



Universidade Federal de São Carlos  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
Curso de Engenharia Agrônômica



**GUSTAVO HENRIQUE ALLEGRE**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO  
EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

**ARARAS – 2024**



Universidade Federal de São Carlos  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
Curso de Engenharia Agrônoma



**GUSTAVO HENRIQUE ALLEGRE**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO  
EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia  
Agrônoma – CCA – UFSCar para a obtenção do  
título de Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Profa. Dra. Josiane Rodrigues

Coorientador: Dr. Alberto Carlos de Campos  
Bernardi

**ARARAS – 2024**

## RESUMO

Cada vez mais tem-se buscado a produção de alimentos de forma sustentável. Nesse contexto surgem os sistemas integrados de produção. No Brasil, sua adesão vem aumentando entre os produtores devido ao aumento da qualidade do solo, além da preservação ambiental, diversificação da produtividade, dentre vários outros fatores. Por sua vez, a compreensão da variabilidade espacial dos atributos do solo nesses sistemas é fundamental para que os produtores consigam atingir tais benefícios. Desse modo, o presente trabalho teve por objetivo estudar a variabilidade espacial de atributos do solo numa área de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP, que engloba diferentes sistemas produtivos (integração Lavoura-Pecuária-Floresta, integração Pecuária-Floresta, integração Lavoura-Pecuária, pastagem intensiva e pastagem extensiva). Para isso, foram avaliados no solo da área os seguintes atributos químicos: pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez total, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por base, saturação por alumínio e sulfato, nas profundidades 0-0,2 e 0,2-0,4 m, sendo que as coletas foram feitas em agosto de 2022. Os mapas para cada um dos atributos foram gerados por meio da interpolação IDW (*Inverse Distance Weight*), sendo o expoente utilizado no método determinado com base no processo de validação cruzada. Os mapas gerados mostraram que as formas de manejo integrado são uma excelente alternativa para atender demandas de sustentabilidade na atividade agropecuária, demonstrando bons resultados para os atributos químicos do solo analisados. Além disso, os resultados obtidos com a pesquisa permitirão a tomada de decisões de maneira localizada, aumentando assim a produtividade e qualidade nos sistemas, levando a uma economia de insumos e reduzindo os impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Agricultura de precisão; geoprocessamento; iLPF; interpolação espacial; sustentabilidade.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Área de estudo, localizada na Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....	17
<b>Figura 2.</b> Pontos de amostragem para estudo da fertilidade do solo na área de estudo.....	18
<b>Figura 3.</b> 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.....	27
<b>Figura 4.</b> 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.....	27
<b>Figura 5.</b> 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.....	27
<b>Figura 6.</b> 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.....	28
<b>Figura 7.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Potássio (K)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	28
<b>Figura 8.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Cálcio (Ca)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	28
<b>Figura 9.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Magnésio (Mg)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	29
<b>Figura 10.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Alumínio (Al)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	29
<b>Figura 11.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Acidez total (H + Al)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	29
<b>Figura 12.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Soma de Bases (SB)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	30
<b>Figura 13.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Capacidade de Troca Catiônica (CTC)’ (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	30
<b>Figura 14.</b> 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.....	30
<b>Figura 15.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Saturação por alumínio (m)’ (%) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	31
<b>Figura 16.</b> Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Sulfato (S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )’ (mg dm <sup>-3</sup> ) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....	31

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Faixas de interpretação de resultados da análise química de solo.....21
- Tabela 2.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da área de estudo.....23
- Tabela 3.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da área de estudo.....23
- Tabela 4.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) no sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) da área de estudo.....24
- Tabela 5.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) na pastagem extensiva (EXT) da área de estudo.....24
- Tabela 6.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) na pastagem intensiva (INT) da área de estudo.....25
- 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  $4$ .....26

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>10</b>
2.1 Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta .....	10
2.2. A importância do estudo dos atributos do solo e a Agricultura de Precisão .....	12
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
3.1 Objetivo Geral .....	15
3.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
4.1. Caracterização da área de estudo .....	16
4.2. Atributos químicos analisados .....	18
4.3. Análises estatísticas .....	19
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente a humanidade se depara com desafios cada vez maiores para a produção de alimentos, fibras, energia, produtos madeireiros e não madeireiros, tudo isso de forma compatível com a disponibilidade de recursos naturais e preservando o meio ambiente e, por esse motivo, são grandes os apelos para que se difunda em todo o mundo a agricultura sustentável (BALBINO et al., 2012b).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a agricultura sustentável envolve fatores tais como a conservação do solo, da água e dos recursos genéticos animais e vegetais, a conservação ambiental e o uso de técnicas apropriadas, economicamente viáveis e socialmente aceitáveis (KAMIYAMA, 2014). De acordo com o conceito de agricultura sustentável, os agrossistemas do século XXI devem ser capazes de, igualmente, maximizar a quantidade de produtos agrícolas de alta qualidade e conservar os recursos naturais do sistema (BALBINO et al., 2012b) e, nesse contexto, os sistemas integrados surgem como uma estratégia de produção sustentável (MÜLLER et al., 2015).

Os sistemas integrados de produção podem ser classificados em quatro modalidades: (i) integração Lavoura-Pecuária (iLP) – sistema de produção que engloba os componentes agrícola e pecuário, em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos; (ii) integração Pecuária-Floresta (iPF) – sistema de produção que engloba os componentes pecuário (pastagem e animal) e florestal, em consórcio; (iii) integração Lavoura-Floresta (iLF) – sistema de produção que engloba os componentes agrícola e florestal pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais ou perenes); e (iv) integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) – sistema de produção que engloba os componentes agrícola, pecuário e florestal em rotação, consórcio ou sucessão, numa mesma área (BALBINO et al., 2011).

No Brasil, a utilização desses sistemas tem aumentado como forma de minimizar os riscos das atividades praticadas de forma isolada, assim como para diminuir as áreas de pastagens degradadas, devido à melhoria dos atributos do solo, dentre os quais se pode citar a maior quantidade de matéria orgânica, maior ciclagem de nutrientes, melhores condições para desenvolvimento de microrganismos, maior infiltração de água, menor perda de umidade e menor risco de erosão (EMBRAPA, 2021).

No que diz respeito aos atributos do solo, entretanto, é sabido que eles podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até a escala regional em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas e, por isso, a compreensão da variabilidade no espaço dos atributos edáficos nos diferentes sistemas produtivos possui potencial para contribuir com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumo e redução do impacto ambiental (CAMBARDELLA; KARLEN, 1999).

O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, por sua vez, está associado ao conceito de agricultura de precisão (AP). A AP pode ser definida como o conjunto de ferramentas e tecnologias que possibilita ao produtor conhecer toda uma determinada área levando em conta a sua variabilidade espacial e temporal. Bernardi et al. (2014) descreveram como a AP envolve a obtenção e processamento de informações detalhadas e georreferenciadas sobre as áreas de cultivo agrícola, visando definir estratégias de manejo mais eficientes.

No estudo da variabilidade espacial de atributos do solo, faz-se necessária a geração de mapas relacionados aos sistemas de produção agrícola, permitindo a identificação de zonas homogêneas e heterogêneas e, conseqüentemente, auxiliando os produtores na aplicação de insumos e manejos localizados, bem como na comparação dos diferentes sistemas produtivos. Contudo, a obtenção de mapas da variabilidade espacial dos atributos só é possível utilizando métodos de interpolação espacial, dentre os quais se pode citar a Interpolação pelo Inverso da Distância Ponderada (*Inverse Distance Weight* - IDW) (WATSON; PHILIP, 1985).

A interpolação espacial é um procedimento que se utiliza de pontos com valores conhecidos de um determinado atributo para estimar os seus valores em outros desconhecidos. O processo de interpolação possibilita a criação de mapas, permitindo assim a visualização espacial dos atributos na área de interesse, o que constitui um aspecto de inquestionável importância, uma vez que ampara tecnicamente as decisões estratégicas, permitindo observar os pontos mais complexos da área em estudo, comparando-os com o sistema de manejo adotado, seus efeitos ambientais e a produtividade das diferentes culturas (GREGO et al., 2014).

Diante o exposto, o objetivo do presente trabalho é estudar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo numa área de iLPF que engloba diferentes sistemas produtivos, utilizando para isso ferramentas de AP e o processo de interpolação IDW. Com isso, pretende-se: contribuir para com as tomadas de decisões que serão feitas sobre essa área, visando definir

estratégias de manejo mais eficientes, em especial o uso racional de insumos e a preservação ambiental; e enfatizar os benefícios dos sistemas integrados.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta

A crescente demanda por uma agricultura mais sustentável e que, ao mesmo tempo, consiga acompanhar a crescente necessidade por produtos alimentícios, tem aumentado o número de estudos envolvendo a preservação do solo e a otimização de espaços de áreas agricultáveis. Dentro dessa perspectiva, os sistemas integrados de produção agropecuária têm sido alvo de muitas pesquisas recentes.

Embora os sistemas integrados sejam considerados inovadores no Brasil, 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 que é difundida na produção atualmente (BALBINO et al., 2012a).

Polidoro et al. (2021) estimaram que os sistemas de produção integrados englobavam no Brasil, no ano de 2020, a área total de 17,4 milhões de hectares, o que representa apenas 2% do território nacional. Embora a área destinada a esses sistemas ainda seja pequena, em levantamento anterior, realizado no ano de 2015, estimava-se um total de 11,5 milhões de hectares com algum sistema de produção integrado no país, ou seja, em poucos anos houve um aumento de aproximadamente 6 milhões de hectares nos diferentes formatos dos sistemas integrados no Brasil.

De modo geral, os sistemas integrados podem ser classificados em quatro modalidades, sendo elas: iLPF (integração Lavoura-Pecuária-Floresta), iPF (integração Pecuária-Floresta), iLF (integração Lavoura-Floresta) e iLP (integração Lavoura-Pecuária) (BALBINO et al., 2012a; BALBINO et al., 2012b).

O sistema iLPF, também conhecido como agrossilvipastoril, é considerado o mais complexo por integrar numa mesma área os três componentes (lavoura, pecuária e floresta). Geralmente, é recomendado para produtores com maior conhecimento em sistemas integrados. Neles, o componente lavoura consegue sustentar a produtividade à curto prazo, enquanto o florestal e o pastoril são pensados a médio e longo prazo (BEHLING et al., 2013).

O sistema iPF, também conhecido como silvipastoril, é um dos sistemas integrados mais difundidos no Brasil, principalmente no estado do Paraná, onde há a presença de forrageiras, que são consumidas pelos animais durante o pastejo. A atividade, ainda, é associada à produção madeireira. As árvores trazem diversos benefícios para os animais, uma vez que as sombras que elas geram dão um maior conforto a eles, principalmente em picos de temperaturas altas. Esse conforto, por sua vez, gera produtos animais – tais como carne e leite – de melhor qualidade. É importante ressaltar que a integração da floresta também é recomendada para estratégias de recuperação de pastagens degradadas (BEHLING et al., 2013).

Por sua vez, o sistema iLF, também conhecido como silviagrícola, geralmente é indicado para produção onde o componente florestal não permite a entrada de animais, pois pode causar danos nos produtos gerados (BEHLING et al., 2013).

Por fim, o iLP, também conhecido como agropastoril, é o sistema mais utilizado no Brasil, onde há a implementação de cultura com forrageiras para o pastejo de animais. Essa técnica vem ganhando popularidade no país devido à dificuldade que muitos produtores têm em lidar com pastagens degradadas. Dessa maneira, ao mesmo tempo em que se otimiza o espaço com maior produtividade, também se diminui a quantidade de áreas improdutivas, fazendo com que não haja necessidade de desmatamento em outras áreas (BEHLING et al., 2013).

Assim, os sistemas integrados podem ser definidos como a produção, em um mesmo espaço, de produtos agrícolas, pecuários e florestais, otimizando o seu uso ao mesmo tempo que busca sinergia entre as produções, além de preservar os seus componentes ambientais, aumentar a produtividade, valorizar o homem e o seu capital natural produzido, além da viabilidade econômica do sistema (BALBINO et al., 2012a; BEHLING et al., 2013). Vale notar que, incluindo o componente florestal, a definição acima também se enquadra nos sistemas agroflorestais (SAFs), que também são bem difundidos ao conhecimento na agricultura sustentável atual (BALBINO et al., 2012a).

No Brasil, dentre os produtores que adotam os sistemas integrados, 83% se dedicam à estratégia iLP, 9% ao iLPF, 7% ao iPF, e os 1% restante ao iLF. Além disso, pecuaristas e produtores típicos de grãos demonstraram dados positivos em relação ao iLPF, em que 29% e 17% deles adotam algum tipo de sistema integrado, respectivamente. Também vale notar que a sua taxa de abandono é baixa, com valores médios de 10% no país (SKORUPA; MANZATTO, 2019).

Em prática, são diversos os benefícios na adoção dos sistemas integrados de produção, tais como uma maior biodiversidade e sustentabilidade na área, melhoria dos atributos do solo, além de maior resiliência em caso de pragas, doenças e condições climáticas adversas, e o aumento da estabilidade econômica do produtor. No entanto, apesar dos inúmeros benefícios, existem também dificuldades para que haja uma implementação de qualidade dos sistemas integrados, sendo algumas delas o custo de implementação, além de gestão e manejo, limitação do uso de mecanizados, bem como falta de mão de obra qualificada (BEHLING et al., 2013).

Essas dificuldades, porém, podem ser superadas tomando alguns cuidados ao implementar o sistema, tais como a adoção de componentes com maior rendimento e de maior aceitação pelo mercado e pelo produtor, além da diversificação dos componentes do sistema, reduzindo assim riscos de perda econômica, e treinamento e acompanhamento com extensionistas para guiar sobre as melhores ações a serem tomadas (BEHLING et al., 2013).

## **2.2. A importância do estudo dos atributos do solo e a Agricultura de Precisão**

O uso adequado do solo para o plantio é um desafio enorme na agricultura, pois ele é considerado um sistema heterogêneo de grande variabilidade, em grande ou pequena escala, sendo que seus componentes podem variar tanto espacialmente como temporalmente (GODERYA, 1998). Essas variações podem ser naturais, ocorrendo desde a sua formação e continuando mesmo após o solo atingir equilíbrio dinâmico, ou serem induzidas pelo homem com suas diversas atividades, tais como formas diferentes de preparo de solo, desmatamento, rotação de culturas, dentre várias outras atividades (CAVALCANTE et al., 2007).

Devido à essa característica, os atributos do solo podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até a escala regional. Dentre eles, os atributos químicos se destacam, devido às suas diferentes interações com as reações químicas constantes que acontecem na solução do solo (CAVALCANTE et al., 2007). Essa variação pode trazer crescimento desigual para as culturas, diminuir a eficácia dos fertilizantes aplicados de maneira uniforme dentro de uma área, além de causar danos ao meio ambiente (BHATTI et al., 1991).

Dentro desta perspectiva, o uso de insumos nos solos com base em seus teores médios de fertilidade pode ser subestimado ou superestimado. Assim, levar em consideração a aplicação de insumos de forma localizada, levando em conta a variabilidade espacial de seus atributos, além de contribuir para com o aumento da produção, também contribui para com a

economia de insumos, bem como reduz os possíveis impactos que podem ser causados ao ambiente.

Com a crescente demanda para a conservação dos recursos naturais, cada vez mais faz-se necessário encontrar formas de manejo adequadas, que consigam diminuir o uso de insumos, evitem a contaminação de lençóis freáticos, além de conservar a estrutura do solo para que ela seja eficiente no plantio de culturas de interesse (BHATTI et al., 1991). Para isso, deve-se considerar a aplicação de insumos a taxas variáveis, levando em conta a variabilidade espacial dos atributos do solo na área. Surge então o conceito de Agricultura de Precisão (AP), que segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva (MAPA, 2009).

A Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA, 2019) define a AP como sendo “uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência do uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola”. Assim, trata-se da gestão dos sistemas produtivos, buscando detalhar ao máximo as variações que ocorrem dentro da propriedade, tentando otimizar as aplicações, as atividades, e qualquer ação que seja realizada dentro do setor produtivo.

Segundo a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), a AP busca obter resultados sociais, econômicos e ambientais (INAMASU; BERNARDI, 2014). Com seu uso o produtor consegue aplicar quantidades específicas de insumos em diferentes localizações, tais como fertilizantes, corretivos, inseticidas, dentre outros (BASSOI et al., 2019), possibilitando aumentar a produtividade das culturas, reduzir a quantidade de insumos utilizados, e reduzindo os danos ambientais que podem ser causados à área.

Dessa forma, o estudo de atributos do solo numa determinada área permite um grande conhecimento da variabilidade encontrada entre as diferentes áreas da propriedade e, assim, proporciona tomadas de decisão de forma mais precisa (SANTI et al., 2012). A AP vem como uma ferramenta útil para os produtores, os auxiliando a conhecer com maior detalhamento as suas áreas de produção (COSTA et al., 2014).

Foi a partir da década de 90, com a implementação da tecnologia chamada *Global Positioning System* (GPS), que houve um avanço das pesquisas sobre AP. Ainda nessa mesma

década, com o primeiro simpósio de Agricultura de Precisão realizado na ESALQ, foram desenvolvidas diversas pesquisas sobre o tema, principalmente pela Embrapa. Inicialmente sua difusão no Brasil levantou questionamentos sobre o uso dessa tecnologia e o seu retorno financeiro, possivelmente sendo uma ela acessível somente para produtores com maiores condições financeiras (INAMASU; BERNARDI, 2014).

Entretanto, projetos desenvolvidos pela Embrapa na última década mostram que o investimento em AP está associado às características de cada lavoura, bem como aos processos utilizados por cada agricultor (SILVA; SILVA-MANN, 2020), ou seja, o retorno depende de cada área de estudo e os processos que o produtor deseja aplicar. O uso de técnicas de AP, para que seja economicamente viável, depende de vários fatores, sendo o principal a existência de variabilidade de produtividade dentro da área produtiva (INAMASU; BERNARDI, 2014). Além disso, para o uso de técnicas de AP, é necessário entender as interações entre os diferentes atributos estudados, pois somente assim será possível traçar uma estratégia de manejo adequado, não sendo suficiente a análise individual de cada atributo (SANTI et al., 2012).

Algumas das técnicas e tecnologias usadas na AP para seus respectivos manejos são: culturas, com o uso de radiação eletromagnética; o solo, com o uso de condutividade elétrica aparente; a água, com a topografia somada à densidade e condutividade elétrica aparente; e para manejo de plantas invasoras, pragas e doenças, com o uso de ferramentas SIG com imagens multiespectrais (BASSOI et al., 2019).

No Brasil, Bernardi e Inamasu (2014) realizaram uma pesquisa com produtores nas principais regiões produtoras do país, dos quais 53% adotavam a AP. As principais atividades realizadas pelos produtores são os sistemas de navegação e a aplicação de insumos em taxas variadas.

De modo geral, o sucesso da implantação da AP traz, além de bons resultados, um processo agrícola mais racional, mais responsável e rastreável (INAMASU; BERNARDI, 2014). Dentro do contexto do estudo da variabilidade espacial de atributos do solo, o monitoramento de seus atributos químicos é importante pois através dele é possível diagnosticar a capacidade do solo em promover o desenvolvimento das plantas, mantendo a produtividade das culturas e a qualidade ambiental do sistema utilizado (DUVAL et al., 2018). Em suma, busca-se o aumento do retorno econômico, a sustentabilidade e a minimização de efeitos nocivos ao ambiente.

### **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, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez total, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por base, saturação por alumínio e sulfato) numa área de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, SP, que engloba diferentes sistemas produtivos (integração Lavoura-Pecuária-Floresta, integração Pecuária-Floresta, integração Lavoura-Pecuária, pastagem intensiva e pastagem extensiva).

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Medir, caracterizar e avaliar atributos químicos do solo num sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta;
- Armazenar, disponibilizar e integrar dados georreferenciados utilizando técnicas de geoprocessamento;
- Gerar mapas de superfície e fornecer as bases para a interpretação da variabilidade de atributos do solo em diferentes sistemas de produção.

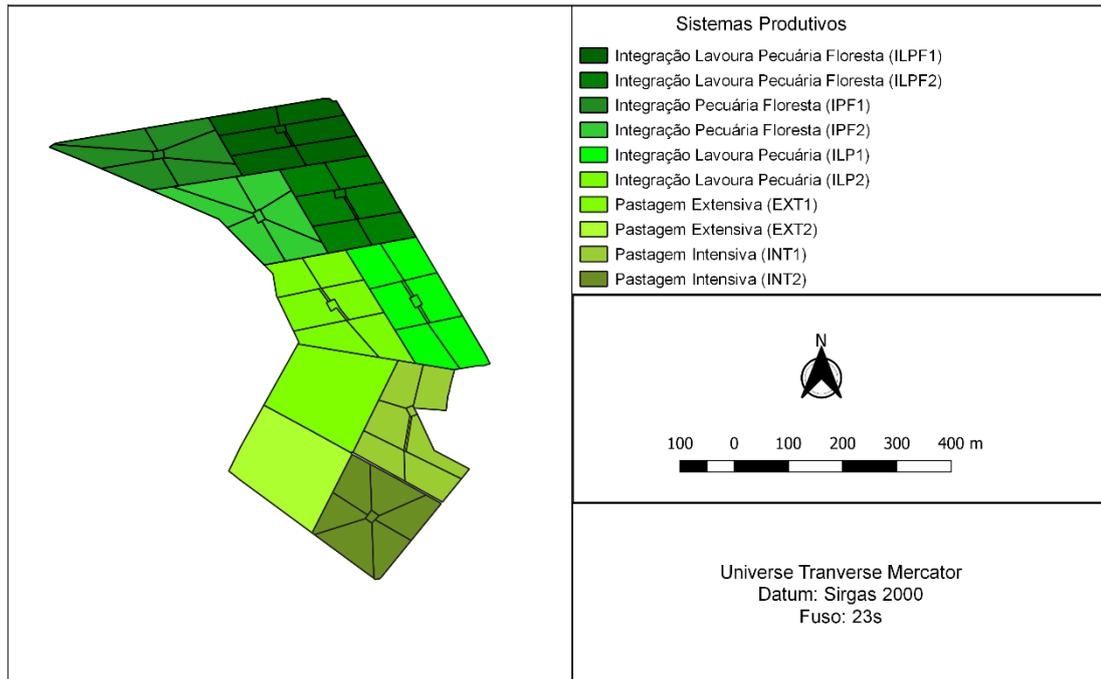
## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 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).

As árvores de eucalipto foram plantadas em abril de 2011, em linhas simples, com uma orientação de Leste-Oeste e um espaçamento de 15 x 2 m (15 m entre linhas e 2 m entre árvores dentro de linhas), resultando numa densidade populacional de 333 árvores ha<sup>-1</sup>. Em julho de 2016, as árvores foram desbastadas (50% retiradas de cada fila), mudando o espaçamento para 15 x 4 m (167 árvores ha<sup>-1</sup>). Em 2019 foi realizado o segundo desbaste de 25% das árvores originais, resultando em um espaçamento de 30 x 4 m (PEZZOPANE et al., 2020). Os desbastes das árvores já estavam planejados no início da implantação, pois são essenciais em sistemas integrados e visam aumentar a transmissão da radiação solar e melhorar a qualidade da madeira das árvores restantes.



**Figura 1.** Área de estudo, localizada na 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/2022) em cada piquete da área de estudo, totalizando 50 amostras georreferenciadas (Figura 2). 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.



**Figura 2.** Pontos de amostragem para estudo da fertilidade do solo na área de estudo.

Os atributos químicos analisados em cada uma das 50 amostras de solo são como segue: pH do solo em  $H_2O$ , pH do solo em  $CaCl_2$ , Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Acidez total (H+Al), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por base (V), Saturação por alumínio (m) e Sulfato ( $S-SO_4^{2-}$ ). 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 Agrônomo de Campinas (RAIJ et al., 2001).

### 4.3. Análises estatísticas

Todos os atributos do solo foram submetidos inicialmente a uma análise exploratória. 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 (do inglês, *cross validation*), 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 *holdout* e o método *k-fold*, por exemplo (PÉREZ-PLANELLAS et al., 2015).

O método *hold-out* é o mais simples dos vários métodos de validação cruzada, e consiste em separar o conjunto de dados disponível em dois subconjuntos, sendo um deles usado para treinar o modelo e outro usado para realizar o teste de validação (ARLOT; CELISSE, 2010). As estatísticas obtidas com os dados de validação permitem a avaliação do método utilizado em termos de erro.

O método *k-fold*, por sua vez, é baseado no método anterior, mas com maior utilidade quando o conjunto de dados é pequeno (YANG; HUANG, 2014). Nele, os dados totais são divididos em  $k$  subconjuntos, e então aplica-se o método *hold-out*  $k$  vezes, cada vez usando um subconjunto diferente para validar o modelo (JUNG; HU, 2015). O erro médio obtido das  $k$  análises fornece o erro cometido pelo método, permitindo assim avaliar sua validade. Comparando os dois métodos entre si, o *k-fold* tem a vantagem de que todos os dados são usados para treinamento e validação, de modo que resultados mais representativos são obtidos que no método *hold-out* (PÉREZ-PLANELLAS 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 da análise química de solo.

	pH água	pH CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V%	m
Muito baixa	7	>6	7	0-5	0-0,7	<4	<1,5	<2	<10	<6	<16	0-25	<15
Baixa	6,1-6,9	5,6-6	7,1-20	6-12	0,8-1,5	4,1-12	1,6-4,5	2,1-5	10,1-25	6,1-18	16,1-43	26-50	15,1-30
Média	5,1-6	5,1-5,5	20,1-40	13-30	1,6-3	12,1-24	4,6-9	5,1-10	25,1-50	18,1-36	43,1-86	51-70	30,1-50
Alta	4,5-5	4,4-5	40,1-70	31-60	3,1-6	24,1-40	9,1-15	10,1-20	50,1-90	36,1-60	86,1-150	71-90	50,1-75
Muito Alta	<4,5	<4,3	>70	>60	>6	>40	>15	>20	>90	>60	>150	>90	>75

**Fonte:** Raij et al. (1996); Alvarez Venegas et al. (1999).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados, considerando cada um dos sistemas ILPF, IPF, ILP, EXT e INT individualmente, está apresentada a seguir (Tabelas 2 a 6).

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  $\text{CaCl}_2$ , MO, Ca, Mg, SB, CTC, V e  $\text{S-SO}_4^{-2}$ , enquanto os atributos P, K e H+Al apresentaram média dispersão ( $10\% < CV < 30\%$ ) e os atributos Al e m mostraram alta dispersão ( $CV > 30\%$ ). Já na camada subsuperficial do solo (0,2 – 0,4 m), os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em  $\text{CaCl}_2$ , Ca, Mg, H+Al, SB, CTC e V, enquanto os de média dispersão foram MO, P, K e  $\text{S-SO}_4^{-2}$ , e apenas o atributo m mostrou alta dispersão (Tabela 2).

No sistema IPF, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em  $\text{CaCl}_2$ , MO, CTC e V, os de média dispersão foram P, K, Ca, Mg, H+Al, SB e  $\text{S-SO}_4^{-2}$ , e os de alta dispersão foram Al e m. Já na camada subsuperficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em  $\text{CaCl}_2$ , MO, Ca, Mg, H+Al, SB, CTC e V, os de média dispersão foram P, K, Al e  $\text{S-SO}_4^{-2}$ , 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  $\text{CaCl}_2$ , MO, K, CTC e V, os de média dispersão foram P, Ca, Mg, H+Al, SB e  $\text{S-SO}_4^{-2}$ , e não houve atributo com alta dispersão, além do que os atributos Al e m não apresentaram valor de CV, uma vez que ambos tiveram todos os seus valores amostrados iguais a zero nesta camada do solo. Na camada subsuperficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em  $\text{CaCl}_2$ , Ca, Mg, SB, CTC e V, os de média dispersão foram MO, P, K e  $\text{S-SO}_4^{-2}$ , os de alta dispersão foram Al e m, e o atributo H+Al apresentou um valor de CV igual a zero (Tabela 4).

**Tabela 2.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da área de estudo.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Sulfato
Profundidade 0-0,2 m														
<b>Média</b>	6,05	5,26	37,55	31,09	1,72	25,73	12,55	0,21	21,58	39,82	60,22	65,58	0,63	8,17
<b>Desvio Padrão</b>	0,85	0,08	1,74	9,20	0,22	2,10	1,04	0,26	2,19	3,19	1,30	4,42	0,77	0,50
<b>Mínimo</b>	5,90	5,10	35,00	17,00	1,30	23,00	11,00	0,00	19,00	35,00	59,00	60,00	0,00	7,50
<b>Máximo</b>	6,20	5,40	40,00	45,00	2,00	30,00	14,00	0,50	25,00	46,00	63,00	76,00	1,50	9,00
<b>CV (%)</b>	1,40	1,54	4,63	29,60	12,97	8,17	8,26	123,58	10,16	8,01	2,16	6,74	123,58	6,12
Profundidade 0,2-0,4 m														
<b>Média</b>	5,86	5,11	28,00	12,50	1,13	20,75	10,17	0,71	22,00	32,00	53,67	59,33	2,29	11,21
<b>Desvio Padrão</b>	0,21	0,17	2,89	3,10	0,24	1,54	0,83	0,54	1,65	2,13	2,15	3,31	1,75	1,48
<b>Mínimo</b>	5,50	4,90	23,00	7,00	0,90	19,00	9,00	0,00	19,00	29,00	51,00	55,00	0,00	8,00
<b>Máximo</b>	6,20	5,40	32,00	16,00	1,70	23,00	11,00	1,50	25,00	35,00	57,00	64,00	5,00	13,50
<b>CV (%)</b>	3,53	3,28	10,33	24,80	21,06	7,44	8,21	76,49	7,51	6,66	3,99	5,58	76,41	13,24

**Tabela 3.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da área de estudo.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Sulfato
Profundidade 0-0,2 m														
<b>Média</b>	5,97	5,21	41,91	29,27	1,88	25,00	12,33	0,42	20,50	39,08	59,33	65,58	1,25	8,71
<b>Desvio Padrão</b>	0,09	0,14	2,43	5,42	0,22	2,89	1,78	0,42	2,24	4,68	3,92	4,46	1,25	1,53
<b>Mínimo</b>	5,80	5,00	38,00	21,00	1,50	22,00	10,00	0,00	17,00	33,00	55,00	60,00	0,00	6,50
<b>Máximo</b>	6,10	5,40	46,00	39,00	2,20	31,00	16,00	1,00	25,00	49,00	68,00	73,00	3,00	10,50
<b>CV (%)</b>	1,51	2,64	5,79	18,53	11,51	11,57	14,39	100,18	10,91	11,97	6,60	6,80	100,18	17,56
Profundidade 0,2-0,4 m														
<b>Média</b>	5,64	4,88	27,67	12,89	1,26	18,40	9,36	1,86	27,17	28,90	56,70	51,67	6,36	12,92
<b>Desvio Padrão</b>	0,18	0,18	2,42	1,90	0,14	0,70	0,50	0,39	2,25	0,99	1,25	3,70	1,55	2,32
<b>Mínimo</b>	5,30	4,60	24,00	10,00	1,00	17,00	9,00	1,50	23,00	27,00	54,00	46,00	5,00	9,00
<b>Máximo</b>	6,00	5,30	31,00	15,00	1,50	19,00	10,00	2,50	31,00	30,00	58,00	58,00	9,00	16,00
<b>CV (%)</b>	3,25	3,69	8,76	14,74	11,34	3,80	5,39	21,09	8,28	3,44	2,21	7,16	24,37	17,99

**Tabela 4.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) no sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) da área de estudo.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Sulfato
Profundidade 0-0,2 m														
<b>Média</b>	6,13	5,32	34,22	33,18	1,86	26,42	13,00	0,00	20,58	41,42	60,91	66,41	0,00	9,17
<b>Desvio Padrão</b>	0,18	0,12	0,83	4,71	0,09	3,85	2,00	0,00	2,43	5,58	3,11	4,83	0,00	1,75
<b>Mínimo</b>	5,90	5,10	33,00	25,00	1,70	21,00	11,00	0,00	16,00	34,00	56,00	59,00	0,00	6,00
<b>Máximo</b>	6,40	5,50	35,00	40,00	2,00	35,00	17,00	0,00	25,00	54,00	65,00	74,00	0,00	12,00
<b>CV (%)</b>	2,98	2,24	2,44	14,18	4,75	14,57	15,38	--	11,80	13,48	5,11	7,28	--	19,09
Profundidade 0,2-0,4 m														
<b>Média</b>	5,89	5,03	23,50	16,08	1,28	18,50	9,30	0,67	25,00	28,67	52,33	53,50	2,17	13,33
<b>Desvio Padrão</b>	0,24	0,09	3,53	3,92	0,26	1,78	0,48	0,65	0,00	2,27	1,50	1,58	2,21	3,28
<b>Mínimo</b>	5,60	4,90	16,00	11,00	0,80	17,00	9,00	0,00	25,00	26,00	50,00	52,00	0,00	9,00
<b>Máximo</b>	6,30	5,20	29,00	21,00	1,80	23,00	10,00	2,00	25,00	34,00	55,00	57,00	7,00	20,00
<b>CV (%)</b>	4,12	1,72	15,02	24,36	19,89	9,64	5,19	97,70	0,00	7,92	2,86	2,96	101,94	24,63

**Tabela 5.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) na pastagem extensiva (EXT) da área de estudo.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Sulfato
Profundidade 0-0,2 m														
<b>Média</b>	5,90	5,05	30,00	12,00	1,50	22,50	11,50	1,00	23,00	35,50	58,50	60,50	3,00	6,00
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,07	1,41	1,41	0,14	0,71	0,71	0,00	1,41	2,12	0,71	2,12	0,00	1,41
<b>Mínimo</b>	5,90	5,00	29,00	11,00	1,40	22,00	11,00	1,00	22,00	34,00	58,00	59,00	3,00	5,00
<b>Máximo</b>	5,90	5,10	31,00	13,00	1,60	23,00	12,00	1,00	24,00	37,00	59,00	62,00	3,00	7,00
<b>CV (%)</b>	0,00	1,40	4,71	11,79	9,43	3,14	6,15	0,00	6,15	5,98	1,21	3,51	0,00	23,57
Profundidade 0,2-0,4 m														
<b>Média</b>	5,65	5,05	24,50	10,00	1,05	19,00	9,50	2,00	24,00	29,50	53,50	55,50	6,50	8,50
<b>Desvio Padrão</b>	0,71	0,71	2,12	0,00	0,71	1,41	0,71	0,00	1,41	2,12	0,71	3,54	0,71	0,71
<b>Mínimo</b>	5,60	5,00	23,00	10,00	1,00	18,00	9,00	2,00	23,00	28,00	53,00	53,00	6,00	8,00
<b>Máximo</b>	5,70	5,10	26,00	10,00	1,10	20,00	10,00	2,00	25,00	31,00	54,00	58,00	7,00	9,00
<b>CV (%)</b>	1,25	1,40	8,66	0,00	6,73	7,44	7,44	0,00	5,89	7,19	1,32	6,37	10,88	8,32

**Tabela 6.** Estatística 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 (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Cálcio – Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Magnésio – Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Alumínio – Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Acidez total – H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Soma de Bases – SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Saturação por base – V (%), Saturação por alumínio – m (%) e Sulfato – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg dm<sup>-3</sup>)) na pastagem intensiva (INT) da área de estudo.

Medidas Estatísticas	pH em Água	pH em CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Sulfato
Profundidade 0-0,2 m														
<b>Média</b>	6,38	5,55	35,08	27,73	1,64	35,33	18,58	0,00	19,92	55,92	75,75	72,83	0,00	8,50
<b>Desvio Padrão</b>	0,24	0,24	5,48	7,76	0,16	6,31	4,17	0,00	3,03	10,33	7,37	6,83	0,00	2,35
<b>Mínimo</b>	5,90	5,10	28,00	18,00	1,40	24,00	12,00	0,00	15,00	39,00	64,00	61,00	0,00	5,00
<b>Máximo</b>	6,80	6,00	46,00	42,00	1,90	45,00	24,00	0,00	25,00	72,00	86,00	83,00	0,00	13,00
<b>CV (%)</b>	3,73	4,31	15,63	27,99	10,04	17,87	22,42	--	15,21	18,48	9,74	9,38	--	27,70
Profundidade 0,2-0,4 m														
<b>Média</b>	6,09	5,34	23,83	13,00	1,06	22,83	10,92	0,00	21,18	34,83	56,58	61,17	0,00	12,00
<b>Desvio Padrão</b>	0,30	0,19	3,69	0,00	0,28	3,64	2,27	0,00	2,64	5,91	4,01	6,87	0,00	2,56
<b>Mínimo</b>	5,50	5,00	17,00	13,00	0,70	17,00	7,00	0,00	17,00	26,00	50,00	48,00	0,00	9,00
<b>Máximo</b>	6,60	5,70	30,00	13,00	1,60	29,00	15,00	0,00	26,00	45,00	62,00	72,00	0,00	17,00
<b>CV (%)</b>	4,97	3,55	15,48	0,00	26,25	15,93	20,84	--	12,46	16,95	7,09	11,24	--	21,32

No sistema EXT, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em CaCl<sub>2</sub>, MO, K, Ca, Mg, H+Al, SB, CTC e V, e os de média dispersão foram P e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, sendo que nenhum atributo do solo apresentou alta dispersão nesta camada do solo. Além disso, os atributos pH em água, Al e m apresentaram um valor de CV igual a zero. Na camada subsuperficial, os atributos de baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, MO, K, Ca, Mg, H+Al, SB, CTC, V e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e m foi o único atributo que mostrou média dispersão. Por sua vez, os atributos P e Al apresentaram um CV igual a zero (Tabela 5).

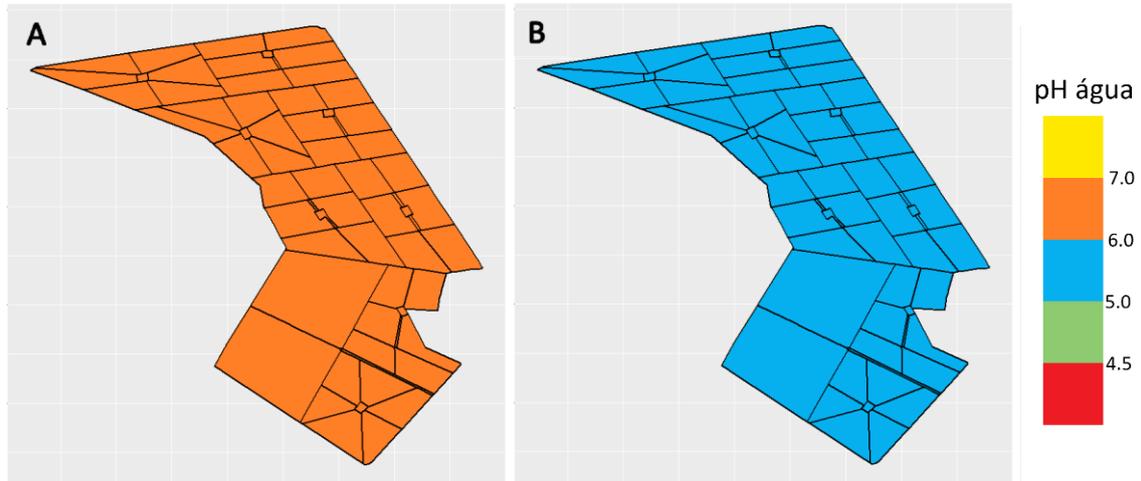
Por fim, no sistema INT, na camada superficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub>, CTC e V, os de média dispersão foram MO, P, K, Ca, Mg, H+Al, SB e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve atributo com alta dispersão. Na camada subsuperficial, os atributos com baixa dispersão foram pH em água, pH em CaCl<sub>2</sub> e CTC, os de média dispersão foram MO, K, Ca, Mg, H+Al, SB, V e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e não houve atributo com alta dispersão. Por sua vez, o atributo P apresentou um CV igual a zero. Em ambas as camadas do solo, os atributos Al e m não apresentaram valor de CV, devido ao fato de todos os seus valores amostrados terem sido iguais a zero (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).

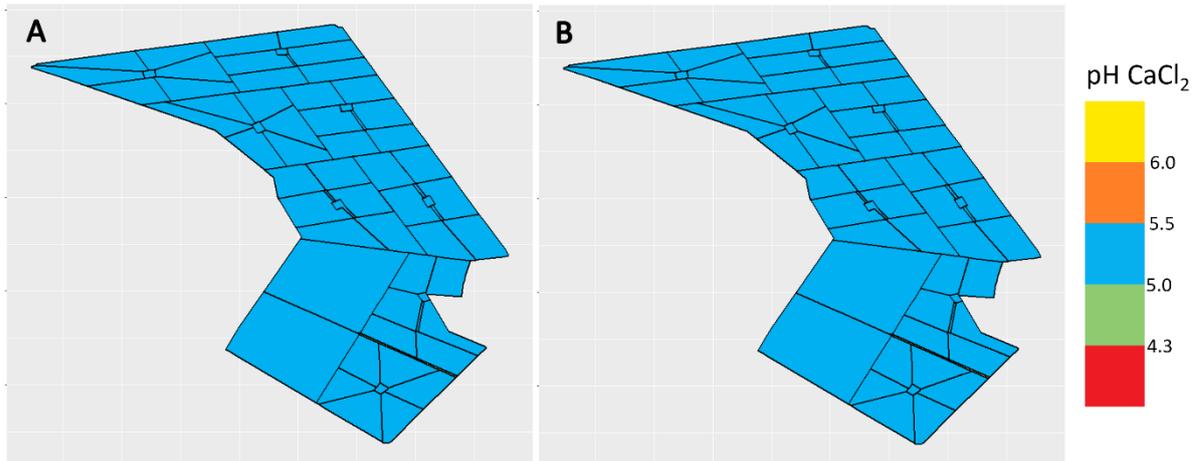
Após finalizar a estatística descritiva dos dados, realizou-se o processo de validação cruzada para cada atributo do solo, considerando-se os valores de  $p = 1, 2, 3$  e  $4$ , em ambas as profundidades avaliadas. O valor de  $p$  escolhido para cada atributo foi aquele que apresentou menor erro médio, 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 3 a 16).

**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  $4$ .

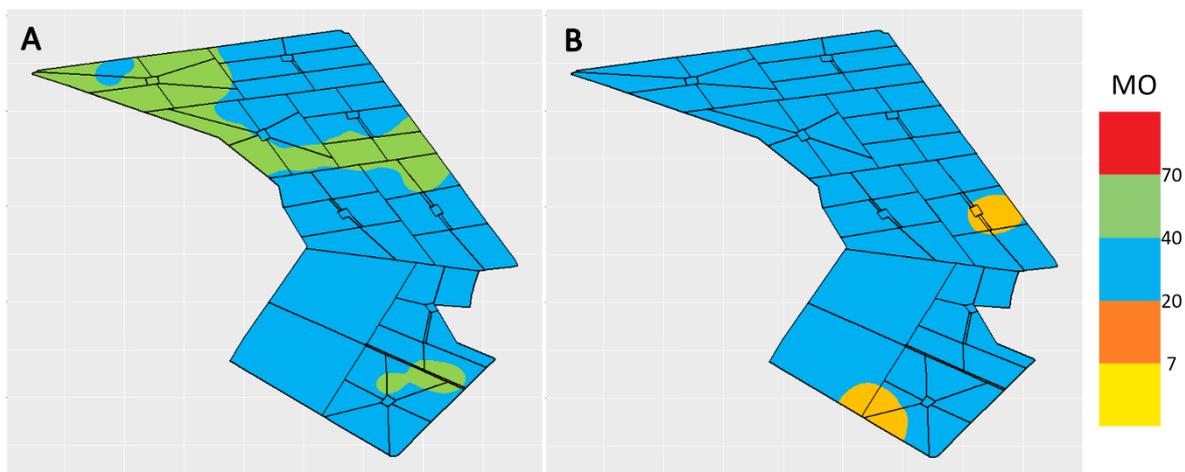
Atributo	RMSE médio			
	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$
pH em água	0,1795	0,1705*	0,1745	0,1865
pH em CaCl <sub>2</sub>	0,1570	0,1545*	0,1650	0,1695
Matéria Orgânica	3,2700	3,0700	3,0650*	3,1600
Fósforo	4,6700	4,5900*	4,9700	4,7500
Potássio	0,1850	0,1775*	0,1810	0,2020
Cálcio	2,0150	1,9900*	2,1950	2,8350
Magnésio	1,1410*	1,2090	1,2635	1,3330
Al	0,4735	0,4505	0,4770	0,4455*
HAl	1,9900	1,9250*	1,9250*	1,9950
SB	3,1150*	3,2400	3,4200	3,6950
CTC	2,6200	2,5750	2,5100*	2,7300
V%	4,5000	4,4450*	4,7700	4,8850
m	1,5425	1,4840*	1,4900	1,5550
Sulfato	1,7500	1,6800*	1,7450	1,7250



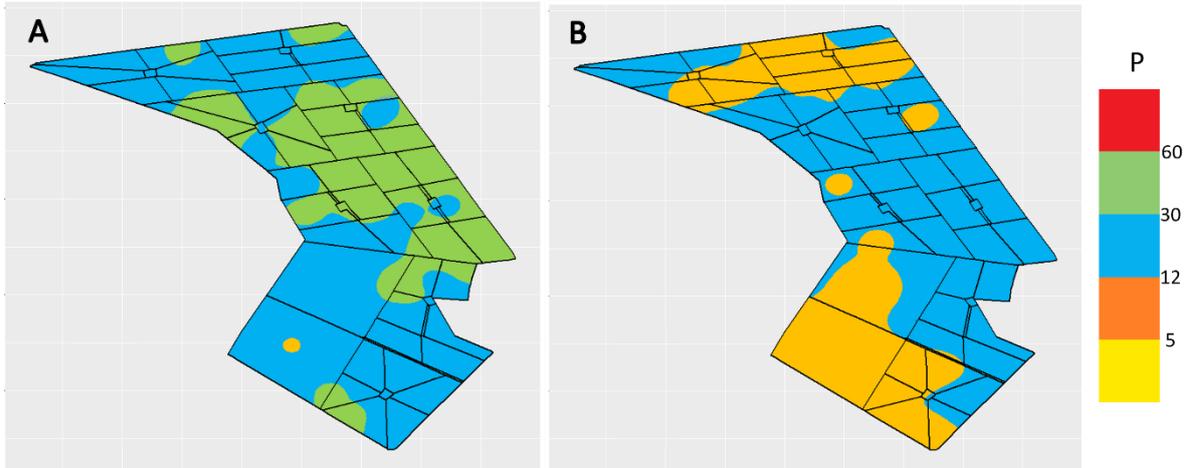
**Figura 3.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘pH em H<sub>2</sub>O’ na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



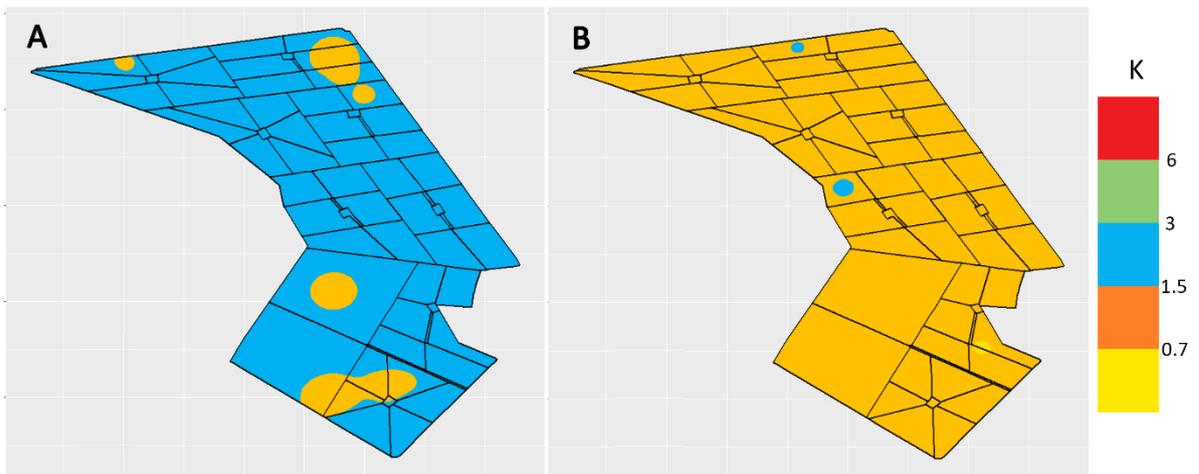
**Figura 4.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘pH em CaCl<sub>2</sub>’ na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



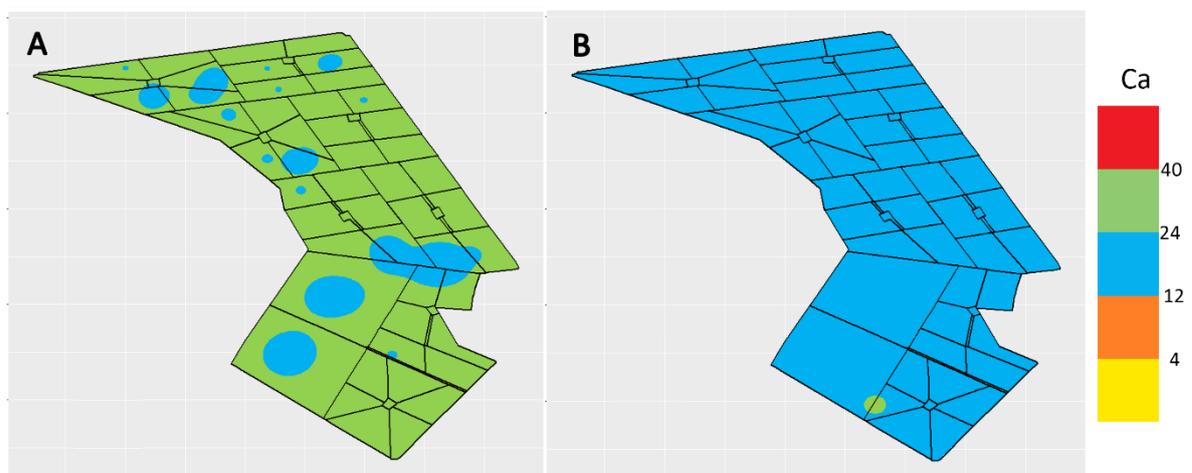
**Figura 5.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Matéria Orgânica (MO)’ (g dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



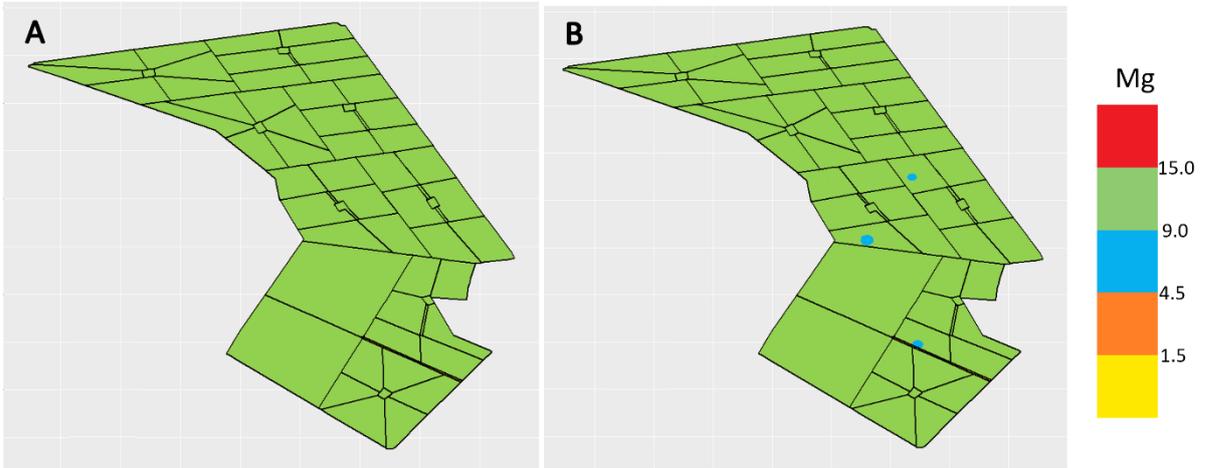
**Figura 6.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Fósforo (P)' (mg dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



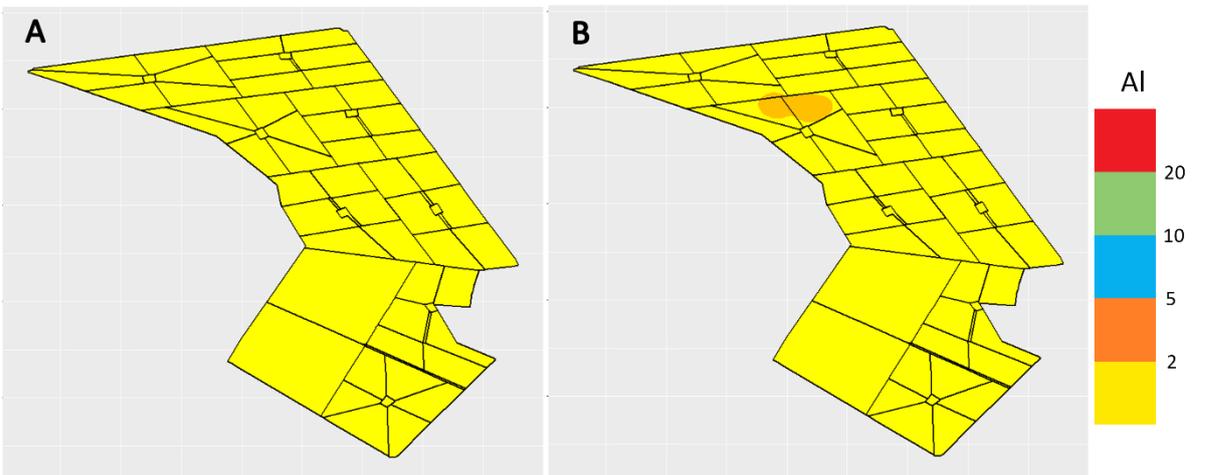
**Figura 7.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Potássio (K)' (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



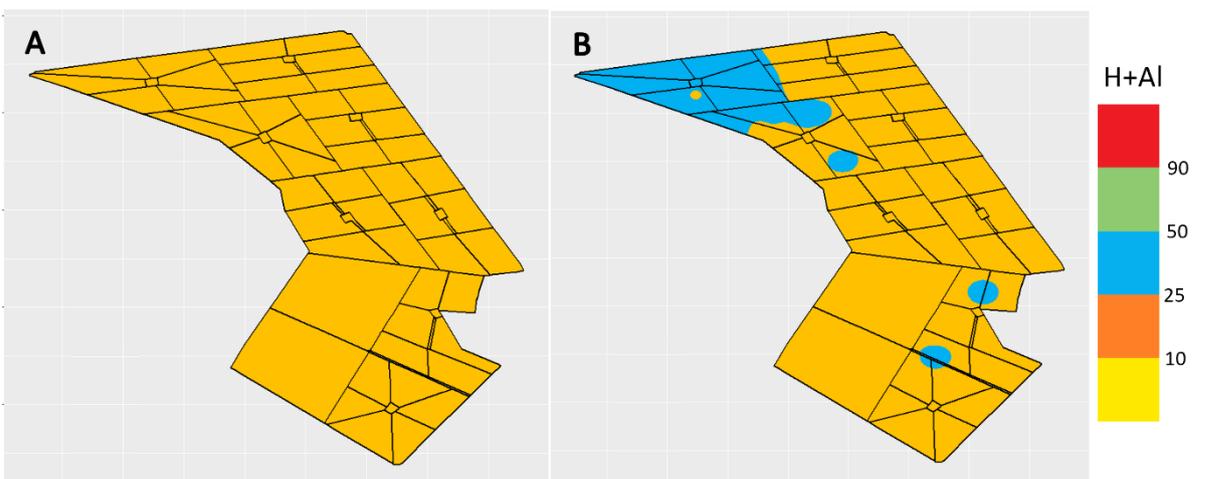
**Figura 8.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Cálcio (Ca)' (mmolc dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



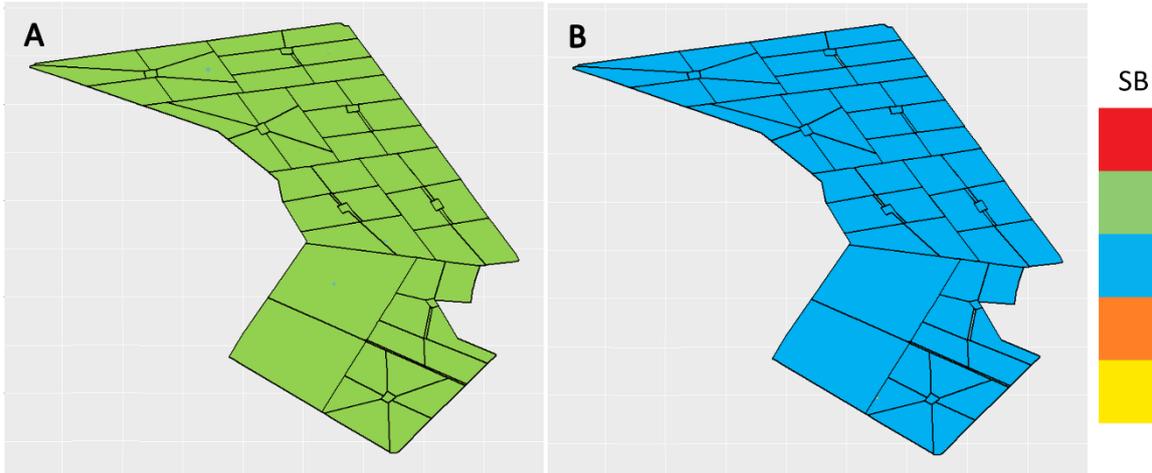
**Figura 9.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Magnésio (Mg)' (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



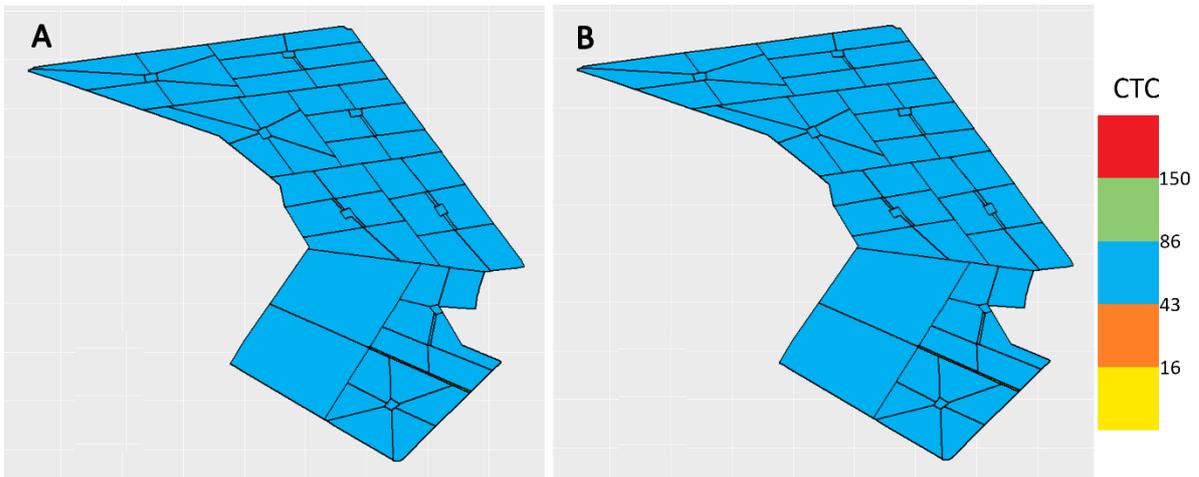
**Figura 10.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Alumínio (Al)' (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



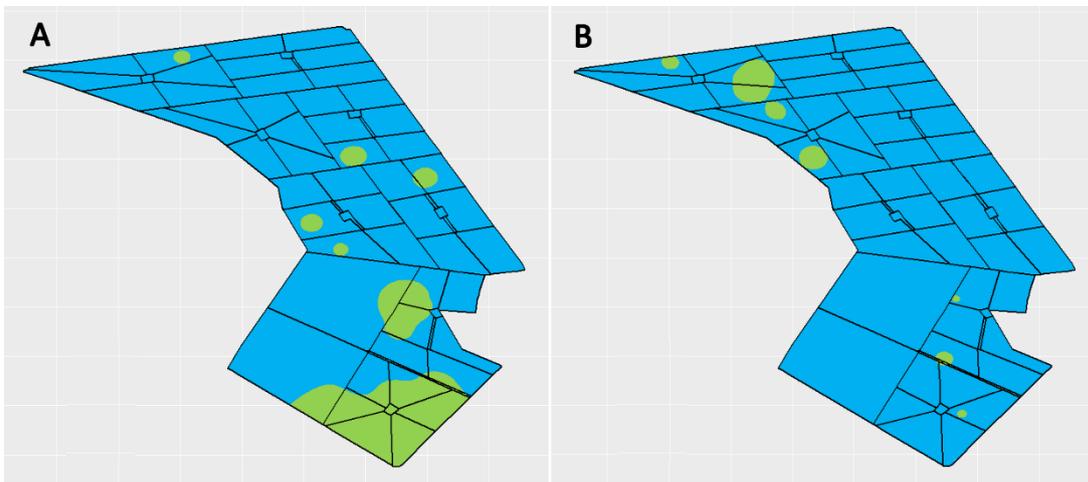
**Figura 11.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo 'Acidez total (H + Al)' (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



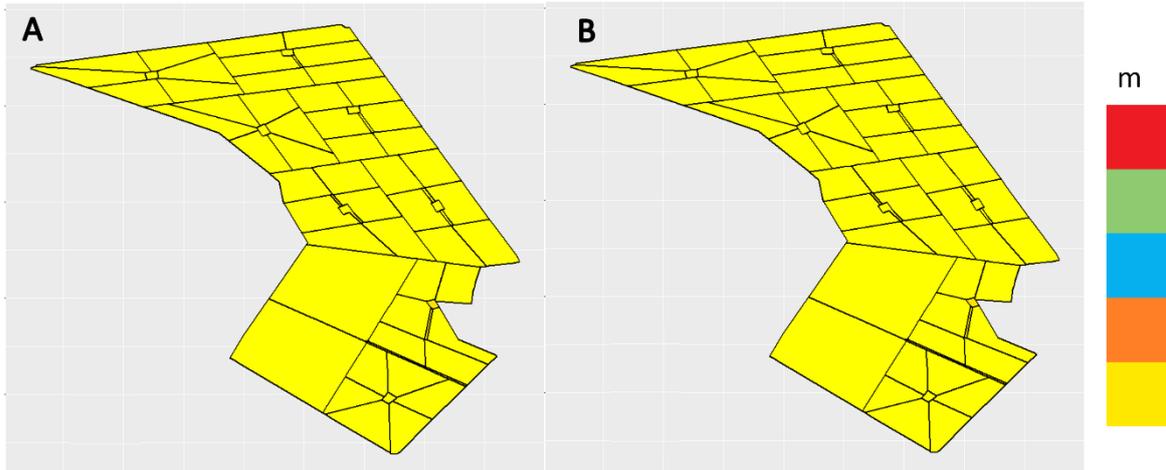
**Figura 12.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Soma de Bases (SB)’ (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



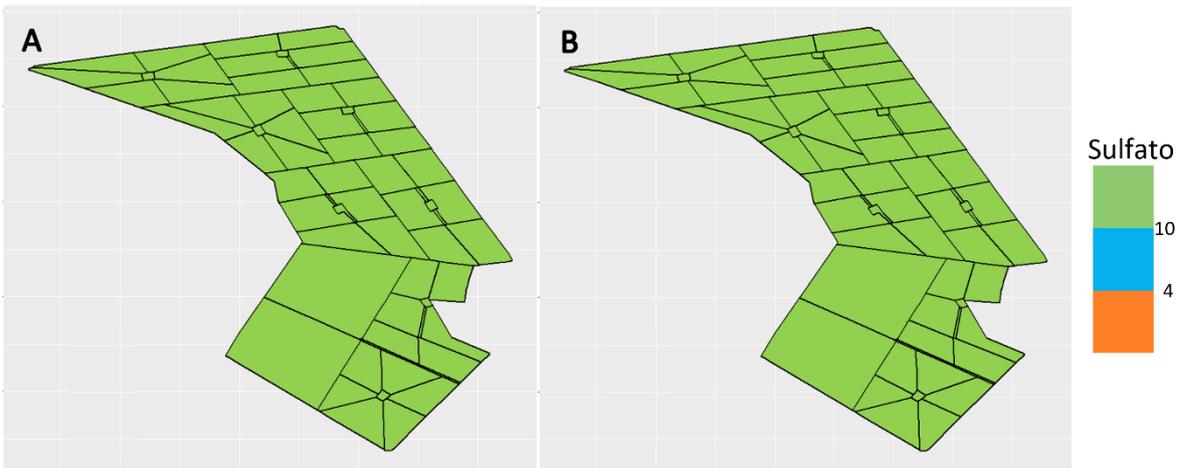
**Figura 13.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Capacidade de Troca Catiônica (CTC)’ (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



**Figura 14.** 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 15.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Saturação por alumínio (m)’ (%) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.



**Figura 16.** Mapa de variabilidade espacial do atributo químico do solo ‘Sulfato (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)’ (mg dm<sup>-3</sup>) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.

O pH é um dos atributos do solo de grande importância, pois através dele é possível indicar índices de atividade de microrganismos, além da presença de nutrientes, compostos tóxicos, dentre vários outros fatores (ALMEIDA; ERNANI, 1996). O pH do solo pode ser aferido tanto em H<sub>2</sub>O como em CaCl<sub>2</sub>, sendo que ambas as medidas são de extrema importância, e uma é considerada complementar à outra (RAIJ et al., 2001).

Pode-se observar que os valores interpolados para o pH do solo em H<sub>2</sub>O na área de estudo estiveram na faixa entre 6,0 e 7,0 (faixa alta) na superfície e na faixa entre 5,0 e 6,0 (faixa média) na subsuperfície (Figura 3). Já para o pH do solo em CaCl<sub>2</sub>, os valores interpolados em toda a extensão da área estiveram na faixa entre 5,0 e 5,5 (faixa média), em ambas as profundidades avaliadas (Figura 4). O valor menor de pH em CaCl<sub>2</sub> é explicada por

RAIJ et al. (2001), que afirmam que a leitura do pH em  $\text{CaCl}_2$  apresenta cerca de 0,5 ponto abaixo da leitura do pH em  $\text{H}_2\text{O}$ , corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

Por meio da estatística descritiva dos dados também se observou uma média do pH do solo em  $\text{H}_2\text{O}$  pouco maior na superfície que na subsuperfície, para todos os sistemas de produção. O mesmo ocorreu para o pH do solo aferido em  $\text{CaCl}_2$  (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 estão localizados dentro da faixa considerada ideal no que diz respeito à disponibilidade de nutrientes (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999; LIMA et al., 2006). Por fim, não foi observada diferença significativa entre os sistemas produtivos com relação às medidas de pH, o que pode ser observado tanto na estatística descritiva dos dados assim também como nos mapas gerados via interpolação IDW.

Por sua vez, a MO é um indicador de qualidade do solo, sendo responsável pela estruturação do solo e ciclagem de nutrientes (CONCEIÇÃO et al., 2005). Os valores médios de MO na superfície do solo dos sistemas produtivos ficaram entre 30,00 e 41,91  $\text{g dm}^{-3}$  (Tabelas 2 a 6), os quais se enquadram principalmente na faixa considerada como média para este atributo (Tabela 1). Corroborando com a estatística descritiva dos dados, os resultados da interpolação apontaram que a quantidade de MO na superfície da área de estudo intercalou entre as faixas média e alta, sendo que os valores altos estiveram presentes, em maioria, no sistema IPF, seguido pelos sistemas ILPF, ILP e INT (Figura 5).

Já na subsuperfície do solo notou-se um decréscimo na quantidade de MO, cujas médias variaram entre os valores 23,50 e 28,00  $\text{g dm}^{-3}$  (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 nas faixas consideradas como média e baixa, sendo que os valores baixos apareceram em pequenas porções dos sistemas ILP, INT e EXT (Figura 5).

O fato de os sistemas integrados possuírem valores maiores de MO em algumas regiões pode ser explicado devido a uma maior diversificação de resíduos vegetais e animais nesses sistemas produtivos, principalmente pela maior presença de espécies forrageiras, as quais

apresentam uma maior quantidade de carbono orgânico (BERNARDI et al., 2023). A maior diversidade de resíduos também justifica uma maior quantidade de MO na camada superficial do solo (FREITAS et al., 2020).

Em relação ao P, sua deficiência é conhecida principalmente em solos tropicais, sendo este o segundo fator que mais limita a produtividade das diferentes culturas (GATIBONI, 2003). Na estatística descritiva para este atributo, os seus valores médios na superfície do solo da área de estudo estiveram entre 12,00 e 33,18 mg dm<sup>-3</sup> (Tabelas 2 a 6), os quais estão localizados, principalmente, na faixa considerada como média (Tabela 1). Pela interpolação IDW, notou-se que os valores interpolados estiveram entre as faixas média e alta, a menos de uma pequena região do INT, que apresentou baixo teor de P (Figura 6). Os valores altos de P estiveram presentes, em maioria, nos sistemas de produção integrados. 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 10,00 e 16,08 mg dm<sup>-3</sup> (faixas baixa e média) (Tabelas 2 a 6). Da mesma forma, na interpolação IDW, os valores de P na subsuperfície da área intercalaram entre as faixas média e baixa (Figura 6).

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 camada do solo, bem como com a adubação fosfatada que é realizada anualmente na área de estudo (BERNARDI et al., 2017; 2019). Da mesma forma, a maior quantidade de MO nos sistemas de produção integrados também justifica uma maior quantidade de P na superfície do solo dos sistemas ILPF, IPF e ILP.

A respeito da quantidade de K no solo da área de estudo, pela estatística dos dados observou-se um valor médio do atributo entre 1,50 e 1,88 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na superfície (faixa média) (Tabelas 2 a 6). Da mesma forma, a partir da interpolação IDW observou-se que na maior parte da área os valores interpolados estiveram na faixa considerada média, a menos de pequenas porções de terra nos sistemas ILPF, IPF, EXT e INT, em que os valores permaneceram na faixa considerada baixa (Figura 7). 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 da área estiveram entre 1,05 e 1,28 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (faixa baixa) (Tabelas 2 a 6). De forma similar, os valores interpolados na área para esta profundidade também permaneceram, em sua grande maioria, nesta mesma faixa de valores.

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, sabe-se que ele é fundamental no crescimento radicular das plantas, além de estar relacionado com a acidez do solo, pois através da lixiviação desse nutriente ocorre a diminuição das medidas de pH (MARIA et al., 1993). Pela estatística descritiva dos dados, notou-se que a concentração de Ca na superfície da área variou entre 22,50 e 35,33  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Tabelas 2 a 5), valores estes que, em maioria, estão dentro da faixa considerada alta para este atributo (Tabela 1). Pela interpolação espacial, observou-se o mesmo comportamento. A menos de pequenas porções de terra em cada um dos sistemas em que os valores ficaram na faixa considerada média, na grande extensão da área os valores interpolados estiveram na faixa considerada alta (Figura 8).

Já na subsuperfície, observou-se que os valores de Ca baixaram. Com a estatística descritiva, chegou-se a valores médios de Ca entre 18,40 e 22,83  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  nesta camada do solo (faixa média) (Tabelas 2 a 6). Corroborando com este resultado, por meio da interpolação observou-se que em quase toda a extensão da área de estudo os valores interpolados permaneceram na faixa considerada média para este atributo (Figura 8). 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, possui 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 11,50 e 18,50  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na camada superficial do solo da área de estudo (Tabelas 2 a 6), sendo que estes valores se enquadram nas faixas consideradas como alta e muito alta (Tabela 1). Por sua vez, na camada subsuperficial do solo, os valores médios observados estiveram entre 9,30 e 10,92  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Tabelas 2 a 6), os quais se encaixam na faixa considerada alta. Já pela interpolação, observou-se que em ambas as camadas do solo os valores estiveram dentro da faixa alta, a menos de alguns pontos na subsuperfície, em que os valores se enquadraram dentro da faixa considerada média (Figura 9).

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. De modo geral, não foi observada diferença significativa entre os diferentes sistemas produtivos no que diz respeito a esse atributo.

Por sua vez, com relação ao Al, a estatística descritiva apontou para valores médios do atributo entre 0 e 1,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na superfície do solo e valores médios entre 0,67 e 2,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na subsuperfície (Tabelas 2 a 6). De acordo com as faixas de interpretação de resultados da análise química de solo, estes valores se enquadram na faixa considerada muito baixa para este atributo (Tabela 1). Corroborando com este resultado, os resultados da interpolação IDW mostraram que, à exceção de uma pequena porção de terra na subsuperfície do sistema IPF, em que os valores estiveram na faixa baixa, todos os valores interpolados na área ficaram classificados dentro da faixa muito baixa (Figura 10).

Os sistemas integrados, como um todo, apresentam um teor de alumínio tóxico muito menor quando comparados àqueles com preparos convencionais, pois apresentam uma maior quantidade de MO no solo (SPERA et al., 2014). A presença de Al em grandes quantidades pode aumentar a acidez do solo, trazendo assim prejuízos para a sua fertilidade. Sua correção, realizada através da calagem, apresenta-se como um ótimo recurso para a redução da quantidade de alumínio tóxico (NATALE et al., 2012). Assim, conclui-se que a calagem realizada anualmente na área tem trazido resultados positivos quanto a correção na quantidade de Al no solo.

Para a acidez total, também conhecida como potencial, a estatística dos dados mostrou valores médios de H + Al entre 19,92 e 23,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na superfície da área de estudo (Tabelas 2 a 6), estando estes na faixa considerada como baixa para o atributo (Tabela 1). Na subsuperfície, por sua vez, os valores médios estiveram entre 21,18 e 27,17 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (Tabelas 2 a 6), sendo estes enquadrados nas faixas consideradas como baixa e média. De forma similar, pela interpolação IDW foram obtidos valores baixos do atributo na superfície de toda a área de estudo, enquanto na subsuperfície, embora os valores baixos predominaram na maior parte da área, valores médios estiveram presentes em grande parte do sistema IPF e em algumas pequenas regiões do sistema INT (Figura 11).

A acidez total, que nada mais é do que a soma da acidez trocável e não trocável, é utilizada como um mecanismo para determinar a necessidade de calagem de uma determinada

área (ARAÚJO et al., 2014). Observando os valores de  $H + Al$  obtidos no solo da área de estudo, conclui-se mais uma vez que a calagem, realizada anualmente na área, possui melhores resultados na camada superficial, demorando a atingir as camadas mais profundas.

Com relação à SB, ela indica a quantidade de cátions trocáveis no solo, sendo usada como base de cálculos para outras variáveis, tais como a CTC e a saturação por base. Seu estudo permite saber sobre a qualidade do solo para liberar nutrientes, realizando a manutenção da sua fertilidade para uso na agricultura (RONQUIM, 2010). Na camada superficial do solo, pela estatística descritiva foram obtidos valores médios entre 35,50 e 55,92  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  de SB na superfície da área de estudo (Tabelas 2 a 6), sendo que estes se encaixam predominantemente na faixa considerada alta para este atributo (Tabela 1). Por sua vez, na subsuperfície os valores médios estiveram entre 28,67 e 29,50  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Tabelas 2 a 6), os quais se encaixam na faixa considerada média.

De forma similar, pela interpolação IDW notou-se que os valores de SB na superfície da área estão na faixa considerada como alta, sendo que na subsuperfície os valores estão na faixa considerada como média (Figura 12). Isso se justifica, pois, a quantidade de MO está diretamente relacionada com esse atributo e, como visto, a MO está mais presente na camada superficial do solo.

Sobre a CTC, sabe-se que é um atributo utilizado para avaliar a qualidade de um solo em liberar nutrientes essenciais para as diferentes culturas (RONQUIM, 2010). Pela estatística dos dados, nota-se que os valores médios de CTC na área de estudo estiveram entre 58,50 e 75,75  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na superfície e entre 52,33 e 56,70  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na subsuperfície (Tabelas 2 a 6), valores estes que se enquadram na faixa considerada como média para o atributo (Tabela 1). De forma similar, ao observar os mapas gerados pela interpolação, nota-se que tanto na camada superficial como subsuperficial do solo, a área apresentou um valor médio de CTC (Figura 13).

Relacionando-se com os dois últimos atributos, a V é utilizada para indicar a qualidade geral de um solo. Expresso em porcentagem, esse atributo permite verificar, de uma maneira geral, a parte essencial de cátions presentes no solo, em comparação àqueles que não o são (RONQUIM, 2010). Pela estatística descritiva, verifica-se que na superfície da área os valores médios de V estiveram entre 60,50 e 72,83%, enquanto na subsuperfície os valores de V estiveram entre 51,67 e 61,17% (Tabelas 2 a 6). Na superfície, estes valores se enquadram, principalmente, na faixa considerada como média e, em menor proporção, na faixa considerada

como alta. Por sua vez, os valores obtidos na subsuperfície se enquadram somente na faixa considerada como média (Tabela 1).

Nos mapas interpolados, é possível verificar que os valores de V na área como um todo foram classificados nas faixas consideradas como alta e, principalmente, média. O mesmo comportamento foi observado na subsuperfície do solo da área de estudo (Figura 14). Na subsuperfície, entretanto, observa-se que os valores de V foram pouco menores quando comparados aos obtidos em superfície, corroborando com os resultados obtidos a partir da estatística descritiva dos dados.

Em relação à m, tem-se que ela reflete a quantidade de alumínio trocável presente no solo, que é a forma tóxica e prejudicial para as culturas (MORAIS FILHO et al., 2015). Grandes quantidades de alumínio trocável atrapalham o crescimento das raízes das plantas, dificultando a absorção de água e nutrientes pelas mesmas (SANTOS et al., 2018). Na estatística dos dados, os valores médios de m na área ficaram entre 0 e 3,0% na superfície e entre 0 e 6,50% na subsuperfície (Tabelas 2 a 6), valores estes que se enquadram na faixa considerada como muito baixa para o atributo (Tabela 1). A camada subsuperficial do solo mostrou ter uma maior quantidade de m quando comparada à camada superficial, mas ainda assim manteve-se no nível muito baixo. De forma análoga, nos mapas interpolados nota-se que em toda a extensão da área os valores de m foram muito baixos (Figura 15), demonstrando que os índices estão abaixo daqueles considerados como prejudiciais para as culturas.

Por fim, o enxofre é um nutriente essencial para as plantas, uma vez que ele é utilizado na produção de proteínas (SOARES et al., 2017). Sua absorção é realizada através da adsorção do  $S-SO_4^{-2}$  presente em vários constituintes do solo (UCHÔA et al., 2013). De uma maneira geral, a área de estudo como um todo apresentou níveis altos de  $S-SO_4^{-2}$  em ambas as camadas do solo (Figura 16). Na estatística descritiva, os valores de  $S-SO_4^{-2}$  na área estiveram entre 6,0 e 9,17  $mg\ dm^{-3}$  na superfície e entre 8,5 e 13,33  $mg\ dm^{-3}$  na subsuperfície (Tabelas 2 a 6). Embora não haja diferença entre as profundidades no que diz respeito à quantidade de  $S-SO_4^{-2}$  dentro do contexto das classes consideradas no processo de interpolação, verifica-se pela análise descritiva que o  $S-SO_4^{-2}$  apresentou uma característica peculiar quando comparado aos outros atributos, que foi a sua presença maior na camada subsuperficial do solo.

## **6. CONCLUSÕES**

1. Os mapas gerados mostraram que as formas de manejo integrado são uma excelente alternativa para atender demandas de sustentabilidade na atividade agropecuária, demonstrando bons resultados para cada um dos atributos químicos do solo analisados.
2. Os resultados obtidos com a pesquisa permitirão a tomada de decisões de maneira localizada na área de estudo, aumentando assim a produtividade e qualidade nos sistemas, levando a uma economia de insumos e reduzindo os impactos ambientais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J.A. de; 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.

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.

ARAUJO, D.M. de F.; CASTRO, G.S.A.; DAMASCENO, L.F.; MONTAGNER, A.E.A.D.; GUEDES, M.C.; MELÉM JR., N.J. Acidez potencial de solos do Estado do Amapá estimada pelo método potenciométrico SMP. **Acta Iguazu**, v.3, n.3, p.57-65, 2014.

ARLOT, S., CELISSE, A. A Survey of Cross-validation Procedures for Model Selection. **Statistics Surveys**, v.4, p.40-79, 2010.

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

BALBINO, L.C.; CORDEIRO, L.A.M.; OLIVEIRA, P. de; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P.R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **International Plant Nutrition Institute**, p.1-32, 2012a.

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, 2012b. p.11-18.

BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y.; BERNARDI, A.C de C.; VAZ, C.M.P.; SPERANZA, E.A.; CRUVINEL, P.E. Agricultura de precisão e agricultura digital. **TECCOGS - Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, n.20, p.17-36, 2019.

BEHLING, M.; WRUCK, F.J.; ANTONIO, D.B.A.; MENEGUCI, J.L.P.; PEDREIRA, B.C. e; CARNEVALLI, R.A.; CORDEIRO, L.A.M.; GIL, J.; FARIAS NETO, A.L. de; DOMIT, L.A.;

SILVA, J.F.V. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **Fundação MT - Boletim de Pesquisa de Soja**, p.306-325, 2013.

BERNARDI, A.C. de 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. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A.V. de; BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596p.

BERNARDI, A.C. de C.; PITRAT, T.; RABELLO, L.M.; PEZZOPANE, J.R.M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G.G.; BETTIO, G.M. Diferenças na tomografia da resistividade elétrica do solo devido aos níveis de água em sistema agropecuário integrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, e00774, 2019.

BERNARDI, A.C. de 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.

BERNARDI, A.C. de C.; TADINI, A.M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J.R.M.; MACHADO, P.L.O.A.; MADARI, B.E.; MARTIN NETO, L. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: BETTIOL, W.; SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C.A. (Ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p.569-600.

BHATTI, A.U.; MULLA, D.J.; FRAZIER, B.E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.3, p.181-191, 1991.

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H.G. dos.; FONSECA, O.O.M. da; SANTOS, R.D. dos; 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.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M. de; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.6, p.1329-1339, 2007.

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.

COSTA, N.R.; CARVALHO, M. de P. e; DAL BEM, E.A.; DALCHIAVON, F.C.; CALDAS, R.R. Produtividade de laranja correlacionada com atributos químicos do solo visando a zonas específicas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.4, p.391-398, 2014.

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.

EMBRAPA. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. **Portal Embrapa**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/nota-tecnica>>. Acesso em: 14 abr. 2022.

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.

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.

FREITAS, I.C.; FRAZÃO, L.A.; FERREIRA, E.A.; CABRAL, C.M. Como os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta influenciam a dinâmica da matéria orgânica do Solo? **Revista Vozes dos Vales**, v.5, p.1-13, 2020.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. Tese de Doutorado (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

GODERYA, F.S. Field scale variations in soil properties for spatially variable control: a review. **Journal of Soil Contamination**, v.7, n.2, p.243-264, 1998.

GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R.P.; VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In BERNARDI, A.C.C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, p.74-83, 2014.

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.

INAMASU, R.Y.; BERNARDI, A.C. de C. Adoção da Agricultura de Precisão no Brasil. In BERNARDI, A.C. de C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, p.21-33, 2014.

JUNG, Y.; HU, J. A k-fold averaging crossvalidation procedure. **Journal of Nonparametric Statistics**, v.27, n.2, p.167-179, 2015.

KAMIYAMA, A. **Agricultura sustentável**. São Paulo: SMA, 2014. 78p.

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. de; SERRAT, B.M.; WISNIEWSKI, C.; FERREIRA, F.V.; ALMEIDA, L.S. de; ALMEIDA, L. de; KRIEGER, K.I.; MACHADO, M.A. de 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.

MARIA, I.C. de; ROSSETTO, R.; AMBROSANO, E.; CASTRO, O.M. de; 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.

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.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Agricultura de precisão**. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 32p.

MORAIS FILHO, L.F.F.; GOMES, M.F.; GOMES, M.S.; SARAH, M.M.S.; MORAES, A.R.A. Teores de cátions trocáveis, CTC, saturação por bases e alumínio em solos submetidos ao sistema plantio convencional e direto em Paragominas, Pará. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, p.1-4, 2015.

MÜLLER, M.D.; MARTINS, C.E.; BRIGHENTI, A.M.; MORENZ, M.J.F.; ROCHA, W.S.D. da; SOUZA SOBRINHO, F. de; CALSAVARA, L.H.F.; ANDRADE, P.J.M.; MACHADO, A.F. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta como alternativa para produção pecuária leiteira sustentável em áreas declivosas. Capítulo 17. In: MARTINS, P. do C.; PICCININI, G.A.; KRUG, E.E.B.; MARTINS, C.E.; LOPES, F.C.F. **Sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite: desafios e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p.343-386.

NATALE, W.; ROZANE, D.E.; PARENT, L.E.; PARENT, S.E.; Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, n.4, p.1294-1306, 2012.

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.

PEZZOPANE, J.R.M.; BERNARDI, A.C. de C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P.P.A.; MARCONATO, M.H.; PEDROSO, A. de F.; ESTEVES, S.N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v.93, p.39-49, 2019.

PEZZOPANE, J.R.M.; BONANI, W.L.; BOSI, C.; ROCHA, E.L.F. da; BERNARDI, A.C. de C.; OLIVEIRA, P.P.A.; PEDROSO, A. de F. Reducing competition in a crop-livestock-forest integrated system by thinning eucalyptus trees. **Experimental Agriculture**, v.56, n.4, p.574-586, 2020.

PEZZOPANE, J.R.M.; BOSI, C.; BERNARDI, A.C. de C.; MULLER, M.D.; OLIVEIRA, P.P.A. de. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.312, p.107350, 2021.

POLIDORO, J.C.; FREITAS, P.L.; HERNANI, L.C.; ANJOS, L.H.C.D.; RODRIGUES, R.D.A.R.; CESÁRIO, F.V.; ANDRADE, A.G.D.; RIBEIRO, J.L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation**, v.32, p.3457-3468, 2021.

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/>.

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

RAIJ, B. Van; 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).

RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Embrapa Monitoramento por Satélite**. 2010.

SANTI, A.L.; AMADO, T.J.C.; CHERUBIN, M.R.; MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.; FLORA, L.P.D.; BASSO, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1346-1357, 2012.

SANTOS, C.V. dos; SILVA, N.S.; MAGALHÃES, J.V.; SCHAFFERT, R.E.; MENEZES, C.B. de. Performance of grain sorghum hybrids in soils with low and high aluminum saturation. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.48, n.1, p.12-18, 2018.

SILVA, W.V.R.; SILVA-MANN, R. Agricultura de Precisão no Brasil: conjunto atual, desafios e perspectivas. **Research, Society and Development**, v.19, n.11, p.1-26, 2020.

SKORUPA, L.A.; MANZATTO, C.V. Avaliação da adoção de sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) no Brasil. In: **Sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil**, 2019.

SOARES, M.M.; BARDIVIESSO, D.M.; BARBOSA, W.F.S.; BARCELOS, M.N. Adubação de cobertura com enxofre na cultura da rúcula. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n.1, p.49-52, 2017.

SPERA, S.T.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SANTOS, H.P. dos; KLEIN, V.A. Atividade do alumínio na solução do solo de um Latossolo Vermelho distrófico submetido ao manejo do solo e de culturas. **Nativa**, v.2, n.3, p.131-137, 2014.

UCHÔA, S.C.P.; VICTOR HUGO, A.V.; FREIRE, F.M. Doses de enxofre e tempo de incubação na dinâmica de formas de enxofre no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.3, p.678-687, 2013.

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

YANG, Y.; HUANG, S. Suitability of five cross validation methods for performance evaluation of nonlinear mixed-effects forest models – a case study. **Forestry**, v.87, p.654-662, 2014.