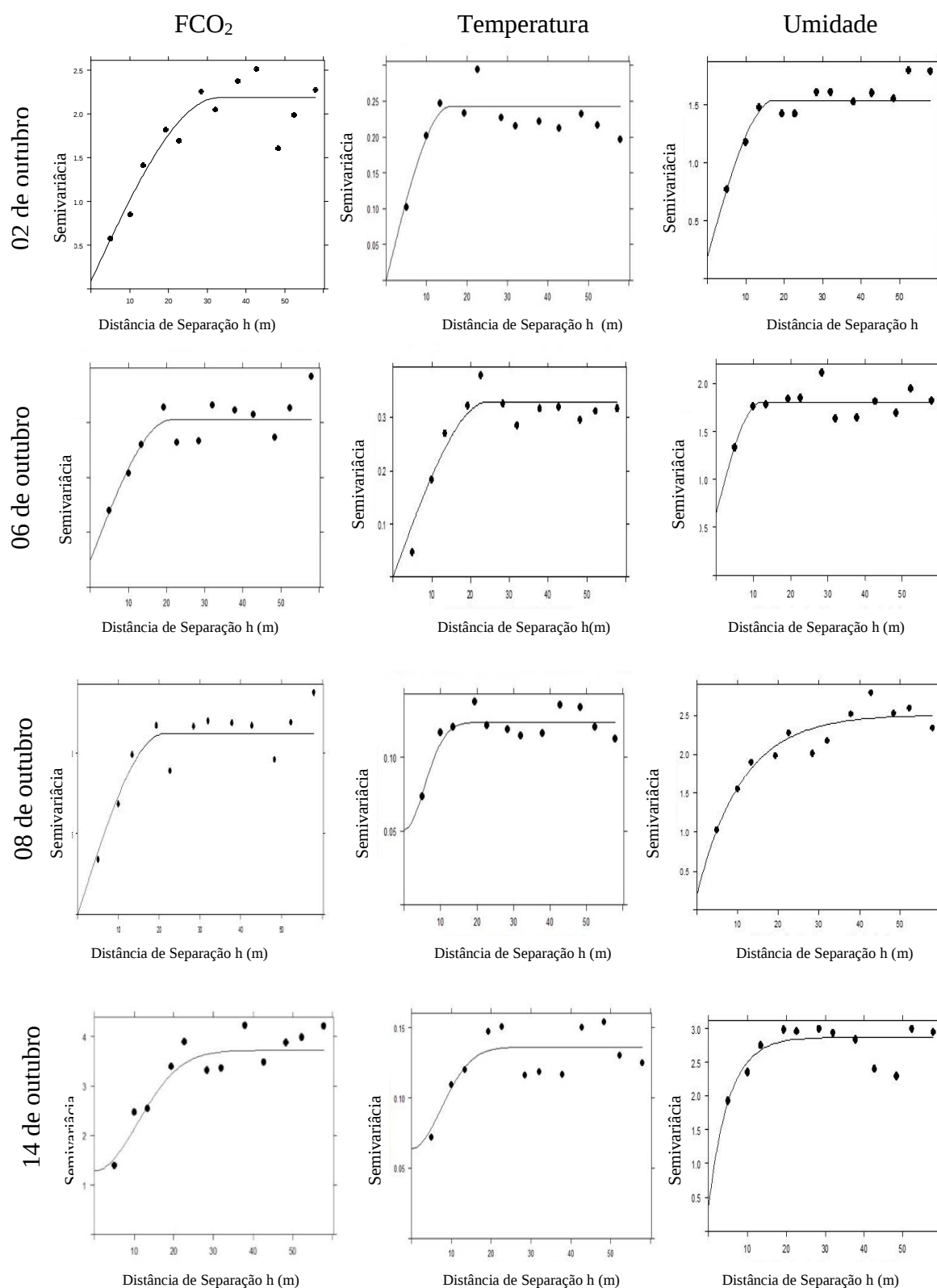
Datas	Modelos ajustados aos variogramas experimentais							Validação Cruzada*		
	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a (m)	SQR	R ²	GDE	a	b	r ²
Emissão de CO ₂ do solo										
02 out	Esf	0,0878	2,1821	32,96	0,1254	0,966	0,0402	1,784	0,249	0,028
06 out	Esf	0,2381	1,5262	21,19	0,0545	0,955	0,1560	0,603	0,839	0,149
08 out	Esf	<0,001	1,1168	21,11	0,0444	0,958	<0,001	0,688	0,774	0,181
14 out	Gau	1,2822	3,7198	26,44	0,3200	0,965	0,3446	0,246	0,963	0,325
22 out	Exp	<0,001	0,8093	27,01	0,0081	0,963	<0,001	0,316	0,926	0,163
29 out	Gau	0,7563	1,6740	18,01	0,0590	0,942	0,4517	0,076	0,981	0,160
05 nov	Gau	1,5494	3,5468	18,42	0,1332	0,973	0,4368	0,598	0,919	0,132
10 nov	Esf	1,1529	2,7805	31,31	0,0608	0,978	0,4146	1,795	0,741	0,100
18 nov	Esf	1,5246	2,7530	35,01	0,0695	0,950	0,5537	0,699	0,862	0,105
25 nov	Esf	0,6016	1,4877	21,09	0,0412	0,941	0,4043	0,048	1,010	0,143
Temperatura do solo										
02 out	Esf	<0,001	0,2424	15,82	0,0021	0,929	<0,001	2,726	1,086	0,411
06 out	Esf	<0,001	0,3305	24,75	0,0068	0,944	<0,001	2,378	1,093	0,500
08 out	Gau	0,0510	0,1239	13,60	0,0002	0,953	0,4120	2,994	0,903	0,068
14 out	Gau	0,0639	0,1361	18,27	0,0005	0,919	0,4690	1,548	0,948	0,094
22 out	Esf	<0,001	0,0613	16,44	0,0002	0,946	<0,001	7,140	0,740	0,134
29 out	Esf	0,0269	0,0587	36,70	0,0001	0,929	0,4580	4,768	0,820	0,132
05 nov	EPP	0,0835	0,0835	----	----	----	----	-----	-----	-----
10 nov	Exp	<0,001	0,0762	33,31	0,0002	0,918	<0,001	0,548	0,979	0,177
18 nov	Esf	<0,001	0,0976	19,21	0,0004	0,949	<0,001	5,729	0,788	0,168
25 nov	Esf	0,0642	0,1272	38,70	0,0001	0,966	0,5040	8,199	0,675	0,081
Umidade do solo										
02 out	Esf	0,1889	1,5349	17,27	0,0295	0,973	0,123	0,272	0,955	0,232
06 out	Esf	0,6438	1,7996	11,82	0,0334	0,915	0,358	0,753	1,137	0,066
08 out	Exp	0,1963	2,5121	33,26	0,1071	0,975	0,078	1,371	0,764	0,170
14 out	Exp	0,3754	2,8757	15,68	0,0957	0,909	0,130	2,837	0,683	0,043
22 out	Esf	0,0955	1,5246	19,20	0,0331	0,975	0,063	0,278	0,956	0,277
29 out	Esf	1,5691	2,4143	17,53	0,0211	0,953	0,649	2,366	1,578	0,109
05 nov	EPP	4,8107	4,8107	----	----	----	----	-----	-----	-----
10 nov	Esf	0,0734	3,2925	18,16	0,2419	0,959	0,022	3,161	0,622	0,082
18 nov	Esf	0,6415	3,2694	16,41	0,0387	0,990	0,196	0,273	0,978	0,159
25 nov	Exp	<0,001	1,5068	13,07	3,9229	0,805	<0,001	0,325	0,982	0,059

Nota: GDE grau de dependência espacial = $C_0/(C_0+C_1)$, forte para valores menores que 0,25; moderado para valores entre 0,25 e 0,75; fraco para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994); SQR soma de quadrados do resíduo; Exp exponencial; Esf esférico; Gau Gaussiano; EPP = efeito pepita puro.

*Parâmetros da análise de regressão entre os valores estimados e observados na análise de validação cruzada: a = coeficiente linear, b = coeficiente angular e r² coeficiente de determinação do ajuste linear.

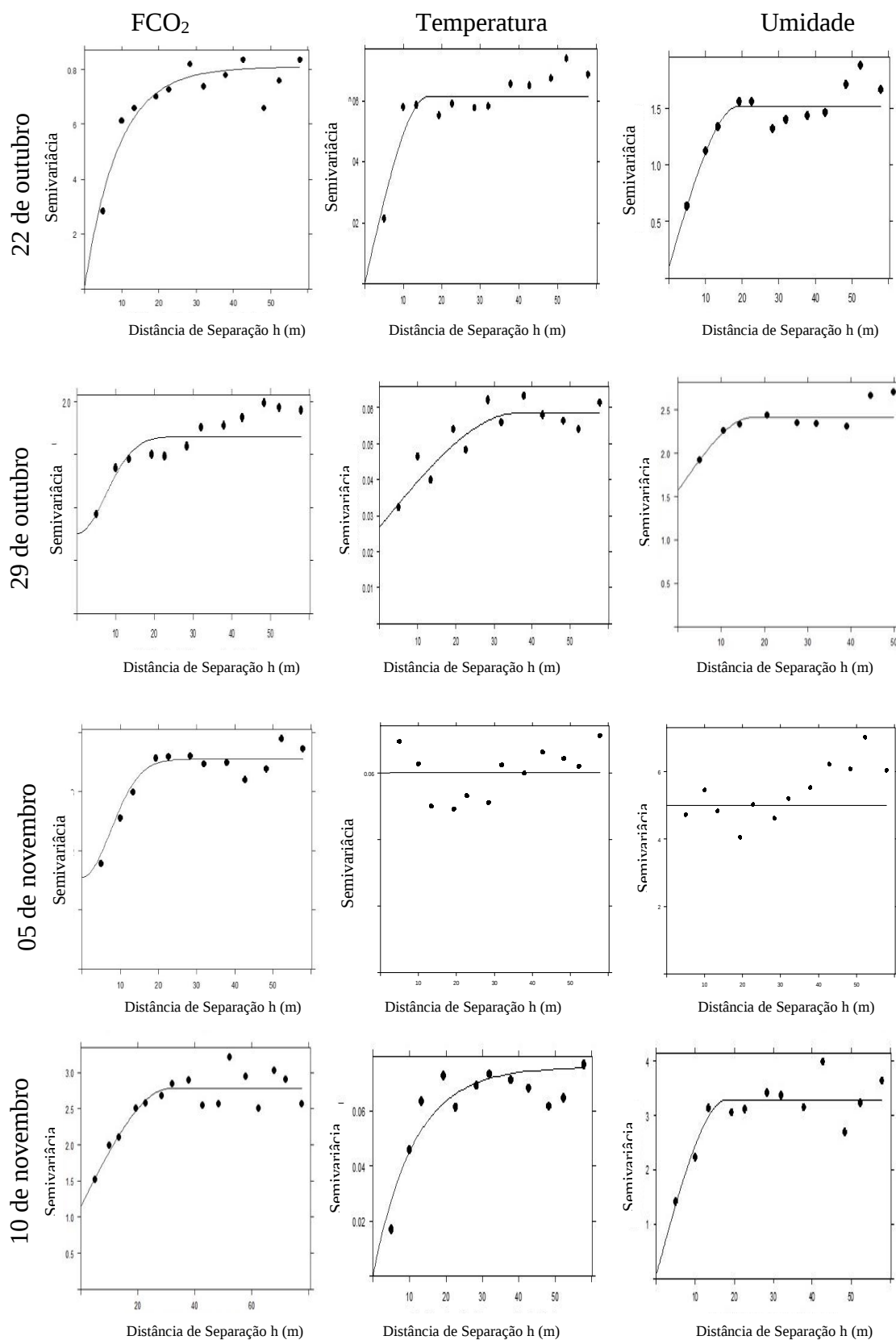
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 9. Variogramas experimentais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade do solo (%) nos dias 02, 06, 08 e 14 de outubro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.



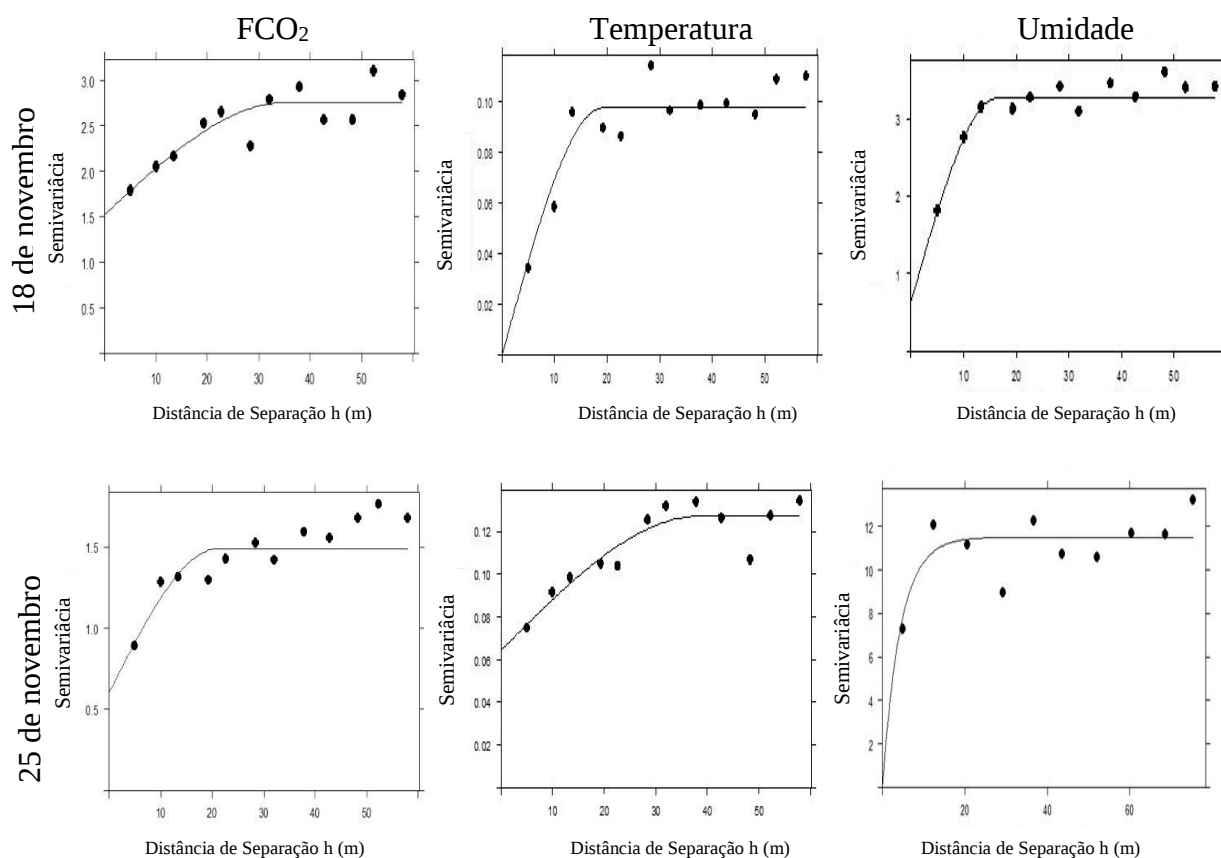
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 10. Variogramas experimentais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) nos dias 22 e 29 de outubro e 05 e 10 de novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.



Fonte: Elaboração da própria autora.

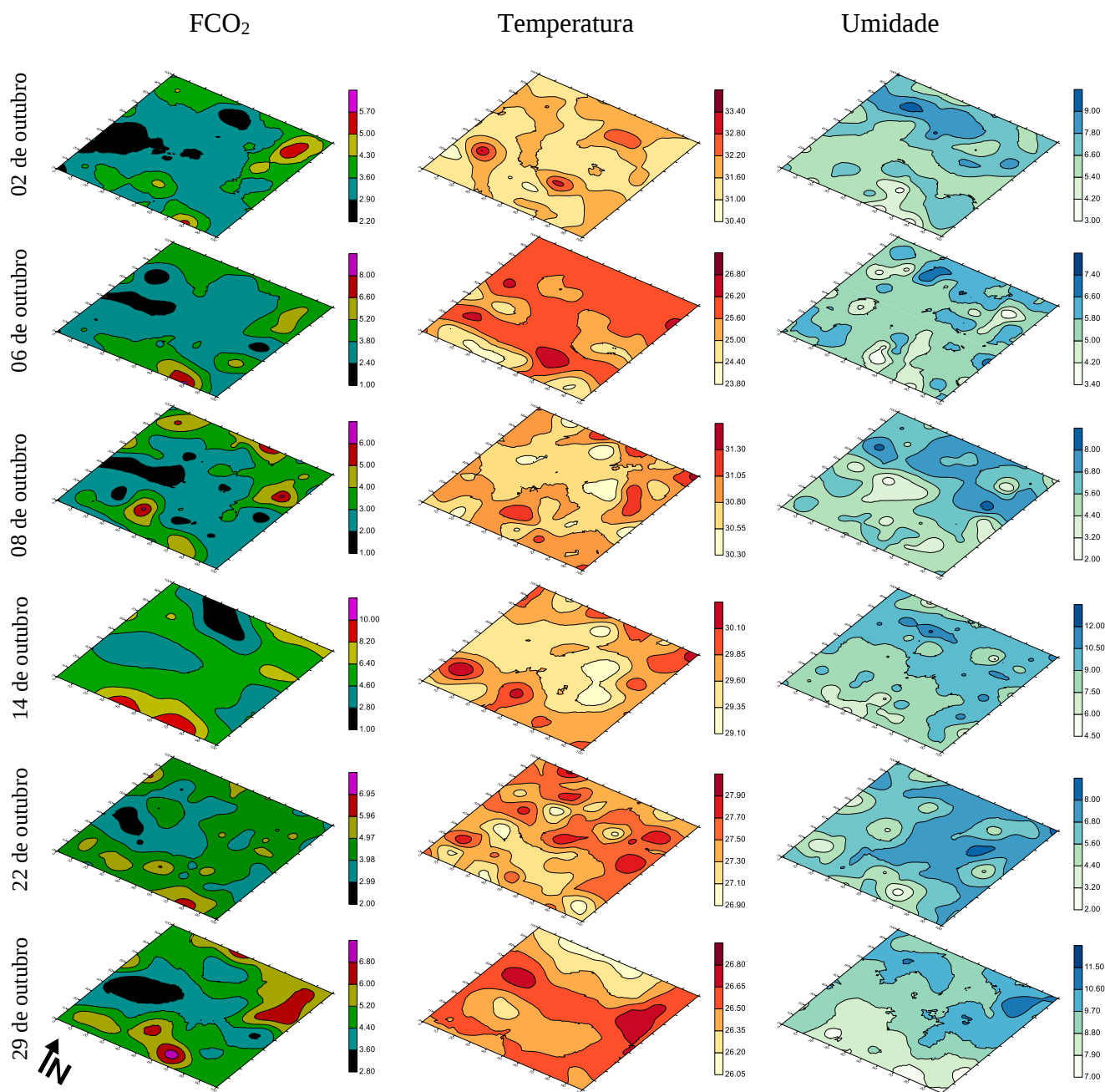
Figura 11. Variogramas experimentais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) nos dias 18 e 25 de novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.



Fonte: Elaboração da própria autora.

O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis analisadas foi determinado de acordo com a classificação proposta por Cambardella et al. (1994). O GDE para a emissão de CO₂ do solo foi classificado como forte nos dias 02, 06, 08 e 22 de outubro e moderado para os demais dias avaliados (Tabela 4). Em estudos, Brito et al. (2010), Panosso et al. (2009) e Teixeira et al. (2012) encontram estruturas de moderada dependência espacial, para a emissão de CO₂ em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Entretanto, Herbst et al. (2009), avaliando a FCO₂ em solo desprovido de vegetação determinaram estruturas com dependências variando de fraca a forte. Para a temperatura do solo o GDE foi classificado como moderado nos dias 08, 14 e 29 de outubro e 25 de novembro e forte nos outros dias avaliados (Tabela 4). No entanto para a umidade do solo, o GDE foi classificado como moderado para os dias 06 e 29 de outubro e 18 de novembro, e para os demais dias avaliados apresentaram dependência espacial forte. Os mapas de krigagem das variáveis analisadas neste trabalho são apresentados nas Figura 12 e 13.

Figura 12. Padrão espacial da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) nos dias 02 a 29 de outubro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.

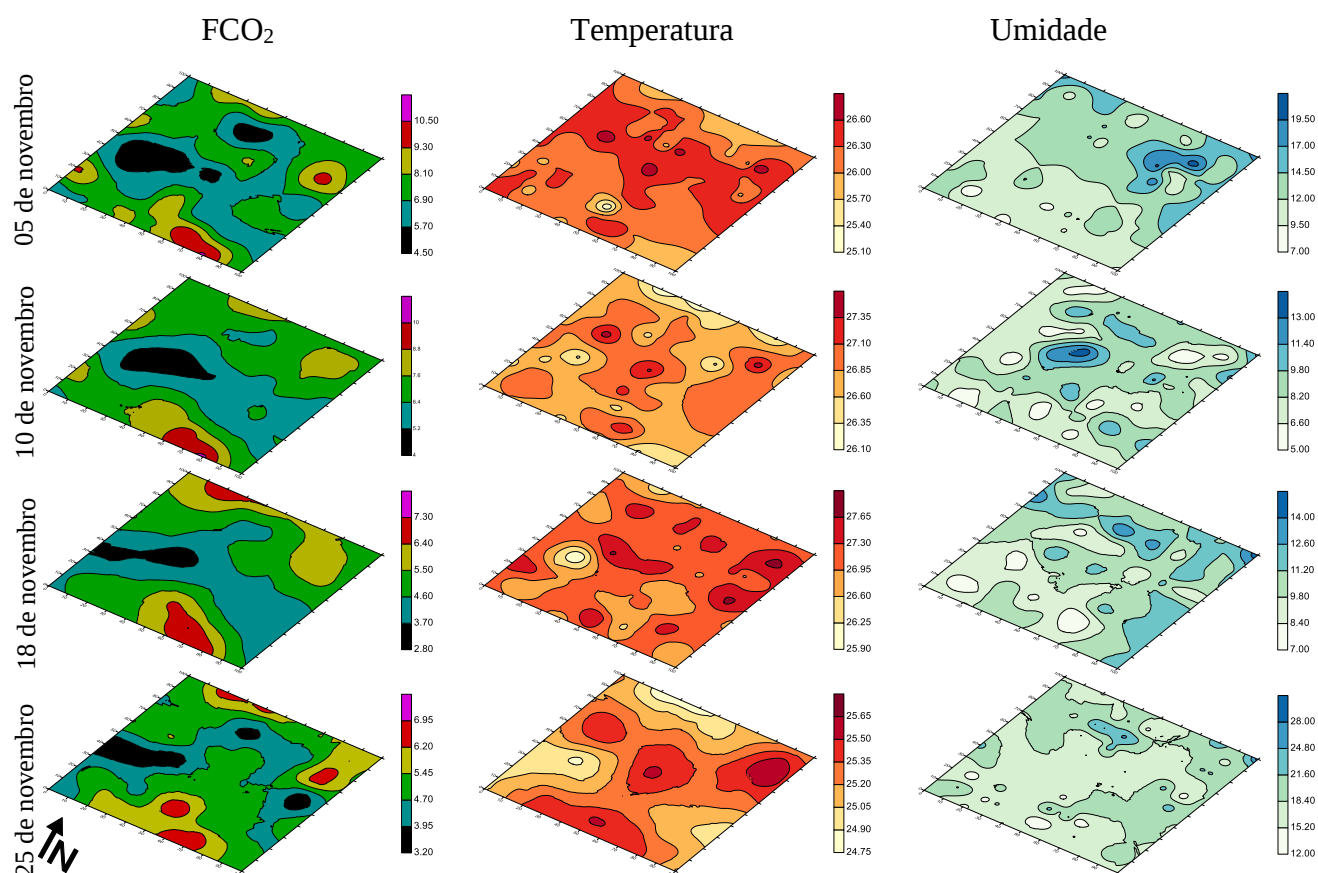


Fonte: Elaboração da própria autora.

A emissão de CO₂ do solo correlacionou-se positivamente e significativamente com a umidade do solo ao nível de 1% ($r = 0,32$; $p = 0,002$), no dia 08 de outubro. Valores de correlação positivos entre a emissão de CO₂ e a umidade do solo foram encontrados por vários autores em estudos conduzidos sob diversas condições climáticas (MORELL et al., 2010; CARBONELL-BOJOLLO et al., 2012; SILVA et al., 2013; VARGAS et al., 2014).

Assim como no dia 05 de novembro correlacionando a emissão de CO₂ com a umidade do solo, verificou-se uma correlação positiva e significativa a 5% ($r=0,24$; $p=0,02$). Porém no dia 18 de novembro, a emissão de CO₂ do solo apresentou uma correlação negativa e significativa com a umidade do solo ao nível de 1% ($r= -0,29$; $p=0,005$), ou seja, a respiração do solo, tende a aumentar com a diminuição da umidade do solo.

Figura 13. Padrão espacial da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (% volume) nos dias 05 a 25 de novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.



Fonte: Elaboração da própria autora.

No presente estudo pode-se verificar que a emissão de CO₂ do solo correlacionou-se com a temperatura do solo positivamente no dia 14 de outubro com significância de 5% ($r=0,22$; $p=0,04$). Brandão (2012) encontrou correlação positiva, porém não significativa ($r=0,42$; $p=0,20$), entre o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo. Em estudo conduzido em área de floresta na Guiana Francesa, Epron et al. (2006) encontraram correlação positiva entre FCO₂ e temperatura do solo, o que se deve provavelmente ao aumento da atividade dos

microrganismos do solo com o aumento da temperatura (BURTON; PREGITZER, 2003; EPRON et al., 2006; RYU et al., 2009). No entanto no dia 18 de novembro a emissão de CO₂ do solo apresentou uma correlação negativa e significativa com a temperatura do solo ao nível de 5% ($r = -0,22$; $p=0,04$), a emissão de CO₂ do solo aumenta com a diminuição da temperatura do solo. Nunes (2003), em uma floresta tropical primária, também encontrou, uma relação negativa entre a média da temperatura do solo e o fluxo de CO₂ do solo. A emissão de CO₂ do solo correlacionou-se negativamente ($r = -0,35$) com a umidade do solo no dia 10 de novembro, e FCO₂ apresentou correlação positiva ($r = 0,41$) com a Ts no dia 25 de novembro (Figura 13).

Os parâmetros dos variogramas estimados para emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo para os dois períodos estudados são apresentados na Tabela 5 e Figuras 14 e 15. Os modelos de variogramas ajustados no mês de outubro para FCO₂ foi esférico, para Ts foi exponencial e para Us foi gaussiano (Figura 14), no mês de novembro, o modelo esférico foi o que melhor se ajustou para FCO₂ e Us, enquanto para Ts foi o modelo exponencial (Figura 15).

Observa-se que para o mês de outubro o alcance (a) de FCO₂ foi de 36,55 m, já novembro apresentou um alcance de 26,51 m. A FCO₂ apresentou maior dependência espacial em outubro, apresentando um GDE forte. Para Us o alcance (a) encontrado apresentou grande diferença entre os períodos, outubro apresentou um alcance de 30,53 m e novembro 8,40 m, entretanto ambos apresentaram moderada dependência espacial (Tabela 5).

De acordo com as Figuras 14 e 15, é possível observar um padrão espacial, apesar das precipitações no mês de novembro, nota-se que para FCO₂ o padrão entre os dois períodos estudados tende a ser o mesmo, verifica-se que as menores emissões ocorrem na mesma região, o mesmo pode ser observado para a Us, onde as maiores umidades registradas ocorrem na mesma região do mapa. No presente estudo, FCO₂ apresentou correlação positiva ($r = 0,15$) com a temperatura do solo no primeiro período estudado (outubro), fato que pode estar relacionado com os microrganismos presentes no solo, enquanto que, para o segundo período estudado (novembro), FCO₂ correlacionou-se negativamente ($r = -0,16$) com a Us, sendo assim com a diminuição da umidade do solo, ocorre um aumento na emissão de CO₂ do solo.

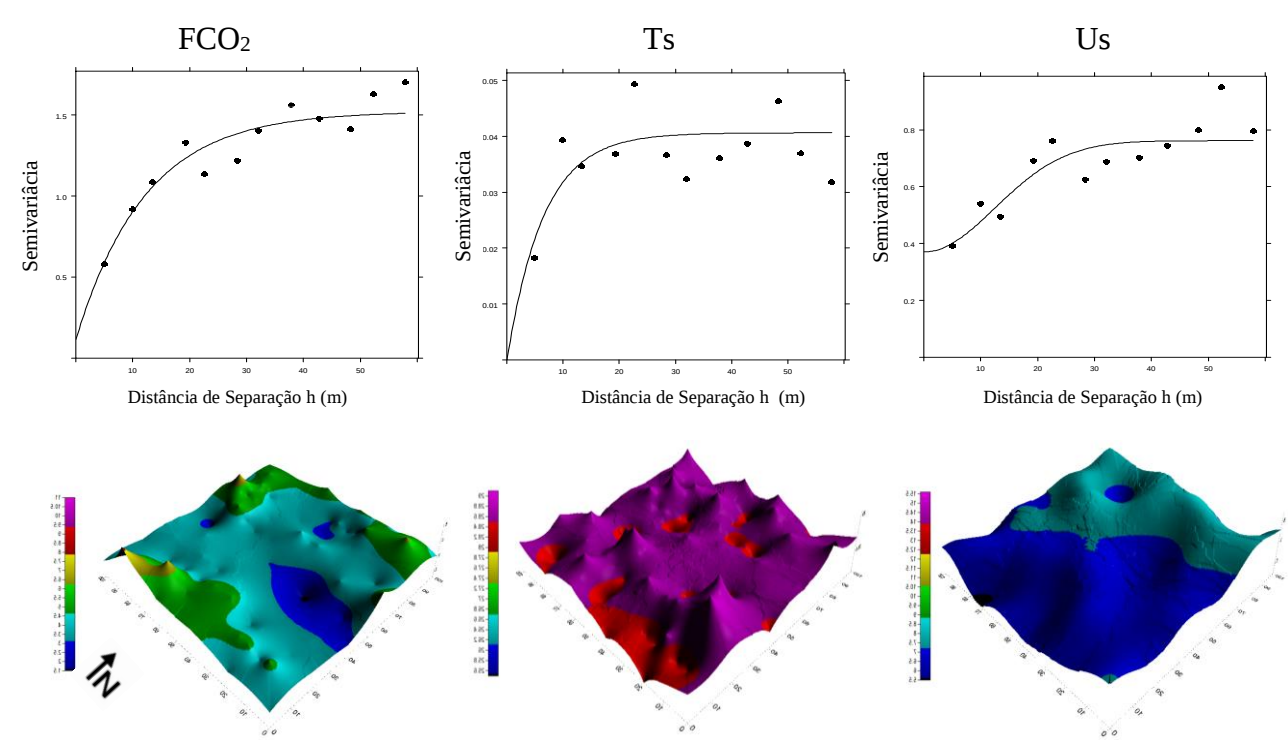
Tabela 5. Modelos e estimativas dos parâmetros ajustados aos variogramas experimentais para a emissão de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (%) para os dois períodos estudados (outubro e novembro) de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.

	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a (m)	SQR	R ²	GDE
Outubro							
FCO ₂	Esf	0,1160	1,5224	36,55	0,0501	0,976	0,076
Ts	Exp	0,0000	0,0406	19,64	0,0001	0,820	<0,001
Us	Gau	0,3702	0,7618	30,53	0,0160	0,930	0,486
Novembro							
FCO ₂	Esf	0,6181	2,2729	26,51	0,0350	0,985	0,272
Ts	Exp	0,0000	0,0433	19,40	0,0001	0,923	<0,001
Us	Esf	0,6641	1,9158	8,40	0,1706	0,420	0,347

Nota: *GDE* grau de dependência espacial = $C_0/(C_0+C_1)$, forte para valores menores que 0,25; moderado para valores entre 0,25 e 0,75; fraco para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994); *SQR* soma de quadrados do resíduo; *Exp* exponencial; *Esf* esférico; *Gau* Gaussiano; *EPP* = efeito pepita puro.

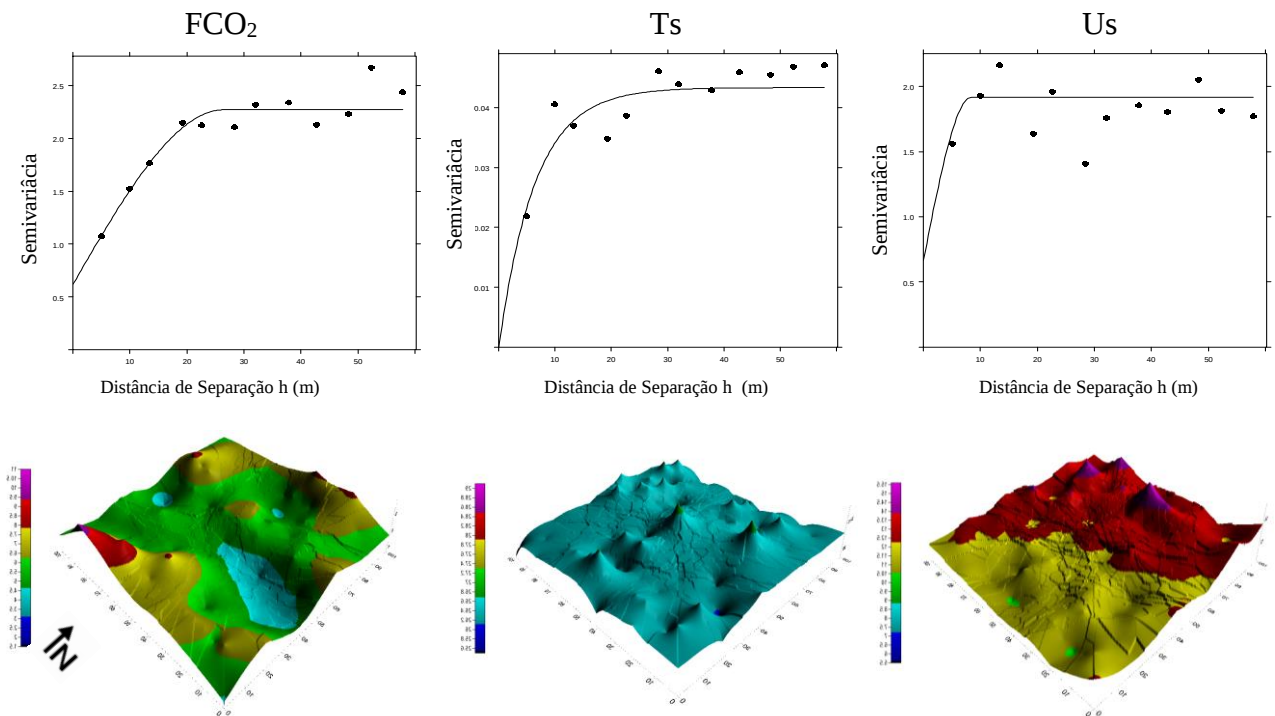
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 14. Variogramas experimentais e padrões espaciais da emissão de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹), temperatura (°C) e umidade do solo (%) em outubro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 15. Variogramas experimentais e padrões espaciais da emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) em novembro de 2015, em floresta de eucalipto em Selvíria, MS.



Fonte: Elaboração da própria autora.

5 CONCLUSÕES

A média de emissão de CO₂ do solo em área de eucalipto no cerrado sul-mato-grossense variou de 4,21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 6,16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nos meses estudados.

A umidade do solo é um fator limitante para FCO₂ em áreas de floresta de eucalipto no cerrado do Mato Grosso do Sul.

A variabilidade espaço-temporal da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo foi afetada pelas precipitações pluviais nos períodos. Valores mais elevados de emissão de CO₂ do solo foram observados após o período de precipitações ocorridas no mês de novembro.

Houve correlação positiva e significativa entre a emissão de CO₂ do solo e a umidade do solo em determinados dias, nos dois períodos estudados.

Os mapas de krigagem demonstraram uma relação entre os padrões espaciais da emissão de CO₂ e umidade do solo em outubro e novembro.

REFERÊNCIAS

- ACRECHE, M. M.; PORTOCARRERO, R.; CHALCO VERA, J.; DANERT, C.; VALEIRO, A. H. Greenhouse gas emissions from green-harvested sugarcane with and without post-harvest burning in Tucumán. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 2, p. 195–199, 2014.
- ALLAIRE, S. E.; LANGE, S. F.; LAFOND, J. A.; PELLETIER, B.; CAMBOURIS, A. N.; DUTILLEUL, P. Multiscale spatial variability of CO₂ emissions and correlations with physico-chemical soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 251-260, 2012.
- ALMEIDA, A. M. **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo sob pastagens e fragmentos de floresta atlântica em regeneração**. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
- BAHNM H.; JANSSENS I. A.; REICHSTEIN M.; SMITH P.; TRUMBORE S.E. Soil respiration across scales: towards an integration of patterns and processes. **New Phytologist Journal**, West Sussex, v. 186, p. 292–296, 2010.
- BASARIR, H.; KUMRAL, M.; KARPUZ, C.; TUTLUOGLU, L. Geostatistical modeling of spatial variability of SPT data for a borax stockpile site. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 114, n. 3-4, p. 154-163, 2010.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M.S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 888-896, 2002.
- BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; MIRANDA, J. G. V.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability structure of soil CO₂ emission and soil attributes in a sugarcane area. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 189, p. 206-215, 2014.
- BRADY, N. B. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898 p.
- BRANDÃO, A.B. **Dinâmica temporal do efluxo de CO₂ do solo em área de cerrado no Pantanal Mato-grossense**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.
- BRITO, L. F.; MARQUES JR. J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77–83, 2009.
- BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 19-27, 2010.
- BURTON, A. J.; PREGITZER, K. S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. **Tree Physiology**, Oxford, v. 23, n. 4, p. 273-280, 2003.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

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

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 51-68, 2004.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical Agriculture and global warming impacts and mitigation options. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n.1, p. 83-89, 2007.

CERRI, C. C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J. & BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: The importance of agriculture and livestock. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, p. 831-843, 2009.

CERRI, C. E. P.; GALDOS, M. V.; CARVALHO, J. L. N.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 361–36, 2013.

CHEN, X.; DHUNGEL, J.; BHATTARAI, S. P.; TORABI, M.; PENDERGAST, L.; MIDMORE, D. J. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species. **Journal of Plant Ecology**, Oxford, v. 3, n. 4, p. 1–13, 2010.

CHEN X.; POST W. M.; NORBY R. J.; CLASSEN A. T. Modeling soil respiration and variations in source components using a multi-factor global climate change experiment. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 107, n. 3–4, p. 459–480, 2011.

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

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

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

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamento de eucalipto. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 407-422, 2011.

DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTANIO, J. H.; ACKERMAN, I. L.; CARVALHO, J. E. M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazônia. **Biogeochemistry**, [S. l.], v. 48, p. 53-69, 2000.

DEFOREST J. L.; NOORMETS A.; MCNULTY S. G.; SUN G.; TENNEY G.; CHEN J. Phenophases alter the soil respiration-temperature relationship in an oak dominated forest. **International Journal of Biometeorology**, Heidelberg, v.11, n. 2, p. 135–144, 2006.

DIAS, J. D. **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de florestas nativa da Amazônia**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Escola Superior Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, 2006.

DILUSTRO, J. J.; COLLINS, B.; DUNCAN, L.; CRAWFORD, C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 87-97, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.09.001>>. Acesso em: 26 maio 2017.

EARTH SYSTEM RESEARCH – ESRL. **Recent monthly average Mauna Loa CO₂**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 26 maio 2017.

EPRON, D., FARQUE, L., LUCOT, E., BADOT, P.M. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 56, p. 221–226, 1999.

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

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

FANG, C.; MONCRIEFF, J.B.; GHOLZ, H.L.; CLARK, K.L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n. 2, p.135-146, 1998.

FÓTI S.; BALOGH J.; NAGY Z.; HERBST M.; PINTÉR K.; PÉLI E.; KONCZ P.; BARTHA S. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, p. 245–254, 2014.

FÓTI, S.; BALOGH, J.; HERBST, M.; PAPP, M.; KONCZ, P.; BARTHA, S.; ZIMMERMANN, Z.; KOMOLY, C.; SZABÓ, G.; MARGÓCZI, K.; ACOSTA, M.; NAGY, Z. Meta-analysis of field scale spatial variability of grassland soil CO₂ efflux: Interaction of biotic and abiotic drivers. **Catena**, Amsterdam, v. 143, p. 78–89, 2016.

GENG Y.; WANG Y.; YANG K. Soil respiration in Tibetan alpine grasslands: belowground biomass and soil moisture, but not soil temperature, best explain the large-scale patterns. **Plos ONE**, San Francisco, v. 7, n. 4, p. 1–12, 2012.

GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. **Journal of Ecology**, London, v. 92, n. 2, p. 189-202, 2004.

GRAF, A.; HERBST, M.; WEIHERMULLER, L.; HUISMAN, J. A.; PROLINGHEUER, N.; BORNEMANN, L.; VEREecken, H. Analyzing spatiotemporal variability of heterotrophic soil respiration at the field scale using orthogonal functions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 181, p.91-101, 2012.

GUO L. B; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, Chichester, v. 8, p. 345-360, 2002.

HAIR JF, ANDERSON RE, TATHAM RL, BLACK W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HENGL, T.; HEUVELINK, G.B.M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1-2, p. 75–93, 2004.

HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J. A.; WEIHERMULLER, L.; VANDERBORGHT, J. Characterization and Understanding of Bare Soil Respiration Spatial Variability at Plot Scale. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 8, n. 3, p. 762-771, 2009.

HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J. A.; WEIHERMULLER, L.; VANDERBORGHT, J.; VEREecken, H. Multivariate conditional stochastic simulation of soil heterotrophic respiration at plot scale. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, n. 1, p. 74-82, 2010.

HOWARD, D.M.; HOWARD, P.J.A. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. **Soil Biology & Biochemistry**, Exeter, v.25, 1537-46, 1993.

HU, W.; SHAO, M.; HAN, F.; REICHARDT, K. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 3–4, p. 260–272, 2011.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Anuario estatístico da IBA**: ano base 2014- 2015, 2015. 80 p.

IPCC. **Climate change 2014**: mitigation of climate change. Cambridge University Press, 2014. 3v.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 561 p, 1989.

JANSSENS, I.A., LANKREIJER, H., MATTEUCCI, G., KOWALSKI, A.S., BUCHMANN, N., EPRON, P.G., VALENTINI, R., Productivity Overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. **Global Change Biology**, Chichester, v.7, p. 269–278, 2001.

KAINIEMI, V. **Tillage effects on soil respiration in Swedish Arable soils**. 2014. 68 f. Doctoral Thesis (Doctorate in Soil and Environment) – Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Uppsala, 2014.

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

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

KNOWLES, J. F.; BLANKEN P. D.; WILLIAMS, M. W. Soil respiration variability across a soil moisture and vegetation community gradient within a snow-scoured alpine meadow, **Biogeochemistry**, v. 125, n. 2, p. 185–202, 2015. Doi:10.1007/s10533-015-0122-3.

KONCZ, P.; BALOGH, J.; PAPP, M.; HIDY, D.; PINTÉR, K.; FÓTI, S.; KLUMPP, K.; NAGY, Z. Higher soil respiration under mowing than under grazing explained by biomass differences. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 103, n. 2, p. 201–215, 2015.

KONDA, R.; OHTA, S.; ISHIZUKA, S.; ARAI, S.; ANSORI, S.; TANAKA, N.; HARDJONO, A. Spatial structures of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from Acacia mangium plantation soils during a relatively dry season in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, Kidlington, v. 40, n. 12, p. 3021-3030, 2008.

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

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, n. 3, p. 425–448, 2006.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n.1-2, p.122,2004. Disponível em:
<<http://dx.http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>>.

LAMB, A.; GREEN, R.; BATEMAN, I.; BROADMEADOW, M.; BRUCE, T.; BURNEY, J.; GOULDING, K. The potential for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture. **Nature Climate Change**, London, v. 6, p. 488-492, 2016.

LA SCALA, N.; DE FIGUEIREDO E. B., PANOSSO A. R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology**, Sao Carlos, v. 72, n.3, p. 775-785, 2012.

LA SCALA, N.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; PAZ GONZÁLEZ, A.; MIRANDA, J. G. V. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in na agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, n. 4, p. 353-358, 2009.

LA SCALA, N.; MARQUES, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000.

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

LEWICKI, J. L.; BERGFELD, D.; CARDELLINI, C.; CHIODINI, G.; GRANIERI, D.; VARLEY, N.; WERNER, C. Comparative soil CO₂ flux measurements and geostatistical estimation methods on Masaya volcano, Nicaragua. **Bulletin of Volcanology**, Heidelberg, v. 68, n. 1, p. 76-90, 2005.

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

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

METCALFE D. B.; FISHER R. A.; WARDLE D. A. Plant communities as drivers of soil respiration: pathways, mechanisms, and significance for global change. **Biogeosciences**, Goettingen, v. 8, p. 2047–2061, 2011.

MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; FERRAUDO, A. S.; LA SCALA, N. On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 127–132, 2015.

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

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

MORELL, F, J.; ÁLVARO-FUENTES, J.; LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Soil CO₂ fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Effects of tillage systems and nitrogen fertilization. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 139, n. 1–2, p. 167–173, 2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **NASA, NOAA analyses reveal record-shattering global warm temperatures in 2016**. [S. l.], 2016.

Disponível em: <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2016>>. Acesso em: 27 abr. 2017.

NUNES, P.C. **Influência do efluxo de CO₂ do solo na produção de forragem numa pastagem extensiva e num sistema agrosilvopastoril**. 2003. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical). Cuiabá: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso; 2003.

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

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Amsterdam, v. 113, n.1, p. 56-69, 2014.

ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R.; CARBONELL BOJOLLO, R.; GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, P.; PEREA TORRES, F. Influencia de la climatología y el manejo del suelo em las emisiones de CO₂ em um suelo arcilloso de la veja Carmona. **Revista de Estudios Locales**, Carmona, v. 6, p. 2339–2354, 2008.

OKUMURA, M. H.; PASSOS, A.; NADER, B.; DE TOMI, G. Improving the monitoring, control and analysis of the carbon accumulation capacity in Legal Reserves of the Amazon forest. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 104, n. 3, p. 109-120, 2015.

PANOSSO, A. R.; PEREIRA, GENER, T.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em dois sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 227-236, 2008.

PANOSSO, A. R.; RIBEIRO, C. E. R.; ZANINI, J. R.; PAVANI, L. C.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of CO₂ emission, temperature and moisture of a bare oxisol submitted to different wetting levels. **Semina-Ciencias Agrarias**, Londrina, v. 30, n., p. 1017-1033, 2009.

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

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

PIVETTA, M. Extremos do clima. **Revista Pesquisa FAPESP (online)**, São Paulo, v. 16, n. 21, p. 1-6, 2013. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2013/08/13/extremos-do-clima/>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. **Mudanças ambientais de curto e longo prazo:** projeções, reversibilidade e atribuição. 2014. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_cap9.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

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

RAICH, J. W.; POTTER, C. S.; BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration 1980-94. **Global Change Biology**, Chichester, v. 8, p. 800-812, 2002.

RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Kidlington, v. 32, n. 1, p. 35-45, 2000.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). 2. ed. **Fundamentos da matéria orgânica do solo:** ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

RETH, S.; REICHSTEIN, M.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux - A modified model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, n. 1-2, p. 21-33, 2005.

REY, A.; PEGORARO, E.; TEDESCHI, V.; DE PARRI, I.; JARVIS, P.; VALENTINI, R., Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy. **Global Change Biology**, Chichester, v. 8, p. 851–866, 2002.

RYU, S.; CONCILIO, A.; CHEN, J.; NORTH, M.; MA, S. Prescribed burning and mechanical effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 4, p. 1324-1332, 2009.

ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 71, n. 2, p. 189-196, 1991.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

RUEHR N. K., BUCHMANN, N. Soil respiration fluxes in a temperate mixed forest: seasonality and temperature sensitivities differ among microbial and root-rhizosphere respiration. **Tree Physiol**, Oxford, v. 30, n. 2, p. 165–176, 2010.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro, p. 353, 2013.

SARTORI, F.; LAL, R.; EBINGER, M. H.; PARRISH, D. J. Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. **Critical Reviews in Plant Sciences**, New York, v. 25, n. 5, p. 441-472, 2006.

SAVVA, Y.; SZLAVECZ, K.; CARLSON, D.; GUPCHUP, J.; SZALAY, A.; TERZIS, A. Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 192, p. 202–210, 2013.

SCHARLEMANN, J. P.; TANNER, E. V.; HIEDERER, R.; KAPOV, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, Abingdon, v. 5, p. 81–91, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.4155/cmt.13.77>>. 10 maio 2017.

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

SHI, B.; JIN, G. Variability of soil respiration at different spatial scales in temperate forests. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 52, p. 561–571, 2016.

SILVA, F. E. **Variabilidade espaço-temporal da emissão de CO₂ do solo em curto período sob influência de eventos de precipitação**. 2016. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Jaboticabal, 2016.

SILVA, E. F.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission associated with liming in area of conversion of orange for sugarcane. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 885–898, 2013.

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

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo, Campinas, 2006.

SIX, J.; FREY, S. D.; THIES, R. K.; BATTEN, K. M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 555–569, 2006.

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

TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P. G.; BORGHETTI, M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, n. 1, p. 110-121, 2006.

TEIXEIRA, D. B.; BICALHO, E. S.; CERRI, C. E. P.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Quantification of uncertainties associated with space-time estimates of short-term soil CO₂ emissions in a sugar cane area. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 167, n., p. 33-37, 2013.

TEIXEIRA, D.B.; BICALHO, E.S.; PANOSSO, A.R.; PERILLO, L.I.; IAMAGUTI, J.L.; PEREIRA, G.T. & LA SCALA Jr, N. Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO₂ emissions and related properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p.1466-1475, 2012.

TEIXEIRA, D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 345, n. 1-2, p. 187-194, 2011.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011.

USSIRI, A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an Alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 39–47, 2009.

VAL, J. E.; FERRAUDO, A. S.; BEZERRA, L. A. F.; CORRADO, M. P.; LOBO, R. B.; FREITAS, M. A. R.; PANETO, J. C. C. Nellore bull selection alternatives using multiple traits of economic importance. **Arquivo Brasileiro De Medicina Veterinária E Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 60, n. 3, p. 705-712, 2008.

VALENTINI, C.M.A.; SANCHES, L.; PAULO, S.R. de; VOURLITIS, G.L.; Nogueira, J.S.; Pinto-Júnior; O.B., Lobo F. de A. 2008. Soil respiration and aboveground litter dynamics of a tropical transistional forest in northwest Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 113, p. 43-45, 2008. G00B10, doi:10.1029/2007JG000619.

VANDE WALLE I.; SAMSON R.; LOOMAN B.; VERHEYEN K.; LEMEURE R. Temporal variation and high-resolution spatial heterogeneity in soil CO₂ efflux in a short-rotation pine plantation. **Tree Physiol**, Oxford, v. 27, n. 6, p. 837–848, 2007.

VARGAS, V. P.; CANTARELLA, H.; MARTINS, A. A.; SOARES, J. R.; CARMO, J. B.; ANDRADE, C. A. Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture conditions. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 2, p. 174–179, 2014.

VERMEULEN, S. J.; CAMPBELL, B. M.; INGRAM, J. S. I. Climate change and food systems. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v. 37, p. 195–222, 2012.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. (Ed.) Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. p. 1-54.

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

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980.

WMO. The State of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through. Tokyo: World Meteorological Organization, World Data Centre for Greenhouse Gases. 8 p. (WMO Greenhouse Gas Bulletin, 12).

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

XU, S., LIU, L.L., SAYER, E.J., Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments. **Biogeosciences**, Goettingen, v. 10, 7423–7433, 2013.