

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL E SOCIOECONOMIA  
RURAL

**JOÃO FRANCISCO BONALDO ARIETTI**

**AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS  
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO**

**ARARAS – 2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL E SOCIOECONOMIA  
RURAL

**JOÃO FRANCISCO BONALDO ARIETTI**

**AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS  
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO**

Trabalho Final de Graduação apresentado com o intuito de obtenção do título de bacharel em Engenharia Agrônômica pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos.

Orientadora: Profa. Dra. Josiane Rodrigues

Coorientador: Dr. Alberto Carlos de Campos Bernardi

**ARARAS – 2025**

## RESUMO

A grande demanda por alimentos, advinda da expansão populacional combinada à busca por uma agricultura sustentável pede que os sistemas agrícolas atuais sejam capazes de maximizar a quantidade de produtos de alta qualidade e, ao mesmo tempo, conservar os recursos naturais do ambiente. Em conformidade com esta perspectiva, os sistemas integrados surgem como uma estratégia de produção sustentável, podendo agregar em uma mesma área atividades agrícolas, pecuárias e florestais, alcançando assim efeitos de cooperação entre os componentes do agrossistema. Dentre os benefícios trazidos pelos sistemas integrados, cita-se a melhoria dos atributos do solo, sendo este um recurso natural vital para o funcionamento dos ecossistemas. Considerando a importância do solo, o monitoramento adequado da sua qualidade só é possível analisando os atributos que reflitam a sua capacidade de produção, bem como a sua sustentabilidade. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo numa área de São Carlos/SP que compreende os seguintes sistemas produtivos: integração lavoura-pecuária-floresta, integração pecuária-floresta, integração lavoura-pecuária, pastagem intensiva e pastagem extensiva. Para isso, por meio da interpolação IDW (*Inverse Distance Weight*) foram criados mapas de variabilidade espacial dos seguintes atributos químicos do solo na área: pH em água e  $\text{CaCl}_2$ , matéria orgânica, fósforo, sulfato, potássio, cálcio, magnésio, capacidade de troca catiônica e saturação por base, em duas diferentes profundidades: 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m. Pode-se observar que houve diminuição nos valores de pH em  $\text{CaCl}_2$ , matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, capacidade de troca catiônica e saturação por base com o aumento da profundidade. Ao contrário, houve aumento nos valores de sulfato com o aumento da profundidade, enquanto os valores de pH do solo em água se mantiveram constantes nas duas camadas do solo analisadas. Dentro do contexto das classes consideradas no processo de interpolação, não foi observada diferença entre os sistemas produtivos no que diz respeito à concentração dos atributos químicos do solo analisados, o que pode ser explicado pelo fato de os sistemas integrados terem sido implantados recentemente na área. Os resultados obtidos com o estudo auxiliarão no manejo da área, propiciando assim a economia de insumos, o aumento da produtividade e a preservação do meio ambiente.

**Palavras-chave:** atributos do solo; geoprocessamento; interpolação espacial; sistemas integrados; sustentabilidade.

## ABSTRACT

The high demand for food resulting from population growth combined with the search for sustainable agriculture requires that current agricultural systems be capable of maximizing the quantity of high-quality products and, at the same time, conserving the environment's natural resources. In accordance with this perspective, integrated systems emerge as a sustainable production strategy, which can aggregate agricultural, livestock and forestry activities in the same area, thus achieving cooperative effects between the components of the agrosystem. Among the benefits brought by integrated systems, we can mention the improvement of soil attributes, which is a vital natural resource for the functioning of ecosystems. Considering the importance of soil, adequate monitoring of its quality is only possible by analyzing the attributes that reflect its production capacity, as well as its sustainability. Within this context, the present work aimed to study the spatial variability of soil chemical attributes in an area of São Carlos/SP that comprises the following production systems: crop-livestock-forest integration, livestock-forest integration, crop-livestock integration, intensive and extensive pasture. For this, through IDW (Inverse Distance Weight) interpolation, spatial variability maps of the following soil chemical attributes in the area were created: pH in water and CaCl<sub>2</sub>, organic matter, phosphorus, sulfate, potassium, calcium, magnesium, cation exchange capacity and base saturation, at two different depths: 0 - 0.2 and 0.2 - 0.4 m. It can be observed that there was a decrease in the pH values in CaCl<sub>2</sub>, organic matter, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, cation exchange capacity and base saturation with increasing depth. On the contrary, there was an increase in sulfate values with increasing depth, while soil pH values in water remained constant in both soil depths analyzed. Within the context of the classes considered in the interpolation process, no difference was observed between the production systems about the concentration of the chemical attributes of the soil analyzed, which can be explained by the fact that the integrated systems were recently implemented in the area. The results obtained from the study will assist in the management of the area, thus providing savings in inputs, increased productivity and environmental preservation.

**Keywords:** soil attributes; geoprocessing; spatial interpolation; integrated systems; sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Área de estudo, o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....22
- Figura 2.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘pH em H<sub>2</sub>O’ na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....32
- Figura 3.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘pH em CaCl<sub>2</sub>’ na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....33
- Figura 4.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Matéria Orgânica (MO)’ (g dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....33
- Figura 5.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Fósforo (P)’ (mg dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....34
- Figura 6.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Potássio (K)’ (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....34
- Figura 7.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Cálcio (Ca)’ (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....35
- Figura 8.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Magnésio (Mg)’ (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....35
- Figura 9.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Capacidade de Troca Catiônica (CTC)’ (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....36
- Figura 10.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Saturação por base (V)’ (%) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....36
- Figura 11.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Sulfato’ (mg dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....37

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Faixas de interpretação de resultados de análise de solo no Sistema Internacional de Unidades.....25
- Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.....26
- Tabela 3.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.....27
- Tabela 4.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILP) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.....28
- Tabela 5.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de pastagem extensiva (EXT) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.....29
- Tabela 6.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de pastagem intensiva (INT) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.....30
- Tabela 7.** Média, para cada atributo químico do solo avaliado, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos para cada profundidade (0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m) a partir de processo de validação cruzada *10-fold*, considerando os valores do expoente da interpolação IDW  $p = 1, 2, 3$  e  $4$ .....32

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Sistemas Integrados.....</b>	<b>10</b>
2.1.1 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF).....	10
2.1.2 Sistema de Integração Pecuária-Floresta (IPF).....	11
2.1.3 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP).....	12
2.1.4 Sistema de pastagem extensiva (EXT) .....	13
2.1.5 Sistema de pastagem intensiva (INT) .....	14
<b>2.2 Atributos químicos do solo.....</b>	<b>15</b>
2.2.1 pH em água e pH em CaCl <sub>2</sub> .....	15
2.2.2 Matéria Orgânica .....	16
2.2.3 Fósforo.....	16
2.2.4 Sulfato .....	16
2.2.5 Potássio.....	17
2.2.6 Cálcio.....	18
2.2.7 Magnésio .....	18
2.2.8 Capacidade de Troca Catiônica .....	19
2.2.9 Saturação por Base .....	19
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
3.1 Objetivo Geral .....	20
3.2 Objetivos Específicos .....	20
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
4.1 Caracterização da área de estudo .....	21
4.2 Atributos químicos analisados.....	22
4.3 Análises Estatísticas.....	23
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No atual sistema de agricultura, chamado de comercial de escala, há a necessidade de comportar a grande demanda de alimentos advinda da expansão populacional. Baseado no uso não sustentável e irracional de insumos agrícolas, esse sistema gera um excesso de nutrientes e resíduos de defensivos agrícolas, estando longe de ser capaz de sustentar os desafios de suprir a demanda por alimentos e, ao mesmo tempo, preservar o meio ambiente (OLIMPIO, 2004).

Devido às suas características, os atuais sistemas agrícolas estão sujeitos a eventos extremos que são associados, por sua vez, às mudanças climáticas, degradação da terra e perda de biodiversidade. Para superar esses problemas, é necessário um modelo agrícola sustentável, que proporcione segurança alimentar para todos e que, ao mesmo tempo, preserve os recursos naturais do sistema (DAVID-BENZ et al., 2022). Esse, inclusive, é um dos objetivos de desenvolvimento sustentável citados pela ONU, conhecido como “Fome zero e agricultura sustentável”, cujas metas são, em suma: garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produção, mantenham os ecossistemas, fortaleçam a capacidade de adaptação às intempéries, e que tragam um impacto positivo ao meio ambiente (ONU, 2023).

Diante o exposto, fica evidente que é necessário alterar a forma de produzir alimentos, respeitando as condições para um ambiente saudável, e é justamente neste contexto que surgem os sistemas integrados de produção agropecuária. Os sistemas integrados podem ser classificados em quatro modalidades, sendo elas: integração lavoura-pecuária (ILP); integração lavoura-floresta (ILF); integração floresta-pecuária (IFP); e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (BALBINO et al., 2011). Essa estratégia de produção em suas diferentes modalidades pode ser feita em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, buscando efeitos de sinergia entre os componentes do agrossistema (PEREIRA et al., 2009). De modo geral, esse método otimiza o uso da terra, aumentando a produtividade e variando a produção, podendo gerar novas fontes de renda no decorrer do processo, além de proporcionar benefícios para o solo (KLUTHCOUSKI et al., 2015).

Apesar de serem considerados inovadores no Brasil, os sistemas integrados datam dos séculos XVII e XVIII, quando no país havia uma clara divisão entre a agricultura e a pecuária, com exceção de um sistema em que a pecuária era integrada ao cultivo de fumo e de mandioca. Nesse sistema único de integração gado-fumo-mandioca, o gado possuía a função de adubar o solo, remetendo à ideia de um aporte de nutrientes, acabando por definir um sistema integrado de produção (ANGHINONI et al., 2013).

Sem dúvidas, as atividades do setor agropecuário como a agricultura e pecuária, quando realizadas de forma independente e extensiva, geram um impacto negativo ao ambiente. A pecuária, por exemplo, faz com que as pastagens fiquem degradadas, perdendo sua capacidade de recuperação natural, gerando um baixo retorno econômico, sendo capaz de reduzir em até seis vezes a capacidade de engorda de bovinos. A agricultura, por sua vez, quando praticada em monocultura, causa perdas de produtividade, aumenta a incidência de pragas/doenças, degrada o solo e causa perda dos recursos naturais. A integração do componente arbóreo às pastagens e às lavouras se constitui em uma alternativa à produção intensiva, sendo uma opção agroecológica que inclui em seus conceitos os princípios da sustentabilidade, contornando os problemas relacionados aos sistemas simplificados de produção, dentre eles a melhoria da qualidade do solo (BALBINO et al., 2012).

É sabido que a manutenção da qualidade do solo representa o fator primordial de uma agricultura sustentável. O solo é constituído por uma mistura dinâmica de componentes químicos, físicos e biológicos (SNYDER et al., 2013), sendo um recurso natural vital para o funcionamento dos ecossistemas na Terra, pois possui uma série de funções no meio ambiente, as quais assumem um papel importante na mediação de processos-chaves na natureza, tais como fornecer nutrientes para as plantas e organismos, regular a dinâmica da água no ambiente, atenuar a ação de contaminantes, regular a emissão de gases de efeito estufa e, sobretudo, influenciar a saúde dos homens e dos animais (XAVIER, 2021). Considerando a importância do solo para o ecossistema, o monitoramento adequado da sua qualidade só é possível analisando os atributos que reflitam a sua capacidade de produção, bem como a sua sustentabilidade (SPOSITO; ZABEL, 2003).

Nesse contexto, levando em consideração a hipótese de que os sistemas integrados podem trazer melhorias à qualidade do solo, o presente trabalho tem como objetivo estudar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo numa área de ILPF da Embrapa Pecuária Sudeste, situada no município de São Carlos - SP, utilizando para isso ferramentas de Agricultura de Precisão (AP). Desse modo, pretende-se: i) contribuir para com as tomadas de decisões que serão feitas sobre essa área, visando o uso racional de insumos, o aumento da produtividade e a preservação ambiental; ii) comparar diferentes sistemas de produção; iii) enfatizar os benefícios dos sistemas de produção integrados.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Sistemas Integrados**

Os sistemas integrados de produção estão longe de ser novidade. Eles já eram citados em documentos de antigos escritores romanos do século I d.C., os quais descreveram o plantio de espécies frutíferas com árvores madeireiras, além de culturas anuais e perenes. No entanto, conforme ocorreu o avanço da tecnificação e intensificação dos sistemas produtivos, os sistemas integrados foram desaparecendo, abrindo espaço para a monocultura. Entretanto, a busca por sistemas sustentáveis tem aumentado nos últimos anos, e nesse contexto os sistemas integrados têm ganhado espaço, proporcionando a integração de sistemas florestais, agrícolas e pecuários em uma mesma área, com a capacidade de diluir e distribuir os riscos econômicos de produção por atuar em vários ramos, além de preservar os componentes ambientais, dito isso, a quantidade de produtos produzidos por fazendas reduziu de 5, em 1900, para aproximadamente 1, em 2002, acabando com a diversidade de produção, deixando o produtor mais sensível para riscos econômicos (HENDRICKSON et al., 2008). A seguir serão apresentados alguns sistemas produtivos e suas principais características.

#### **2.1.1 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)**

O sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é uma metodologia que visa a abordagem de, em uma mesma área, implementar atividades agrícolas, pecuárias e florestais, conduzindo-as de forma integrada, consorciada ou em rotação. Essa estratégia, em suma, promove a sinergia entre os componentes do agrossistema, contribuindo para o uso sustentável da terra, recuperação de áreas degradadas e aumenta a eficiência produtiva (HENDRICKSON et al., 2008).

Acerca das contribuições para o setor ambiental, o ILPF apresenta redução do desmatamento, visto que o uso da terra é otimizado, diminuindo a necessidade de novas áreas, tanto para o cultivo quanto para a pastagem. Como já citado anteriormente, uma vantagem deste sistema é a recuperação de áreas degradadas, conquista essa que se deve a combinação de atividades agrícolas, pecuárias e florestais. O ILPF, além de possuir o potencial de recuperação, também é capaz de conservar o solo e a água, reduzindo a erosão do solo enquanto melhora a

infiltração de água. Além disso, no ILPF ocorre o sequestro de carbono, em razão das árvores cultivadas sob esse sistema (STRASSBURG et al., 2014).

As contribuições se estendem ao setor econômico, visto que é possível citar o aumento da produtividade, fruto da sinergia entre as atividades e a maior eficiência no uso de recursos, como água e nutrientes. Há também a diversificação de renda, visto que são exploradas atividades agrícolas, pecuárias e florestais, oferecendo várias fontes de receita em razão da variação das atividades. Essa vantagem também proporciona maior resiliência às crises, como variações climáticas e cenários não favoráveis economicamente para determinada cultura. Concluindo a questão econômica, a integração entre os componentes proporciona redução de gastos com insumos, tais como fertilizantes e defensivos, pois os resíduos de uma atividade podem ser aproveitados para outra (BALBINO et al., 2011).

O setor social também pode ser beneficiado com a adoção do ILPF de vários modos, como por exemplo a geração de empregos por conta da complexidade do sistema, o que por sua vez demanda mão de obra qualificada, a queda do êxodo rural, pois o ILPF pode melhorar as condições de vida no campo, incentivando a permanência nas áreas rurais e, por conta da resiliência deste sistema, ele também garante a segurança alimentar, reduzindo a vulnerabilidade a crises de abastecimento (TOLEDO et al., 2017).

### **2.1.2 Sistema de Integração Pecuária-Floresta (IPF)**

O sistema de Integração Pecuária-Floresta (IPF) é uma abordagem sustentável que combina áreas de pastagens com árvores plantadas de forma intencional, visando benefícios econômicos, ambientais e sociais. O IPF busca integrar de maneira harmônica a pecuária e o cultivo de árvores em uma mesma área, utilizando práticas que otimizam os recursos naturais. O manejo do sistema é projetado para que as árvores proporcionem sombra para o gado, melhorem o microclima, reduzindo temperaturas extremas (redução da amplitude térmica) e contribuam para a conservação do solo (SILVA et al., 2021).

No aspecto ambiental, o sistema é reconhecido por sua capacidade de sequestrar carbono atmosférico, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (RACHWAL et al., 2022). As árvores atuam como sumidouros de carbono, e esse benefício é particularmente importante em contextos globais de transição para uma economia de baixo carbono, além de melhorar o balanço ambiental da própria atividade agropecuária, pois com a

adoção desse sistema é possível obter a neutralização das emissões de metano dos animais pela fixação de dióxido de carbono e, ainda, ficar com um saldo positivo (SILVA et al., 2021).

A integração de pastagens e florestas promove a regeneração do solo, melhora a sua estrutura e aumenta a quantidade de matéria orgânica, favorecendo a retenção de nutrientes e água, podendo proteger o solo contra a erosão. Essa recuperação é essencial em regiões onde o manejo inadequado de pastagens contribuiu para a degradação ambiental (SALTON et al., 2014).

Com relação ao âmbito econômico e produtivo, o IPF oferece a diversificação de fontes de renda, ou seja, o produtor passa a explorar a comercialização de madeira, frutos ou outros produtos florestais não madeireiros provenientes das árvores integradas. A respeito da questão produtiva, o IPF permite o aumento da produtividade, em razão da diminuição da frequência respiratória (que é um indicativo de estresse) obtido através do sombreamento que permite redução da temperatura e o aumento da qualidade do leite, vantagens essas que estão incluídas também nos períodos críticos, como a época de seca, o que garante maior segurança para a prática dessas atividades, sobretudo para os pequenos e médios produtores (KICHEL et al., 2014).

### **2.1.3 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP)**

O Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) é uma estratégia de produção sustentável que combina práticas agrícolas e pecuárias na mesma área, em consórcio, sucessão ou rotação. Este sistema é amplamente reconhecido por promover eficiência no uso da terra, aumento da produtividade e redução de impactos ambientais quando bem manejado (ALVARENGA et al., 2006).

A respeito de suas contribuições no setor ambiental, tem-se a redução da degradação no solo por meio da alternância entre lavoura e pastagem, melhorando a cobertura vegetal e aumentando a quantidade de matéria orgânica (KLUTHCOUSKI; AIDAR, 2003), eficiência no uso de insumos por meio da utilização dos resíduos como adubo, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos, e a recuperação de áreas degradadas pela pecuária extensiva (KONDO et al., 2012).

No cerne da questão econômica, tem-se o aumento da rentabilidade proveniente da diversificação das atividades e há redução dos riscos financeiros associados a flutuações de mercado ou condições climáticas adversas. Além disso, o uso otimizado dos recursos também

é importante, visto que o mesmo espaço é utilizado de maneira mais eficiente ao longo dos anos, reaproveita-se resíduos agrícolas como palhada, e recupera-se as pastagens degradadas, diminuindo custos com insumos e corretivos. Por fim, produtos oriundos desse sistema possibilitam uma maior aceitação de mercado, aumentando a liquidez, claro, isso em locais onde valoriza-se práticas agrícolas sustentáveis (ARAÚJO et al., 2018).

De forma a encerrar os benefícios do ILP, a questão social também é abrangida, pois a diversificação de atividades oferece um maior índice de oportunidades de trabalho e renda para pequenos e médios produtores, incentivando ainda a permanência do homem no campo e garantindo a segurança alimentar proveniente do aumento da oferta de grãos, carne e leite (VILELA et al., 2011). Ademais, eles não se encerram por aqui, há também aumento de produtividade e maior estabilidade financeira que permitem investimentos em infraestrutura e serviços para a região, além de promover capacitação adequada para operação, aumentando a disseminação técnica (DUARTE et al., 2018).

#### **2.1.4 Sistema de pastagem extensiva (EXT)**

O sistema de pastagem extensiva (EXT) é um modelo de criação de animais em áreas de grandes extensões de terra, onde os animais são mantidos soltos e se alimentam, predominantemente, de pastagens naturais ou cultivadas, com pouca ou nenhuma suplementação alimentar (EUCLIDES FILHO, 2000). Esse sistema é comum em regiões onde há disponibilidade de terras, como em certas áreas do Brasil, em especial o Estado do Mato Grosso (CRUZ; GUZATTI, 2019).

A respeito desse sistema, ele requer menores investimentos e custos operacionais, visto que a alimentação animal nesse quesito é majoritariamente de pastagem, utiliza áreas marginais, possibilitando o aproveitamento de áreas não adequadas para a agricultura, além de se tornar uma alternativa viável à agricultores familiares e pecuaristas com menos recursos financeiros, inclusive preservando os modos de vida tradicionais que são abrangidos por essa classe (FIGUEIREDO et al., 2007).

Em tom de imparcialidade, esse sistema apresenta diversas desvantagens, inclusive capazes de inviabilizá-lo. Tratando sobre a questão ambiental, a pastagem extensiva contribui para a conversão de florestas em pastagens, gerando desmatamento e perda de biodiversidade, além de haver a chance de o manejo inadequado levar à compactação do solo e erosão (TAVANTI, 2020). Com relação ao âmbito econômico, a produção animal em sistemas

extensivos é geralmente menor que em sistemas intensivos, reduzindo a competitividade por baixa produtividade. Além disso, o sistema possui um tendão de Aquiles, visto que há a dependência de grandes áreas, sendo um desafio em regiões onde o custo da terra é alto ou há competição por uso do solo (BONJOUR et al., 2008).

### **2.1.5 Sistema de pastagem intensiva (INT)**

O sistema de pastagem intensiva (INT) é uma técnica de manejo pecuário que visa maximizar a produção animal em uma área reduzida, através do uso otimizado de pastagens, insumos tecnológicos e suplementação alimentar. Esse modelo utiliza práticas como rotação de pastagens, adubação, irrigação, escolha de espécies forrageiras de alta produtividade e o ajuste adequado da lotação animal por hectare (BATISTELLI et al., 2022).

A respeito das contribuições do INT para o aspecto ambiental, pode-se considerar o uso eficiente da terra, visto que o sistema possibilita produzir mais carne e/ou leite em áreas menores, reduzindo a necessidade de desmatamento para expansão de áreas de pasto, redução da emissão por unidade de produto, pois a melhora da dieta animal aumenta a eficiência alimentar, diminuindo a emissão de metano por quilograma de carne ou leite produzido (PEDREIRA et al., 2005). Além disso, o sistema protege o solo por meio de rotação de pastagens que reduzem a compactação e a erosão do solo (assim como outros benefícios) e o melhoram através da adoção de adubação e manejo adequados, que aumentam a quantidade de matéria orgânica, a sua estrutura e a sua fertilidade (ALMEIDA, 2015).

Quanto aos benefícios para o setor econômico, é possível citar o aumento da produção, tendo em vista que mais animais são mantidos em uma mesma área, aumentando o retorno financeiro por hectare, reduz-se os custos de expansão, visto que como é utilizado menos terra para maior produção, reduz-se a necessidade de comprar ou arrendar novas áreas, e há o acirramento da competitividade no setor, já que os sistemas intensivos de produção podem gerar produtos de maior qualidade, em razão do incremento de um número elevado e mais recentes tecnologias (JÚNIOR, 2020).

Dito o exposto, o setor social não é deixado de lado e também é beneficiado com a adoção do sistema INT, visto que é requerida mão de obra capacitada para operar tecnologias do setor, gerando oportunidades de trabalho especializado. Como esse sistema apresenta uma maior produção em uma mesma área, a segurança alimentar também é resultado da exploração desse sistema, visto que esse aumento da produção contribui na oferta de alimentos e, além

disso, esse sistema também oferece uma maior segurança aos agricultores familiares, ao mesmo tempo que possibilita que este tipo de sistema possa se tornar competitivo para o público em questão, e garante maior inclusão econômica, com a premissa de haver devido acompanhamento técnico (JÚNIOR, 2020).

## **2.2 Atributos químicos do solo**

O solo é constituído por uma mistura de componentes químicos, físicos e biológicos, sendo um recurso natural vital para o funcionamento do ecossistema na Terra, visto que possui uma série de funções no meio ambiente (XAVIER, 2021). Considerando a importância do solo para o ecossistema, o monitoramento da sua qualidade só é possível analisando os atributos que reflitam a sua capacidade de produção, bem como a sua sustentabilidade (SPOSITO; ZABEL, 2003). Dentro desse contexto, o monitoramento de seus atributos químicos é importante pois através dele é possível diagnosticar a capacidade do solo promover o desenvolvimento das plantas, mantendo a produtividade das culturas e a qualidade ambiental do sistema usado (DUVAL et al., 2018). A seguir serão apresentados alguns atributos químicos do solo comumente utilizados nesse processo.

### **2.2.1 pH em água e pH em CaCl<sub>2</sub>**

Para a aferição do pH do solo, podem ser utilizados dois métodos: o medido em água e o medido em CaCl<sub>2</sub>. A respeito da medida do pH aferido em CaCl<sub>2</sub>, geralmente o resultado é 0,5 inferior para organossolos e cerca de 0,6 unidades inferiores para solos minerais, em comparação com o resultado do pH caso fosse aferido em água (RAIJ et al., 2001).

A razão pela qual podem ser utilizados os dois métodos é que o pH aferido em CaCl<sub>2</sub> é considerado uma forma de determinação mais precisa que o medido em água, isso em razão do segundo método ser bastante afetado pela presença de sais presentes na amostra (DAVEY; CONYERS, 1988).

A medida do pH do solo é uma importante ferramenta para identificação e correção do solo visando uma maior produtividade. Com relação a escala de pH, o solo pode se configurar como ácido com um pH menor que 7, neutro com um pH igual a 7 e básico com um pH acima de 7. Dito isso, solos muito ácidos são favoráveis para a solubilidade de minerais como ferro e alumínio, que se apresentam tóxicos para as plantas. O contraponto é que o pH do solo não se

apresenta problemático apenas quando o solo está muito ácido, uma vez que o solo muito alcalino também apresenta complicações, que no caso pode ser o impedimento da solubilização dos nutrientes para as plantas, tornando-os inacessíveis (SCHOFIELD; TAYLOR, 1955).

### **2.2.2 Matéria Orgânica**

A matéria orgânica (MO) é fundamental para a estruturação do solo. Seu efeito de elasticidade tem a capacidade de promover ao solo a propriedade de retornar ao seu estado físico após uma possível compactação, problema que é responsável pela resistência do solo à penetração de raízes, além dessa característica promover resistência contra a erosão (MENEZES et al., 2020). Além disso, a MO também é responsável por reduzir a oscilação de temperatura do solo ao longo do dia (ALBUQUERQUE et al., 2005), servir como indicador de qualidade (MACHADO et al., 2014), amenizar possíveis efeitos negativos de acidificação em solos (pela complexação de alumínio) (SPERA, 2009), é fundamental para enriquecer a capacidade de troca catiônica do solo, reduzindo a lixiviação (LOPES; GUILHERME, 2016) e, concluindo, é uma importante fonte e reserva de nutrientes para a microbiota do solo (FRARE et al., 2023).

### **2.2.3 Fósforo**

O fósforo (P) é responsável por promover o crescimento de raízes, bem como por aumentar a capacidade de absorção de nutrientes e água pelas plantas, principalmente em seus estágios iniciais (MALAVOLTA, 2006). Além disso, o nutriente em questão também é responsável pela síntese de nucleotídeos e adenosina trifosfato, atuando de forma direta na divisão celular, reprodução, metabolismo, armazenamento e transferência de energia (DARIO; DARIO, 2015). O P também é indispensável na produção de frutos e sementes, influenciando diretamente a sua produtividade e qualidade (MARSCHNER, 2012).

### **2.2.4 Sulfato**

O sulfato ( $S-SO_4^{2-}$ ) é a forma de enxofre que está prontamente disponível para ser absorvido pelas plantas, visto que se for utilizado enxofre elementar para adubar o solo, ele precisará passar pelo processo de oxidação a sulfato para ser absorvido. Esse nutriente é responsável pela síntese de aminoácidos que são fundamentais para o crescimento vegetativo, e de outros como a metionina, que é precursor do etileno, hormônio responsável pelo amadurecimento dos frutos (MALAVOLTA, 2006). O enxofre também possui uma alta capacidade de mitigação de estresses bióticos e abióticos para as plantas, como desintoxicação de metais pesados e defesa química contra-ataques de patógenos e animais herbívoros (TAKAHASHI et al., 2023).

Além das funcionalidades do enxofre já citadas, esse nutriente também é responsável pela concentração de proteínas em sementes, no quesito valor nutricional (BONNOT et al., 2023).

### **2.2.5 Potássio**

O potássio (K) é um macronutriente considerado essencial para as plantas por inúmeros motivos: além de ser o segundo nutriente mais absorvido pelas plantas cultivadas, desempenha várias outras funções, dentre as quais está a manutenção da organização celular no âmbito da hidratação e permeabilidade, manutenção da fotossíntese e regulação da respiração, participação na fosforilação oxidativa, que é a última etapa do processo de metabolismo produtor de energia, processo que antecede a síntese de adenosina trifosfato, e também participa auxiliando a translocação de carboidratos. De modo geral, também pode-se dizer que o K está relacionado ao processo de manutenção de equilíbrio osmótico na célula vegetal e ao processo de regulação das trocas gasosas e transpiração via estômatos (MALAVOLTA, 1967).

Além dos motivos pelos quais o K é de suma importância para as plantas, outras funções pelas quais esse macronutriente é responsável são o melhoramento da resposta ao fósforo, resistência a algumas doenças como a brusone do arroz, conservação de alga nas folhas, desenvolvimento radicular das plantas, fortalecimento da parede celular com lignina e estímulo à absorção de silício (FAGERIA, 1984), que contribui à resistência à seca, salinidade, melhora no estado nutricional, transpiração, resistência ao ataque de insetos, nematóides, microorganismos e, não menos importante, na eficiência fotossintética (MENECALE et al., 2014).

### 2.2.6 Cálcio

Com relação ao cálcio (Ca), este é um dos macronutrientes essenciais para as plantas e um metal alcalino, e está relacionado com a integridade das membranas e paredes celulares, bem como ao crescimento radicular (MARSCHNER, 1995). Devido ao fortalecimento das paredes celulares, é aumentada a resistência das plantas às doenças e à penetração de patógenos (WHITE; BROADLEY, 2003). Além dos fatores acima, o Ca também é fundamental na melhoria da estrutura do solo ao promover a floculação das partículas de argila, o que facilita a aeração, infiltração de água e o crescimento radicular (NOVAIS et al., 2007).

Esse macronutriente também pode ser aplicado via corretivos agrícolas, como o calcário, neutralizando a acidez do solo, aumentando o pH e, portanto, melhorando a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas, além de reduzir a toxicidade de alumínio em solos ácidos, o que favorece o crescimento das plantas (RAIJ, 2011).

Ademais, é essencial citar que esse macronutriente também possui papel importante para a qualidade dos frutos na questão da pós-colheita, visto que ele previne problemas fisiológicos tais como podridão apical, rachaduras e desordens nutricionais (MARSCHNER, 2012).

### 2.2.7 Magnésio

O magnésio (Mg) é o componente principal da clorofila, molécula essa que é fundamental para o processo de fotossíntese (TAIZ et al., 2024). Além disso, o Mg é um ativador de uma série de enzimas responsáveis pelo transporte do fósforo para dentro das células (MARSCHNER, 1995), ajuda na absorção e na mobilidade de outros nutrientes essenciais como o potássio, otimizando a nutrição (NOVAIS et al., 2007), atua na síntese proteica, auxilia na separação e utilização de foto assimilados (WIEND, 2007) e na síntese de nucleotídeos e de carboidratos (TAIZ; ZEIGER, 2012). Ademais, o Mg também é responsável pelo aumento da resistência ao estresse abiótico, como a seca e alta salinidade do solo, isso ao ter parte em realizar o equilíbrio osmótico e a pressão de turgor celular (EPSTEIN; BLOOM, 2004).

### **2.2.8 Capacidade de Troca Catiônica**

A capacidade de troca catiônica (CTC) é um dos melhores parâmetros para definir a fertilidade do solo. Esse atributo é particularmente afetado pela matéria orgânica e, portanto, a manutenção ou o aumento da matéria orgânica implica diretamente no aumento da CTC (CANELLAS et al., 2003; FALLEIRO et al., 2003). Além disso, a capacidade de troca catiônica é responsável pela capacidade de retenção de cálcio, magnésio, potássio e outros nutrientes que são cátions metálicos como cobre, ferro, manganês e zinco (FREITAS et al., 2017). Ainda falando no quesito de retenção, a CTC é um parâmetro que ajuda a minimizar a perda de nutrientes por lixiviação (WEIL; BRADY, 2016).

### **2.2.9 Saturação por Base**

A saturação por base (V%) é um importante indicador de acidez do solo e, portanto, um importante parâmetro a ser avaliado para calcular a quantidade de calagem que deverá ser feita para a sua correção. O conceito de V% está relacionado com o fornecimento de bases (potássio, magnésio, cálcio) em níveis considerados necessários para a produtividade máxima da cultura em questão (FAGERIA, 2001).

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo Geral

Estudar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo - pH em água, pH em  $\text{CaCl}_2$ , Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), Sulfato ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por base (V), em duas diferentes profundidades (0-0,2 e 0,2-0,4 m), numa área com sistemas integrados de produção, da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, que engloba diferentes sistemas produtivos (integração Lavoura-Pecuária-Floresta, integração Pecuária-Floresta, integração Lavoura-Pecuária, pastagem extensiva e pastagem intensiva).

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Medir, caracterizar e avaliar atributos químicos do solo;
- Armazenar, disponibilizar e integrar dados georreferenciados;
- Desenvolver *script* no *software* R para a análise descritiva dos dados e para o processo de interpolação espacial;
- Gerar mapas de superfície e fornecer as bases para a interpretação da variabilidade e aplicação de insumos a taxas variáveis na área de estudo;
- Comparar diferentes sistemas produtivos e enfatizar os benefícios dos sistemas integrados.

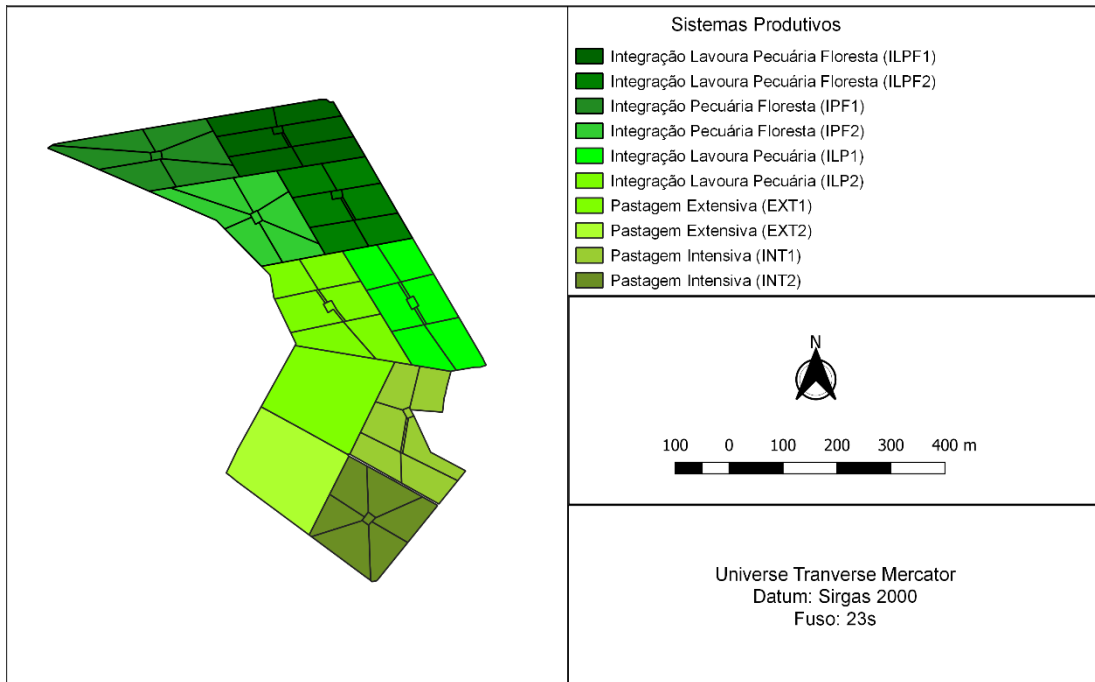
## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido em uma área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil (21°57'S, 47°51'W, 860 m de altitude). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura média (CALDERANO FILHO et al., 1998), e o seu clima é tropical de altitude (Cwa) pela classificação de Köppen, com duas estações bem definidas, sendo ela seca de abril a setembro, com temperatura média de 19,9 °C e precipitação média de 250 mm, e úmida de outubro a março, com temperatura média de 23,0 °C e precipitação média de 1.100 mm (PEZZOPANE et al., 2021).

A área de estudo compreende um sistema de 30 ha que inclui diferentes combinações, como segue (PEZZOPANE et al., 2019): i) pastagem intensiva (INT) de capim Piatã (*Urochloa brizantha*); ii) Integração lavoura-pecuária (ILP), em que um terço da área é renovada anualmente plantando milho consorciado com capim Piatã; iii) Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) plantado com *Eucalyptus urograndis* (GG100) em fileiras simples com espaçamento de 15 m e distância de 4 m entre árvores; iv) Integração de pastagem-floresta (IPF), com capim Piatã e eucalipto; v) sistema extensivo (EXT) de capim braquiária (*Urochloa decumbens*). Cada sistema integrado possui um total de 6 ha, sendo dividido em duas áreas experimentais de 3 ha cada. Por sua vez, cada área experimental (com exceção da pastagem extensiva), é dividida em seis piquetes de 0,5 ha cada (Figura 1).

Em todas as safras, o milho foi semeado no espaçamento de 0,8 x 0,2 m, visando uma população de 62.500 plantas ha<sup>-1</sup>. Por sua vez, o capim Piatã foi semeado simultaneamente ao milho, no espaçamento de 0,4 m na dose de 10 kg de sementes ha<sup>-1</sup>. Em ambos os sistemas, 1/3 das pastagens é renovada a cada safra. Ainda, as pastagens são manejadas em sistema rotacionado com 6 dias de pastejo (novilhos Canchim com lotação ajustada de acordo com massa de forragem pré-pastejo) e 35 dias de repouso.



**Figura 1.** Área de estudo, o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

Em todas as safras, o milho foi semeado no espaçamento de 0,8 x 0,2 m, visando uma população de 62.500 plantas ha<sup>-1</sup>. Por sua vez, o capim Piatã foi semeado simultaneamente ao milho, no espaçamento de 0,4 m na dose de 10 kg de sementes ha<sup>-1</sup>. Em ambos os sistemas, 1/3 das pastagens é renovada a cada safra. Ainda, as pastagens são manejadas em sistema rotacionado com 6 dias de pastejo (novilhos Canchim com lotação ajustada de acordo com massa de forragem pré-pastejo) e 35 dias de repouso.

Durante o período de 2013 a 2021 as recomendações de calcário e fertilizantes foram calculadas com base na análise do solo. A calagem foi aplicada para aumentar a saturação por base a 70% para milho e a 60% para pastagens, a adubação fosfatada (superfosfato simples, 18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) para aumentar o P do solo para 12 mg dm<sup>-3</sup>, e a adubação potássica (KCl, 60% K<sub>2</sub>O) para aumentar o K a 3% da capacidade de troca catiônica do solo. Os sistemas de produção receberam adubação nitrogenada com média de 110,9 kg N ha<sup>-1</sup> por safra.

#### 4.2 Atributos químicos analisados

Para a realização das análises químicas do solo foi feita uma amostragem no período seco (agosto/2021) em cada piquete da área de estudo, totalizando 50 amostras georreferenciadas. Para isso foi utilizado o procedimento de amostragem por zonas

homogêneas (FLEMING et al., 2000). Neste estudo, cada piquete foi considerado uma unidade homogênea de manejo, como já descrito por Bernardi et al. (2017). As amostragens em cada piquete foram realizadas em duas profundidades: 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m. Ainda, as amostras foram georreferenciadas pelo centroide do piquete.

Os atributos químicos analisados em cada uma das 50 amostras de solo são como segue: pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), Sulfato (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por base (V). Para realizar cada uma das análises, as amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório de solos da Embrapa Pecuária Sudeste, onde foram numeradas sequencialmente, a fim de que fossem identificadas sempre pelo mesmo número, desde o preparo inicial para a análise, até o processo final de registro dos resultados. As análises dos atributos foram realizadas a partir dos métodos de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais do Instituto Agronômico de Campinas (RAIJ et al., 2001).

### 4.3 Análises Estatísticas

Após a identificação e retirada dos *outliers* dos dados, foram calculadas as seguintes medidas estatísticas associadas aos atributos: média, desvio padrão, mínimo, máximo e coeficiente de variação. A análise descritiva dos dados teve a função de verificar a presença de uma tendência central para cada um dos atributos avaliados, bem como a sua variabilidade.

Finalizada a análise exploratória, seguiu-se com o processo de interpolação espacial de cada um dos atributos. A interpolação espacial nada mais é do que o processo de utilização de pontos com valores conhecidos de um determinado atributo para estimar os valores em outros pontos desconhecidos. O processo de interpolação possibilita a criação de mapas a partir dos quais é possível visualizar a distribuição espacial dos atributos de interesse na área de estudo.

Existem vários métodos de interpolação, dentre os quais se pode citar a interpolação pelo inverso da distância ponderada (do inglês, *Inverse Distance Weight* - IDW) (WATSON; PHILIP, 1985). No método, a ponderação é atribuída de acordo com a distância entre o ponto no qual se quer prever a característica de interesse e os pontos amostrados. Dessa forma, pontos que estão mais distantes têm peso menor e influenciam menos na previsão, enquanto pontos que estão mais próximos têm peso maior e, portanto, têm maior influência na previsão. O cálculo é realizado utilizando-se da equação (MELLO et al., 2003):

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \times z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \right)},$$

em que  $z_p$  é o valor do atributo a ser interpolado,  $z_i$  é o valor do atributo do  $i$ -ésimo ponto amostrado,  $d_i$  corresponde à distância euclidiana entre o ponto a ser interpolado e o  $i$ -ésimo ponto amostrado,  $p$  é o valor do expoente a ser considerado no processo de interpolação, e  $n$  representa o número de pontos amostrados.

O expoente  $p$ , utilizado no processo, atribui alguns efeitos na interpolação e, por isso, sua escolha deve ser tomada em virtude de métodos estatísticos como, por exemplo, a validação cruzada, a qual é uma técnica para avaliar a capacidade de generalização de um modelo, a partir de um conjunto de dados, sendo amplamente utilizada em situações em que o objetivo da modelagem é a predição.

O conceito central das técnicas de validação cruzada é o particionamento do conjunto de dados em subconjuntos mutuamente exclusivos e, posteriormente, o uso de alguns destes subconjuntos para a estimação do modelo (dados de treinamento), sendo os subconjuntos restantes (dados de validação) empregados na validação do modelo. Na literatura, encontram-se diversas formas de se realizar o particionamento dos dados, dentre as quais se pode citar o método *k-fold*, por exemplo (PÉREZ-PLANELLIS et al., 2015).

Um dos coeficientes que pode ser utilizado no processo de validação para avaliar o modelo é a raiz quadrada do erro médio (do inglês, *Root Mean Square Error* - RMSE) (GREGO et al., 2014), a qual é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos, tendo como vantagem o fato de que apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável de interesse (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011). A RMSE é definida por:

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^v (e_i)^2}{v} \right)^{1/2},$$

sendo  $v$  o número de dados de validação e  $e_i$  o valor do erro estimado (resíduo) para cada ponto. A RMSE é sempre não negativa, e um valor igual a 0 indicaria um ajuste perfeito aos dados, o que quase nunca é alcançado na prática. Dessa forma, quanto menor o valor da RMSE melhor.

Diante o exposto, para cada atributo avaliado na área de estudo, a validação cruzada *10-fold* foi aplicada para cada um dos valores de expoente  $p = 1, 2, 3$  e  $4$ . Para cada um deles, nas 10 iterações utilizadas no método, calculou-se a RMSE, sendo que ao final do procedimento foi feita a média dos erros obtidos em todas as iterações. Para a escolha do valor de  $p$  a ser utilizado

na interpolação para cada atributo, foi feita a média, para cada  $p$ , entre a RMSE obtida na validação para cada profundidade. O expoente  $p$  que levou ao menor valor médio da RMSE foi o escolhido para realizar a interpolação IDW.

Após a interpolação, as faixas de interpretação dos resultados da análise dos atributos químicos do solo foram organizadas a partir das publicações de Raij et al. (1996) e Alvarez Venegas et al. (1999) (Tabela 1). Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software* R (R CORE TEAM, 2021).

**Tabela 1.** Faixas de interpretação de resultados de análise de solo no Sistema Internacional de Unidades.

Interpretação	pH <sup>1</sup>	pH <sup>2</sup>	MO <sup>2</sup>	P <sup>1</sup>	K <sup>1</sup>	Ca <sup>2</sup>	Mg <sup>2</sup>	CTC <sup>2</sup>	V <sup>1</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	CaCl <sub>2</sub>	água	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mmolc dm <sup>-3</sup>				%	mg dm <sup>-3</sup>
Muito baixa	>6	7	7	0 - 5	0 - 0,7	<4	< 1,5	< 16	0 - 25	-
Baixa	5,6 - 6	6,1 - 6,9	7,1 - 20	6 - 12	0,8 - 1,5	4,1 - 12	1,6 - 4,5	16,1 - 43	26 - 50	0 - 4
Média	5,1 - 5,5	5,1 - 6,0	20,1 - 40	13 - 30	1,6 - 3	12,1 - 24	4,6 - 9	43,1 - 86	51 - 70	5 - 10
Alta	4,4 - 5,0	4,5 - 5,0	40,1 - 70	31 - 60	3,1 - 6	24,1 - 40	9,1 - 15	86,1 - 150	71 - 90	> 10
Muito Alta	<4,3	<4,5	>70	>60	>6	>40	>15	>150	>90	-

<sup>1</sup>Raij et al. (1996); <sup>2</sup>Alvarez Venegas et al. (1999)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a retirada dos *outliers* do conjunto, foi realizada a estatística descritiva dos atributos, considerando cada um dos sistemas ILPF, IPF, ILP, EXT e INT individualmente (Tabelas 2 a 6).

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	CTC	V%	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0 – 0,2 m										
<b>Média</b>	6,00	5,50	47,83	15,00	3,00	41,58	20,00	89,00	71,5	8,45
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,52	6,53	2,21	0,00	5,90	2,44	7,32	4,88	0,52
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	38,00	12,00	3,00	29,00	15,00	75,00	61,00	8,00
<b>Máximo</b>	6,00	6,00	61,00	19,00	3,00	48,00	24,00	100,00	77,00	9,00
<b>CV (%)</b>	0,00	9,49	13,66	14,77	0,00	14,18	12,24	8,22	6,83	6,17
0,2 – 0,4 m										
<b>Média</b>	6,00	5,00	30,83	7,66	1,66	20,58	9,58	62,75	50,25	18,50
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,00	5,37	1,30	0,49	2,15	1,16	3,38	4,67	2,93
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	25,00	5,00	1,00	18,00	8,00	58,00	42,00	13,00
<b>Máximo</b>	6,00	5,00	43,00	10,00	2,00	26,00	12,00	70,00	58,00	23,00
<b>CV (%)</b>	0,00	0,00	17,42	16,99	29,54	10,45	12,15	5,39	9,30	15,88

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	CTC	V%	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0 – 0,2 m										
<b>Média</b>	6,00	5,16	51,75	16,08	3,00	34,08	16,33	79,08	65,58	8,18
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,38	6,96	2,81	0,00	8,65	4,16	9,75	8,29	0,60
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	44,00	12,00	3,00	22,00	10,00	65,00	51,00	7,00
<b>Máximo</b>	6,00	6,00	69,00	22,00	3,00	46,00	22,00	92,00	78,00	9,00
<b>CV (%)</b>	0,00	7,50	13,46	17,47	0,00	25,40	25,48	12,33	12,64	7,37
0,2 – 0,4 m										
<b>Média</b>	6,00	5,00	33,33	7,25	1,66	17,66	8,50	63,75	43,41	19,54
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,00	6,47	0,96	0,49	1,55	0,67	2,41	3,75	1,43
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	25,00	6,00	1,00	15,00	8,00	60,00	37,00	17,00
<b>Máximo</b>	6,00	5,00	47,00	9,00	2,00	20,00	10,00	67,00	50,00	22,00
<b>CV (%)</b>	0,00	0,00	19,41	13,31	29,54	8,81	7,93	3,79	8,64	7,36

**Tabela 4.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILP) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	CTC	V%	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0 – 0,2 m										
<b>Média</b>	6,00	6,00	42,33	24,42	3,00	52,75	26,25	99,50	82,50	8,00
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,42	4,29	2,81	0,00	10,63	4,11	13,37	5,10	0,81
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	35,00	21,00	3,00	28,00	15,00	67,00	69,00	7,00
<b>Máximo</b>	6,00	7,00	47,00	28,00	3,00	72,00	30,00	121,00	91,00	10,00
<b>CV (%)</b>	0,00	7,10	10,13	11,54	0,00	20,16	15,67	13,44	6,19	10,20
0,2 – 0,4 m										
<b>Média</b>	6,00	5,00	25,33	14,18	1,90	33,63	14,72	69,09	73,50	18,90
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,00	1,77	2,31	0,53	6,85	2,45	8,49	6,62	2,99
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	22,00	11,00	1,00	22,00	10,00	55,00	60,00	15,00
<b>Máximo</b>	6,00	5,00	28,00	17,00	3,00	44,00	17,00	82,00	85,00	25,00
<b>CV (%)</b>	0,00	0,00	7,00	16,33	28,25	20,39	16,65	12,28	9,01	15,86

**Tabela 5.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de pastagem extensiva (EXT) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	CTC	V%	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0 – 0,2 m										
<b>Média</b>	6,00	5,50	36,50	18,00	3,00	39,50	19,00	82,50	72,50	7,50
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,70	4,94	2,82	0,00	17,67	7,07	24,74	7,77	0,70
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	33,00	16,00	3,00	27,00	14,00	65,00	67,00	7,00
<b>Máximo</b>	6,00	6,00	40,00	20,00	3,00	52,00	24,00	100,00	78,00	8,00
<b>CV (%)</b>	0,00	12,85	13,56	15,71	0,00	44,75	37,21	29,99	10,72	9,42
0,2 – 0,4 m										
<b>Média</b>	6,00	5,00	26,00	11,00	1,00	28,00	11,50	69,50	57,50	20,00
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,00	1,41	2,82	0,00	12,72	4,94	7,77	19,09	7,07
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	25,00	9,00	1,00	19,00	8,00	64,00	44,00	15,00
<b>Máximo</b>	6,00	5,00	27,00	13,00	1,00	37,00	15,00	75,00	71,00	25,00
<b>CV (%)</b>	0,00	0,00	5,43	25,71	0,00	45,45	43,04	11,19	33,20	35,35

**Tabela 6.** Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H<sub>2</sub>O, pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, Matéria Orgânica – MO (g dm<sup>-3</sup>), Fósforo – P (mg dm<sup>-3</sup>), Potássio – K (mmolc dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmolc dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de pastagem intensiva (INT) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	CTC	V%	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0 – 0,2 m										
<b>Média</b>	6,00	5,91	53,25	17,75	3,00	52,33	26,16	103,58	78,83	8,45
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,28	6,13	1,95	0,00	6,62	3,51	8,43	3,99	1,36
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	36,00	15,00	3,00	41,00	21,00	88,00	71,00	7,00
<b>Máximo</b>	6,00	6,00	60,00	21,00	3,00	64,00	33,00	118,00	84,00	10,00
<b>CV (%)</b>	0,00	4,87	11,52	11,04	0,00	12,65	13,42	8,14	5,06	16,18
0,2 – 0,4 m										
<b>Média</b>	6,00	5,00	38,58	11,08	1,83	23,41	11,16	68,00	53,33	19,30
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,00	4,27	1,62	0,38	6,14	3,09	8,22	10,12	2,86
<b>Mínimo</b>	6,00	5,00	34,00	10,00	1,00	16,00	7,00	55,00	37,00	14,00
<b>Máximo</b>	6,00	5,00	49,00	15,00	2,00	35,00	19,00	81,00	69,00	23,00
<b>CV (%)</b>	0,00	0,00	11,07	14,62	21,23	26,22	27,75	12,09	18,99	14,86

No sistema ILPF, na camada superficial do solo (0 – 0,2 m), os atributos que apresentaram baixa dispersão (CV < 10%) foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, K, CTC, V% e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, enquanto os atributos MO, P, Ca e Mg apresentaram média dispersão (10% < CV < 30%) e não houve nenhum atributo que mostrou alta dispersão (CV > 30%). Já na camada subsuperficial (0,2 – 0,4 m), os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, CTC e V%, enquanto os de média dispersão foram MO, P, K, Ca, Mg e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve nenhum atributo que mostrou alta dispersão (Tabela 2).

No sistema IPF, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, K e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, os de média dispersão foram MO, P, Ca, Mg, CTC e V%, e não houve atributo que apresentou alta dispersão. Já na camada subsuperficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, Ca, Mg, CTC, V% e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, os de média dispersão MO, P e K, e não houve atributo que apresentou alta dispersão (Tabela 3).

No sistema ILP, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, K e V%, os de média dispersão foram MO, P, Ca, Mg, CTC e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve atributo com alta dispersão. Na camada subsuperficial, os atributos com baixa

dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, MO e V%, os de média dispersão foram P, K, Ca, Mg, CTC e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve atributo que apresentou alta dispersão (Tabela 4).

No sistema EXT, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, K e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, os de média dispersão foram pH em CaCl<sub>2</sub>, MO, P, CTC e V%, enquanto os de alta dispersão foram Ca e Mg. Na camada subsuperficial, os atributos de baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, MO e K, os de média dispersão foram P e CTC, e por sua vez, os de alta dispersão foram Ca, Mg, V% e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Tabela 5).

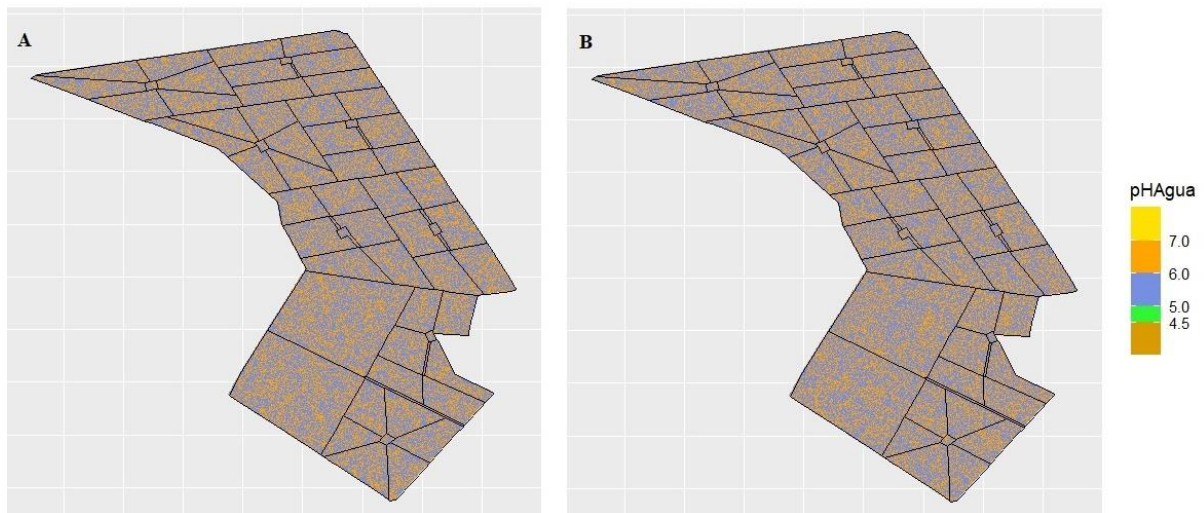
Por fim, no sistema INT, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, K CTC e V%, os de média dispersão foram MO, P Ca, Mg e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve atributo com alta dispersão. Na camada subsuperficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água e pH em CaCl<sub>2</sub>, os de média dispersão foram MO, P, K, Ca, Mg, CTC, V% e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve atributo com alta dispersão (Tabela 6).

O grau de dispersão dos diferentes atributos do solo é importante no manejo de agricultura de precisão, uma vez que aqueles que apresentam alta variabilidade são potencialmente melhores candidatos a serem manejados em uma base específica do que aqueles que apresentam baixa variabilidade. Entretanto, o mapeamento de atributos com maior variabilidade pode ser menos preciso do que o de atributos com menor variabilidade (CAMBARDELLA; KARLEN, 1999; KRAVCHENKO, 2003).

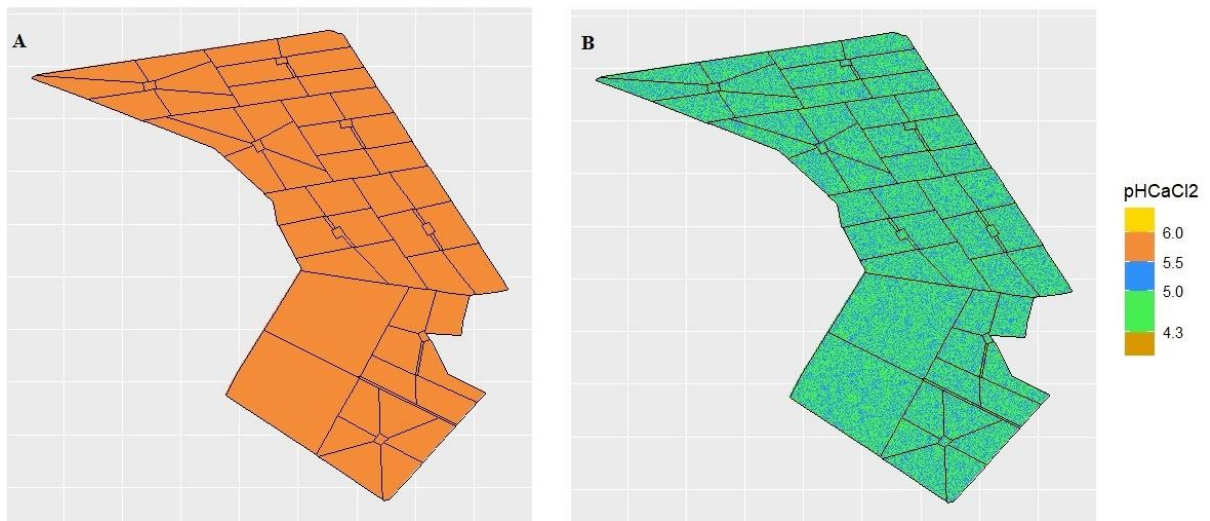
Após finalizar a estatística descritiva dos dados, realizou-se o processo de validação cruzada para cada atributo do solo, considerando-se os valores de  $p = 1, 2, 3$  e  $4$ , em ambas as profundidades avaliadas. O valor de  $p$  escolhido para cada atributo foi aquele que apresentou menor erro médio, considerando-se a média das RMSE obtidas nas duas profundidades (Tabela 7). Por fim, foram gerados, via interpolação IDW, os mapas de variabilidade espacial de cada atributo do solo na área de estudo, considerando o valor de  $p$  obtido no processo de validação (Figuras 2 a 15).

**Tabela 7.** Média, para cada atributo químico do solo avaliado, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos para cada profundidade (0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m) a partir de processo de validação cruzada *10-fold*, considerando os valores do expoente da interpolação IDW  $p = 1, 2, 3$  e 4.

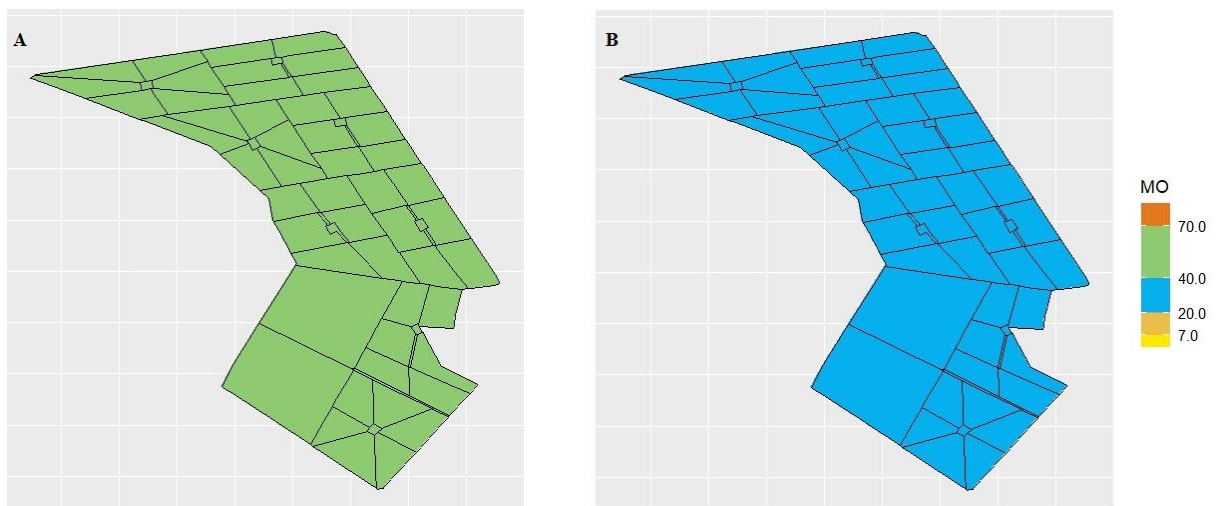
Atributo	RMSE médio			
	p = 1	p = 2	p = 3	p = 4
pH em água	0,3235	0,3175	0,3090*	0,3165
pH em CaCl <sub>2</sub>	0,3435	0,3080	0,2690	0,2590*
Matéria Orgânica	5,2150	4,5800	4,3850*	4,5350
Fósforo	3,1500	2,9700	2,8150*	2,9200
Potássio	0,4510*	0,4545	0,4625	0,4815
Cálcio	6,7250	5,9800*	6,2350	6,6350
Magnésio	3,0800	2,8000	2,7750*	3,1500
CTC	7,2050	6,9300*	7,0300	7,4900
Saturação por base	7,3550	6,2350	6,0700	5,9600*
Sulfato	1,9900*	2,1000	2,1750	2,3250



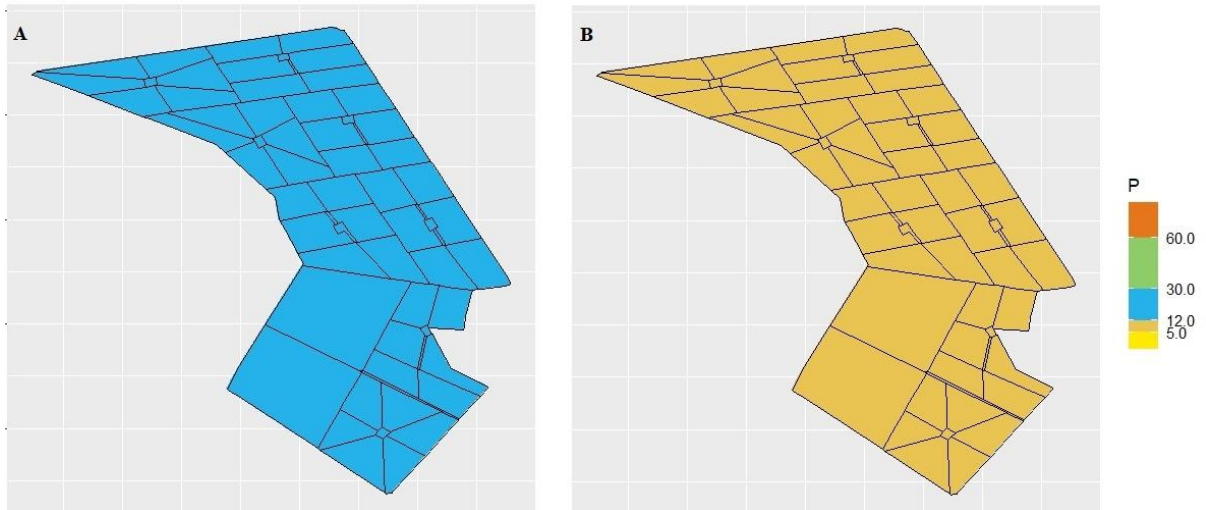
**Figura 2.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘pH em H<sub>2</sub>O’ na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



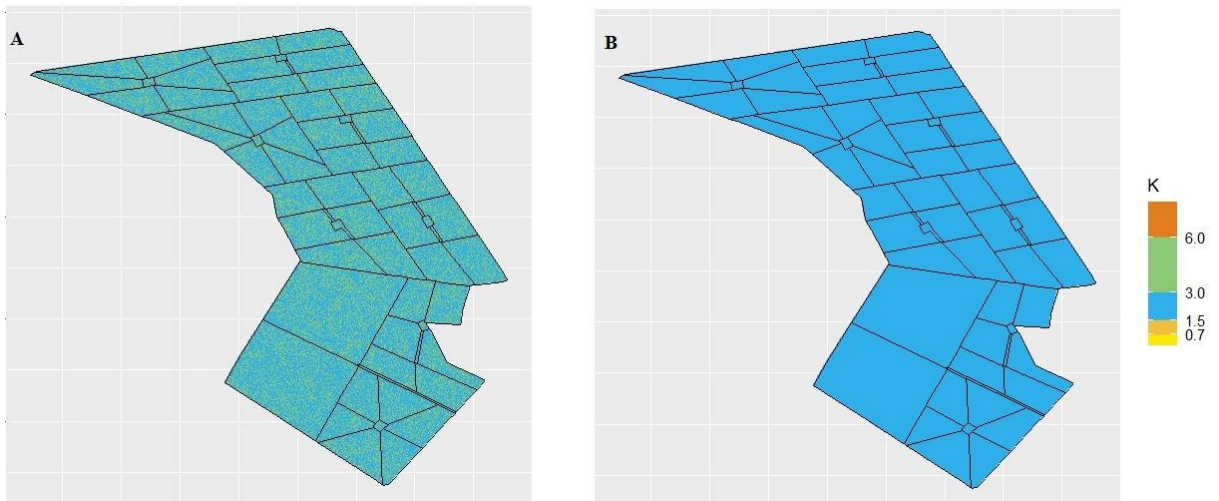
**Figura 3.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘pH em CaCl<sub>2</sub>’ na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



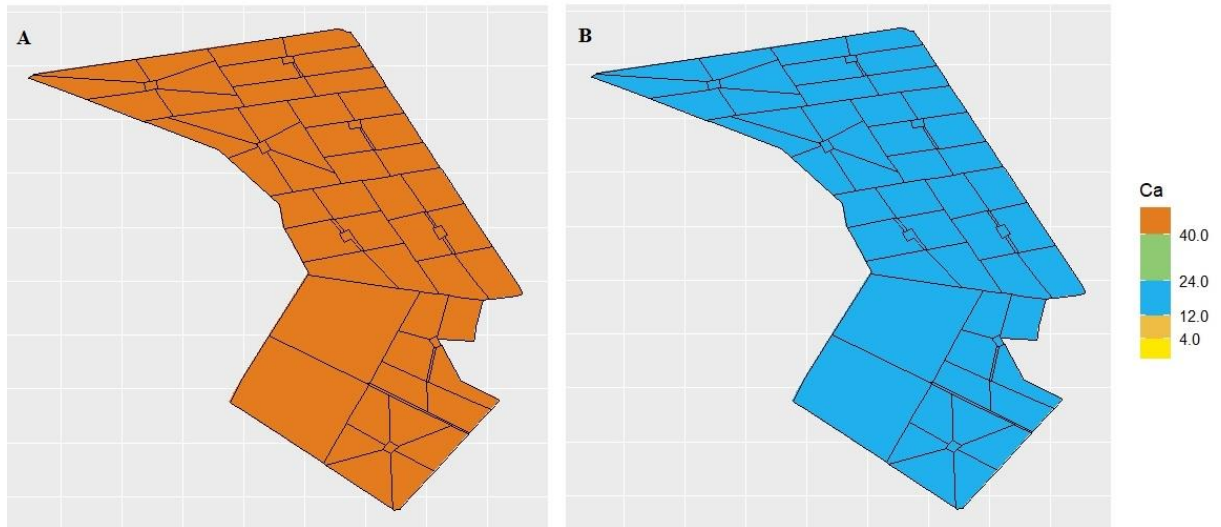
**Figura 4.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Matéria Orgânica (MO)’ (g dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



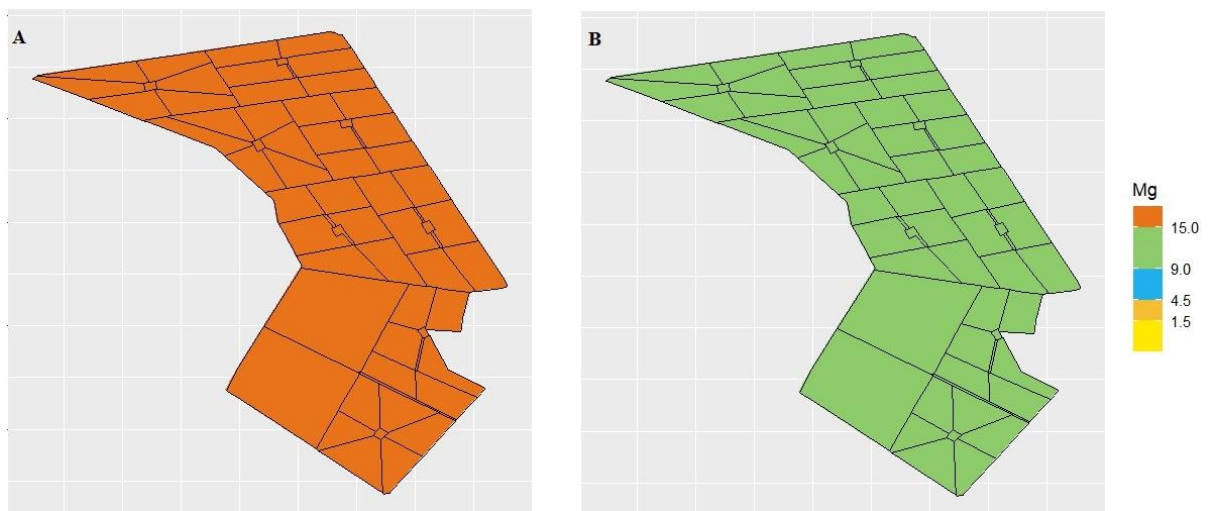
**Figura 5.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Fósforo (P)' ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



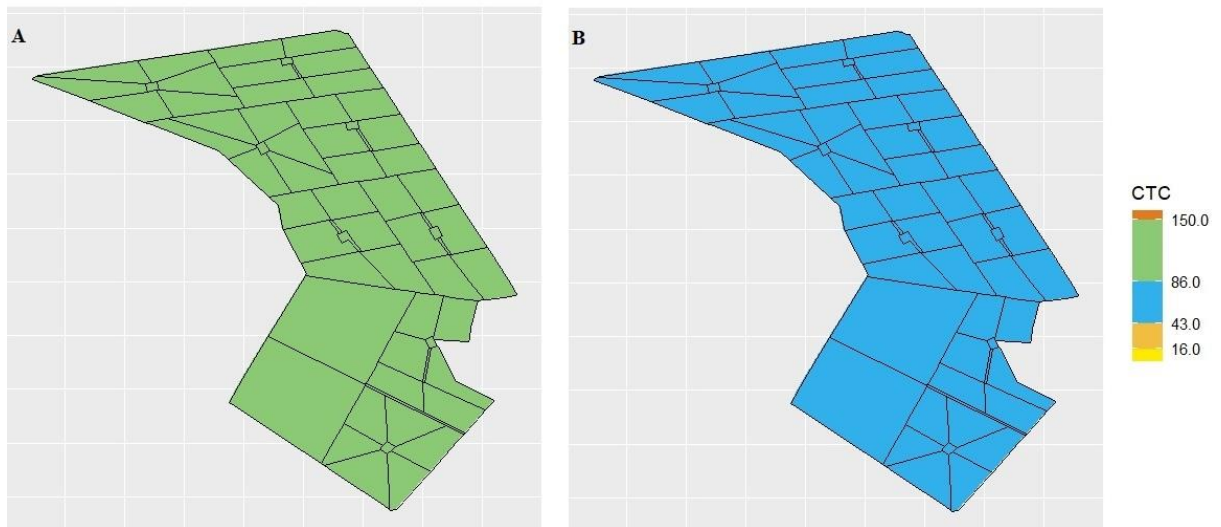
**Figura 6.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Potássio (K)' ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ ) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



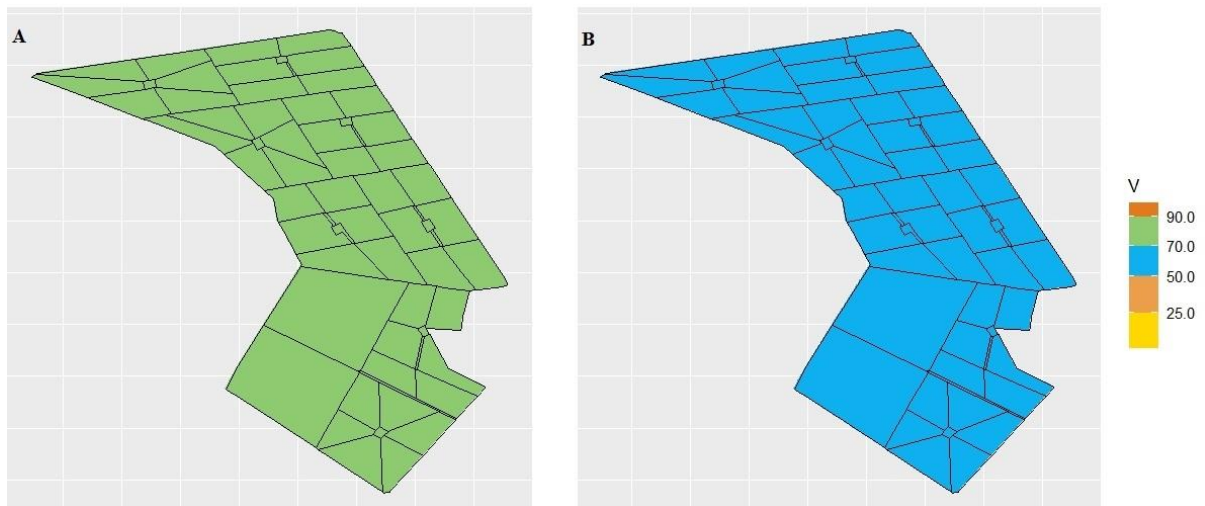
**Figura 7.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Cálcio (Ca)' ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ ) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



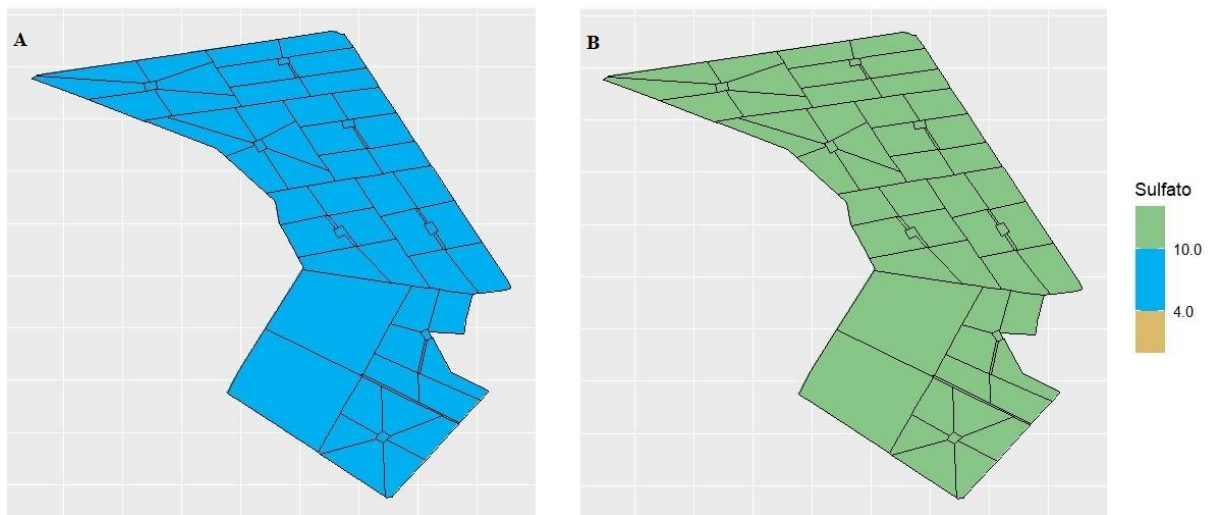
**Figura 8.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Magnésio (Mg)' ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ ) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



**Figura 9.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Capacidade de Troca Catiônica (CTC)’ (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



**Figura 10.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Saturação por base (V)’ (%) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



**Figura 11.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Sulfato’ ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) na área de estudo. (A) Profundidade 0 – 0,2 m. (B) Profundidade 0,2 – 0,4 m.

Pode-se observar que os valores interpolados para o pH do solo em água na área de estudo estiveram fixos em 6,0, exatamente na área de transição entre a faixa média (5,0 e 6,0) e a faixa alta (6,0 e 7,0), tanto na superfície quanto na subsuperfície (Figura 2). Já para o pH do solo em  $\text{CaCl}_2$ , os valores interpolados em toda a extensão da área estiveram na faixa entre 5,0 e 5,5 (faixa média) na superfície do solo (Figura 3A), enquanto na subsuperfície os valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  se enquadraram exatamente na transição entre as faixas baixa (4,3 a 5,0) e média (5,0 a 5,5) (Figura 3A).

Por meio da estatística descritiva dos dados também se observou uma média do pH em água igual a 6,0 tanto na superfície como na subsuperfície do solo, em todos os sistemas de produção (Tabelas 2 a 6). Diferentemente, para o pH do solo aferido em  $\text{CaCl}_2$ , observou-se uma média entre 5,16 e 6,00 na superfície, e exatamente igual a 5,00 na subsuperfície (Tabelas 2 a 6). Os valores pouco maiores de pH na superfície podem ser explicados devido ao efeito positivo da calagem realizada anualmente na área de estudo. Apesar do calcário ser aplicado à lanço, em área total e sem incorporação, observa-se um efeito de correção, especialmente na camada superficial do solo. Além disso, na superfície ocorre também um maior depósito de resíduos animais e vegetais, o que também intervém nas medidas de pH (MELLO; VITTI, 2002). De modo geral, os valores do pH do solo na área de estudo estiveram localizados dentro da faixa considerada ideal no que diz respeito à disponibilidade de nutrientes (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999; LIMA et al., 2006).

Com relação a quantidade de MO, na superfície, os seus valores médios nos diferentes sistemas produtivos ficaram entre 36,50 e 53,25 g dm<sup>-3</sup> (Tabelas 2 a 6), os quais se enquadram principalmente na faixa considerada como alta para este atributo. Da mesma forma, os resultados da interpolação apontaram que a quantidade de MO na superfície da área de estudo estiveram na faixa considerada alta (Figura 4A).

Já na subsuperfície notou-se um decréscimo na quantidade de MO, cujas médias variaram entre 25,33 e 38,58 g dm<sup>-3</sup> (faixa média) (Tabelas 2 a 6), corroborando com o fato de que a MO fica mais acumulada nas camadas superficiais do solo. Na interpolação, também foi possível notar a diminuição da MO com o aumento da profundidade, a qual permaneceu na faixa considerada como média para o atributo (Figura 4B).

Em relação ao P, na estatística descritiva para este atributo, os seus valores médios na superfície estiveram entre 15,00 e 24,42 mg dm<sup>-3</sup> (Tabelas 2 a 6), os quais estão localizados na faixa considerada como média. Pela interpolação IDW, também se notou que os valores interpolados na superfície da área estiveram na faixa média, corroborando com a estatística descritiva do atributo (Figura 5A). Já na subsuperfície, notou-se uma diminuição na disponibilidade de P. Pela estatística descritiva, os valores médios de P nesta camada do solo estiveram entre 7,25 e 14,18 mg dm<sup>-3</sup> (faixas baixa e média) (Tabelas 2 a 6). Na interpolação, os valores de P na subsuperfície da área estiveram determinados na faixa considerada baixa (5,00 a 12,00) (Figura 5B).

A disponibilidade de P está diretamente ligada a diversos fatores, dentre os quais se pode citar a quantidade de MO e a adubação (CORRÊA et al., 2004). Assim, é possível concluir que os valores maiores de P na superfície estão diretamente associados com a quantidade de MO nesta profundidade de solo, bem como com a adubação fosfatada que é realizada anualmente na área de estudo (BERNARDI et al., 2017; 2019).

A respeito da quantidade de K no solo da área, pela estatística dos dados observou-se um valor do atributo fixo em 3,0 mmol dm<sup>-3</sup> na superfície, independente do sistema de produção (faixa média) (Tabelas 2 a 6). Da mesma forma, a partir da interpolação IDW observou-se que os valores interpolados estiveram na transição entre as faixas média e alta, isto é, no teto da faixa média e no piso da faixa alta (Figura 6A). Também se notou uma diminuição na disponibilidade de K com o aumento da profundidade. Pela análise descritiva dos dados, os valores médios de K na subsuperfície estiveram entre 1,00 e 1,90 mmol dm<sup>-3</sup> (faixas baixa e média) (Tabelas 2 a 6). Por sua vez, os valores interpolados na área para esta profundidade permaneceram na faixa de valor médio (Figura 6B).

A disponibilidade de K é ligada a diversos fatores do solo, tais como a CTC, pH, relação  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{K}$ , dentre outros (BERNARDI et al., 2012). Como muitos dos atributos citados apresentam uma maior concentração na camada superficial do solo, o K conseqüentemente também apresenta uma maior quantidade nesta mesma profundidade. Além disso, o resultado obtido também mostra que a aplicação do fertilizante K na área de estudo tem atuado principalmente nas camadas superficiais do solo.

Tratando-se do Ca, pela estatística descritiva dos dados, notou-se que a sua concentração na superfície da área variou entre 34,08 e 52,75  $\text{mmolc dm}^{-3}$  (Tabelas 2 a 6), valores estes que, em maioria, estão dentro da faixa considerada muito alta (acima de 40,00) para o atributo. Pela interpolação espacial, observou-se que os valores permaneceram na faixa considerada muito alta (Figura 7A).

Já na subsuperfície, observou-se que os valores de Ca baixaram. Com a estatística descritiva, chegou-se a valores médios de Ca entre 17,66 e 33,63  $\text{mmolc dm}^{-3}$  (faixas média e alta) (Tabelas 2 a 6). Por meio da interpolação, observou-se que em toda a extensão da área de estudo os valores interpolados permaneceram na faixa considerada média para este atributo (Figura 7B). Os resultados obtidos comprovam o fato de que a calagem, realizada anualmente na área, e que é utilizada para corrigir a acidez e incorporar Ca e Mg no solo, apresenta melhores resultados na camada superficial do solo, enquanto ela demora a atingir as camadas mais profundas (MARIA et al., 1993).

Sobre a quantidade de Mg, pela estatística descritiva dos dados foram observados valores médios entre 16,33 e 26,25  $\text{mmolc dm}^{-3}$  na camada superficial do solo (Tabelas 2 a 6), sendo que estes valores se enquadram na faixa considerada como muito alta. Por sua vez, na camada subsuperficial do solo, os valores médios observados estiveram entre 8,50 e 14,72  $\text{mmolc dm}^{-3}$  (Tabelas 2 a 6), os quais se encaixam nas faixas consideradas média e, principalmente, alta para este atributo. De forma análoga, pela interpolação, observou-se que na camada superficial do solo os seus valores estiveram dentro da faixa muito alta e, na camada subsuperficial, os valores se enquadraram na faixa considerada alta (Figuras 8A e 8B). A presença de Mg se dá por vários fatores, sendo alguns deles a mineralização da MO e a aplicação de calcário para corrigir a acidez do solo (FAVARIN et al., 2013), o que explica a grande quantidade de Mg no solo da área de estudo.

Sobre a CTC, pela estatística dos dados, notou-se que os seus valores médios na área estiveram entre 79,08 e 103,58  $\text{mmolc dm}^{-3}$  na superfície (faixas média e alta), e entre 62,75 e 69,50  $\text{mmolc dm}^{-3}$  na subsuperfície (faixa média) (Tabelas 2 a 6). De forma similar, ao observar os mapas gerados pela interpolação, notou-se que na camada superficial a área mostrou estar

dentro da faixa alta de concentração do atributo (Figura 9A). Quanto à camada subsuperficial, a interpolação mostrou a área se enquadrando na faixa média do atributo (Figura 9B).

A respeito do atributo V, verificou-se que na superfície da área os seus valores médios estiveram entre 65,58 e 82,50%, enquanto na subsuperfície os seus valores estiveram entre 43,41 e 73,50% (Tabelas 2 a 6). Na superfície, estes valores se enquadram, principalmente, na faixa considerada como alta e, em menor proporção, na faixa considerada como média. Por sua vez, os valores obtidos na subsuperfície se enquadraram em sua maioria na faixa considerada como média para o atributo. Nos mapas interpolados, é possível verificar que os valores de V na superfície do solo permaneceram na faixa considerada como alta (Figura 10A), enquanto na subsuperfície os seus valores permaneceram na faixa considerada média para o atributo (Figura 10B), corroborando com os resultados obtidos a partir da estatística descritiva dos dados.

Quanto a quantidade de  $S-SO_4^{2-}$ , a área de estudo como um todo apresentou níveis médios do atributo na superfície do solo. Pela análise descritiva dos dados, os valores de  $S-SO_4^{2-}$  na área estiveram entre 7,50 e 8,45  $mg\ dm^{-3}$ , valores esses que se enquadram na faixa considerada média para o atributo. Quanto à camada subsuperficial, os valores aferidos estiveram entre 18,50 e 20,00  $mg\ dm^{-3}$ , o que é condizente com a faixa alta de concentração (Tabelas 2 a 6).

Quanto aos mapas interpolados para a quantidade de  $S-SO_4^{2-}$ , estes corroboram com os resultados obtidos na estatística descritiva, pois observou-se o mesmo padrão de comportamento, isto é, o mapa da camada superficial está na faixa média e o mapa da camada subsuperficial está na faixa alta do atributo (Figuras 11A e 11B). Diferente dos demais atributos químicos analisados, verificou-se que a quantidade de  $S-SO_4^{2-}$  apresentou uma característica peculiar quando comparada aos outros atributos, uma vez que a sua concentração foi maior na camada subsuperficial do solo.

## 6. CONCLUSÕES

1. Dentro do contexto das classes consideradas no processo de interpolação, não foi observada diferença entre os sistemas produtivos que compõe a área de estudo no que diz respeito à concentração dos atributos químicos do solo analisados, o que pode ser explicado pelo fato de os sistemas integrados terem sido implantados recentemente na área.
2. Notou-se diminuição nos valores de pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, CTC e saturação por base com o aumento da profundidade. Ao contrário, houve aumento nos valores de sulfato com o aumento da profundidade. Por sua vez, os valores de pH do solo em água se mantiveram constantes nas duas camadas do solo analisadas.
3. Os resultados obtidos com o estudo auxiliarão no manejo da área, propiciando assim a economia de insumos, o aumento da produtividade e a preservação do meio ambiente.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; MAFRA, Álvaro Luiz; FONTOURA, Sandra Mara Vieira; BAYER, Cimélio; PASSOS, João Frederico Mangrich dos. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno alumínico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 963-975, 2005.

ALMEIDA, J.A.; ERNANI, P.R. Influência do solvente, da relação solo/solvente, e da incubação das amostras úmidas na variação do pH de solos Catarinenses. **Ciência Rural**, v.26, n.1, p.81-85, 1996.

ALMEIDA, L.C. **Perfil metabólico e emissão de metano em vacas leiteiras submetidas a sistemas de pastejo extensivo e intensivo**. 2015. 78f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Veterinárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES, 2015.

ALVARENGA, R.C.; COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; WRUCK, F. J.; CRUZ, J. C.; NETO, M. M. G. Cultura do milho na integração lavoura-pecuária. **Informe Agropecuário**, v.27, n. 233, p.106-126, 2006.

ALVAREZ VENEGAS, V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. (Ed.) **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais: Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p.25-32.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A.P.; AVELAR, J.R.B. **Tópicos em Ciência do Solo**. 1.ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.8, 2013. Cap.8, p.325-380.

ARAÚJO, M. A. S.; LOPES, M. A.; CARDOSO, M. G. Viabilidade econômica do milho (*Zea mays*) para grãos em plantio direto no sistema integrado de produção em recuperação de pastagens. **Nucleus Animalium**, v.10, n.1, p.19-34, 2018.

BALBINO, L.C.; BARCELLOS, A.O.; STONE, L.F. **Marco referencial Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. p.23-40.

BALBINO, Luiz Carlos; CORDEIRO, Luiz Adriano Maia; PORFÍRIO-DA-SILVA, Vanderley; MORAES, Anibal de; MARTÍNEZ, Gladys Beatriz; ALVARENGA, Ramon Costa; KICHEL, Armindo Neivo; FONTANELI, Renato Serena; SANTOS, Henrique Pereira dos; FRANCHINI, Júlio Cezar; GALERANI, Paulo Roberto. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1-12. 2011.

BALBINO, L.C.; KICHEL, A.N.; BUNGENSTAB, D.J.; ALMEIDA, R.G. de. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D.J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p.11-18.

BATISTELLI, I.J.C.; BATISTELLI, J.C.O.R; BESS, B.L.; MENEZES, F.L.; MORAES, K.A.K.; MORAES, E.H.B.K. Recria intensiva em confinamento como estratégia de manejo em bovinos de corte - revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v.11, n.2, 2022.

BERNARDI, A.C.C.; BETTIOL, G.M.; MAZZUCO, G.G.; ESTEVES, S.N.; OLIVEIRA, P.P.A.; PEZZOPANE, J.R.M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture**, v.8, n.2, p.590-593, 2017.

BERNARDI, A.C.C.; RISSINI, J.B.; FERREIRA, R.P.; Teores de potássio no solo, estado nutricional e produção de matéria seca de alfafa em função de doses e frequência da adubação potássica após dois anos de cultivo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Pecuária Sudeste**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2012.

BONJOUR, S.C.M.; FIGUEIREDO, A.M.R.; MARTA, J.M.C. A pecuária de corte no Estado de Mato Grosso. In: Congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural, 2008, Cuiabá-MT. **Anais [...]**. Rio Branco-AC: 2008.

BONNOT, T.; BACHELET, F.; BOUDET, J.; SIGNOR, C.L.; BANCEL, E.; VERNOUD, V.; RAVEL, C.; GALLARDO, K. Sulfur in determining seed protein composition: present understanding of its interaction with abiotic stresses and future directions. **Journal of Experimental Botany**, v.74, n.11, p.3276-3285, 2023.

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H.G.; FONSECA, O.O.M.; SANTOS, R.D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de**

**Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP:** levantamento semidetalhado, propriedade e potenciais. Rio de Janeiro: EMBRAPA CNPS/São Carlos: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95p.

CAMBARDELLA, C.A.; KARLEN, D.L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v.1, n.1, p.5-14, 1999.

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.935-944, 2003.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELCICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.777-788, 2005.

CORRÊA, J.C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C.A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.12, p.1231-1237, 2004.

CRUZ, A.M.; GUZATTI, N.C. Custos e lucratividade na produção de bovinos no sistema de pecuária extensiva, no município de Denise-MT. **Revista Unemat de Contabilidade**, v.8, n.16, p.155-179, 2019.

DARIO, G.J.A.; DARIO, I.S.N. Adubação. In: BORÉM, A.; SCHEEREN, P.L. **Trigo: do Plantio à Colheita**. Universidade Federal de Viçosa, 2015. Cap.6, p.119-140.

KLUTHCOUSKI, J.; CORDEIRO, L.A.M.; VILELA, L.; MARCHAO, R.L.; SALTON, J.C.; MACEDO, M.C.M.; ZIMMER, A.H.; BALBINO, L.C.; PORFIRIO DA SILVA, V.; MULLER, M.D. Conceitos e Modalidades da Estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L.A.M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHAO, R.L. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap.1, p.21-33.

DAVEY, B.J.; CONYERS, M.K. Determining the pH of acid soils. **Soil Science**, v.146, n.3, p.141-150, 1988.

DAVID-BENZ, H.; SIRDEY, N.; DESHONS, A.; ORBELL C.; HERLANT, P. 2022. **Estrutura conceitual e método para a avaliação nacional e territorial dos sistemas**

**alimentares** - Catalisando a transformação sustentável e inclusiva dos sistemas alimentares. Roma, FAO, Bruxelas, União Européia e Montpellier, França, CIRAD.

DUARTE, P.M.; SANTANA, V.T.P.; DALMAS, A.D.; FERRI, I.E.B. Integração Lavoura-Pecuária (ILP): uma revisão literária. **Uniciências**, v.22, n.2, p.106-109, 2018.

DUVAL, M.E.; GALANTINI, J.A.; MARTÍNEZ, J.M.; LIMBOZZI, F. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: Influence of management practices and edaphic conditions, **Catena**, v.171, p.316-326, 2018.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral Nutrition of Plants: principles and perspectives**. 2.ed. Sinauer Associates, 2004. 380p.

EUCLIDES FILHO, K. **Produção de bovinos de corte e o trinômio genótipo-ambiente-mercado**. Campo Grande-MS: Embrapa Gado de Corte, 2000. 69p.

FAGERIA, N.K. **Adubação e nutrição mineral da cultura do arroz**. Goiânia: Embrapa-CNPAF; Rio de Janeiro: Campus, 1984. 341p.

FAGERIA, N.K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, p.416-424, 2001.

FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.W.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A.; FAGUNDES, J.L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1097-1104, 2003.

FAVARIN, J.F.; NETO, A.P.; TEZOTTO, T.; MARTINS, P.O.; TEIXEIRA, P.P.C. Correção do magnésio no solo é essencial ao cafeeiro. **Fertilidade e nutrição, visão agrícola**, v.12, p.76-78, 2013.

FERREIRA, A.D.; SERRA, A.P.; MELOTTO, A.M.; BUNGENSTAB, D.J.; LAURA, V.A. Manejo das árvores e propriedades da madeira em sistema de ILPF com eucalipto. In: BUNGENSTAB, D.J. Embrapa. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília: Embrapa Gado de Corte, 2019. Cap.28. p.455-471.

FIGUEIREDO, D.M.; OLIVEIRA, A.S.; SALES, M.F.L.; PAULINO, M.F.; VALE, S.M.L.R. Análise econômica de quatro estratégias de suplementação para recria e engorda de bovinos em sistema pasto-suplemento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, n.5, p.1443-1453, 2007.

FLEMING, K.L.; WESTFALL, D.G.; WIENS, D.W.; BRODAHL, M.C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. **Precision Agriculture**, v.2, p.201-215, 2000.

FRARE, J.C.V.; MARTINS, G.C.; FREITAS, L.; OLIVEIRA, I.A.; RAMOS, S. Bioeconomia na Amazônia: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos. **Research, Society and Development**, v.12, n.2, p.1-17, 2023.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I.A.; SILVA, L.S.; FRARE, J.C.V.; FILLA, V.A.; GOMES, R.P. Indicadores de qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, v.26, n.1-2, p.8-25, 2017.

GARRETT, R.D.; GIL, J.D.B.; VALENTIM, J.F. Transferência de Tecnologia: Desafios e Oportunidades para Adoção de ILPF na Amazônia Brasileira Legal. In: BUNGENSTAB, D.J. Embrapa. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília: Embrapa Gado de Corte, 2019. Cap.36. p.599-615.

GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R.P.; VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, p.74-83, 2014.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. Tese de Doutorado (Doutor em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2003

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A.J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, p.591-608, 2011.

HENDRICKSON, J.R.; HANSON, J.D.; TANAKA, D.L.; SASSENATH, G. Principles of integrated agricultural systems: introduction to processes and definition. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v.23, n.4, p.265-271, 2008.

JÚNIOR, C.O.P. **A produção intensiva de leite a pasto como fator competitivo para a agricultura familiar no Espírito Santo**. 2020. 73f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, UENF- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2020.

KICHEL, A.N.; COSTA, J.A.A.; ALMEIDA, R.G.; PAULINO, V.T. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) - experiências no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, v.71, n.1, p.94-105, 2014.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. **Uso da integração lavoura-pecuária na recuperação de pastagens degradadas: integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003.

KONDO, M.K.; ALBUQUERQUE C.J.B.; WENDLING, B.; SILVA, P.B.; CARDOSO, M.M. Efeito de coberturas vegetais sobre os atributos físicos do solo e características agronômicas do sorgo granífero. **Bioscience Journal**, v.28, p.33-40, 2012.

KRAVCHENKO, A.N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1564-1571, 2003.

LIMA, M.R.; SIRTOLI, A.E.; MOTTA, A.C.V.; OLIVEIRA, A.C.; SERRAT, B.M.; WISNIEWSKI, C.; FERREIRA, F.V.; ALMEIDA, L.S.; ALMEIDA, L.; KRIEGER, K.I.; MACHADO, M.A.M.; FAVARETTO, N.; COGO, N.P.; BERTOL, O.J.; MARQUES, R. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba, 2006. 341p.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v.137, p.1-72, 2016.

MACHADO, L.V.; RANGEL, O.J.P.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, R.V.; FERRARI, J.L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v.9, n.3, p.289-299, 2014.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 2.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1967. p.100-126.

MALAVOLTA, E. Funções dos macros e micronutrientes. In: MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2006. p.1-631.

MARIA, I.C.; ROSSETTO, R.; AMBROSANO, E.J.; CASTRO, O.M.; NEPTUNE, A.M.L. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia Agricola**, v.50, n.1, p.87-98, 1993.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London: Academic Press, 1995.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3.ed. Elsevier, 2012. 649p.

MELLO, C.R.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA, M.S. Krigagem e Inverso do Quadrado da Distância para Interpolação dos Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.27, p.925-933, 2003.

MELLO, S.C.; VITTI, G.C. Influência de materiais orgânicos no desenvolvimento do tomateiro e nas propriedades químicas do solo em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.20, p.452-458, 2002.

MENEGALE, M.L.C.; CASTRO, G.S.A.; MANCUSO, M.A.C. Silício: interação com o sistema solo planta. **Journal of Agronomic Sciences**, p.435-454. 2014.

MENEZES, K.C.; PUIA, J.D.; MACHADO, A.H.R. A importância da elasticidade da matéria orgânica e de sua atuação na estabilidade dos agregados para o controle da compactação do solo. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.3, n.3, p.1349-1356, 2020.

NOVAIS, R.F.; VENEGAS, V.H.A.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. SBCS, 2007. 1017p.

OLIMPIO, J.A. **A agricultura comercial e suas consequências sobre o ambiente nos municípios de Palmeira do Piauí e Currais**. 2004. 148f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (MDMA), Núcleo de Referência em Ciências Ambientais do Trópico Ecotonal do Nordeste, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, PI, 2004.

ONU. 2023. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>. Acesso em: 23 jun. 2023.

PÉREZ-PLANELLAS, L.I.; DELEGIDO, J.; RIVERA-CAICEDO, J.P.; VERRELST, J. Análisis de métodos de validación cruzada para la obtención robusta de parámetros biofísicos. **Revista de Teledetección**, v.44, p.55-65, 2015.

PEDREIRA, M.S.; OLIVEIRA, S.G.; BERCHIELLI, T.T.; PRIMAVERESI, O. Aspectos relacionados com a emissão de metano de origem ruminal em sistemas de produção de bovinos. **Archives of Veterinary Science**, v.10, n.3, p.24-32, 2005.

PEREIRA, L.G.R.; VOLTOLINI, T.V.; DE MORAES, S.A.; ARAGÃO, A.S.L.; BRANDÃO, L.G.N.; CHIZZOTTI, M.L. Integração Lavoura Pecuária Floresta - ILPF Sistema de Integração

- Fruticultura Pecuária. In: Simpósio de Produção Animal do Vale do São Francisco, 2009, Petrolina, PE. **Anais eletrônicos** [...]. Petrolina, PE: UNIVASF: Embrapa Semi-Árido, 2009.
- RACHWAL, M.F.G.; ZANATTA, J.A.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; FRANCISCON, L. Impacto de sistemas produtivos nos estoques de carbono e nitrogênio do solo na Região Noroeste do Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, p. 1-13. 2022.
- PEZZOPANE, J.R.M.; BOSI, C.; BERNARDI, A.C.C.; MULLER, M.D.; OLIVEIRA, P.P.A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.312, 2021.
- RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. 285p. (IAC, Boletim Técnico, 100).
- RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAIJ, B.V. **Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.
- R CORE TEAM (2021). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Embrapa Monitoramento por Satélite**. 2010.
- SALTON, J.C.; MERCANTE, F.M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J.A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W.M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.190, p.70-79, 2014.
- SANTOS, P.P. **Avaliação financeira e custeio por absorção em sistema de integração lavoura pecuária floresta**. 2020. 48f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.
- SCHOFIELD, R.K.; TAYLOR, A.W. The measurement of soil pH. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.25, n.2, p.164-167, 1955.
- SILVA, A.R.; FILHO, J.A.R.; CARVALHO, E.J.M.; SANTIAGO, A.V.; VELOSO, C.A.C.; MARTINEZ, G.B. Estoque de carbono e mitigação de metano produzido por bovinos em

sistema integração pecuária-floresta (IPF) com eucalipto no Sudeste Paraense. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.4, p.39997-40016, 2021.

SNYDER, B.; CALLAHAM JR, M.A.; LOWE, C.N.; HENDRIX, P.F. Earthworm invasion in North America: Food resource competition affects native millipede survival and invasive earthworm reproduction. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, n.1, 2013.

SPOSITO, G.; ZABEL, A. The assessment of soil quality. **Geoderma**, v.114, p.143-144, 2003.

STRASSBURG, B.B.N.; LATAWIEC, A.E.; BARIONI, L.G.; NOBRE, C.A.; SILVA, V.P.; VALENTIM, J.F.; VIANNA, M.; ASSAD, E.D. When enough should be enough: improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in brazil. **Global Environmental Change**, v.28, p.84-97, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. 720p.

TAIZ, L.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 7.ed. Artmed, 2024. 864p.

TAKAHASHI, H.; MARSOLAIS, F.; CUYPERS, A.; KOPRIVA, S. Sulfur metabolism: actions for plant resilience and environmental adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v.74, n.11, p.3271-3275, 2023.

TAVANTI, R.F.R. **Indicadores de qualidade física e química de solo em sistemas de pecuária extensiva no cerrado brasileiro**. 2020. 93f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020.

TOLEDO, M.M.; COSTA, J.B.; NETO, R.B.A.; NETO, M.L.T. **Desempenho socioambiental da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) no Maranhão**: Estudo de Caso 1: Fazenda Barbosa - Brejo. São Luís, MA: Embrapa Cocais, 2017. 37p.

VILELA, L.; JUNIOR, G.B.M.; MACEDO, M.C.M.; MARCHÃO, R.L.; JÚNIOR, R.G.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1127-1138, 2011.

WATSON, D.F.; PHILIP, G.M. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. **Geoprocessing**, v.2, p.315-327, 1985.

WEIL, R.R.; BRADY, N.C. **The Nature and Properties of Soils**. 15.ed. Pearson, 2016. 1104p.

WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Calcium in Plants. **Annals Of Botany**, v.92, n.4, p.487-511, 2003.

WIEND, T. Palestra: Magnésio no solo e nas plantas. **Potabrazil**, São Paulo-SP. n.117, 2007. Informações Agronômicas, 3p.

XAVIER, F.A.S. Solo - definição e importância. In: BORGES, A.L. **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Brasília: Embrapa, 2021. p.15-25.