

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CAMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM ÁREAS  
DE CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DA LÓGICA FUZZY**

**Angélica da Silva**

**Engenheira Agrônoma**

**2021**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM ÁREAS  
DE CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DA LÓGICA FUZZY**

**Angélica da Silva**

**Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso**

**Coorientador: Nelson José Peruzzi**

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

**2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

|       |  |
|-------|--|
| S586m | <p>Silva, Angélica da<br/>Modelagem da emissão de CO<sub>2</sub> do solo em áreas de cana-de-açúcar por meio da lógica Fuzzy / Angélica da Silva. -- Jaboticabal, 2021<br/>60 p. : il., tabs., fotos</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal<br/>Orientador: Alan Rodrigo Panosso<br/>Coorientador: Nelson José Peruzzi</p> <p>1. atributos do solo. 2. conjunto de regras. 3. fluxo de CO<sub>2</sub>.<br/>4. lógica Fuzzy. 5. modelos determinísticos. I. Título.</p> |
|-------|--|

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DA LÓGICA FUZZY

AUTORA: ANGÉLICA DA SILVA


ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORIENTADOR: NELSON JOSÉ PERUZZI

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

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO (Participação Virtual)   
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal - UNESP

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR (Participação Virtual) p/   
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. ONÃ DA SILVA FREDDI (Participação Virtual) p/   
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais-UFMT/Sinop / Sinop/MT

Jaboticabal, 07 de abril de 2021

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**ANGÉLICA DA SILVA** – Filha de Valdir Aparecido da Silva e Doralice Clares da Silva, nasceu em Avaré, São Paulo, no dia 19 de outubro de 1992. Em março de 2011, ingressou no curso de Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Mato Grosso – Campus de Sinop; em 2015 transferiu o curso para Engenharia Agrônômica na mesma Universidade. Foi monitora da disciplina de fertilidade do solo e nutrição de plantas nos anos de 2013 e 2014; estagiária na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA durante o período de outubro de 2014 à abril de 2015 na área de forragicultura e integração Lavoura Pecuária e Floresta; discente voluntária no Grupo de Estudos em Pecuária Integrada nos anos de 2014 à 2016; bolsista de Iniciação Científica – Pibic, durante o período de agosto de 2016 à dezembro de 2017; realizou estágio curricular obrigatório na Universidade Federal de Lavras – UFLA, no laboratório de nutrição de plantas, durante janeiro à agosto de 2018. Iniciou, em agosto de 2018, o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. No mês de abril de 2021, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo aprovada como Mestre em Agronomia.

## **EPÍGRAFE**

“Deus provê, Deus proverá. A sua misericórdia não faltará!”

### **Dedicatória**

À minha mãe Doralice Clares da Silva *in memoriam*, que em nenhum momento me desamparou e nunca mediu esforços para que eu estudasse e realizasse meus sonhos (que também eram os dela). Por ter sido exemplo de força e coragem durante sua passagem aqui na Terra e por ter me ensinado o verdadeiro sentido do amor. Dedico este trabalho e o restante dos meus dias, amando, honrando e respeitando-a.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por me abençoar, ter me dado sustento e forças para conseguir ultrapassar as dificuldades durante a caminhada do mestrado. Sem a fé, não conseguiria chegar ao fim desta jornada e a realizar mais este sonho.

A mim, por não ter desistido dos meus sonhos mesmo tendo fraquejado. Por seguir firme no meu propósito de me formar mestre, de ter dado mais um passo na minha carreira acadêmica e de seguir firme no propósito de ser instrumento para a evolução e mudança de vida de tantas pessoas através dos estudos.

A minha família, que sempre me auxiliou e não mediu esforços para a minha formação. Muito obrigada por estarem comigo em todas as fases. Ao meu pai Valdir Aparecido da Silva, que sempre foi um incentivador da minha formação e sempre acreditou em mim. Em especial à minha sobrinha, Maria Alice Silva de Miranda Chaves, que é a minha alegria e a razão para continuar em busca de conhecimento.

A minha mãe por tudo que me ensinou a ser e a crer. Por ter me dado todo o suporte em todas as decisões da minha vida. Por ter comemorado comigo o início desta jornada, e estar comemorando e abençoando do céu o final desta realização. O fim desta etapa é pela senhora, obrigada Mãe! Te amo.

Ao meu orientador, Dr. Alan Rodrigo Panosso, pelos ensinamentos transmitidos, mas principalmente, por ter sido humano e pela paciência. Obrigada por se colocar no meu lugar e aceitar continuar com o trabalho mesmo a passos lentos.

Ao meu co-orientador, Dr. Nelson José Peruzzi, pela clareza, disponibilidade e conhecimentos repassados.

Ao professor, Dr. Onã da Silva Freddi, por aceitar prontamente colaborar sendo banca de defesa deste trabalho. Obrigada também pelo exemplo de professor em minha época de graduação mesmo não tendo sido sua aluna.

Aos meus amigos de Unesp, meus irmãos científicos, que desde o início me receberam de braços abertos. Me deram a mão, me apoiaram, me fortaleceram e me ensinaram muitos caminhos. Obrigada por todas as contribuições.



A Ludhanna Marinho Veras, pelo coração bondoso, pelas contribuições e pelas horas gastas para a finalização deste trabalho. Obrigada por estar comigo.

Aos amigos Thais Leite e Fernando Brunhari, pelo afeto e amparo em toda minha estadia em Jaboticabal, agradeço em nome da minha família por terem sido meu braço direito em toda jornada com a minha mãe. Somos imensamente gratos a vocês. Que Deus retribua todo o amor desprendido a nós.

Aos amigos Amanda Gonzalez e Abner Penha, pelas melhores companhias e incentivos para que o mestrado chegasse ao fim. Aos passeios memoráveis e ao carinho que sempre tiveram comigo. Obrigada pelo companheirismo e por me fortalecerem.

Ao meu amigo, pai científico, dono dos passos que eu sigo, Prof. Dr. Anderson Lange, por ter me apresentado a academia e por ter me incentivado a seguir a carreira acadêmica. Por me auxiliar em tudo o que precisei para que eu me tornasse professora.

A professora, Dra. Solange Bonaldo, pela empatia e carinho. Obrigada pelos conselhos e incentivos (na hora certa!). Obrigada por ser essa profissional maravilhosa.

A minha prima Fabiane Cristina Clares, que em todos os momentos (sem exceções) sempre foi minha cúmplice, amiga e porto seguro. Obrigada por você na minha vida.

Aos meus amigos da época de ensino fundamental/médio Ana Rúbia, Débora Gaieski, Marciele Marchesan, Maycon Douglas e Suzamar de Souza por sempre me incentivarem e acreditarem em mim. Obrigada pela ajuda de todos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A FCAV/Unesp – Jaboticabal, pela estrutura, corpo docente e pela vivência de aprendizado. Fui muito feliz neste lugar.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1 Inércia Climática.....  | 17        |
| 2.2 Impacto dos Gases de Efeito Estufa na Sociedade .....                           | 18        |
| 2.3 Impacto dos Gases de Efeito Estufa na Agricultura .....                         | 20        |
| 2.4 Brasil: Produção de Alimentos x Emissão dos Gases de Efeito Estufa.....         | 20        |
| 2.5 Manejo de Solos Tropicais e a Mitigação dos Gases de Efeito Estufa.....         | 21        |
| 2.6 Emissão de CO <sub>2</sub> do Solo e sua Relação com os Atributos do Solo ..... | 23        |
| 2.7 Produção Brasileira de Cana-de-Açúcar.....                                      | 25        |
| 2.8 Modelagem das Emissões de CO <sub>2</sub> por meio da Lógica Fuzzy.....         | 27        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>   | <b>28</b> |
| 3.1 Localização e Descrição da Área de Estudo .....                                 | 28        |
| 3.2 Emissão de CO <sub>2</sub> do Solo e os atributos do solo. ....                 | 29        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>35</b> |
| 4.1 Comportamento das variáveis de estudo.....                                      | 35        |
| 4.2 Correlação entre as variáveis .....   | 43        |
| 4.3 Lógica Fuzzy e FCO <sub>2</sub> .....   | 48        |
| <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>51</b> |

## MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DA LÓGICA FUZZY

**RESUMO** – Ações ambientais ligadas às mudanças climáticas têm causado preocupações para lideranças governamentais e muito tem-se discutido sobre o tema. Um dos assuntos mais relevantes são os Gases de Efeito Estufa (GEE), e por ser um tema amplo e dinâmico, é importante que haja uma compreensão correta das causas, consequências e as dimensões desse efeito. Objetivou-se a caracterização dos padrões do fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) do solo, por meio da lógica Fuzzy, e os atributos do solo (físicos, químicos e biológicos) em área de cultivo de cana-de-açúcar. Os experimentos foram conduzidos nos municípios de Guariba - SP no ano de 2008, Jaboticabal – SP no ano de 2010, e Pradópolis no ano de 2012. As avaliações foram realizadas após a colheita de cana-de-açúcar, que estavam no sistema de manejo de colheita mecanizada em que os resíduos vegetais permanecem na superfície do solo. Nas áreas estudadas foram avaliados o FCO<sub>2</sub> do solo, umidade do solo e temperatura do solo com relação aos atributos do solo. Foi utilizada a lógica Fuzzy para expressar ou traduzir o conhecimento, sobre o FCO<sub>2</sub> do solo em áreas agrícolas em forma de regras. Todos os procedimentos estatísticos e de programação Fuzzy foram mensuradas no software livre R (R Development Core Team, 2020). Os índices de correlação para os atributos do solo e FCO<sub>2</sub> se apresentaram de forma levemente positiva para todos as variáveis de estudo, porém, para macroporosidade e temperatura do solo a correlação está mais próxima de ser nula. O uso de 3 variáveis de estudo foi suficiente para a obtenção de uma boa classificação e culminando num total de 27 regras para análise por meio da lógica Fuzzy, nas quais as variáveis são consideradas altamente correlacionadas com a variável de resposta (FCO<sub>2</sub>). A técnica de modelagem baseada em modelagem de incertezas e constituído por um conjunto de regras, demonstrou que a lógica Fuzzy é eficaz para estimar o FCO<sub>2</sub>. A complexidade do sistema pode ser abstraída pelos conjuntos de regra (modelos determinísticos). Entretanto, faltam variáveis para melhorar a explicação, como por exemplo, o gás carbônico atmosférico, e a captura de oxigênio. O que pode ser incorporado em novos trabalhos com a mesma análise.

### Palavras-chave

Atributos do solo, conjunto de regras, fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, lógica Fuzzy, modelos determinísticos.

## MODELING OF CO<sub>2</sub> EMISSION FROM SOIL IN SUGARCANE AREAS THROUGH FUZZY LOGIC

**ABSTRACT** - Environmental actions linked to climate change have caused concerns for government leaders and much has been discussed on the topic. One of the most relevant issues is the Greenhouse Gases (GHG), and because it is a broad and dynamic theme, it is important that there is a correct understanding of the causes, consequences and dimensions of this effect. However, the objective was to characterize the FCO<sub>2</sub> patterns of the soil, using the Fuzzy logic, in addition to studying the relationships of such patterns with the other attributes of the soil in a sugarcane cultivation area. The studies were conducted in the cities of Guariba - SP in 2008, Jaboticabal - SP in 2010, and Pradópolis in 2012. The evaluations were carried out after the sugarcane harvest, which were in the mechanized harvest management system in which the vegetable residues remain on the soil surface. In the studied areas, soil FCO<sub>2</sub>, soil moisture and soil temperature were evaluated in relation to soil attributes. Fuzzy logic was used to express or translate knowledge about soil FCO<sub>2</sub> in agricultural areas in the form of rules. All statistical and Fuzzy programming procedures were measured using the free software R (R Development Core Team, 2020). The correlation indices for soil and FCO<sub>2</sub> attributes were slightly positive for all study variables, however, for macroporosity and soil temperature, the correlation is closer to zero. The use of 3 study variables was sufficient to obtain a good classification and culminating in a total of 27 rules for analysis using the Fuzzy logic, where such variables are considered highly correlated with the response variable. (FCO<sub>2</sub>). The modeling technique based on uncertainty modeling and consisting of a set of rules, demonstrated that the Fuzzy logic is effective for estimating the FCO<sub>2</sub>. The complexity of the system can be abstracted by the rule sets (deterministic models). However, there is a lack of variables to improve the explanation, such as atmospheric [CO<sub>2</sub>], and O<sub>2</sub> capture. What can be incorporated into new works with the same analysis.

### Key words

Soil attributes, set of rules, CO<sub>2</sub> emission from soil, Fuzzy logic, deterministic models.

## 1. INTRODUÇÃO

Questionamentos acerca das problemáticas ambientais ligadas às mudanças climáticas têm causado preocupações para lideranças governamentais e muito tem-se discutido sobre o tema. Um dos pontos em destaque são os Gases de Efeito Estufa (GEE), e por ser um assunto amplo e dinâmico, é importante que haja uma compreensão correta das causas, consequências e as dimensões desse efeito. A conferência do clima (COP-21), realizada em 2015, teve como acerto o Acordo de Paris, que objetivou a longo prazo, limitar os efeitos do aumento de temperatura, já que cientistas afirmam que a elevação da temperatura pode trazer efeitos devastadores, como aumento do nível do mar, eventos climáticos extremos, propagação de doenças, além da falta de água e alimentos. Tais mudanças também são capazes de alterar a temperatura do ar e o ciclo hidrológico, por exemplo, interferindo na biodiversidade e podem causar degradação do solo, além de escassez de outros recursos naturais.

O efeito estufa é um fenômeno atmosférico natural, e benéfico, pois, mantém a temperatura da Terra de modo que seja habitável e produtivo (agronomicamente), por meio da retenção de calor pela superfície terrestre, e conseqüentemente, manutenção da temperatura média do planeta entre 15 e 18 °C. Sem esse fato, a temperatura média do planeta seria 30 °C mais fria. (SMITH et al., 2003). Os principais GEE são dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que são os responsáveis por reter os raios solares transformando a Terra em uma “estufa”.

Após a revolução industrial (ocorrida no século XIX), maiores quantidades de GEE estão sendo lançados para a atmosfera, o que intensificou o processo e pode ter alterado as condições climáticas do planeta, logo modificando o ambiente, assim como as atividades agrícolas, pecuária, além de danos à saúde humana (Terçariol et al., 2016). Também após este período a comunidade científica convencionou adotar o termo de “Efeito Estufa Adicional” para a intensificação das emissões devido ao forçamento radiativo promovido pela emissão adicional desses gases.

A mudança do uso da terra é responsável por 69% das emissões de CO<sub>2</sub> (Silva Junior, et al 2020), favorecendo o efeito estufa adicional na terra em virtude da quantidade emitida para a atmosfera. Por menores que sejam as emissões de CH<sub>4</sub> e

N<sub>2</sub>O, estes possuem um potencial de aquecimento de 23 e 296 vezes, respectivamente, mais elevado que o CO<sub>2</sub>.

O aumento na produção de combustíveis a partir de fontes renováveis desponta-se como uma alternativa na diminuição da emissão de GEE, e mostra sua viabilidade a curto e médio prazo, além de que a prática aponta alternativas sustentáveis em razões ambientais, econômicas e sociais. Opções de combustíveis estão sendo exploradas para que haja a substituição ou a diminuição (em grande escala) da utilização dos combustíveis fósseis para fontes que agriam menos o ambiente sendo assim, os biocombustíveis são viáveis e compatíveis à substituição.

Nesse contexto, o Brasil se destaca na extensiva utilização de tecnologia limpa, sendo o país pioneiro na utilização de etanol, desde o fim da década de 1970. Além da utilização em larga escala, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol (ANP, 2020). Existem duas formas de utilização de etanol, o anidro e o hidratado, sendo o primeiro, no Brasil utilizado como componente de mistura na obtenção da gasolina, e o hidratado como combustível acabado.

A minimização do desmatamento, queimadas e queima de combustíveis fósseis em conjunto de usos e manejos de solo que promovam um acúmulo e, conseqüente, sequestro de carbono no solo, despontam-se como alternativas, que devem ser implantadas à campo, afim de buscar reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Cerri et al., 2007).

Nesse contexto de que a sustentabilidade deve alcançar grandes expressões, em dezembro de 2019, aconteceu a Conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas (COP25), onde novamente líderes mundiais se reuniram para discutir possíveis soluções para o aquecimento global. No intuito de reduzir as emissões de GEE no planeta, sugeriu-se transformar o CO<sub>2</sub> em ativos econômicos, nas quais nações que promovem redução das emissões GEE recebam uma certificação de redução que conta como crédito de carbono e pode ser comercializado com países que não reduziram ou ainda têm metas a cumprir. Entende-se que um crédito de carbono é correspondente a uma tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente que deixou de ser emitida.

A agricultura de baixo carbono é uma tendência crescente para o combate às mudanças climáticas e para a criação de novos moldes de negócios para a agricultura. O mercado de carbono na agricultura é presumível se os produtores instalarem negócios viáveis acerca do uso da terra e produção para sequestrar carbono no solo ou redução das emissões de carbono das culturas. Neste sentido é preciso que existam modelos de medição de redução e protocolos pautados em ciência, sendo uma ferramenta que nos permite estudar e verificar possíveis efeitos da agricultura em relação a dinâmica do carbono e nutrientes do solo.

Segundo o IPCC, (2007), a agricultura mundial é o agente emissor responsável por 11, 47 e 58% de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, respectivamente, dos gases para a atmosfera, decorrente das emissões antrópicas. Embora haja prejuízos, a agricultura pode ser também parte da solução para o problema. Alternativas de sistemas agrícolas que propõem o uso do solo mais sustentável podem transformar a agricultura de uma grande emissora para um grande sumidouro de carbono. A exemplo, os sistemas agropastoris, agrossilvipastoris e plantio direto (Torres et al. 2017), além de reduzirem o uso de fertilizantes sintéticos, podem evitar o desmatamento, aumentar a captura de gás carbônico atmosférico, recuperar o solo, manutenção da biodiversidade e sustentabilidade da agropecuária (Pinto et al., 2008).

Estudos vêm sendo desenvolvidos para com o intuito de entender a variação do FCO<sub>2</sub> do solo (La Scala Jr et al., 2012; Moitinho et al, 2013; lamaguti et al., 2015; Santos et al., 2019), porém, o CO<sub>2</sub> apresenta uma grande variabilidade temporal e espacial, o que ainda não nos apresenta uma resposta que satisfaça nossa indagações, pois na geoestatística, a incerteza é uma estimativa que consegue medir o quanto o resultado de uma medida, no caso deste trabalho – os atributos do solo, é confiável.

Nesse contexto a logica Fuzzy, é um recurso que vem sendo utilizado para solucionar problemas complexos. Desenvolvida por Zadeh em 1965, ela vem se destacando em diferentes áreas do conhecimento, representando uma mudança significativa tanto na abordagem como no resultado das avaliações ambientais, levando em consideração o saber técnico a campo e interpretações linguísticas. Além disso, nos oferece respostas, saindo do campo restrito do verdadeiro ou falso,

apresentando respostas precisas ou adequadas (ZADEH, 1965; CABANILLAS et al, 2012).

A hipótese do trabalho é demonstrar as relações de causa e efeito do FCO<sub>2</sub> e os atributos do solo, que podem ser modeladas por meio de uma modelagem determinística, como a lógica Fuzzy.

Portanto, o objetivo do trabalho será caracterizar os padrões do FCO<sub>2</sub> do solo, por meio da lógica Fuzzy e estudar as relações de tais padrões com os demais atributos do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar, além de verificar qual o melhor cenário de escolhas de variáveis para diminuição do momento de inércia do sistema.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Inércia Climática

Sabemos que inércia é a tendência natural de um objeto em resistir a alterações em seu estado original de repouso ou movimento. O sistema climático também possui seu estado de inércia (Lemoine, e Rudik, 2017), e isso significa que são necessárias ações antecipadas para que haja mudança no fluxo do clima (Mattauch et al 2020) sendo as ações propostas e acordos firmados pelas lideranças governamentais no Acordo de Paris (UNFCCC 2015) incapazes de surtir efeito a curto prazo.

Segundo Zickfeld et al. (2013), o compromisso com as mudanças climáticas refere-se às mudanças esperadas no futuro em detrimento das atividades humanas passadas, com isso especialistas propuseram a governos regulamentações e impostos sobre carbono para mitigar as mudanças climáticas (UNEP, 2019)

Algumas formas de comprometimento da mudança climática têm sido discutida na literatura (Zickfeld et al., 2013), e um deles é o compromisso de “emissão zero” (Daavis et al., 2018), que consiste no aquecimento esperado após a completa eliminação das emissões (Giletti et al., 2011; Matthews e Zickfeld, 2012). Mesmo havendo redução da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera a zero, a sua concentração na atmosfera e conseqüentemente a temperatura global permanecerá elevada por milênios Zickfeld et al. (2013).

O aquecimento climático persistirá decorrente da longa vida útil do carbono antropogênico na atmosfera, pois, enquanto metade do carbono emitido é removido pelo ciclo natural do carbono dentro de um século, o CO<sub>2</sub> antropogênico remanescente persistirá na atmosfera por milênios (Archer, 2005). Montenegro et al. (2007) afirmam que 80% do CO<sub>2</sub> antropogênico emitido possui uma vida média de perturbação na atmosfera de aproximadamente 350 ~ 400 anos, e o restante persistirá na atmosfera por aproximadamente 5 000 anos. Contudo, nota-se que a temperatura global pode não diminuir em paralelo com as concentrações atmosféricas de GEE, mas sim permanecer elevada por vários séculos evidenciando que as mudanças climáticas decorrentes das emissões de CO<sub>2</sub> de combustíveis fósseis acarretam mudanças climáticas irreversíveis em escalas de tempo humanas. A dificuldade é, portanto, que

a geração que causa o problema está na melhor fase para resolvê-lo, porém, como as consequências completas se concretizarão em grande escala de tempo, terão o menor incentivo para fazê-lo.

## 2.2 Impacto dos Gases de Efeito Estufa na Sociedade

O clima global tem sofrido alterações em detrimento à ação humana, (Trenberth, 2018; Malhi et al., 2020) e as emissões de GEE se intensificaram nos últimos anos (Mendes, 2015) a taxas nunca registradas na história (Roscoe, 2003). Essas ações antropogênicas foram causadoras no aumento de 0,6 °C a temperatura média do planeta, de acordo com o segundo relatório publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) e a tendência é de aumentar em 0,7 °C na temperatura média global por década (UNDP, 2007).

A conversão de terras agrícolas no período da Revolução Industrial não foi tão expressiva quanto a partir de 1945, que a partir deste período aumentou significativamente, chegando a cerca de um quarto da superfície terrestre global modificado para algum sistema de cultivo (Cerri et al., 2007). As concentrações dos GEE têm apresentados altos níveis, conforme boletim publicado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2016), as concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O aumentaram em 144%, 256% e 121%, respectivamente, se comparados aos níveis pré-industriais.

O território destinado à produção agrícola pode ser expandido, pois a população mundial chegará a 9,6 bilhões de habitantes em 2050 (ONU, 2013), e conseqüentemente, a demanda de alimentos, energia etc. aumentará (Binns et al., 2021). As mudanças climáticas podem estar atreladas à ação antropogênica em detrimento ao aumento populacional. Este crescimento contínuo da população pode tornar a oferta de alimentos escassa, sendo que, a amplitude dessas modificações poderá causar estresse, desordens no crescimento e na composição nutricional das plantas, além das relações antagonistas com outros organismos (Chapin III et al., 2000), motivando impactos que comprometem a estrutura dos ecossistemas e na dinâmica de interações. Admitindo a disponibilidade de terras agricultáveis, sabe-se

que a expansão horizontal da agricultura pode não atender a demanda, devendo haver a intensificação dos sistemas produtivos em mais safras em ambientes tropicais e tecnologia aplicada aos ganhos de produtividade, como materiais resistente às pragas e doenças e adaptados a condições edafoclimáticas.

Um dos problemas previstos para a agricultura com o aumento da temperatura é que aumente a taxa de evapotranspiração, e portanto, um aumento no déficit hídrico que tem como consequência uma ampliação de áreas com alto risco climático (Pinto et al., 2008). Para a cultura do feijão o aquecimento do clima reduzirá a área de plantio em 4,3%, já em 2020, ocasionando prejuízos de R\$ 155 à R\$ 453,4 milhões de reais até o ano de 2070 (Pinto et al., 2008). Para a cultura do arroz, as perdas podem alcançar R\$ 600 milhões de reais e uma redução de área de plantio de até 14% (Pinto et al., 2008). Além do arroz e do feijão, que é a base alimentar do brasileiro, outras culturas também podem ser prejudicadas, como o milho, que em 2020 sofre redução de área favorável para plantio de 12%, acarretando em um prejuízo de R\$ 1,2 bilhões, podendo chegar a R\$ 1,7 bilhões quando a área de plantio da cultura pode atingir patamares de redução de 17% em 2070 (Pinto et al., 2008). O cenário previsto para a cana-de-açúcar é favorável, aumentando a área de plantio em 283% em 2020 (Pinto et al., 2008). Este cenário para a cultura da cana-de-açúcar torna-se favorável decorrente da fisiologia da cultura; a cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo C4 (que possui um mecanismo de concentração de CO<sub>2</sub> nas células do mesófilo e favorece a descarboxilação na células da bainha vascular), que permite o fechamento parcial dos estômatos reduzindo a condutância estomática e a transpiração quando submetidas a altas concentrações de CO<sub>2</sub>.

Essas reduções de área apta para o plantio, implica em forte redução do PIB brasileiro (mesmo com o aumento para cana-de-açúcar), já que a economia do país depende em altas porcentagens do agronegócio nacional. Neste contexto torna-se um desafio compreender a tolerância das espécies agrícolas sob influência das alterações do clima e como driblar os impactos causados por esses efeitos.

Além do fato da dificuldade de se produzir alimentos, implicando em desabastecimento alimentar num futuro próximo, as emissões de GEE implicam na saúde da sociedade. Lorenz et al. (2017) verificou que o aumento da temperatura

média do planeta, induzido pelas emissões de GEE deve contribuir para ampliar, no Brasil, a área de distribuição de doenças (Lorenz et al., 2017). E ainda de acordo com Blank (2015), muitas pessoas até 2050 serão obrigados a abandonar seus lares em busca de locais mais seguros e passíveis de sobrevivência em consequência às questões ambientais, afirmando que o número de pessoas deslocadas pela problemática climática é maior que refugiados perseguidos por razões políticas, sociais ou religiosas.

### 2.3 Impacto dos Gases de Efeito Estufa na Agricultura

A agricultura, principalmente em grande escala, depende muito do clima e tais mudanças como alteração no ciclo hidrológico e temperatura da atmosfera (Jat, et al., 2018) decorrentes do efeito estufa ocasionam variações na produtividade das plantas e concludente impacto na produção de alimentos. Com o aumento da temperatura decorrente do aquecimento global a perda estimada para a economia brasileira foi de R\$ 7,4 bilhões em 2020 e até R\$ 14 bilhões em 2070 (Gonçalves e Gurgel, 2012). Tal cenário não afeta somente a economia do país, mas implica em instabilidade social, incentivando a desigualdade social atingindo as classes menos favorecidas, e até setores como a indústria.

### 2.4 Brasil: Produção de Alimentos x Emissão dos Gases de Efeito Estufa

As contribuições brasileiras nas emissões dos GEE advindas do uso de combustíveis fósseis fogem do cenário global por serem menores (Cerri et al., 2007). Em emissões totais, considerando todas as fontes de emissão, o Brasil ocupa a 7ª posição no ranking dos maiores emissores de gases para a atmosfera, contribuindo com 1 bilhão de toneladas nas emissões totais, representando 4% nas emissões globais, ficando atrás da China, Estados Unidos, União Europeia, Índia, Rússia e Indonésia, com uma percentagem de contribuição nas emissões de 22, 20, 15, 8, 5,5 e 5%, respectivamente (Viola, 2009). Justamente por este quadro particular que o Brasil se encontra, de que mesmo não tendo expressiva participação em emissões causadas por combustíveis fósseis, a comunidade internacional “pressiona” o país para que ajude a contribuir para a redução da emissão de GEE (Rocha, 2003) e fez

com o Brasil assumisse um compromisso como voluntário visando a redução nas emissões até 2020, participando de acordos globais para a mitigação dos GEE (Ely et al., 2015).

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2020) o Brasil emitiu 2,2 bilhões de toneladas de GEE em 2019. O setor de uso do solo – que compreende os setores de mudança de uso da terra e de agropecuária – representaram 72% das emissões brasileiras em 2019. Tal panorama pode ser explicado pela disponibilidade de terras e a necessidade da expansão da agricultura, sendo estes, responsáveis para o crescimento econômico do país (Gonçalves e Gurgel, 2012) e importante na produção mundial de alimentos.

No relatório apresentado pela FAO e pela OCDE (2015), o Brasil ganhou uma seção de destaque, em que o país aponta oportunidades capazes de incrementar a produtividade e sua responsabilidade como um dos maiores produtores mundiais de proteína. O relatório ainda mostra que o Brasil aumentará a capacidade produtiva decorrente das melhorias produtivas, expressando maiores rendimentos da produção agropecuária. Dados publicados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, indicam que o Brasil possui uma área plantada por grãos de aproximadamente 64 milhões de hectares em 2017, e cerca de 11,5 milhões de hectares destinados a iLPF (EMBRAPA, 2016).

Sabe-se que sistemas conservacionistas de manejo do solo são indiscutíveis como alternativas de redução de emissão de GEE (Paustian, et al 2016; Ferreira et al., 2020) a exemplo de sistemas iLP, que no bioma Cerrado apontou incremento no acúmulo de carbono no solo (Carvalho et al., 2010).

## 2.5 Manejo de Solos Tropicais e a Mitigação dos Gases de Efeito Estufa

O solo é um recurso natural que colabora para o desenvolvimento vegetal e para a regulação e a participação do fluxo de água no ambiente. A ciência da importância e da qualidade do solo é proeminente na incorporação de estratégias de manejos sustentáveis. Contudo, a matéria orgânica do solo é um dos atributos determinantes na definição da qualidade do solo, e é justamente na superfície do solo

onde se encontra a maior quantidade de matéria orgânica, sendo que a superfície do solo está mais exposta a ação antrópica.

Existem dois reservatórios de carbono: a biomassa viva (vegetais, animais, etc.) e a matéria orgânica do solo (maior reservatório de carbono terrestre), sendo nestes reservatórios os responsáveis pela estocagem de carbono. De acordo com Cerri et al. (2004), o solo é composto de um compartimento chave, no processo de emissão e sequestro de carbono, comprovando que, globalmente, há duas ou três vezes mais carbono nos solos (1500-2000 Pg), em relação ao estoque presente na vegetação (470–655 Pg). Logo, manejos inadequados podem mineralizar a matéria orgânica e transferir grandes quantidades de GEE para a atmosfera (De Souza Barros, J. D., 2013).

Além disso, o manejo influi nas perdas de C orgânico, por emitir CO<sub>2</sub> para a atmosfera, o que acelera o efeito estufa (Teixeira et al., 2013). Ao se cultivar o solo, o acúmulo de C no sistema solo-atmosfera é alterado, sendo assim, o solo apresenta uma diminuição no estoque de C devido às altas taxas de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e influxo (diminuído) de C fotossintetizado no solo, influenciando seu estoque (Costa et al., 2006).

O sistema de plantio convencional (SPC) que inverte a camada superficial do solo e incorpora os resíduos vegetais, por quebrar os agregados do solo, aumenta a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, pois favorece a atividade microbiana, permitindo que o C antes protegido pelos agregados se tornem mais expostos e facilitados pela alta oxigenação e temperatura do solo (Silva et al., 2014). Logo, o sistema de plantio direto (SPD), tem como premissa a não perturbação do solo, em conjunto com a manutenção de resíduos de culturas em cobertura no solo, e é apontado como uma alternativa no sequestro de C da atmosfera, aumentando o estoque de C orgânico através da sua ciclagem no sistema solo-atmosfera (Lal, 2007).

Compreende-se por mitigação, a redução nas emissões de GEE e o envolvimento de mudanças na utilização de recursos naturais, combustíveis fósseis e energias alternativas, além de, alterações em direção a um modelo de consumo menos intenso de C (carbono) e eficiência energética (PBMC, 2014). A força por mitigação pode ser induzida pelo próprio mercado, visto que mudanças tecnológicas

de produção ou até mesmo preferências dos agentes econômicos passem a considerar a necessidade da redução das emissões.

Os solos são grandes reservatórios de C orgânico, contudo, pesquisas estão sendo elaboradas para entender os métodos de absorção e emissão por diferentes ecossistemas e também em escolhas capazes de promover o sequestro de CO<sub>2</sub> em diversos manejos de uso da terra (Moitinho, 2013). Sequestro de carbono nada mais é que a absorção do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera e sua transformação em componente orgânico (estoque e disponibilidade para as plantas) (Ozério et al., 2007).

O sequestro de C em áreas agrícolas são dependentes de fatores como a textura do solo e características do perfil e clima (Lal, 2004). Já as estimativas de perdas de carbono podem ser inferidas pela determinação do estoque de MO do solo, ou ainda, pela quantidade das emissões de CO<sub>2</sub>. Em comparação com a biomassa vegetal, sabe-se que os solos armazenam quatro vezes mais C; e que o CO<sub>2</sub> fixado pela vegetação é, em partes, consumido pela atividade respiratória da planta, que é uma fonte de energia para os demais sistemas heterotróficos, consumidos pela respiração dos mesmos, e, por processos de decomposição (Roscoe, 2003).

## 2.6 Emissão de CO<sub>2</sub> do Solo e sua Relação com os Atributos do Solo

A emissão de CO<sub>2</sub> é resultante de processos bioquímicos existentes no solo e relaciona-se com a respiração das raízes e a atividade microbiana (LAL, 2009), sendo plantios de culturas com baixo aporte de resíduos vegetais envolvendo o pousio, também facilitam a emissão do gás para a atmosfera (Bayer et al., 2000).

A respiração do solo (liberação do CO<sub>2</sub> da superfície para a atmosfera) é primariamente definida como a atuação conjunta da respiração das raízes e a ação dos microrganismos ao decompor a matéria orgânica (Panosso et al., 2008; Stockmann et al., 2013). Atuando de forma significativa no conteúdo de C, a respiração do solo é o principal elemento na transferência de C da pedosfera para a atmosfera (Vicca et al., 2014) e responsável por emitir quantidades expressivas de C, aproximadamente 75 bilhões de toneladas no mundo, sendo que 20% deste total

advindo de atividades agrícolas. No Brasil, tal atividade é responsável por 75% das emissões, principalmente pela mudança do uso da terra (IPCC, 2007).

A porosidade, é um dos fatores mais importantes na dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) para a atmosfera em conjunto com a atividade microbiana decorrente da temperatura e umidade do solo. Os poros são espaços vazios entre as partículas de solo e agregados preenchidos por água e ar, e estes podem ser classificados como macroporos, mesoporos, microporos, ultramicroporos ou criptoporos, de diâmetro equivalente do poro, respectivamente, de > 5000, 74 – 30, 30 – 6, 6 – 0,1, < 0,1 µm (Brewer, 1964).

As possibilidades do CO<sub>2</sub> alcançar a atmosfera pelos macroporos são mais facilitadas, pois, a linearidade dos poros é maior, simplificando a sua chegada à superfície do solo (Tavares et al., 2015). O sistema de manejo empregado na área de cultivo afeta a porosidade do solo que implica diretamente nas taxas de emissão de CO<sub>2</sub>. Fatores como a temperatura e a umidade, além de proporcionarem alta atividade microbiana (Panosso et al., 2009), são aspectos que mais elucidam as mudanças nas emissões de CO<sub>2</sub> pelo solo no decorrer do tempo. O teor de água no solo e a temperatura variam de acordo com a estação do ano, sendo assim, a taxa de respiração é menor com a diminuição da temperatura e quando o teor de água no solo é maior no outono e inverno, já quando ocorre o aumento de temperatura na primavera, as taxas de respiração do solo também aumentam (Davidson et al., 1998).

A taxa de transferência de CO<sub>2</sub>, do solo para a atmosfera, é com medida pela produção no solo, temperatura da atmosfera e do solo, concentração no sistema solo-atmosfera e pelos atributos físicos do solo, além, da pressão atmosférica que o ambiente é acometido. As ações dos microrganismos na fase de decomposição da MO em conjunto com a respiração das plantas são responsáveis pela produção de CO<sub>2</sub>, já o transporte do gás é vinculado à estrutura física do solo, sendo a porosidade o principal fator que permite seu fluxo (Tavares, 2014).

O estoque de C é bastante sensível a mudanças de temperatura da superfície do solo mesmo que muito pequenas (Fang e Moncrieff, 2001), sendo a temperatura do solo outro fator que é alterado pelas práticas de manejo e que influenciam no comportamento do FCO<sub>2</sub>. No SPC, a taxa de emissão é maior pelo aumento da área



de contato do solo com o resíduo (após incorporação) e somados com a aeração e ao aumento da temperatura no solo, ocasiona a baixa umidade do solo após processos de revolvimento (Iamaguti et al., 2015).

De acordo com Canellas et al. (2003) e Dias et al. (2007), os sistemas agrícolas que praticam a monocultura tradicional apresentam maiores instabilidades, além de causar redução dos estoques de carbono de várias frações orgânicas do solo. Segundo estudo desenvolvido por Rosa et al. (2003) avaliaram uma redução no teor de carbono no solo de 20 a 50%, sendo alterado com a profundidade, quando ocorria a transformação da paisagem natural para a sistemas agrícolas. De acordo com Galdos et al. (2009), analisaram que a modificação de uma área de reserva natural em lavouras de cana-de-açúcar, apesar da diferenciação de tratos culturais, apresentou diminuição dos teores de carbono orgânico do solo, especialmente na camada superficial do solo.

## 2.7 Produção Brasileira de Cana-de-Açúcar

A partir de meados do ano de 1530, época em que a cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil, houve uma relevante importância da cultura para a economia nacional. O setor sucroenergético brasileiro envolve todas as atividades agrícolas e industriais pertinentes à produção de açúcar (bioeletricidade e bioetanol) e estes produtos resultam de forma quase que exclusiva do processamento da cana-de-açúcar (NASTARI, 2012). Outro fato importante, de acordo com Nastari (2012), é de que o setor sucroenergético do Brasil, sustenta-se, em ser o único setor agroindustrial em que o Brasil tem domínio integral de tecnologia no campo agrícola e industrial.

No Brasil, a produção de cana-de-açúcar para a bioenergia chega a 17 milhões de toneladas. Foram produzidos no Brasil 633,18 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 8,73 milhões de hectares na safra 2017/2018 (CONAB - NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018) e a destinação da produção foi de 37,87 milhões de toneladas para a produção de açúcar, valor 2,1% menor se comparado a safra anterior. A produção do etanol teve uma queda de 0,2% apenas, e totalizou uma 27,76 bilhões de litros, já o etanol hidratado obteve uma produção de 16,68 bilhões de litros

e uma queda de 0,3% no total produzido, e o etanol anidro (utilizado na mistura da gasolina) apresentou um aumento de 0,1% na produção, que representou 11,09 bilhões de litros. A produção da região Sudeste do Brasil foi de 417,47 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada, já as regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sul e Norte registaram safra de 133,66, 41,14, 37,52 e 3,46 milhões de toneladas respectivamente.

Se tratando do ciclo produtivo da cana-de-açúcar, se confrontado com outras culturas, envolve operações que precisam de níveis altos mecanização. Ressaltam-se o preparo do solo, colheita, manejos nutricionais e transporte da produção dos canaviais às usinas (CGEE, 2009; BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2010).

Houveram mudanças com o passar do tempo no que diz respeito à colheita de cana-de-açúcar. Ocorreram evoluções do sistema de colheita, que anteriormente, além do trabalho manual contava com a queima precedente do canavial, para um sistema de colheita mecanizada (CGEE, 2009). A colheita mecanizada teve sua implantação efetiva na década de 80, demonstrando um aumento com o passar dos anos para atender os processos produtivos das usinas e também pelas requisições ambientais para a amortização das queimadas (CERVI et al., 2015), pautadas em leis Federal e Estadual que instituíam os cronogramas para a supressão de modo gradativo da queima na áreas comerciais de cana-de-açúcar (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2010).

Durante o processo de queima da fitomassa da cana-de-açúcar, além de redução dos teores de matéria orgânica, há o aumento das emissões de GEE para a atmosfera, contribuindo para o aumento do aquecimento global (FEARNSIDE et al., 2009). Para cada tonelada de cana-de-açúcar queimada, Arbex (2001) afirma que, são emitidos para a atmosfera 0,0005 t de N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), 0,028 t de CO (monóxido de carbono) e 0,006 t de HFCs (hidrofluorcarbonetos). Além desses, outros gases são liberados na queima da palhada da cultura da cana-de-açúcar, como CH<sub>4</sub> (metano), O<sub>3</sub> (ozônio) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), que além de serem liberados no processo da queima da palha da cana-de-açúcar, são também considerados como os principais GEE.

De acordo com Rodrigues e Abi Saab (2007), dentre alguns benefícios, a colheita mecanizada (sem a queima prévia) propicia decaimento no custo operacional em 32,74% se comparada ao sistema tradicional que era precedido da queima do canavial. Além disso, a colheita mecanizada proporciona a manutenção da cobertura do solo com os resíduos/palhada da cultura sobre o solo, atuando como proteção contra fatores climáticos como chuva, vento, e por consequência, mecanismos de defesa contra erosão do solo (SILVA et al., 2006); atenuação da amplitude térmica do solo, determinando acréscimos do teor de água e de matéria orgânica no solo, desenvolvimento radicular (VASCONCELOS et al., 2003), maior estabilidade de agregados e macroporosidade (SOUZA et al., 2005).

Por outro lado, o trânsito de máquinas e implementos necessários para o manejo do canavial promove o aumento da compactação do solo (SILVA et al., 2016b), decorrente do elevado tráfego de maquinários necessário para a realização de operações de colheita e tratores com transbordos (BRAUNACK e MCGARRY, 2006).

## 2.8 Modelagem das Emissões de CO<sub>2</sub> por meio da Lógica Fuzzy

O termo Fuzzy, normalmente quer dizer incerto ou vago. Em português, é recorrente a utilização dos termos como nebuloso ou difuso, e neste trabalho usamos o sentido de nebuloso. A lógica Fuzzy é uma presunção que congrega a experiência, a intuição, o conhecimento especialista e a imprecisão da natureza do processo decisório humano através de um conjunto de regras e utiliza a ideia de que todas as coisas admitem graus de pertinência, onde uma sentença pode ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

A primeira etapa para a representação de conjuntos Fuzzy é a escolha da função de pertinência, e a escolha dessa função depende do problema que se espera modelar. Eleger uma função é um trabalho oneroso, pois as opções são praticamente infinitas por apresentarem uma pertinência gradual. Logo, as variáveis linguísticas representam por meio da linguagem cotidiana imprecisa uma definição ou variação de um problema (Rezende, 2005). Já as regras Fuzzy descrevem de modo qualitativo o

estudo e são compostas por um termo antecedente e um conseqüente; SE <antecedente> ENTÃO <conseqüente> e também operações de União, Interseção, e outras (Minussi, 2009). Essas regras baseiam-se no conhecimento e na expectativa do pesquisador, e a maneira que elas são dispostas e analisadas não influem no resultado, por serem não sequenciais e declarativas. Esse conjunto de regras, após um valor escalar transforma as informações qualitativas em quantitativas, e esse processo é chamado de defuzificação, onde obtém-se o resultado das funções e regras que “entraram” no sistema Fuzzy.

A lógica Fuzzy é uma ferramenta capaz de modelar as incertezas relacionadas ao FCO<sub>2</sub> do solo, sendo as regras linguísticas o resultado obtido na estimativa das emissões. Em resumo, a inferência Fuzzy une as hipóteses da base de regras, por meio de operações lógicas que correspondem às leis de cálculo proposicional, para modelar o processo de FCO<sub>2</sub> e resultar em uma variável Fuzzy de saída (Peruzzi et al., 2012).

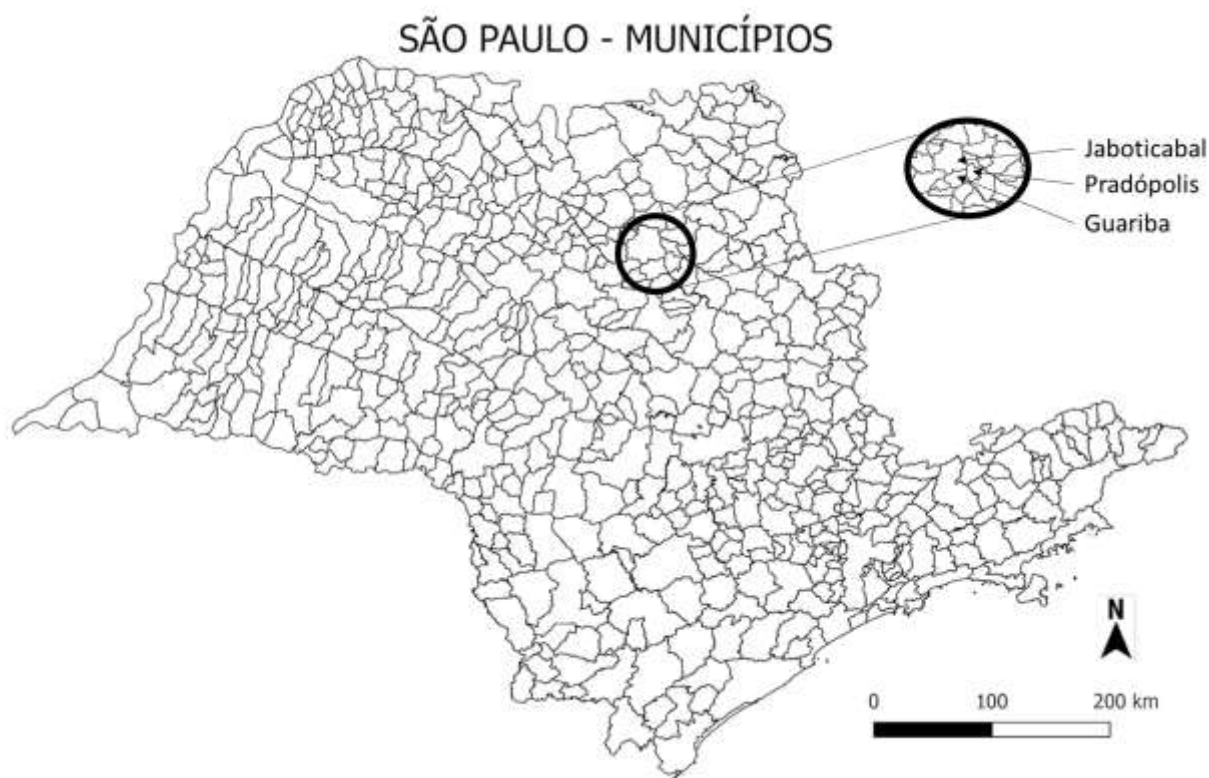
### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Localização e Descrição da Área de Estudo**

Os estudos foram conduzidos em áreas comerciais de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), localizadas nos municípios de Guariba (21° 21' de latitude Sul, 48° 13' de longitude Oeste a 620 m acima do nível do mar), e coletados 89 pontos amostrais realizados no ano de 2008; Jaboticabal (21° 15' de latitude Sul, 48° 19' de longitude Oeste a 605 m acima do mar), e coletados 141 pontos amostrais no ano de 2010; e Pradópolis (21° 21' de latitude Sul, 48° 03' de longitude Oeste e a 529 m acima do mar) e coletados 133 pontos amostrais no ano de 2012. As avaliações foram realizadas em áreas de colheita mecanizada em que os resíduos vegetais (folha e colmos) permanecem na superfície do solo. Nas áreas estudadas foram avaliados o FCO<sub>2</sub> do solo, umidade do solo (Us) e temperatura do solo (Ts) com relação aos atributos do solo (Panosso et al., 2012; Teixeira et al., 2013; Bicalho et al., 2014).

A classificações dos solos foram realizadas conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Para as três localidades os solos foram classificados

como Latossolo Vermelho eutroférico e de textura argilosa. O clima regional é classificado como B<sub>2r</sub>B'4a' pelo sistema de Thornthwaite (Rolim et al., 2007), indicando uma região mesotérmica com verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média é de aproximadamente 1425 mm e está concentrada entre os meses de Outubro e Março. A temperatura média anual é de 22,2 °C.



**Figura 1.** Mapa das cidades das áreas experimentais (Jaboticabal - SP, Pradópolis - SP e Guariba – SP).

### 3.2 Emissão de CO<sub>2</sub> do Solo e os atributos do solo.

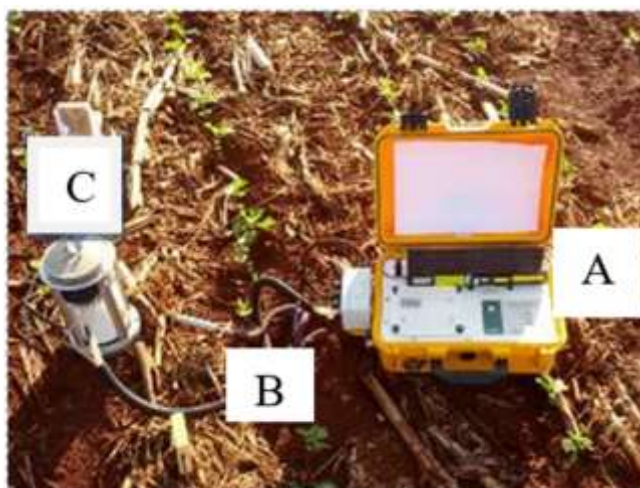
As emissões de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) foram registradas no sistema portátil LI-COR (LI-8100, Lincoln, NE, EUA), durante a fase inicial de crescimento da cultura. Em seu modo de medição, o sistema LI-8100 (Figura 2, item a) monitora as mudanças na concentração de CO<sub>2</sub> dentro da câmara (Figura 2, item c), por meio de espectroscopia, na região do infravermelho (IRGA Infrared Gas Analyzer). A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm<sup>3</sup> com área de contato de 83,7 cm<sup>2</sup>, e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 0,03 m

(Figura 2.3). A determinação da concentração de CO<sub>2</sub> dentro da câmara é de 90 segundos, sendo contabilizados a cada 2,5 segundos. Para a condução dos estudo, as taxas de FCO<sub>2</sub> foram convertidas em perda de C-CO<sub>2</sub> (emissão de carbono em forma de CO<sub>2</sub>).

A umidade do solo (Us) foi registrada utilizando-se de um aparelho TDR (Time Domain Reflectometry) - Campbell® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália – Figura 3).

A temperatura do solo (TS) foi monitorada concomitantemente às avaliações de respiração do solo, utilizando-se de um sensor de temperatura, que é parte integrante do sistema ao LI-8100 (Figura 2, item b). Tal sensor consiste em uma haste de 0,2 m que é inserida no interior do solo, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC.

As amostragens foram realizadas em Guariba no ano de 2008 nos dias Juliano: 299, 301, 308 e 322; em Jaboticabal no ano de 2010, nos dias Juliano: 195, 196, 197, 200, 201, 204 e 207; e por fim, em Pradópolis no ano de 2012, nos dias Juliano: 240, 242, 244, 247, 249, 251, 255 e 258. Totalizando 2407 amostragens.



**Figura 2.** Sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (a), sensor de temperatura do solo (b) e câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (c).



**Figura 3.** TDR - Hydrosense system, dispositivo portátil utilizado para a mensuração da umidade do solo.

### 3.3 Amostragem do solo e análise de atributos químicos e físicos do solo

Os atributos do solo (químicos e físicos) que compuseram este estudo, além de umidade e temperatura do solo, foram: macroporosidade, argila, matéria orgânica, hidrogênio e alumínio (H\_AL). Para a determinação dos componentes químicos e físicos do solo, sendo utilizada a metodologia sugerida pela EMBRAPA (1997).

Amostras de solo de uma camada de 0 a 10 cm foram obtidas de todos os pontos amostrais da área de estudo, após todas as medidas de FCO<sub>2</sub>, Ts e Us registradas. Essas amostras foram secas e peneiradas em uma malha de 2 mm antes da análises consequentes que incluíam o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), estimado pelo estoque de carbono orgânico do solo, determinado pelo método de oxidação úmida (método de Walkley-Black modificado), e H + Al (Raij et al., 2001).

O estoque de carbono total foi calculado para a camada de 0,10 m e, baseado na massa de solo equivalente, para contabilizar as variações da densidade do solo, nas diferentes áreas de estudo pela equação 1:

$$Estc = (CO \times DS \times E).0,1 \quad (1)$$

Onde:

Estc = estoque de carbono (Mg ha<sup>-1</sup>);

CO = teor de carbono orgânico oxidável (g kg<sup>-1</sup>);

$D_s$  = densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ); e

$E$  = espessura da camada estudada (0,10 m).

Afim de minerar os dados, antes do emprego da lógica Fuzzy, fez-se uma análise de componentes principais (ACP), que é uma técnica que visa transformar grandes grupos de variáveis, em grupos menores e reorganizados, sem perder as prováveis informações iniciais e não correlacionados (componentes principais – CP). Pertenceram à análise de CP o seguinte conjunto de atributos do solo: umidade do solo, temperatura do solo, macroporosidade, acidez do solo, matéria orgânica, argila e  $\text{FCO}_2$ ; afim de condensar em um conjunto menor (e relevante) de variáveis latentes ortogonais, que são os autovetores motivados por combinações lineares dos atributos estudados.

### 3.4 Análises dos resultados

Os dados foram analisados, previamente, por meio da estatística descritiva (média, erro-padrão da média, máximo, mínimo e coeficiente de variação). Logo após, realizou-se a ACP, onde os componentes principais (CP) formam combinações lineares das variáveis originais, criando eixos ortogonais onde são plotados em gráficos bidimensionais ou tridimensionais. A análise aumenta a variância, evidenciando o poder discriminatório de cada variável, onde os primeiros CP detém de mais informações.

Foi utilizada a lógica Fuzzy para expressar ou traduzir o conhecimento, sobre o  $\text{FCO}_2$  do solo em áreas agrícolas em forma de regras, e consiste em uma parte SE, que representa as condições lógicas e a parte ENTÃO, que representa a ação executada ou a conclusão encontrada, caso as condições SE tenham sido satisfatórias (Silva, 2005). Essa técnica permite traduzir termos matemáticos a informação imprecisa por um conjunto de regras linguísticas (Gonçalves, 2007). Esquemáticamente tem-se:

**SE**  $COND_1, COND_2, \dots, COND_N$  **ENTÃO**  $CONCL_1, \dots, CONCL_N$

O  $\text{FCO}_2$  do solo foi representada, através da lógica Fuzzy por uma função  $f$ :  $\mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$  com  $y = f(x)$ , onde a saída do sistema  $y$  é o  $\text{FCO}_2$  em função do vetor de entrada  $X$ , que são os atributos do solo. Neste trabalho os atributos do solo escolhidos



foram: umidade do solo, macroporosidade e matéria orgânica, baseado em um resultado semelhante desenvolvido por Farhate et al., 2018, que utilizou atributos do solo (físicos, químicos, biológicos e climáticos) afim de explicar a relação atuante entre o FCO<sub>2</sub> do solo e os atributos do solo.

Por ser uma ferramenta eficaz ao modelar as incertezas, o conjunto de regras linguísticas pode ser usado, por exemplo, na estimação de produção. Sintaticamente, modelos Fuzzy podem ser definidos como a seguir:



**Figura 4.** Esquema demonstrativo de processos da lógica Fuzzy

Neste estudo, os vetores de entrada (X) são os atributos do solo, que através dos termos linguísticos (base de regras), resulta num vetor de saída (Y), que é o FCO<sub>2</sub>, em detrimento às condições do solo. O processo de fuzzificação, transforma os valores de X para uma linguagem usual e o método de inferência é o controlador Fuzzy, que é formado pela base de regras e de dados (Peruzzi et al., 2012), onde a base de regras descreve a relação entre X e Y do sistema de FCO<sub>2</sub>. A desfuzzificação é a transformação do conjunto Fuzzy de saída, que foi obtido no procedimento de inferência, em um número real Y (Peruzzi et al., 2012).

Para determinar as classes dos atributos, adotou-se os limites a seguir:

**Tabela 1.** Limites adotados na composição das regras para os atributos: umidade, matéria orgânica, macroporosidade e fluxo de CO<sub>2</sub>.

| Classificação   | US      | MO                    | Macro                             | FCO <sub>2</sub>   |
|-----------------|---------|-----------------------|-----------------------------------|--|
|                 | (%)     | (g dm <sup>-3</sup> ) | (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | (kg C-CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) |
| Baixo (B)       | 0 a 15  | 0 a 20                | 0 a 15                            | 0 a 10   |
| Médio (M)       | 8 a 30  | 15 a 40               | 9 a 25                            | 3 a 20   |
| Alto (A)        | 23 a 60 | 35 a 60               | 18 a 40                           | 10 a 35  |
| Muito Alto (MA) | -       | -                     | -                                 | 25 a 100   |

As regras adotadas foram:

**Tabela 2.** Regras geradas a partir dos atributos do solo em estudo.

| Regra | Condições |    |   |   |          |    |   |   |          |       |   | Conclusão |              |      |   |    |
|-------|-----------|----|---|---|----------|----|---|---|----------|-------|---|-----------|--------------|------|---|----|
| 1     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | É | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | B  |
| 2     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | É | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 3     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 4     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 5     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 6     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 7     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 8     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 9     | <b>SE</b> | Us | é | B | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 10    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 11    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 12    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 13    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 14    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 15    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 16    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 17    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 18    | <b>SE</b> | Us | é | M | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | MA |
| 19    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 20    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 21    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | B | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 22    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | B  |
| 23    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | M  |
| 24    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | M | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 25    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | B         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 26    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | M         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | A  |
| 27    | <b>SE</b> | Us | é | A | <b>E</b> | MO | é | A | <b>E</b> | Macro | é | A         | <b>ENTÃO</b> | FCO2 | é | MA |

Todos os procedimentos estatísticos e de programação Fuzzy foram mensuradas no software livre R (R Development Core Team, 2020).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Comportamento das variáveis de estudo**

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próximo à distribuição normal (coeficientes iguais à zero). Para  $\text{FCO}_2$  em todos os anos de estudo a assimetria foi positiva, o que justifica a transformação logarítmica para  $\text{FCO}_2$ . De acordo com Warrick e Nielsen (1980), para o  $\text{FCO}_2$ , o coeficiente de variação (CV) pode ser classificado como alto ( $>24\%$ ), valor médio ( $12\% < \text{CV} < 20\%$ ) e baixo ( $\text{CV} < 12\%$ ). O  $\text{FCO}_2$  foi a variável que demonstrou os maiores valores de CV, sendo todos considerados como alto, com destaque para Jaboticabal que resultou em um CV de 76.86% (Quadro 1).

**Quadro 1.** Estatística descritiva do FCO<sub>2</sub>, temperatura do solo, umidade do solo, macroporosidade, matéria orgânica, acidez do solo e argila, durante o período de estudo.

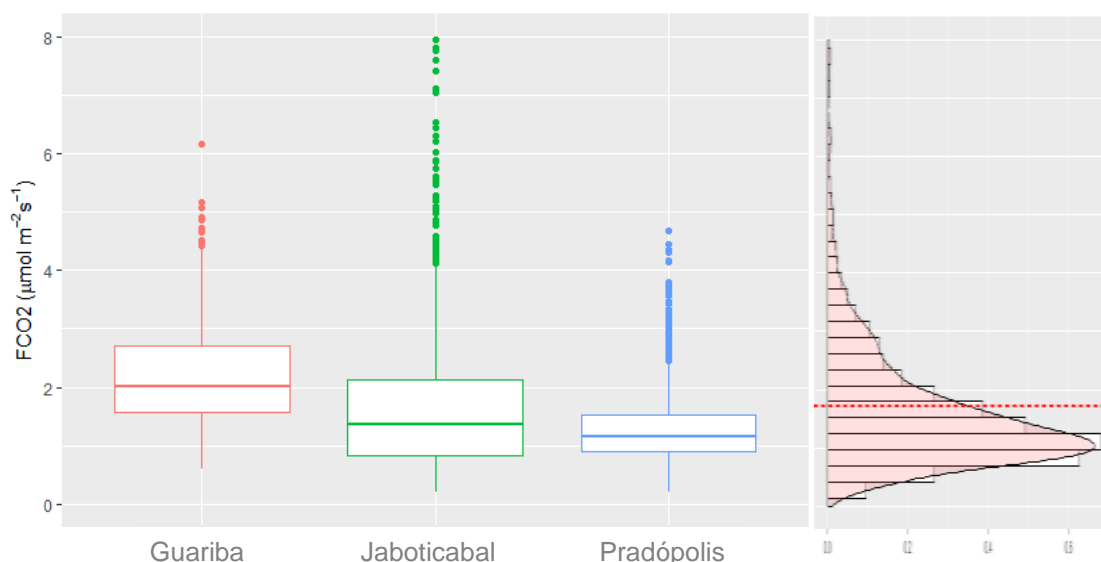
|  | Ano         | N   | Média  | Mediana | Erro Pad. | CV*   | Assimetria | Curtose |
|--|-------------|-----|--------|---------|-----------|-------|------------|---------|
| <b>FCO<sub>2</sub></b><br>( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | Guariba     | 89  | 2.19   | 2.08    | 0.08      | 35.73 | 0.76       | 0.72    |
|  | Jaboticabal | 141 | 1.94   | 1.40    | 0.13      | 76.86 | 1.88       | 4.60    |
|  | Pradópolis  | 133 | 1.32   | 1.18    | 0.05      | 44.95 | 1.75       | 3.23    |
| <b>Ts</b><br>(°C)  | Guariba     | 89  | 25.98  | 26.01   | 0.06      | 2.23  | -0.22      | 0.96    |
|  | Jaboticabal | 141 | 22.66  | 19.27   | 0.81      | 42.42 | 2.88       | 8.15    |
|  | Pradópolis  | 133 | 21.76  | 20.67   | 0.36      | 19.41 | 3.90       | 14.89   |
| <b>Us</b><br>(%)   | Guariba     | 89  | 27.76  | 27.25   | 0.48      | 16.41 | 1.32       | 2.80    |
|  | Jaboticabal | 141 | 19.85  | 19.43   | 0.32      | 19.09 | 4.14       | 31.73   |
|  | Pradópolis  | 133 | 9.25   | 9.13    | 0.07      | 9.30  | 0.57       | -0.30   |
| <b>Macro</b><br>( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )                     | Guariba     | 89  | 6.60   | 6.22    | 0.33      | 47.30 | 0.92       | 1.01    |
|  | Jaboticabal | 141 | 14.72  | 13.68   | 0.41      | 33.09 | 0.71       | -0.05   |
|  | Pradópolis  | 133 | 19.61  | 19.33   | 0.57      | 33.80 | 0.31       | -0.18   |
| <b>MO</b><br>( $\text{g dm}^{-3}$ )                                | Guariba     | 89  | 24.21  | 24.00   | 0.24      | 9.37  | 0.11       | -0.58   |
|  | Jaboticabal | 141 | 47.63  | 47.32   | 0.46      | 11.50 | 0.29       | -0.33   |
|  | Pradópolis  | 133 | 28.75  | 28.16   | 0.38      | 15.47 | 1.59       | 6.00    |
| <b>H+Al</b><br>( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )                  | Guariba     | 89  | 58.60  | 58.00   | 1.25      | 20.18 | 0.57       | 0.42    |
|  | Jaboticabal | 141 | 42.80  | 42.29   | 0.55      | 15.16 | 0.73       | 0.40    |
|  | Pradópolis  | 133 | 33.42  | 32.50   | 0.69      | 23.81 | 0.81       | 0.95    |
| <b>Argila</b><br>( $\text{g kg}^{-1}$ )                            | Guariba     | 89  | 604.54 | 605.00  | 2.01      | 3.13  | -0.42      | 0.79    |
|  | Jaboticabal | 141 | 506.47 | 509.42  | 1.93      | 4.52  | -0.15      | -0.52   |
|  | Pradópolis  | 133 | 475.47 | 474.53  | 1.81      | 4.40  | -0.18      | -0.35   |

N = número de observações; CV= coeficiente de variação (%); Erro Pad = Erro Padrão.

Os maiores valores de FCO<sub>2</sub> foram observados em Guariba, quando comparado aos demais, apresentando uma taxa de 2,19  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , seguido por Jaboticabal com 1,94  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e Pradópolis com média de 1,32  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Se convertidas as taxas de FCO<sub>2</sub> em perda de C-CO<sub>2</sub>, a cidade de Guariba representa

uma perda de 22,70 kg C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, já para Jaboticabal e Pradópolis as perdas foram de, 20,11 e 13,90 kg C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, durante o período de condução dos respectivos ensaios que foram 23 dias para 2008, 12 dias para 2010 e 18 dias para 2012.

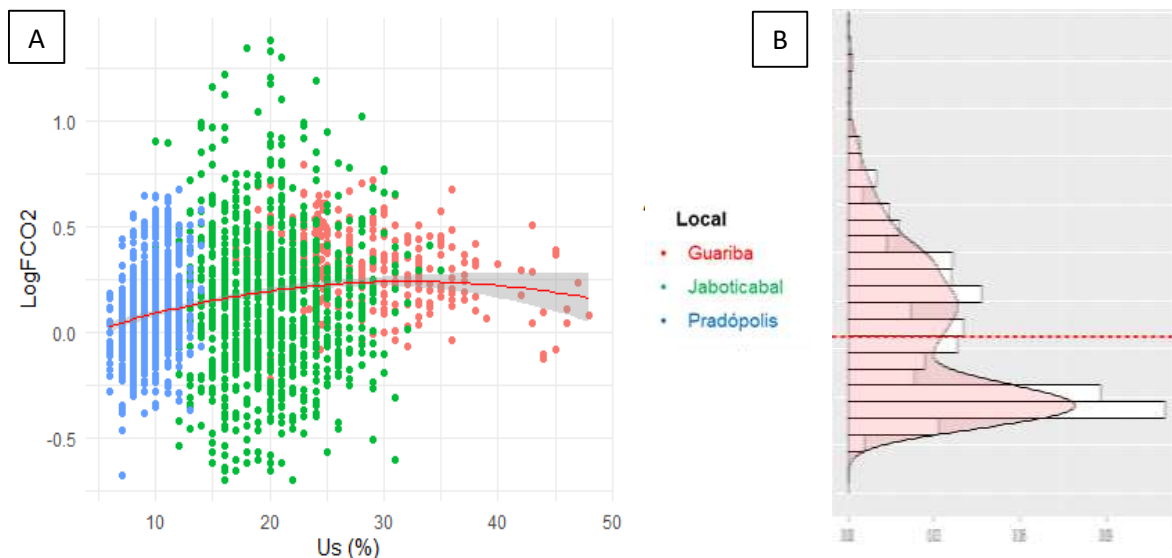
**Figura 5.** Boxplot e histograma de todas as observações (N=2407) para FCO<sub>2</sub>.



Em um estudo realizado por La Scala et al., (2001) observaram a influência da chuva nos padrões espaço-temporais de FCO<sub>2</sub> e constataram que a intercorrência de precipitação sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo faz com que os padrões das emissões sejam modificados rapidamente após a ocorrência de chuvas. O preenchimento dos poros pela água leva a uma expulsão das moléculas de CO<sub>2</sub> do interior do solo para a atmosfera, ocorrendo, assim, um aumento de FCO<sub>2</sub> após ocorrência de chuvas.

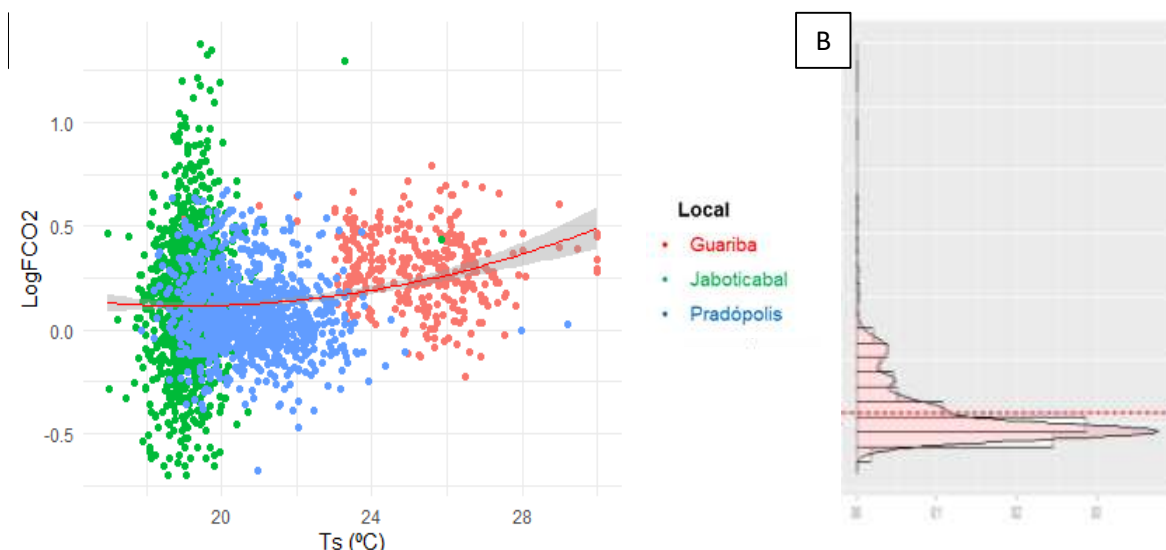
A Us no período de avaliação foi de 9,25% em Pradópolis, de 19,85% em Jaboticabal e 27,76% em Guariba. Schwendenmann et al. (2003) afirma que o FCO<sub>2</sub> é diminuído nos períodos em que o solo apresenta alta umidade. De acordo com Vicent et al. (2006), uma classe de Us considerada como ótima de Us varia de 25 a 40%, pois, valores acima disto o FCO<sub>2</sub> é restrito pelo excesso de água e falta de oxigênio no solo e, abaixo limita a respiração do solo acarretado pela seca, como evidenciado na Figura 6.

**Figura 6.** a) Relação espaço-temporal entre FCO<sub>2</sub> e Us. b) Histograma de todas as observações de Us.



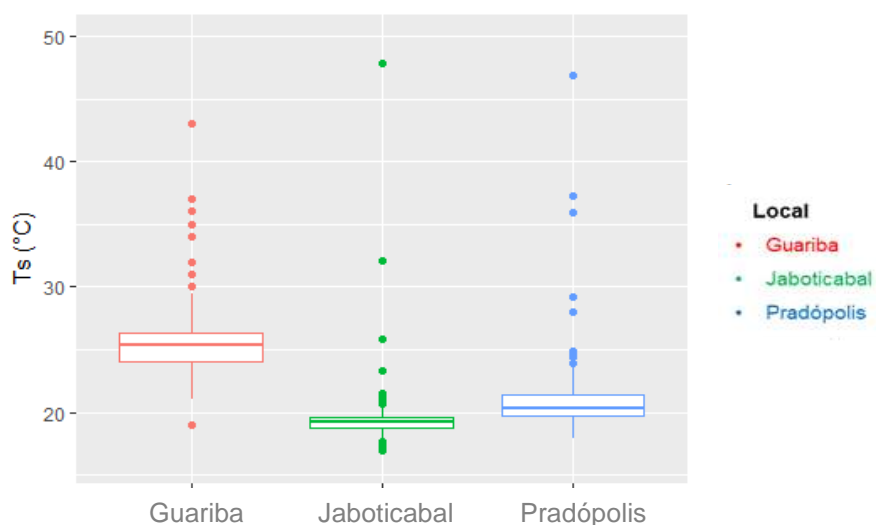
Embora a Ts influencie no FCO<sub>2</sub>, a Us tem desempenho categórico, pois é um fator limitante para a atividade microbiana (La Scala et al., 2009). A cidade de Guariba apresentou a maior Ts, em média 25,98 °C, seguido de Jaboticabal e Pradópolis, com 22,65 e 21,75 °C respectivamente (Figura 7 e Quadro 1). As alterações do FCO<sub>2</sub> em resposta às mudanças na Ts e Us, refletem alterações químicas que compõem os processos respiratórios que ocorrem simultaneamente. Reth (2005), na tentativa de criar um modelo capaz de estimar FCO<sub>2</sub> constatou que em solos descobertos, a Ts e o teor de água no solo exerceram a maior controle sobre o FCO<sub>2</sub>, e geralmente observamos uma correlação inversa entre a Ts e a Us, e este efeito deve ser explorado.

**Figura 7.** a) Relação espaço-temporal entre  $\text{FCO}_2$  e  $T_s$ . b) Histograma de todas as observações de  $T_s$ .



Em Jaboticabal, não existe relação entre  $U_s$  e  $\text{FCO}_2$ , ou seja, este atributo do solo não é um fator limitante. Nessa situação, observa-se uma relação de  $\text{FCO}_2$  e  $T_s$ , apesar de ser discreta, cabe salientar que em Jaboticabal foi observado maior dispersão de  $T_s$  (Figura 8), mas em média, menores valores de temperatura. No processo de  $\text{FCO}_2$ , a “expulsão” do gás do interior do solo até a superfície é dada por meio da equação de difusão, que em grau de influência, ocorre por alterações na  $T_s$  e  $U_s$  (Kang et al., 2003). Savva et al. (2013), ressaltam que a  $T_s$  e a  $U_s$  podem covariar, o que se torna uma problemática adicional na tentativa de modelar o  $\text{FCO}_2$ , tornando impraticável separar os seus efeitos sobre o  $\text{FCO}_2$ .

**Figura 8.** Boxplot da  $T_s$  no período do estudo.

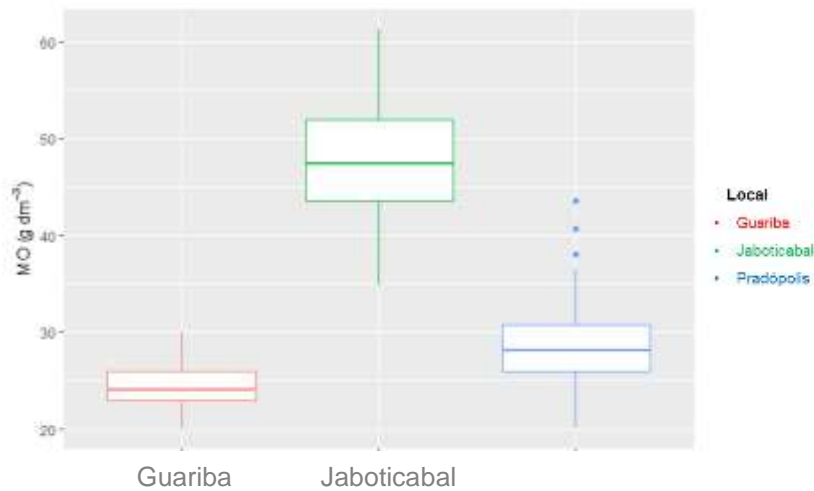


As maiores médias para MO encontradas Jaboticabal, 47,63 g dm<sup>-3</sup>, em seguida Pradópolis e Guariba, com 28,74 e 24,21 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente (Figura 09 e 10 e Quadro 1). De maneira individual, quanto a relação de FCO<sub>2</sub> com a MO, sempre há um aumento de FCO<sub>2</sub> com o aumento da MO nas áreas, mas de modo geral, a relação entre eles é fraca.

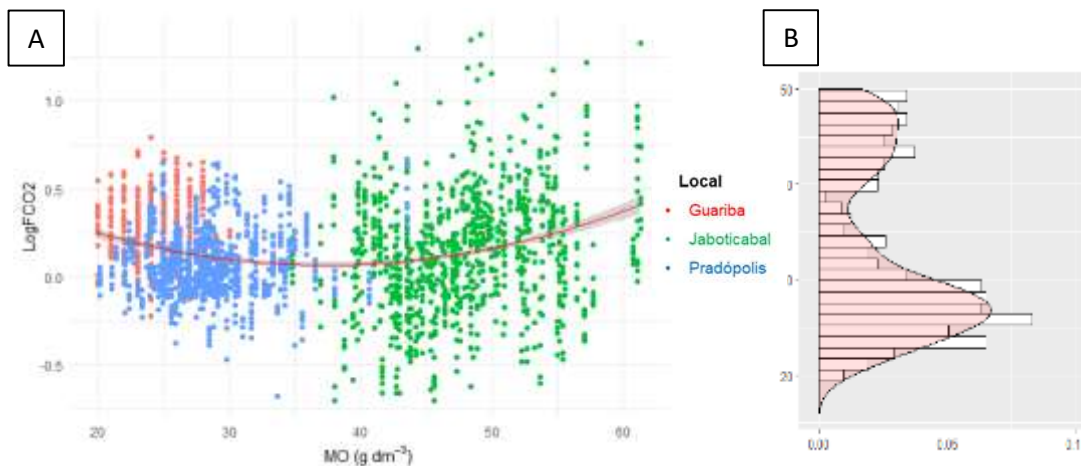
A quantidade e a regularidade de distribuição dos resíduos vegetais influem na Ts e Us (CHAVEZ et al., 2009; CAMPOS et al., 2011), apoiando La Scala et al., 2006 que afirmam que a evolução do FCO<sub>2</sub> é influenciado pela cobertura ou exposição do solo. A presença de resíduo vegetal é capaz de promover um isolamento térmico, o que favorece uma retenção de água mais alta no solo com conseqüente modificações da temperatura (USSIRI; LAL, 2009). Six et al., (2006) afirmam que a MO é um atributo do solo imprescindível para elucidar a dinâmica do FCO<sub>2</sub>, uma vez que, é capaz de agir na retenção de nutrientes no solo, no desenvolvimento microbiano e na taxa de respiração (Lal, 2004).



**Figura 9.** Boxplot da MO no período do estudo.

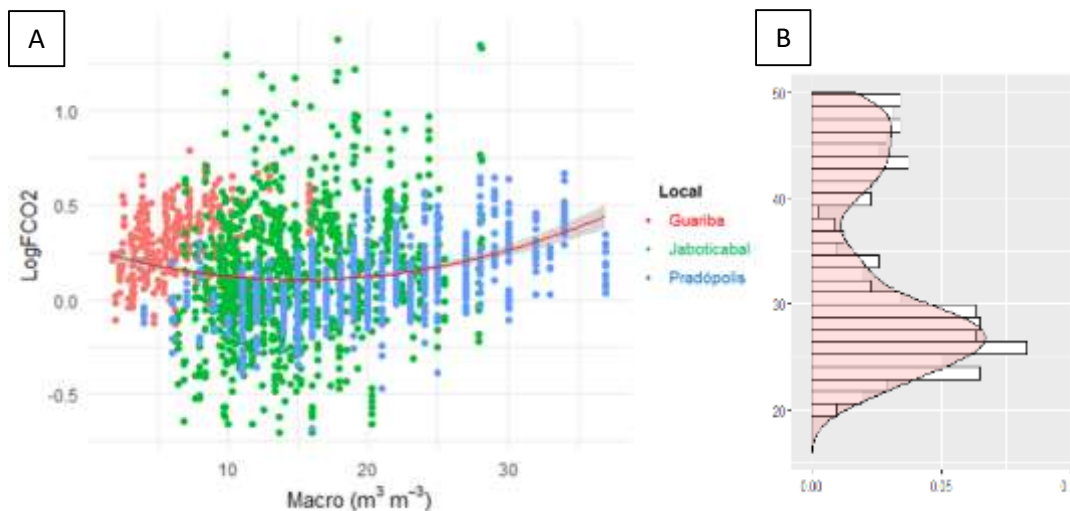


**Figura 10.** a) Relação espaço-temporal entre FCO<sub>2</sub> e MO. b) Histograma de todas as observações de MO.



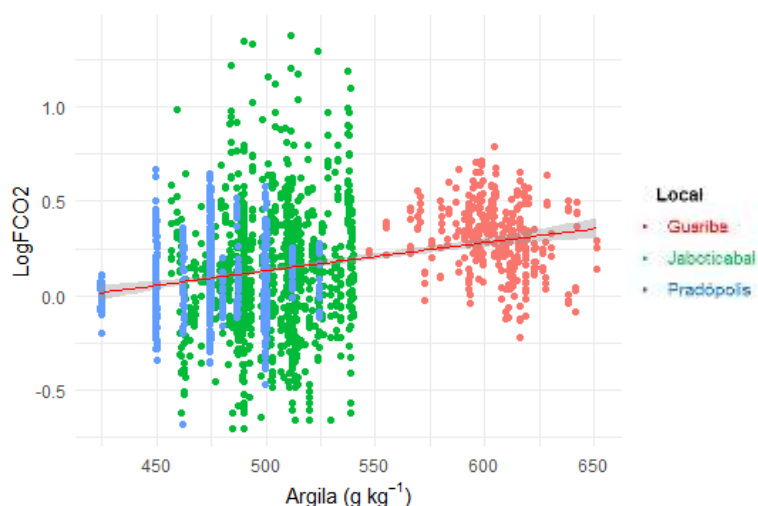
De acordo com Valois et al. (2014), a densidade do solo é inversamente proporcional a porosidade do solo. Neste trabalho foi encontrado em Pradópolis a maior incidência de macroporosidade na área de estudo,  $19,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , seguidos dos municípios de Jaboticabal e Guariba,  $14,71$  e  $6,59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente (Quadro 1). De acordo com Tavares et al. (2015), o FCO<sub>2</sub> é mais facilitado através dos macroporos (decorrente da linearidade dos poros).

**Figura 11.** a) Relação espaço-temporal entre FCO<sub>2</sub> e Macro. b) Histograma de todas as observações de Macro.



As maiores médias de teor de argila encontradas na área de estudo foram, respectivamente, em Guariba, Jaboticabal e Pradópolis (Figura 12; Quadro 1). Farhate (2015) identificou que em solos com menores teores de argila, a Us do solo também foi menor, e associado ao menor teor de MO foram fatores que limitaram o FCO<sub>2</sub>. Neste trabalho, os atributos Us, MO e Argila não acompanham o mesmo padrão encontrado por Farhate (2015). Em Guariba foram encontrados os menores teores de Us e MO, porém, o maior teor de argila e as maiores taxas de FCO<sub>2</sub>.

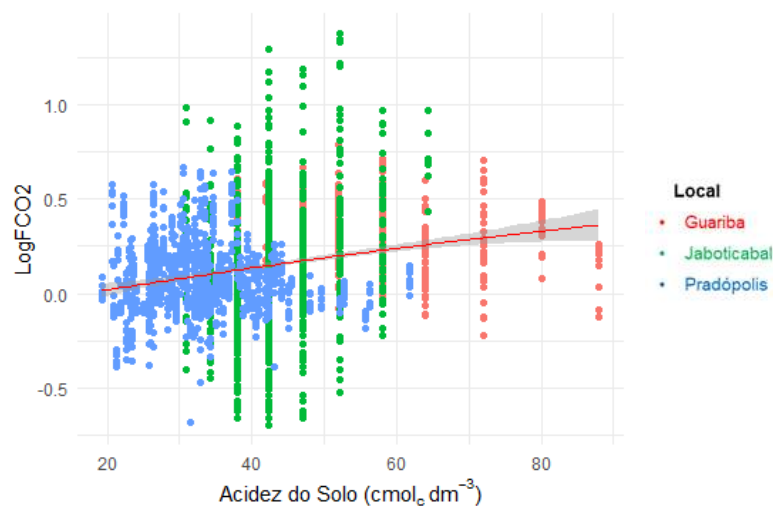
**Figura 12.** Relação espaço-temporal entre FCO<sub>2</sub> e Argila.



Neste estudo, Guariba apresentou maiores índices de acidez no solo, seguido de Jaboticabal e Pradópolis, respectivamente (Quadro 1). Em sistemas agrícolas é

comum a utilização de calcário para a correção da acidez do solo. Porém, esta pratica contribui para o aumento do FCO<sub>2</sub> para a atmosfera (Almaraz et al., 2009), decorrente do CO<sub>2</sub> ser subproduto da reação do calcário no solo. Entretanto, o FCO<sub>2</sub> advindo da aplicação do calcário ocorre em pequenas quantidades, já que os principais fatores de emissão estão atrelados à atividade microbiana, respiração das raízes, decomposição dos resíduos vegetais e oxidação da matéria orgânica do solo (LAL, 2009).

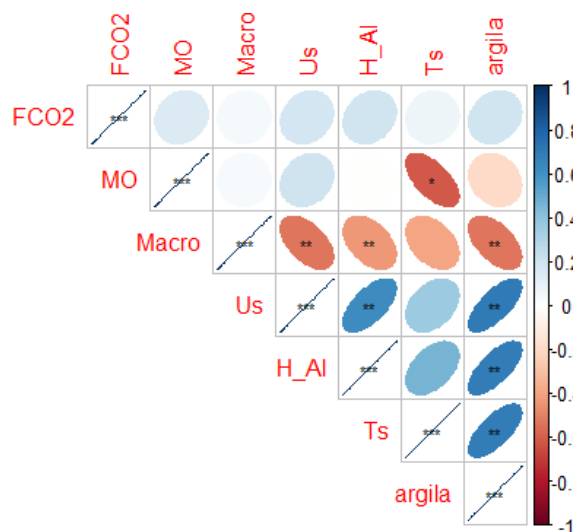
**Figura 13.** Relação espaço-temporal entre FCO<sub>2</sub> e Acidez do Solo.



#### 4.2 Correlação entre as variáveis

Para obtenção de uma visão precedente da importância de cada atributo do solo (variável) utilizado, os mesmos foram correlacionados entre si e com o FCO<sub>2</sub> gerando um diagrama de correlações, apresentado na Figura 14. Esse diagrama foi elaborado empregando-se a Correlação de Pearson ( $r$ ), sendo que quanto maior  $r$ , maior será a intensidade das cores azul (correlação positiva entre as variáveis) e vermelha (correlação negativa). Os índices de correlação para FCO<sub>2</sub> se apresentaram de forma positiva para todas as variáveis de estudo, porém, para macroporosidade e temperatura do solo a correlação está mais próxima de ser nula.

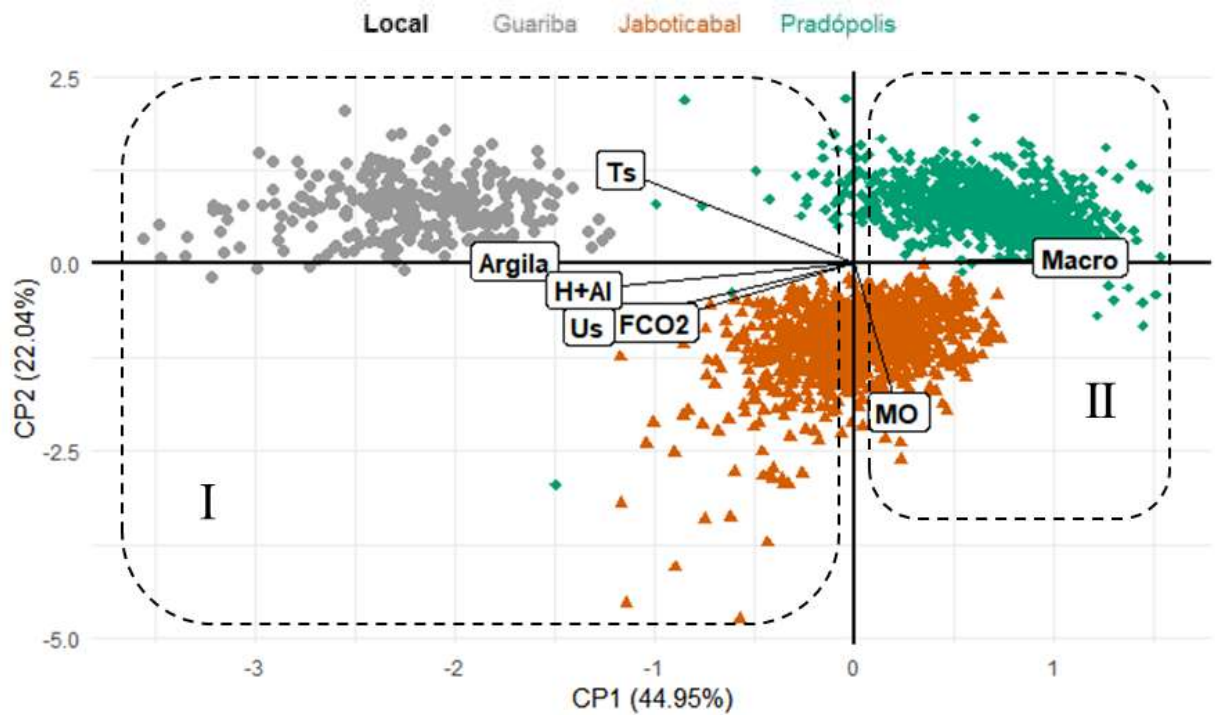
**Figura 14.** Matriz de correlação entre os atributos do solo analisados.



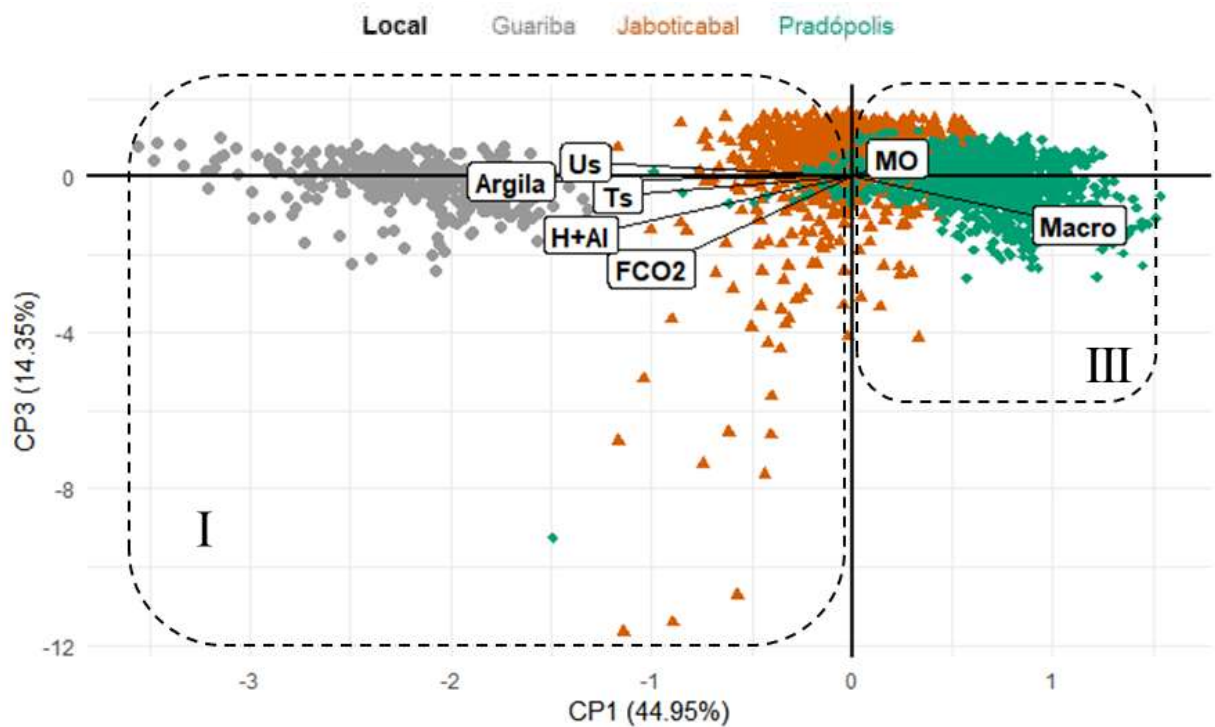
A estrutura multivariada presente no conjunto de dados original foi descrita pela análise de componentes principais (ACP), cujo propósito foi a diminuição de dados e seu resumo a partir de um grande volume de dados e variáveis, a partir de combinações lineares (componentes principais) de um conjunto dessas variáveis. A ACP é o cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores a partir da matriz variância-covariância ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis. A representação bidimensional entre o primeiro e segundo componente principal (CP1 e CP2) foi apresentada a partir do gráfico biplot. Através desta representação é possível visualizar o arranjo estrutural dos atributos do solo deste estudo e seu grau de importância na discriminação de eventuais agrupamento de acessos (observações). Foram acatados os 3 primeiros componentes principais (CP1, CP2 e CP3), cujos autovalores eram superiores ou iguais a 1 (Kaiser, 1958), representando 81,34% da variação total do conjunto de dados original. Na Figura 15 e Tabela 3, PC1 explicou 44,95% da variabilidade dos atributos do solo, enquanto que o CP2 explicou 22,04%. Podemos observar a formação de dois grupos distintos: grupo I, localizado nos quadrantes III e IV do gráfico (lado esquerdo), pouco agrupado em comparação aos demais e formado por observações dos estudos de Jaboticabal e Pradópolis; e o grupo localizado nos quadrantes I e II do gráfico (lado direito), menos agrupado e característico principalmente por apresentar todas as amostras do estudo de Guariba. A contribuição de cada um dos atributos do solo em cada CP foi calculada pela correlação linear individual do atributo com os CP. A Tabela 1 mostra em ordem de

significância, os atributos do solo que mais se relacionaram com CP1 foram argila (0,920), acidez do solo (0,812), umidade do solo (0,801), temperatura do solo (0,739) e macroporosidade (0,689); e para o CP2, o atributo do solo de maior significância foi a matéria orgânica (0,923). Na Figura 16 e Tabela 1 é possível visualizar que o FCO<sub>2</sub> (0,847) apresentou maior significância em CP3, e por mais que a macroporosidade tenha tido significância em CP3, ela apresentou-se maior em CP1. Tais correlações são mostradas e representadas pela seta de cada atributo do solo e suas respectivas projeções no gráfico.

**Figura 15.** Gráfico biplot dos componentes principais CP1 e CP2 dos atributos do solo.



**Figura 16.** Gráfico biplot dos componentes principais CP1 e CP3 dos atributos do solo.



Avaliando que os componentes são ortogonais entre si (não correlacionados), os processos que ocorrem em CP1 atuam independentes dos processos que acontecem em CP2 E CP3. A capacidade discriminatória de cada variável dentro do componente é ajustado pelas correlações lineares entre cada atributo do solo e o respectivo CP. O processo contido em CP1 é o mais importante para o estudo, pois é derivado do maior autovalor e possui o maior percentual de explicação. Dentre os 7 atributos do solo selecionados pela análise, 5 ficaram retidos em CP1 (Macro, Ts, Us, H+Al e argila). A argila, H+Al e Us, que apresentaram correlação negativa com CP1, foram os atributos do solo responsável pela discriminação do grupo I. Deste modo, o grupo II foi discriminado pela Macro, de amostras provenientes de Pradópolis, apresentando correlação positiva com esse vetor. A propriedade que apresentou correlação negativa com CP2, foi a MO, como indicado na parte inferior da Figura 16. Para o FCO<sub>2</sub>, a maior correlação apresentou no CP3.

**Tabela 3.** Correlação entre os atributos do solo e os três primeiros componentes principais (CP1-CP2-CP3).

| <b>Componente principal</b>    | <b>CP1</b>                                      | <b>CP2</b>    | <b>CP3</b>    |
|--------------------------------|---|---------------|---------------|
| <b>Autovalores</b>             | <b>3.15</b>                                     | <b>1.54</b>   | <b>1.00</b>   |
| <b>Variância explicada (%)</b> | <b>44.95*</b>                                   | <b>22.04*</b> | <b>14.35*</b> |
| <b>Variância acumulada (%)</b> | <b>44.95</b>                                    | <b>66.99</b>  | <b>81.34</b>  |
| <b>Correlações</b>             |   |               |               |
| MO                             | 0.189   | <b>0.923</b>  | -0.182        |
| FCO <sub>2</sub>               | -0.216  | 0.391         | <b>0.847</b>  |
| Macro                          | <b>0.689</b>                                    | -0.053        | 0.444         |
| Ts                             | <b>-0.739</b>                                   | -0.550        | 0.169         |
| Us                             | <b>-0.801</b>                                   | 0.391         | -0.134        |
| H+Al                           | <b>-0.812</b>                                   | 0.187         | 0.034         |
| Argila                         | <b>-0.920</b>                                   | -0.006        | 0.046         |
| Interpretação                  | <b>Transporte de CO<sub>2</sub><br/>no solo</b> |               |               |

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

### 4.3 Lógica Fuzzy e FCO<sub>2</sub>

Neste estudo, os atributos selecionados para compor as análises Fuzzy foram Us, Macro e MO, totalizando 1089 observações (referente a Guariba, Jaboticabl e Pradópolis), e a variável alvo refere-se ao FCO<sub>2</sub>, sendo o alvo da classificação (363 observações).

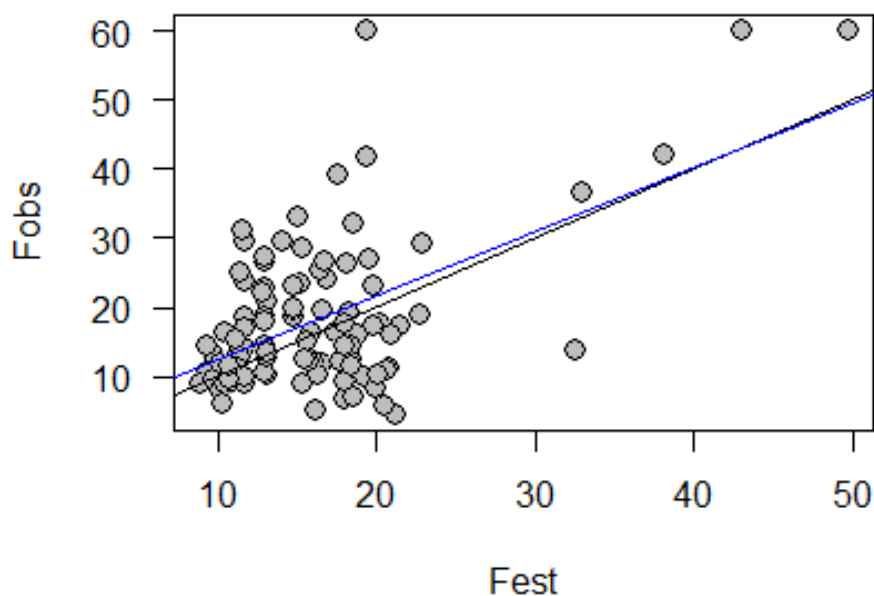
Para identificar diferentes níveis de FCO<sub>2</sub>, foi necessária uma discretização da variável-alvo em classes, portanto, dados contínuos foram transformados em dados discretos (intervalos). Esse arranjo das classes das variáveis simplifica as informações, facilitando a interpretação dos resultados. Deste modo, as classes dos atributos do solo foram classificadas como baixo (B), médio (M) e alto (A) para Us, Macro e MO e B, M, A e muito alto (MA) para FCO<sub>2</sub> conforme demonstrado no Quadro 2 e Figura 17, baseado em observações no banco de dados. O uso apenas dessas 3 variáveis (Us, Macro e MO) é suficiente para obter uma classificação boa, resultando num total de 27 regras.

Os resultados deste estudo, através da prática de mineração de dados, admitiram o desenvolvimento de um modelo eficaz ao classificar o FCO<sub>2</sub> do solo. As variáveis selecionadas mostraram grande consistência com a literatura. Reth et al. (2005), avaliando o quanto a temperatura do solo, umidade do solo, pH e massa de raízes influenciam no FCO<sub>2</sub>, verificaram que a Us, juntamente com a temperatura do solo, são os fatores mais importantes que alteram a dinâmica do FCO<sub>2</sub>.

A fim de compreender a relação entre o FCO<sub>2</sub> observado (Fobs) e o FCO<sub>2</sub> estimado (Fest) pelo modelo, realizou-se uma análise de regressão linear (Figura 17), com um N = 100. O Fobs apresentou relação com o Fest ( $p < 0,05$ ), então, a correlação entre as duas variáveis é significativa. Porém o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,2582, ou seja, 25,82% da proporção da variabilidade de Fobs é explicada pelo conjunto de variáveis estimadas (Fest).



**Figura 17.** Regressão linear entre Fobs x Fest.



A verificação da eficiência da modelagem foram delimitadas a 3 medidas de acurácia: RSME (root mean squared error) que calcula a raiz quadrada da média dos erros entre valores observados e preditos; MAE (mean absolut error) que calcula o erro absoluto médio dos erros observados e preditos; e, MAPE (mean absolut percentage erro) que expressa em porcentagem, um indicador de acerto de estimativa/predição. Tais métricas são as mais utilizadas para medir a acurácia de modelos preditivos que possuem variáveis contínuas. Hyndman e Koehler (2006) ressaltam que, apesar da medida RSME ser mais utilizada, ela é mais sensível a *outliers* quando comparada com a MAE. Para RSME e MAE as medidas são dimensionais. Para Eaves (2002), em diferentes comparações, a medida que mais se adequa, por ser uma métrica livre é o MAPE, pois consegue relacionar o tamanho do erro para uma observação proporcionalmente real. MAPE é medido em porcentagem.

Como empregado neste trabalho, Mancuso (2013) afirma que o melhor método indicando maior acurácia foi o de regressão linear. Os resultados de acurácia para o método de regressão empregado foram: RSME = 14, MAE = 6,82 e MAPE 0,42%. Os resultados encontrados indicam boa acurácia no modelo, pois, quanto menor for o erro, melhor será o ajuste do modelo à série.

## **CONCLUSÕES**

A variação no  $FCO_2$  é influenciada pela Us principalmente após eventos de precipitação; e em conjunto com a Macro, melhor explicam índices de  $FCO_2$ , pois atuam no processo de transporte de  $CO_2$  para a atmosfera.

A mineração de dados permitiu que apenas 3 atributos do solo (Us, Macro e MO) sejam capazes de compor um modelo preditivo para estimar o  $FCO_2$  do solo através da lógica Fuzzy. Sendo que para a Us por apresentar altos índices de correlação, demonstra alta sensibilidade no processo de modelagem.

A técnica de modelagem baseada em modelagem de incertezas e constituído por um conjunto de regras, demonstrou que a lógica Fuzzy é eficaz para estimar o  $FCO_2$ .

A complexidade do sistema pode ser abstraída pelos conjuntos de regras (modelos determinístico). Entretanto, faltam variáveis para melhorar a explicação, como por exemplo, a  $[CO_2]$  atmosférico, e a captura de  $O_2$ . O que pode ser incorporado em novos trabalhos com a mesma análise.

## REFERÊNCIAS

- Almaraz JJ, Zhou X, Mabood F, Madramootoo C, Rochetted P, Ma BL, Smith DL (2009) Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in Southwestern Quebec. **Soil & Tillage Research** 104; 134-139.
- Archer D (2005) Fate of fossil fuel CO<sub>2</sub> in geologic time. **American Geophysical Union** 110:C09S05.
- Bayer C, Dieckow J, Amado TJC, Eltz FLF, Vieira FCB (2009) Cover crop effects increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 40:1499-1511.
- Bayer C, Mielniczuk J, Martin-Neto L (2010) Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:599-607.
- Bernoux, M.; Carvalho, M. D. S.; Volkoff, B.; Cerri, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.
- Beutler AN, Centurion JF, Souza ZM, Andrioli I, Roque CG (2002) Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:829-834.
- Bicalho ES, Panosso AR, Teixeira DDB, Miranda JGV, Pereira GT, La Scala N (2014) Spatial variability structure of soil CO<sub>2</sub> emission and soil attributes in a sugarcane area. **Agriculture Ecosystems & Environment** 189:206-215.
- Biller D e Souza M de. (2020). **Wildfires sweep into Brazil park harboring jaguars**. Disponível em: < <https://apnews.com/article/environment-brazil-wildfires-fires-archive-949544b4f28905869bd77392c640a7ea> > Acesso em: 19 de setembro de 2020.
- Binns, C. W. et al (2021). Climate Change, Food Supply, and Dietary Guidelines. **Annual review of public health**, 42.
- Blank DMP (2015) O contexto das mudanças climáticas e as suas vítimas. **Mercator** 14:157-172.
- Brewer, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York: J. Wiley, 1964. 470 p.

- Brito LF, Marques Júnior J, Pereira GT, La Scala N (2010) Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in different topographic positions. **Bragantia** 69:19–27.
- Cabanillas, J. et al (2012). Fuzzy logic based risk assessment of effluents from wastewater treatment plants. **Sci. Total Environ.** 439, 202–210.
- Campos BC, Amado TJC, Tornquist CG, Nicoloso RS, Fiorin JE (2011) Long-term C-CO<sub>2</sub> emissions and carbono crop residue mineralization in na oxisol under diferente tillage and crop rotation Systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:819-832.
- Canellas, L. P. et al. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 331-340, 2007.
- Carvalho JLN, Avanzi JC, Silva MLN, Mello CR, Cerri CEP (2010) Potencial de sequestro de carbono em diferentes Biomias do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:277-290.
- CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; DAVIDSON, E.A.; BERNOUX, M.; FELLER, C. A ciência do solo e o sequestro de carbono. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.3, p. 29-34, 2004.
- Cerri CEP, Spavorek G, Bernoux M, Easterling WE, Melillo JM, Cerri CC (2007) Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola** 64:83-99.
- Chapin III FS, Zavaleta ES, Eviner VT, Naylor RL, Vitousek PM, Revnolds HL, Hooper DU, Lavorel S, Sala OE, Hobbie SE (2000) Consequences of changing biodiversity. **Nature** 405:234-242.
- Chavez LF, Amado TJC, Bayer C, La Scala N, Escobar LF, Fiorin JE, Campos BC (2009) Carbon dioxide efflux in a Rhodic Hapludox as affected by tillage systems in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:325-334.
- Davidson EA, Belk E, Boone RD (1998) Soil water contente and temperature as independente or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. **Global Change Biology** 4:217-227.

Davis, S. J. et al (2018). Net-zero emissions energy systems. **Science**, 360(6396).

De Souza Barros, J. D. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. **POLÊMICA**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 341-351, jun. 2013. ISSN 1676-0727. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/polemica/article/view/6436/4862>>. Acesso em: 24 jun. 2021.

DIAS, B. O. et al. Estoque de carbono e quantificação de substâncias húmicas em Latossolo submetido à aplicação contínua de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 701-711, 2007

Eaves AHC (2002) **Forecasting for the Ordering and Stock-Holding of Consumable Spare Parts**. Tese (doutorado em ciências administrativas), Lancaster School, Lancaster.

Fang C, Moncrieff JB (2001) The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. **Soil Biology & Biochemistry** 33:155-165.

Farhate CVV (2015) **Emissões de CO<sub>2</sub>: Efeito da rotação de culturas e preparo do solo na renovação do canavial**. 98 f. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola), Unicamp – Campinas.

Farhate CVV, Souza ZM, Sousa ACM, Santos APG, Fredericci T, Carvalho JLN (2015) Fluxo de CO<sub>2</sub> e suas correlações com os atributos do solo na reforma do canavial. In: XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

Ferreira, A. C. D. B. et al (2020) Soil carbon accumulation in cotton production systems in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum**. Agronomy, 42.

Foley JA, DeFries R et al. (2005) Global consequences of land use. **Science** 309:570-574.

Follett RF (2001) Soil management concepts and carbono sequestration zin cropland soils. **Soil & Tillage Research** 61:77-92.

Galdos, M. V. et al. Simulation of soil carbon dynamics under sugarcane with the Century Model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 3, p. 802-811, 2009.

Gillett NP, Arora VK, Zickfeld K, Marshall SJ, Merryfield WJ (2011) Ongoing climate change following a complete cessation of carbon dioxide emissions. **Nature Geoscience** 4:83-87.

Hales S, Wet N, Maindonald John, Woodward A (2002) **Potential effect population and climate changes on global distribution of dengre fever: an empirical model.** The Lancet. Disponível em <<http://image.thelancet.com/extras/01art11175web.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

Hyndman, R. J., e Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. **International journal of forecasting** 22: 679 - 688.

Iamaguti JL, Moitinho MR, Teixeira DD, Bicalho EDS, Panosso AR, La Scala N (2015) Preparo do solo e emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 19:497–504.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. Climate Change (2007) Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, **Cambridge**.

Jat, M. L. et al (2018). Soil processes and wheat cropping under emerging climate change scenarios in south Asia. **Advances in Agronomy**, 148, 111-171.

Kaiser HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika** 23:187-200

Kang S, Doh S, Lee D, Lee D, Jin VL, Kimball J (2003) Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Bio**, 9:1427-1437.

La Scala N, Bolonhezi D, Pereira GT (2006) Short-term soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research** 91:244-248.

- La Scala N, Lopes A, Spokas K, Archer D, Reicosky DC (2009) Short-term temporal changes of bare soil CO<sub>2</sub> fluxes after tillage described by first-order decay models. **European Journal of Science** 60:258-264.
- La Scala N, Lopes A, Spokas K, Bolonhezi D, Archer DW, Reicosky DC (2008) Short-term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a firstorder decay model. **Soil & Tillage Research** 99:108-118.
- La Scala N, Marques JRJ, Pereira GT, Corá JE (2000) Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry** 32:1459–1462.
- La Scala N, Panosso AR, Pereira GT, Gonzalez AP, Miranda JGV (2009) Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub> emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics** 23:353-358
- Lal R (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma** 123:122.
- Lal R (2007) Soil Science and the carbono civilization. **Soil Science Society of America Journal** 71:1425-1437.
- Lal R, Delgado JA, Groffman PM, Millar N, Dell C, Rotz A (2011) Management to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, 66:276-285.
- Lal, R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, 60:158-169.
- Lemoine, D., & Rudik, I. (2017). Steering the climate system: Using inertia to lower the cost of policy. **American Economic Review**, 107(10), 2947-57.
- Lorenz C, Azevedo TS, Virginio F, Aguiar BS, Chiaravalloti-Neto F, Suesdek L (2017) Impact of environmental factors on neglected emerging arboviral diseases. **Plos Neglected Tropical Diseases** 11(9): e0005959.

Malhi Y, Franklin J, Seddon N, Solan M, Turner MG, Field CB, Knowlton N. 2020 Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Phil. Trans. R. Soc. B* 375: 20190104.

Mattauch, L., et al (2020). Steering the climate system: Using inertia to lower the cost of policy: Comment. *American Economic Review*, 110(4), 1231-37.

Matthews HD, Zickfeld K (2012) Climate response to zeroed emissions of greenhouse gases and aerosol. *Nature Climate Change* 2:338-341.

Mendes TJ (2015) **Estimativa da variação do estoque de carbono do solo em diferentes cenários de uso e manejo agropecuário no estado do Maranhão**. 66 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

MINUSSI, C. R. **Lógica Nebulosa (Lógica Fuzzy)**. Ilha Solteira: Unesp/FE/DEEE, 2009. 119p.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, La Scala N (2013) Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37:1720-1728.

Montenegro A, Brovikn V, Eby M, Archer D, Weaver AJ (2007) Long-term fate of anthropogenic carbono. *Geophysical Research Letters* 34:L19707.

OECD/FAO (2015), OCDE-FAO **Perspectivas Agrícolas 2015**, OECD Publishing, París.

Omonode, R.A et al (2007) Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn–soybean rotations. *Soil & Tillage Research* 95: 182–195.

Oxford, v. 54, n. 4, p. 779–791, 2003.

Panosso AR, Marques J, Pereira GT, La Scala N (2009) Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. *Soil and Tillage Research* 105:275-282.



Panosso AR, Pereira GT, Júnior JM, La Scala N (2008) Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola** 28:227-236.

Panosso AR, Perillo LI, Ferraudo AS, Pereira GT, Miranda JGV, La Scala N (2012) Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub> emission in a mechanically harvested sugarcane production area. **Soil & Tillage Research** 124:8-16.

Paustian, K. et al (2016). Climate-smart soils. **Nature**, 532(7597), 49-57. DOI: 10.1038/nature17174

PBMC (2014) Contribuição do Grupo de Trabalho 3 ao **Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** – Sumário Executivo GT3. PBMC

Peruzzi NJ, La Scala N, Macari M, Furlan RL, Meyer AD, Fernandez-Alarcon MF, Kroetz Neto FL, Souza FA (2012) Fuzzy modeling to predict chicken egg hatchability in comercial hatchery. **Poultry Science** 91:2710-2717.

physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, R Development Core Team. **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-90005107-0, URL <http://www.R-project.org/>

Reth S, Markus R, Falge E (2005) The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux – A modified model. **Plant Soil** 268:21-33.

Rezende, S. O. et al. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Manole, 2005. 525 p

Rocha MT (2003) **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo cert**. 214 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Esalq/USP, Piracicaba.

Savva Y, Szlaveck K, Carlson D, Gupchup J, Szalay A, Terzis A (2013) Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area. **Geoderma** 192:202-210.

Schwendenmann L, Veldkamp E, Brenes T, O'brien JJ, Mackensen J (2003) Spatial and temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry** 64:111-28.

SEEG (2016) **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em < <http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg/>>. Acesso em: 07 jan. 2019.

Silva DAP, Campos MCC, Mantovanelli BC, Santos LAC, Soares MDR, Cunha JM (2019) Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área de pastagem na região Amazônica, Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias** 18: 119-126.

Silva EF, Moitinho MR, Teixeira DB, Pereira GT, La Scala N (2014) Emissão de CO<sub>2</sub> do solo associada à calagem em área de conversão de laranja para cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 34:885-898.

Silva IR, Mendonça ES (2007) Matéria orgânica do solo. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL (Eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.275-374.

Silva Junior, C.A. et al (2020) Focos de fogo persistentes em todos os biomas prejudicam o Acordo de Paris no Brasil. *Sci Rep* 10, 16246. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>>. Acesso em: 27 de Fevereiro de 2021.

Siqueira Neto, M. et al (2009) Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). II Emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33: 1023-1029.

Six J, Frey SD, Thies RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal** 70:555-569.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A.

Stockmann U, Adams MA et al. (2013) The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 164:80-99.

Tavares RLM (2014) **Emissão de CO<sub>2</sub> e atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em sistemas de manejo de cana-de-açúcar**. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Unicamp, Campinas.

Teixeira DB, Bicalho ES, Cerri CEP, Panosso AR, Pereira GT, La Scala JRN (2013) Quantification of uncertainties associated with space-time estimates of short-term soil CO<sub>2</sub> emissions in a sugar cane area. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 167:33-37.

Teixeira DB, Bicalho ES, Panosso AR, Perillo LI, Iamaguti JL, Pereira GT, La Scala N (2012) Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emissions and related properties. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 36:1466-1475.

Teixeira DDB, Bicalho ES, Cerri CEP, Panosso AR, Pereira GT, La Scala N (2013) Quantification of uncertainties associated with space-time estimates of short-term soil CO<sub>2</sub> emissions in a sugar cane area. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 167: 33-37.

Terçariol MC, Brancaglioni VA, Júnior JPA, Montanari R, Filho MCMT, Bolonhezi AC, La Scala N, Chaverette FR, Panosso AR (2016) Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in soybean and sugarcane areas in Mato Grosso do sul Cerrado, Brazil. **Journal of Geospatial Modelling** 2:44-66.

Thomazini A (2014) **Matéria orgânica do solo e emissão de C-CO<sub>2</sub> em diferentes manejos e cultivos agrícolas**. 98 f. Dissertação (Mestre em Produção Vegetal) – UFES, Alegre.

Torres, C.M.M.E. (2017) et al. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. *Sci Rep* 7, 16738. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-017-16821-4>>. Acesso em: 02 de Março de 2021.

Trenberth, K. E. (2018). Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences. **Journal of Energy & Natural Resources Law**, 36(4), 463-481.

UNFCCC (2015). Adoption of the Paris Agreement, **21st Conference of the Parties**. Paris: United Nations

United Nations Environment Programme (UNEP) (2019). **Emissions Gap Report 2019** (p. 108). Disponível em: <  
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf>>.

Acesso em: 12 de Fevereiro de 2021.

Vicca S, Bahn M et al (2014) Can current moisture responses predict soil CO<sub>2</sub> efflux under altered precipitation regimes? A synthesis of manipulation experiments. **Biogeosciences** 11:2991-3013.

Vicenti G, Shahriari AR, Lucot E, Badot P, Epronb D (2006) Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. **Soil Biology and Biochemistry** 38:2527-2535.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D (Ed.) **Applications of soil physics**. Academic Press, New York, p. 319-344.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. **IEEE Infomatics and Control**, v. 8, p. 338–353.

Zickfeld K, Eby M et al. (2013) Long-term climate change commitment and reversibility: na EMIC intercomparison. **Journal of Climate** 26:5782-5809.