

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA

NICOLLE LAURENTI

**Variabilidade espacial de atributos do solo e vegetação em sistemas de Integração
Lavoura-Pecuária-Floresta**

ARARAS

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA

NICOLLE LAURENTI

**Variabilidade espacial de atributos do solo e vegetação em sistemas de Integração
Lavoura-Pecuária-Floresta**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente - PPGAA da Universidade Federal de São Carlos *campus* Araras, como requisito para obtenção do título de **Mestre em Agricultura e Ambiente.**

Orientadora: Profa. Dra. Josiane Rodrigues
Coorientador: Dr. Alberto C. Bernardi

ARARAS

2023

Nicolle., Laurenti

Variabilidade espacial de atributos do solo e vegetação em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta / Laurenti Nicolle. -- 2023.

83f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras

Orientador (a): Josiane Rodrigues

Banca Examinadora: Josiane Rodrigues, José Ricardo

Macedo Pezzopane, Rubismar Stolf

Bibliografia

1. Análise da Variabilidade espacial de atributos do solo e vegetação em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, na Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos. . I. Nicolle., Laurenti. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Nicolle Laurenti, realizada em 16/08/2023.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Josiane Rodrigues (UFSCar)

Prof. Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane (EMBRAPA)

Prof. Dr. Rubismar Stolf (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a quem colaborou diretamente comigo: minha orientadora Profa. Dra. Josiane, e meu coorientador Dr. Alberto, sem os quais eu não teria concluído este projeto.

AGRADECIMENTOS

Inúmeras pessoas contribuíram para que este trabalho (projeto de pesquisa) tivesse uma conclusão bem-sucedida. Portanto, agradecê-los não é meramente cumprir uma exigência da academia, e sim um sentimento que nasce do coração.

O agradecimento à Deus, por me ter imbuído de um cérebro pensante, crítico, criativo e com capacidade de resolução de problemas é sem dúvida minha primeira intenção.

Agradeço ao Dr. Alberto Carlos de C. Bernardi, que foi o primeiro a acreditar em meu potencial e me dar oportunidade quando, ainda graduanda em agronomia, aceitou-me como sua estagiária na Embrapa, me orientando até os dias de hoje.

Meus agradecimentos ao Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane, por sua inestimável colaboração, ajudando-me a superar tantos obstáculos durante a realização deste trabalho.

À Prof. Dra. Josiane, são tantos meses que é difícil agradecer só com palavras. Sua orientação segura e serena foi um incentivo para que pudesse superar minhas dificuldades e limitações.

Ao Prof. Dr. Vandoir, ao Prof. Dr. Casagrande e ao Prof. Dr. Rubismar pelos inestimáveis conselhos e orientações.

Agradeço ao colega Otávio e à colega Christine, pelas indicações e ajuda nos meus primeiros passos nestes estudos.

Agradeço ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade por todo apoio recebido.

Aos meus pai Tadeu e Ana e ao meu irmão Rafael por todo suporte físico e emocional, por me encorajarem a persistir.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

De acordo com o conceito de sustentabilidade, os agrossistemas do século XXI devem ser capazes de maximizar a quantidade de produtos agrícolas de alta qualidade e, ao mesmo tempo, conservar os recursos naturais do sistema. Dentro dessa perspectiva, os sistemas integrados surgem como uma estratégia de produção sustentável. No que diz respeito às características do solo e da vegetação dos sistemas produtivos, é sabido que elas podem variar espacialmente em função de fatores intrínsecos e extrínsecos, e a compreensão da variabilidade das propriedades edáficas e dos vegetais possui potencial para contribuir com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumos, e redução do impacto ambiental. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e vegetação numa área de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e numa área de Integração Pecuária-Floresta (IPF) em São Carlos-SP utilizando ferramentas de Agricultura de Precisão. Para isso, foram avaliados na área de estudo atributos físicos e químicos do solo (profundidades 0-0,2 e 0,2-0,4 m), a sua resistividade elétrica (profundidades 0-0,5, 0-1,0 e 0-2,0 m) e atributos da vegetação (períodos de abril/2021 e abril/2022). Com relação aos atributos químicos, observou-se valores maiores de pH em H₂O, pH em CaCl₂, potássio, cálcio, magnésio, capacidade de troca catiônica e saturação por base no sistema ILPF. Já para os atributos matéria orgânica, fósforo e sulfato, não houve diferenças entre os dois sistemas produtivos. Para todos os atributos químicos, com exceção do sulfato, notou-se diminuição dos valores com o aumento da profundidade. Por sua vez, não houve diferença entre os sistemas ILPF e IPF para os atributos físicos areia, argila e silte, sendo que a quantidade de areia e silte no solo não se alterou com o aumento da profundidade, dentro do contexto das classes consideradas no processo de interpolação. Para a argila, ao contrário, notou-se que ela aumentou com o aumento da profundidade. Com relação à resistividade elétrica do solo, notou-se que ela cresceu com o aumento da profundidade, não havendo diferença significativa entre os dois sistemas produtivos. Por fim, também não foi observada diferença significativa entre os sistemas para os atributos da vegetação, concluindo-se que o crescimento tanto na altura como no DAP e no volume das árvores foi relativamente homogêneo. Os resultados indicaram que as técnicas de geoprocessamento permitiram armazenar, disponibilizar e integrar dados georreferenciados dos atributos do solo e das plantas. E a análise espacial desses atributos por meio dos mapas interpolados pode fornecer ferramentas de gestão para o manejo dos sistemas integrados.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Interpolação espacial; Sistemas integrados; Sustentabilidade.

ABSTRACT

According to the concept of sustainability, 21st century agrosystems must be able to maximize the quantity of high-quality agricultural products and, at the same time, conserve the natural resources of the system. Within this perspective, integrated systems emerge as a sustainable production strategy. Regarding soil and vegetation characteristics of productive systems, it is known that they can vary spatially due to intrinsic and extrinsic factors, and understanding the variability of edaphic and plant properties has the potential to contribute to increase productivity and quality, economy of inputs, and reduction of environmental impact. In this context, the aim of this work was to study the spatial variability of soil and vegetation attributes in an Integrated Crop-Livestock-Forest (ICLF) and in an Integrated Livestock-Forest (ILF) area in São Carlos-SP using precision agriculture. For this, physical and chemical attributes of the soil (depths 0-0.2 and 0.2-0.4 m), its electrical resistivity (depths 0-0.5, 0-1.0 and 0-2.0 m) and vegetation attributes (April/2021 and April/2022 periods) were analyzed in the area. Regarding chemical attributes, higher values of pH in H₂O, pH in CaCl₂, potassium, calcium, magnesium, cation exchange capacity and base saturation were observed in the ICLF system. For the attributes organic matter, phosphorus and sulfate, there were no differences between the two production systems. For all chemical attributes, except for sulfate, a decrease in values was observed with increasing depth. In turn, there was no difference between the ICLF and ILF systems for the physical attributes sand, clay and silt, and the amount of sand and silt in the soil did not change with increasing depth, within the context of the classes considered in the process of interpolation. For clay, against, it was noted that it increased with increasing depth. Regarding the electrical resistivity of the soil, it was noted that it increased with increasing depth, with no significant difference between the two production systems. Finally, no significant difference was observed between the systems for vegetation attributes, concluding that the growth in height, diameter at breast height and volume of trees was relatively homogeneous. The results indicated that geoprocessing techniques made it possible to store, make available and integrate georeferenced data of soil and plant attributes. And the spatial analysis of these attributes through interpolated maps can provide management tools for the management of integrated systems.

Keywords: Precision Agriculture; Spatial interpolation; Integrated systems; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização da área de estudo, município de São Carlos, São Paulo, Brasil..26
- Figura 2.** Área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....27
- Figura 3.** Vista aérea da área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....28
- Figura 4.** Pontos de amostragem para estudo da fertilidade do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....30
- Figura 5.** Guia para agrupamento de classes de textura do solo.....31
- Figura 6.** Sensor comercial ARP system®.....33
- Figura 7.** Pontos de amostragem para estudo da resistividade elétrica do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....33
- Figura 8.** Temperatura e precipitação de novembro de 2020 a outubro de 2021 no município de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil.....34
- Figura 9.** Medição de altura de árvore de eucalipto na área de estudo utilizando o hipsômetro.....35
- Figura 10.** Medição do diâmetro à altura do peito (DAP) de árvore de eucalipto na área de estudo.....36
- Figura 11.** Boxplots dos atributos químicos do solo (pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica – MO (g dm⁻³), Fósforo – P (mg dm⁻³), Potássio – K (mmolc dm⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm⁻³)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, na profundidade 0 – 0,2 m.....41
- Figura 12.** Boxplots dos atributos químicos do solo (pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica – MO (g dm⁻³), Fósforo – P (mg dm⁻³), Potássio – K (mmolc dm⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm⁻³)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, na profundidade 0,2 – 0,4 m.....42
- Figura 13.** Boxplots dos atributos físicos do solo (Areia Total, Argila e Silte) (g kg⁻¹) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.....42

Figura 14. Variação espacial do atributo químico do solo ‘pH em H₂O’ na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).....48

Figura 15. Variação espacial do atributo químico do solo ‘pH em CaCl₂’ na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).....48

Figura 16. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Matéria Orgânica (MO)’ (g dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).....49

Figura 17. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Fósforo (P)’ (mg dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).....49

Figura 18. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Potássio (K)’ (mmolc dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).....50

Figura 19. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Cálcio (Ca)’ (mmolc dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).....50

Figura 20. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Magnésio (Mg)’ (mmolc dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).....51

Figura 21. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Capacidade de Troca Catiônica (CTC)’ (mmolc dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade

0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).....51

Figura 22. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Saturação por base (V)’ (%) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).....52

Figura 23. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Sulfato’ (mg dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: laranja – baixa; azul – média; verde – alta (REIN; SOUSA, 2004).....52

Figura 24. Variação espacial do atributo físico do solo ‘Areia’ (g kg^{-1}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....53

Figura 25. Variação espacial do atributo físico do solo ‘Argila’ (g kg^{-1}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....53

Figura 26. Variação espacial do atributo físico do solo ‘Silte’ (g kg^{-1}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.....53

Figura 27. Boxplots da resistividade elétrica do solo ($\Omega \text{ m}$) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m.....61

Figura 28. Variabilidade espacial da resistividade elétrica do solo (RE) ($\Omega \text{ m}$) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,5 m. (b) Profundidade 0 – 1,0 m. (c) Profundidade 0 – 2,0 m.....63

Figura 29. Boxplots da altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m^3) de eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração-pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nos períodos de abril/2021 e abril/2022.....65

Figura 30. Variabilidade espacial da altura (m), do diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e do volume (m^3) de árvores de eucalipto na área de estudo. (a) Altura em abril/2021. (b) Altura em abril/2022. (c) DAP em abril/2021. (d) DAP em abril/2022. (e) Volume em abril/2021. (f) Volume em abril/2022.....67

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Quantidades anuais de adubação nitrogenada no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), onde a renovação de pastagens foi realizada em um terço de cada replicação de área (dois piquetes) por ano, e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF), onde as pastagens não foram renovadas, de 2013 a 2021, em São Carlos, SP..... | 29 |
| Tabela 2. Faixas de interpretação de resultados de análise de solo no Sistema Internacional de Unidades..... | 32 |
| Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H ₂ O, pH do solo em CaCl ₂ , Matéria Orgânica – MO (g dm ⁻³), Fósforo – P (mg dm ⁻³), Potássio – K (mmolc dm ⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm ⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm ⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm ⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm ⁻³)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m...43 | 43 |
| Tabela 4. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H ₂ O, pH do solo em CaCl ₂ , Matéria Orgânica – MO (g dm ⁻³), Fósforo – P (mg dm ⁻³), Potássio – K (mmolc dm ⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm ⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm ⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm ⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm ⁻³)) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m..... | 44 |
| Tabela 5. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo (Areia, Argila e Silte (g kg ⁻¹)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m..... | 45 |
| Tabela 6. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo (Areia, Argila e Silte (g kg ⁻¹)) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m...45 | 45 |
| Tabela 7. Média, para cada atributo do solo avaliado, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos para cada profundidade (0 - 0,2 m e 0,2 - 0,4 m) a partir de processo de validação cruzada <i>k-fold</i> , considerando os valores do expoente da interpolação IDW $p = 1, 2, 3$ e 4 | 47 |
| Tabela 8. Estatística descritiva da resistividade elétrica do solo (Ω m) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m..... | 61 |
| Tabela 9. Estatística descritiva da resistividade elétrica do solo (Ω m) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m..... | 62 |
| Tabela 10. Média, para a resistividade elétrica do solo, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos para cada profundidade (0 - 0,5 m, 0 - 1,0 m e 0 - 2,0 m) a partir de processo de validação cruzada <i>k-fold</i> , considerando os valores do expoente da interpolação IDW $p = 1, 2, 3$ e 4 | 63 |

Tabela 11. Estatística descritiva dos dados de eucaliptos – altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m³) – no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....65

Tabela 12. Estatística descritiva dos dados de eucaliptos – altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m³) – do sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.....66

Tabela 13. Média, para os atributos da vegetação, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos em cada período de avaliação (abril/2021 e abril/2022) a partir de processo de validação cruzada *k-fold*, considerando os valores do expoente da interpolação IDW $p = 1, 2, 3$ e 466

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 2. OBJETIVOS | 13 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 13 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 13 |
| 3. REVISÃO TEÓRICA | 14 |
| 3.1 Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta..... | 14 |
| 3.2 Agricultura de Precisão..... | 17 |
| 3.3 A importância do estudo dos atributos do solo nos diferentes sistemas de produção..... | 22 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 26 |
| 4.1 Caracterização da área de estudo..... | 26 |
| 4.2 Atributos analisados | 29 |
| 4.2.1 Fertilidade do solo | 29 |
| 4.2.2 Resistividade elétrica do solo..... | 32 |
| 4.2.3 Altura, diâmetro à altura do peito e volume de eucaliptos..... | 34 |
| 4.3 Análises estatísticas | 36 |
| 4.3.1 Estatística descritiva | 37 |
| 4.3.2 Interpolação espacial..... | 37 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 5.1 Fertilidade do solo..... | 41 |
| 5.2 Resistividade elétrica do solo | 60 |
| 5.3 Altura, diâmetro à altura do peito e volume de eucaliptos | 64 |
| 6. CONCLUSÕES | 70 |
| 7. REFERÊNCIAS | 71 |

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais 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, por esse motivo, são grandes os apelos para que se difunda em todo o mundo a agricultura sustentável (BALBINO et al., 2012).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a agricultura sustentável envolve fatores tais como conservação do solo, da água e dos recursos genéticos animais e vegetais, conservação ambiental e 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., 2012) e, nesse sentido, os sistemas integrados surgem como uma estratégia de produção sustentável, os quais têm sido cada vez mais estudados (MULLER et al., 2015).

De acordo com Balbino, Barcellos e Stone (2011), os sistemas integrados podem ser classificados em quatro modalidades, sendo elas: (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.

Os sistemas ILPF são, portanto, uma alternativa de produção sustentável que agregam atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas numa mesma área, e buscam efeitos de sinergia entre os componentes do agrossistema, contemplando a preservação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica da atividade agropecuária (BALBINO et al., 2012).

No que diz respeito aos atributos do solo e da vegetação dos sistemas produtivos, elas 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 (CAMBARDELLA; KARLEN, 1999). Dessa forma, a compreensão da variabilidade no espaço e tempo dos atributos edáficos e dos vegetais, nos diferentes sistemas, possui potencial para contribuir com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumos, e redução do impacto ambiental.

Variabilidade espacial é a expressão que justifica o sistema de gerenciamento agrícola chamado 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, sendo um ciclo que se inicia na coleta dos dados, análises e interpretações dessas informações, geração das recomendações, aplicação no campo e avaliação dos resultados (GEEBERS; ADAMCHUK, 2010). 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, em especial, o uso racional de insumos.

Em AP, 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. Contudo, a obtenção de mapas da variabilidade espacial dos atributos envolvidos 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), por exemplo.

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, 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).

Na interpolação IDW, diferentes valores do expoente atribuem alguns efeitos na interpolação e, por esse motivo, é importante que a sua escolha seja feita com base em métodos estatísticos como, por exemplo, a validação cruzada, a qual é uma técnica para avaliar a capacidade de generalização de um modelo, a partir de um conjunto de dados, sendo amplamente utilizada em situações em que o objetivo da modelagem é a predição. A partir do processo de validação, busca-se estimar o quão preciso é um modelo na prática, ou seja, o seu desempenho para um novo conjunto de dados.

Diante o exposto, o objetivo do presente trabalho é estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação numa área de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e numa área de integração Pecuária-Floresta (IPF) em São Carlos - SP, utilizando para isso ferramentas de AP e o processo de interpolação IDW, sendo o expoente da interpolação determinado com base no processo de validação cruzada. Com isso, pretende-se: comparar os dois sistemas produtivos; 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; enfatizar os benefícios dos sistemas integrados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e vegetação numa área de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) em São Carlos - SP utilizando ferramentas de Agricultura de Precisão.

2.2 Objetivos Específicos

- Medir, caracterizar e avaliar atributos do solo e da vegetação de um 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 dos atributos do solo e das plantas em sistemas integrados de produção.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1 Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

A agricultura brasileira é a base da economia com uma característica marcante, a alta mecanização. A Revolução Verde foi a grande precursora desses aspectos, com a modernização da agricultura incluindo tecnologias para a produção em larga escala (SOUZA, 2004). As inovações têm sido uma parte importante do processo de desenvolvimento econômico, sendo especialmente na agricultura um dos principais contribuintes para melhorias de produtividade e crescimento de renda (FUGLIE; WANG, 2012). O aumento da população mundial aumentou a demanda por alimentos e estimulou a necessidade de inovações para aumentar a produção de alimentos, fibras e energia. Daí a importância da adoção de tecnologia na indústria de alimentos.

Nos dias atuais a humanidade se depara com desafios cada vez maiores para a produção em larga escala de forma compatível com a disponibilidade de recursos naturais e, por esse motivo, são grandes os apelos para que se difunda em todo o mundo a agricultura sustentável (BALBINO et al., 2012). Dentro desse contexto, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) promovem intensificação sustentável (ALVES et al., 2017), uma vez que possibilitam alcançar altas produtividades das culturas e melhorar a qualidade da forragem ofertada a animais, e ao mesmo tempo promovem melhoria dos serviços do ecossistema, melhorando a qualidade do solo.

Sustentabilidade nada mais é que a união dos aspectos econômicos, sociais, ambientais e culturais, visando suprir as necessidades atuais sem prejudicar as próximas gerações. Esse termo veio à tona nas primeiras discussões ligadas ao meio ambiente e ao clima que foram promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Na agricultura sustentável deve-se levar em consideração os seguintes pontos: a parte ambiental (consumo consciente dos recursos, conformidade com as normas ambientais e o uso racional dos insumos); o social (desenvolvimento da comunidade, responsabilidade social, diversidade cultural); e por fim o econômico (aumento da estabilidade do faturamento, lucratividade, tributos, investimentos) (BALBINO et al., 2012). Os sistemas ILPF representam uma oportunidade, no conjunto de estratégias para a intensificação agropecuária mais sustentável do Brasil, pois têm o potencial de recuperar

vastas áreas de pastagens degradadas, incorporar os princípios da agricultura conservacionista e, ao mesmo tempo, diminuir a intensidade das emissões de gases de efeito estufa (CORTNER et al., 2019; SÁ et al., 2017).

A agricultura sustentável, segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), tem o objetivo de envolver o manejo eficiente dos recursos disponíveis, mantendo a produção nos níveis necessários para satisfazer as crescentes aspirações de uma também crescente população, mas sem degradar o meio ambiente (KAMIYAMA, 2014).

Dentro dessa agricultura estão vários modelos, como: orgânica, biodinâmica, ecológica, natural e os sistemas integrados. O sistema integrado é a junção, na mesma área, das atividades agrícolas, pecuárias e florestais. Ela é feita em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação. Esse sistema busca uma dinâmica com os componentes do agrossistema, pensando sempre em um sistema adequado para o ambiente, reconhecimento do homem no campo e a efetividade econômica da atividade agropecuária (CORDEIRO et al., 2015).

Com a junção da lavoura com a pecuária, surge o sistema agropastoril ou o sistema de integração Lavoura-Pecuária (ILP); já com a lavoura mais a floresta tem-se o sistema Silviagrícola, também conhecido como sistema de integração Lavoura-Floresta (ILF); com a floresta e a pecuária juntas, tem-se o sistema Silvipastoril, podendo ser chamado também de Integração Pecuária-Floresta (IPF); e, por fim, com a integração de todos esses componentes, a lavoura, a pecuária e a floresta, surge o sistema Agrossilvipastoril, conhecido como sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). Os sistemas integrados podem ser aplicados por pequenos, médios e grandes produtores, mas é preciso planejar bem e com o apoio de especialistas para definir o sistema mais adequado para aplicar em uma determinada área (SILVA et al., 2014).

O sistema ILPF, portanto, integra os componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, também incluindo a floresta, numa mesma área (BALBINO, 2012). Com a aplicação desse sistema tem-se os benefícios como os grãos, carne, leite, produtos madeireiros e não madeireiros, energia, uso eficiente e racional dos recursos naturais, diminuição da emissão de gases de efeito estufa, melhorias químicas/físicas/biológicas do solo, mais produtividade sem devastar mais áreas e mais

renda para os produtores rurais, por exemplo (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011).

Mas, apesar desses benefícios, deve-se levar em conta os desafios para adotar esse sistema, como: maior investimento inicial, mesmo sabendo que ele trará benefícios a partir do quarto ano de aplicação; falta de mão de obra especializada, por ser um sistema novo não são todos que sabem manejar a área para aplicar esse sistema; e, um dos pontos mais importantes, a questão cultural, pois os produtores, especialmente os pecuaristas, optam por permanecer com uma única atividade e não querem assumir o risco de novos financiamentos para iniciar outra atividade, mesmo ela sendo benéfica para o meio ambiente (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011).

No entanto, para os produtores que desejam adotar esse sistema na propriedade e necessitam de investimento inicial, vale ressaltar que se trata de uma tecnologia que foi incentivada pelo Programa Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Programa ABC). Esse programa foi criado no ano de 2010 pelo governo federal e disponibiliza créditos e benefícios para os produtores que querem aplicar essa técnica agrícola sustentável (BRASIL, 2012). O sucesso inicial do Plano ABC resultou em motivação para o estabelecimento do Plano ABC+ para o período de 2020 a 2030 como parte da contribuição do Brasil acordo da COP 21 em Paris (BRASIL, 2021). Além disso, para os agricultores e pecuaristas que têm receio em adotar essa nova tecnologia por não terem experiência, vale ressaltar que ela pode ser aplicada em uma área menor, de modo que os produtores possam adquirir mais confiança e prática para a sua implantação e, além disso, isso minimiza os riscos na produção e na parte financeira também (ASSAD et al., 2012).

Os sistemas ILPF são considerados inovadores no Brasil, embora vários tipos de plantios associados entre culturas anuais e culturas perenes ou entre frutíferas e árvores madeiras sejam conhecidos na Europa desde a antiguidade (BALBINO et al., 2011). Polidoro et al. (2021) estimaram que as quatro modalidades de estratégias ILPF, nos cinco biomas do Brasil, englobavam, em 2020, a área total de 17,4 milhões de hectares, o que representa cerca de 2% do território nacional. A maior parte, cerca de 80%, integra lavoura e pecuária, sem introduzir árvores no sistema. Além disso, a parcela que integra o componente florestal utiliza predominantemente o eucalipto, devido ao seu rápido crescimento e a outros fatores que facilitam a sua implantação pelo produtor (WRI BRASIL, 2021). Embora a área destinada a esses sistemas ainda seja pequena no país,

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 Brasil, ou seja, em poucos anos houve um aumento de aproximadamente 6 milhões de hectares nos diferentes formatos da estratégia ILPF.

Devido ao seu crescimento nos últimos anos, bem como por se tratar de sistema produtivo sustentável, várias pesquisas têm sido desenvolvidas recentemente com o intuito de estudar as características e os benefícios dos sistemas integrados de produção (SALTON et al., 2011; MORAES et al., 2014; BORGES; CALONEGO; ROSOLEM, 2019). A Embrapa, por exemplo, desenvolve pesquisa com sistemas ILPF desde a década de 1980, sendo que, atualmente, mais de 20 unidades da empresa desenvolvem algum tipo de atividade de pesquisa sobre o tema (EMBRAPA, 2022).

Os sistemas integrados são parte de uma grande revolução, revolução essa conhecida como a intensificação sustentável (ALVES et al., 2017). Segundo Soterroni et al. (2016), o Brasil tem capacidade para conciliar seu protagonismo na produção sustentável, mas, para que essa produção sustentável ocorra, é necessário melhorar as estruturas agrícolas do passado para enfrentar o desafio da sustentabilidade. Produção e sustentabilidade aparentam ser o oposto, entretanto, esses dois aspectos estão presentes nos sistemas integrados de produção (LEMAIRE et al., 2014).

Assim, é necessário seguir em direção ao futuro protegendo a base de recursos naturais do país e fortalecendo a sua capacidade de produzir alimentos para a população, e a intensificação sustentável com sistemas ILPF são definitivamente caminhos para o Brasil realizar essa visão de uma agricultura intensificada de baixa emissão de carbono e que respeita os recursos naturais (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011).

3.2 Agricultura de Precisão

Para atingir a sustentabilidade deve-se buscar a otimização dos processos dentro do agrossistema. Para isso, atualmente tem-se um conceito bastante interessante, que é a Agricultura de Precisão (AP).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a AP é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da

unidade produtiva, e visa ao aumento do retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização de efeitos nocivos ao meio ambiente (MAPA, 2009). A Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA, 2019) adotou um conceito abrangente de 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”. Portanto, trata-se da gestão das lavouras, dos sistemas produtivos, buscando detalhar o máximo possível as variações que ocorrem dentro da propriedade, tentando otimizar as aplicações, as atividades, e qualquer ação que seja realizada dentro do setor produtivo.

Anteriormente à mecanização do trabalho de campo, quando a agricultura convencional era praticada em menor escala, o detalhamento das áreas sempre foi feito pelo produtor, principalmente pelos pequenos produtores, uma vez que, em pequenas áreas, era possível verificar as reais demandas para cada setor da propriedade (COELHO; SILVA, 2009).

No entanto, com o aumento da extensão das áreas cultivadas, o que foi impulsionado pelo processo de mecanização do trabalho agrícola, o gerenciamento variável dos fatores de produção em função da variabilidade espacial e temporal das áreas de plantio tornou-se cada vez mais difícil e inviável para os produtores. O avanço no desenvolvimento de novos equipamentos para aplicação dos insumos agrícolas tornou possível e viável a aplicação dos fatores de produção em grandes extensões de terra, porém, em distribuição uniforme (SILVA; SILVA-MANN, 2020).

Com o passar do tempo, entretanto, os produtores e os envolvidos no setor agrícola foram percebendo que não era possível considerar uma área de grandes extensões como se fosse homogênea. Começaram a perceber que havia áreas em que os insumos eram colocados excessivamente, enquanto, em outras áreas, eram colocados de forma insuficiente. Dessa forma, perceberam que era preciso começar a otimizar as ações dentro das áreas de produção, justamente para alcançar um maior padrão, um maior potencial de determinada área, ao mesmo tempo que para reduzir os impactos ambientais da atividade agrícola. Essa nova forma de gerenciamento das lavouras, por meio da adoção de fatores à taxa variável, culminou no advento da AP (SILVA; SILVA-MANN, 2020).

Dessa forma, a AP surge justamente para auxiliar o produtor a verificar a variabilidade das características das grandes propriedades, promovendo mais eficiência operacional e trazendo uma maior produtividade e lucratividade para o produtor, além de reduzir os impactos ambientais (INAMASU et al., 2011). O grande diferencial do sistema de AP aos outros sistemas convencionais de gestão, é justamente a possibilidade de controle das ações e intervenções baseadas na variabilidade espacial dos atributos da propriedade. Pois, então é definida como o uso de práticas agrícolas com base nas tecnologias de informação e ferramentas, considerando a variabilidade do espaço e do tempo sobre a produtividade das culturas (BASSOI et al., 2019).

O primeiro caso de uma atividade pensada de acordo com a AP foi “O caso de 1929”, nos Estados Unidos, quando houve a recomendação para o produtor fazer um mapa da sua área, baseado nas análises de acidez do solo. Levando em conta os resultados desse mapa, o produtor colocaria justamente a quantidade de calcário necessária para cada área (LINSLEY; BAUER, 1929).

Porém, a AP, como conhecida atualmente, ressurge apenas nos anos 80, com a criação dos mapas de produtividade na Europa e com as primeiras aplicações de fertilizantes a taxas variáveis nos Estados Unidos. Esses processos só foram possibilitados devido à difusão da eletrônica e por meio do desenvolvimento de sensores e de microcomputadores, que passaram a ser acoplados nas máquinas agrícolas, o que as tornou programáveis, flexíveis e eficientes. Além disso, os *softwares* de desenho assistidos por computador (*Computer-Aided Design - CAD*) tiveram um papel fundamental na geração de mapas das lavouras e na visualização de imagens de satélite (SILVA; SILVA-MANN, 2020).

Foi a partir da década de 90, porém, que houve um avanço das pesquisas sobre AP, devido à disponibilização de sinal de satélites através do sistema global de navegação desenvolvido pelos Estados Unidos (*Global Positioning System - GPS*) que, embora tenha entrado em funcionamento na década de 70, tornou-se totalmente operacional apenas no ano de 1995. A disponibilização de sinal de satélites GPS permitiu a instalação de receptores em colhedoras, possibilitando dessa forma armazenar dados de produção instantânea associada à coordenada geográfica. Em 1996, surgem no mercado as colheitadeiras com capacidade de mapeamento da produção, gerando assim o *boom* da

AP no mundo, tornando possível a prática de mapeamento e aplicação de insumos à taxa variada por meio de máquinas (INAMASU; BERNARDI, 2014).

A AP, uma vez que tornou possível localizar pontos na superfície terrestre, passou a reunir um conjunto de ferramentas, envolvendo desde sensores eletrônicos em máquinas computadorizadas, até Sistemas de Informação Geográfica (SIG), também conhecidos por *Geographic Information System* (GIS), e tecnologias de aplicações diferenciadas, denominadas *Variable Rate Technology* (VRT) ou *Variable Rate Application* (VRA) (SILVA; SILVA-MANN, 2020).

A AP começou a ser praticada no Brasil a partir da importação de equipamentos informatizados ainda nos anos 80, porém de forma elementar e sem resultados favoráveis, devido às dificuldades nesse processo. A partir de 1995, com o início da utilização de sinais de satélites GPS e com o aumento do conhecimento sobre AP, o agronegócio brasileiro iniciou a abertura ao comércio de máquinas agrícolas, que cada vez mais incorporavam as tecnologias da informação, da robótica e da eletrônica para o processamento de dados georreferenciados (SILVA; SILVA-MANN, 2020). Ainda assim, até o final da década de 90, as indústrias de máquinas agrícolas brasileiras ainda não acompanhavam a inovação trazida pela integração da eletrônica e da informática (INAMASU; BERNARDI, 2014).

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), a partir dos anos 2000, o Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas e Implementos Associados e Colheitadeira (MODERFROTA), levou as montadoras a projetarem o que havia de mais moderno no mundo em máquinas agrícolas, o que foi denominado de “salto tecnológico do obsoleto à última geração” (MIRANDA et al., 2017). Nesse período, os brasileiros presenciaram o início de produtos com a eletrônica a bordo de máquinas agrícolas no mercado nacional (INAMASU; BERNARDI, 2014). Depois do salto tecnológico, o Brasil passou de 33.114 máquinas produzidas em 1990, para 53.125 em 2019 (ANFAVEA, 2006).

Mas, apesar do crescimento dos ânimos entre os produtores brasileiros sobre a AP, e o seu potencial com relação ao rendimento da produção, a adoção de novas tecnologias agrícolas foi retraída devido à complexidade de manuseio dos equipamentos de coleta, processamento e apresentação dos dados sobre as colheitas realizadas pelos maquinários da AP. Porém, esse cenário permitiu a criação de empresas especializadas na prestação

de serviços de assistência à utilização dos recursos tecnológicos oferecidos por ela (RESENDE et al., 2010).

Um ponto importante a ser considerado foi o alto custo associado às tecnologias de AP. Como muitas delas eram importadas de outros países, havia um custo elevado para adoção dessa prática nas lavouras do Brasil (INAMASU; BERNARDI, 2014). Isso levou ao questionamento sobre os resultados econômicos resultantes da adoção da AP em função do alto investimento inicial, o que a limitava, praticamente, a produtores com grandes recursos financeiros (SILVA; SILVA-MANN, 2020).

Dessa forma, surgiu a necessidade de se avaliar a viabilidade do uso da AP, levando em conta, para isso, as dimensões da área de cultivo, acreditando-se que a prática se tornaria viável após um tamanho específico de propriedade. Porém, 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 pretende aplicar.

Por isso, é preciso que o produtor, num primeiro momento, reconheça a variabilidade dos fatores de produção de sua lavoura, para em seguida avaliar se a amplitude entre os valores é suficiente para que a adoção da AP seja economicamente sustentável (INAMASU; BERNARDI, 2014).

De forma geral, a AP é baseada em três etapas: coleta de dados, interpretação e atuação (INAMASU; BERNARDI, 2014). Na primeira etapa, a da leitura ou coleta de dados, acontece o levantamento dos atributos de interesse na área em estudo, e nela são utilizados sensores e equipamentos já disponíveis no mercado, como por exemplo, sensores de condutividade elétrica do solo. Feito o levantamento, a etapa seguinte é a da interpretação, e nela acontece a análise da variabilidade dos atributos levantados na etapa anterior, de modo a determinar se essa variação é ou não significativa a ponto de se fazer intervenções diferenciadas. Esse tipo de análise é feito pelas ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e de Geoestatística. Por fim, na etapa da atuação, ocorre a aplicação localizada de insumos, considerando os dados e resultados obtidos das etapas anteriores.

Dessa forma, a AP é um ciclo que se inicia na coleta dos dados, análises e interpretação dessas informações, geração das recomendações, aplicação no campo e

avaliação dos resultados (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010). A AP também é considerada uma cadeia de conhecimentos, na qual máquinas, aplicativos e equipamentos são ferramentas para coletar dados, os quais devem ser organizados e interpretados, gerando informações para apoiar a gestão (INAMASU; BERNARDI, 2014).

Dessa forma, pode-se afirmar que as tecnologias associadas à AP permitem um grande conhecimento da variabilidade encontrada entre as diferentes áreas da propriedade e, assim, proporcionam tomadas de decisão de forma cada vez mais precisa. Com essas tecnologias, pretende-se aumentar cada vez mais os lucros das lavouras, assim como também minimizar os impactos ambientais das práticas agrícolas (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002).

Os fundamentos da AP podem trazer benefícios nos mais diferentes campos de atuação, tais como: melhor controle da área de cultivo; uso racional de insumos, para maior retorno; menor impacto ambiental e melhoria da qualidade do solo ao longo do tempo; priorização dos investimentos em insumos nas áreas em que o potencial de rendimento é maior, garantindo maior possibilidade de retorno econômico com menor investimento; maior fluxo de informações para direcionar a tomada de decisões de manejo; e valorização da propriedade rural. Assim, o sucesso da implantação da AP traz, além de bons resultados, um processo agrícola mais racional, mais responsável e rastreável (INAMASU; BERNARDI, 2014).

3.3 A importância do estudo dos atributos do solo nos diferentes sistemas de produção

Um dos pressupostos básicos da AP é o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo no espaço e no tempo (SANTI et al., 2012).

O solo é constituído por uma mistura dinâmica de componentes químicos, físicos e biológicos (SNYDER et al., 2013), sendo um recurso natural vital para o funcionamento do ecossistema na Terra, visto que possui uma série de funções no meio ambiente, as quais assumem um papel importante na mediação de processos-chaves na natureza, tais como fornecer nutrientes para as plantas e organismos, regular a dinâmica da água no ambiente, atenuar a ação de contaminantes, regular a emissão de gases de efeito estufa e, sobretudo, influenciar a saúde dos homens e dos animais (XAVIER, 2021). Considerando

a importância do solo para o ecossistema, o monitoramento adequado da sua qualidade só é possível analisando os atributos que reflitam a sua capacidade de produção, bem como a sua sustentabilidade (SPOSITO; ZABEL, 2003).

Dentro desse contexto, o monitoramento de seus atributos químicos, por exemplo, 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 usado (DUVAL et al., 2018). Por sua vez, os atributos físicos estão relacionados à organização das partículas e do espaço poroso do solo (CUNHA NETO et al., 2018), e estão diretamente associados, dentre outros fatores, ao crescimento radicular, à emergência das plântulas, à infiltração e percolação da água e nutrientes no perfil do solo, bem como à drenagem e à erosão. Já a resistividade elétrica tem sido usada para caracterizar as propriedades do solo (SERRANO et al., 2014). Por apresentar correlação com propriedades do solo como teor de argila, matéria orgânica, concentração de sais ou umidade (SAMOUËLIAN et al., 2005; MACHADO et al., 2006; BERNARDI et al., 2019), ela pode ser utilizada para delinear zonas de manejo diferenciado (BERNARDI et al., 2018; BERNARDI et al., 2019).

Todos esses atributos são sensíveis às variações provocadas pelo uso da terra e se relacionam diretamente com as funções desempenhadas pelo solo (DUVAL et al., 2018). Especificidades existentes entre os sistemas de manejo, por exemplo, podem produzir efeitos distintos nos atributos do solo. Por esse motivo, ao avaliar diferentes sistemas produtivos, é importante que estudos do solo sejam realizados considerando a estrutura de variabilidade espacial e temporal de seus atributos (ANDREOTTI et al., 2010).

Devido ao aumento da demanda por alimentos e a evolução tecnológica na produção, sabe-se que a atividade agrícola moderna é caracterizada predominantemente por sistemas padronizados e por monoculturas. Além disso, com a expansão da fronteira agrícola e com o manejo mecanizado do solo e o uso de agroquímicos e da irrigação, as atividades agrícolas, pecuárias e florestais passaram a ser realizadas de maneira intensificada, independente e dissociada. Porém, esse modelo de produção agropecuária moderna, predominante nas propriedades rurais de todo o mundo, tem mostrado sinais de saturação, haja visto a elevada demanda por energia e por recursos naturais que o caracteriza (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011).

Com relação à pecuária, por exemplo, a degradação das pastagens tornou-se um dos principais sinais de baixa sustentabilidade, sendo o manejo inadequado a principal causa dessa degradação (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Aidar e Kluthcouski (2003) citam a baixa reposição de nutrientes no solo e os impedimentos físicos dos solos como problemas decorrentes da pecuária tradicional.

Em relação à agricultura, a monocultura e as práticas culturais inadequadas têm causado a degradação do solo e dos recursos naturais (MACEDO, 2009). Nas áreas de lavouras temporárias, assim também como naquelas de pastagens naturais e plantadas, a monocultura é predominante e, na maior parte dos casos, não são realizadas boas práticas agrônômicas de forma completa, o que implica em degradação na qualidade dos solos e se reflete em baixa produtividade e elevada erosão (HERNANI et al., 2002).

Dentro desse contexto, os sistemas integrados de produção surgem como uma alternativa de manejo conservacionista do solo, visando contribuir para com o estabelecimento de uma agricultura sustentável. O fornecimento adequado de nutrientes é essencial para obter-se altos rendimentos e é essencial para manter alta qualidade e rendimentos rentáveis no ILPF. No entanto, a gestão da fertilidade do solo, sem levar em conta a variação espacial dentro das áreas de produção, pode afetar diretamente a produtividade e a qualidade ambiental (BERNARDI et al., 2016). Além disso, a detecção da variabilidade dos atributos de fertilidade do solo ainda é um desafio na AP (VISCARRA ROSSEL; BOUMA, 2016).

O desenvolvimento de equipamentos e os métodos de sensoriamento remoto possibilitam ampliar a capacidade de adquirir dados em tempo real e em larga escala no campo. E, desta forma, a AP contribui para a automação da avaliação, otimizando o tempo e mão-de-obra, e mantendo a confiabilidade da estimativa, que possibilitam a redução das amostragens intensivas e caras (McBRATNEY; PRINGLE, 1999). A modelagem via sistema de informações geográficas (SIG) possibilita a fusão dessas camadas de informações, ampliando a capacidade de interpretação dos dados e auxiliando na tomada de decisão para a gestão do sistema de produção (FILIPINI-ALBA, 2014).

O procedimento predominantemente no Brasil para mapeamento do solo envolve a coleta de amostras georreferenciadas e geração dos mapas utilizando métodos de interpolação (RESENDE et al., 2014; BERNARDI et al., 2015). No entanto, a quantidade de amostras necessárias pode ser um fator limitante por causa dos custos e, por isso,

sensores de campo podem ser usados para melhorar a detecção da variabilidade e para aumentar a quantidade de dados (MOLIN; TAVARES, 2019).

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 ($21^{\circ}57'S$, $47^{\circ}51'W$, 860 m de altitude) (Figura 1). 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 $19,9^{\circ}C$ e precipitação média de 250 mm, e úmida de outubro a março, com temperatura média de $23,0^{\circ}C$ e precipitação média de 1.100 mm (PEZZOPANE et al., 2021).

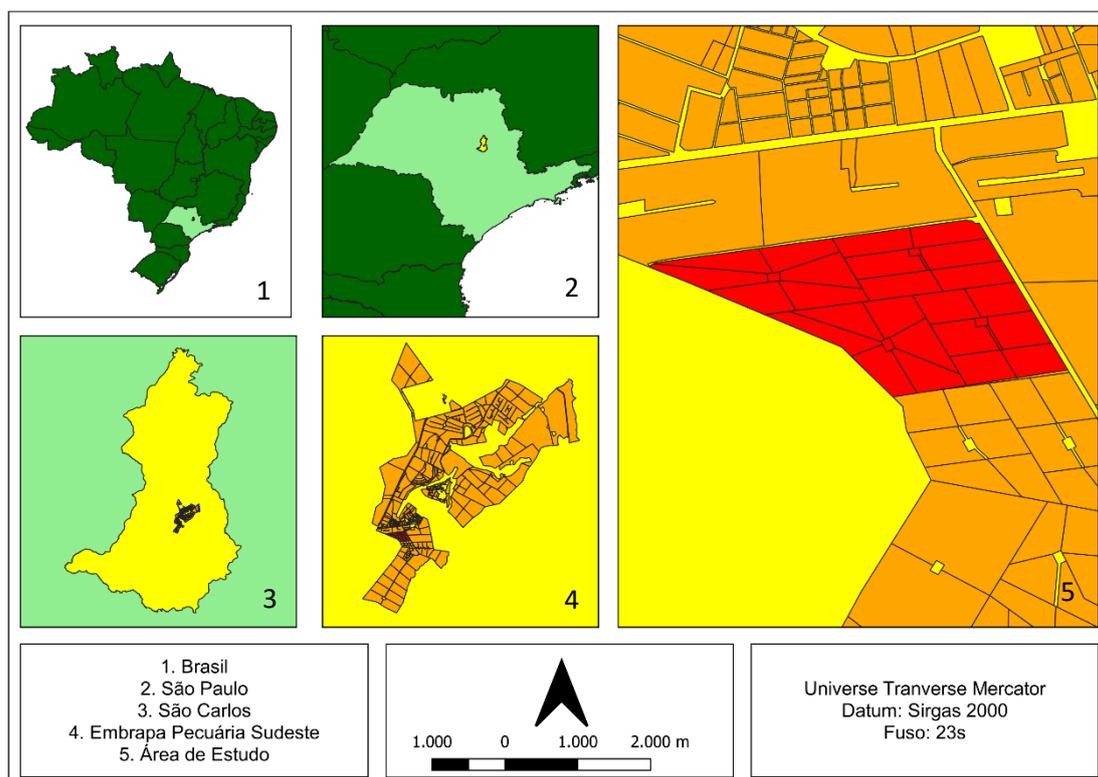


Figura 1. Localização da área de estudo, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

A área de estudo compreende dois sistemas produtivos, como segue (PEZZOPANE et al., 2019): i) integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) - pastagem de capim Piatã (*Urochloa brizantha*) plantado com *Eucalyptus urograndis* (GG100) em fileiras simples com espaçamento de 30 m e distância de 4 m entre árvores implantada com milho (*Zea mays* L.) consorciado com capim Piatã; ii) integração pecuária-floresta (IPF) - pastagem de capim Piatã plantado com *Eucalyptus urograndis* (GG100) em fileiras simples com espaçamento de 30 m e distância de 4 m entre árvores.

Cada sistema integrado possui um total de 6 ha, sendo dividido em duas áreas experimentais de 3 ha cada. Essas áreas foram divididas em seis piquetes de 0,5 ha cada (Figura 2). O mapa da área de estudo com a sua vista aérea e a especificação de como ela é dividida está disponível a seguir (Figura 3).

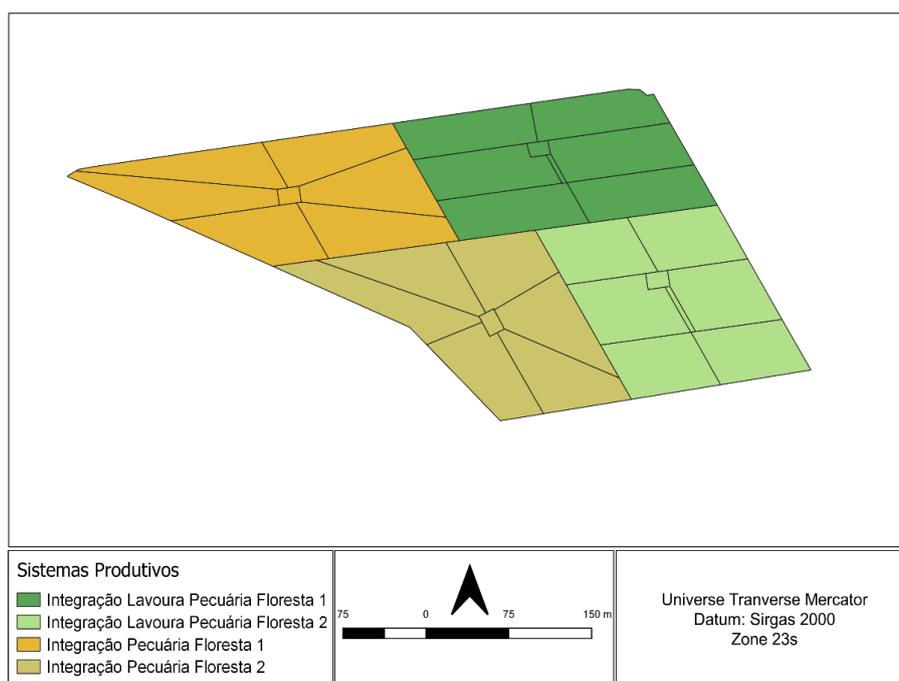


Figura 2. Área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

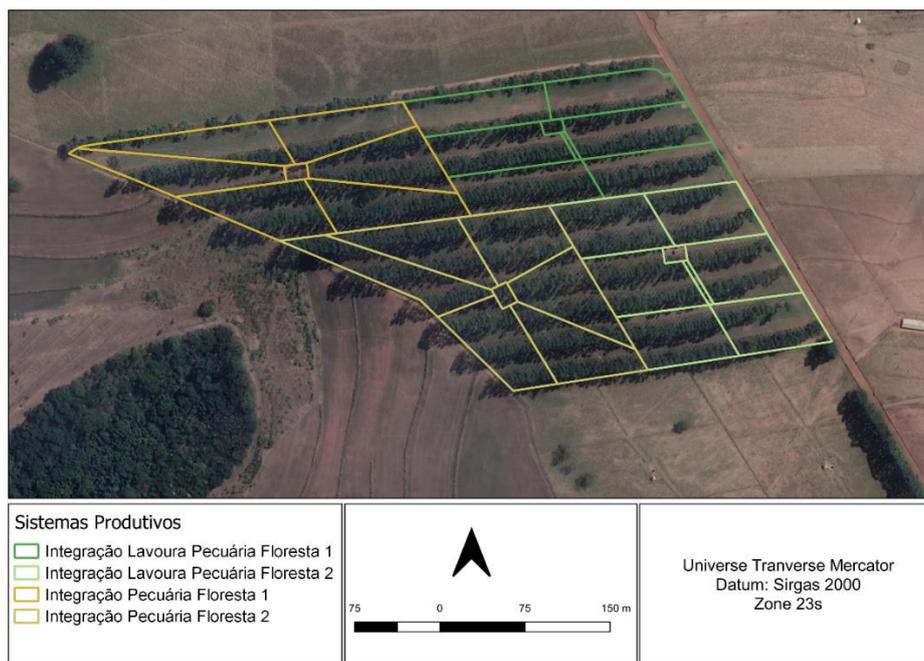


Figura 3. Vista aérea da área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

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⁻¹. Em julho de 2016, as árvores foram desbastadas (50% retiradas de cada fila), mudando o espaçamento para 15 x 4 m (167 árvores ha⁻¹). 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.

Em todas as safras (Tabela 1), o milho foi semeado no espaçamento de 0,8 x 0,2 m, visando uma população de 62.500 plantas ha⁻¹. 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⁻¹. 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% P₂O₅) para aumentar o P do solo para 12 mg dm⁻³, e o fertilizante K (KCl, 60% K₂O) 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⁻¹ por safra (Tabela 1).

Tabela 1. Quantidades anuais de adubação nitrogenada no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), onde a renovação de pastagens foi realizada em um terço de cada replicação de área (dois piquetes) por ano, e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF), onde as pastagens não foram renovadas, de 2013 a 2021, em São Carlos, SP.

| Sistema | Safra (kg ha ⁻¹ N) | | | | | | | | |
|-------------|-------------------------------|---------|------------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|-------|
| | 2013/14 | 2014/15 | 2015/16 ⁽¹⁾ | 2016/17 | 2017/18 | 2018/19 ⁽¹⁾⁽²⁾ | 2019/20 | 2020/21 | Média |
| ILPF | 151 | 188 | 40 | 141 | 141 | - | 88 | 138 | 110,9 |
| IPF | 156 | 202 | 40 | 131 | 132 | - | 88 | 138 | 110,9 |

⁽¹⁾Época de crescimento sem renovação de pastagens; ⁽²⁾Época de crescimento sem adubação nitrogenada.

4.2 Atributos analisados

4.2.1 Fertilidade do solo

Para a realização das análises físicas e químicas do solo foi feita uma amostragem no período seco (agosto/2021) em cada piquete da área de estudo (cada piquete de 0,5 ha), totalizando 24 amostras georreferenciadas. Para isso foi utilizado o procedimento de amostragem por zonas homogêneas (FLEMING et al., 2000). Neste estudo, cada piquete foi considerado uma unidade homogênea de manejo, como já descrito por Bernardi et al. (2017). As amostragens em cada piquete foram realizadas em duas profundidades: 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m. Em cada piquete foram coletas seis subamostras para compor uma amostra composta georreferenciada pelo centroide do piquete (Figura 4).

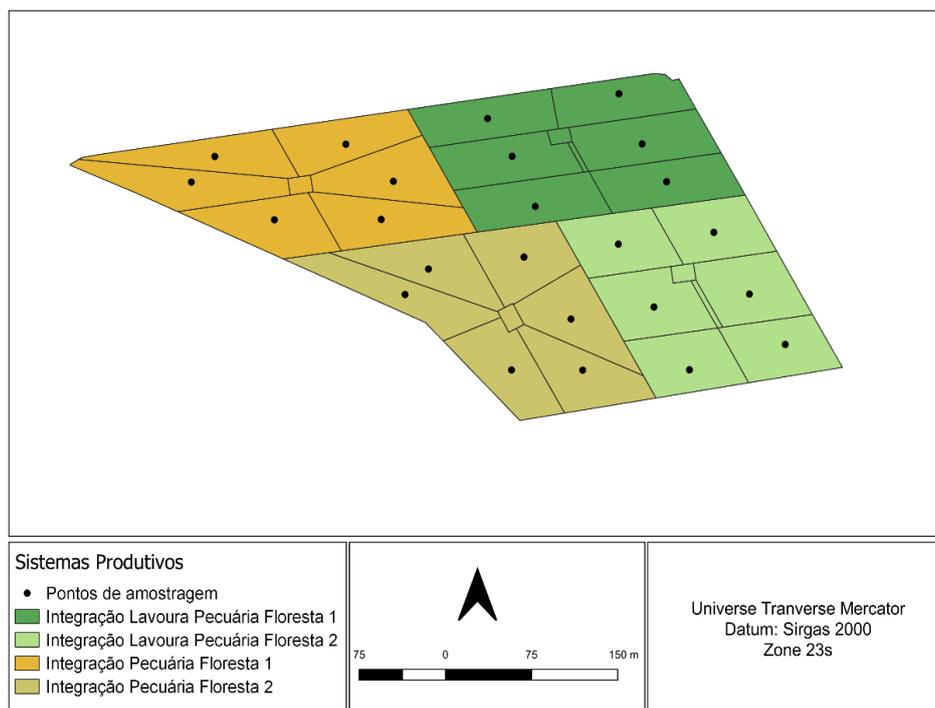


Figura 4. Pontos de amostragem para estudo da fertilidade do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

Os atributos físicos e químicos analisados em cada uma das 24 amostras de solo são como segue: Areia, Argila, Silte, pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), e foram calculados também Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por base (V) e Sulfato. 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.

4.2.1.1 Atributos físicos

As análises dos atributos físicos das amostras de solo – areia, argila e silte (g kg⁻¹) – foram realizadas a partir dos métodos de análise física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas (MARIA et al., 2021).

A Figura 5 resume as faixas de interpretação dos resultados de análise dos atributos físicos do solo, uma vez que, para fins de classificação, os solos devem ser agrupados em classes de acordo com as frações de tamanho das partículas minerais, e a determinação da sua classe textural é feita por meio de triângulos de textura que apresentam, em cada face, as porcentagens de areia, argila e silte.

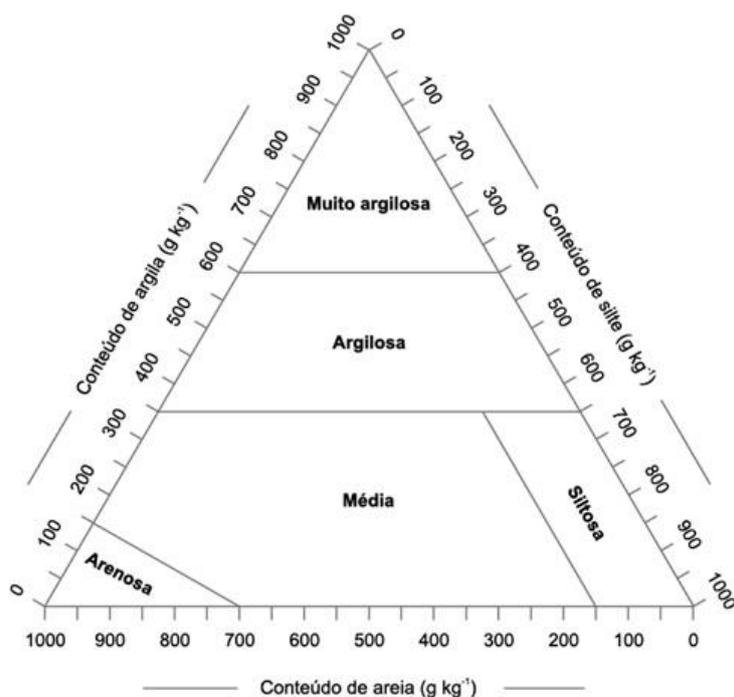


Figura 5. Guia para agrupamento de classes de textura do solo.
Fonte: Santos et al. (2018).

4.2.1.2 Atributos químicos

As análises dos atributos químicos das amostras – pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica (g dm⁻³), Fósforo (mg dm⁻³), Potássio (mmolc dm⁻³), Cálcio (mmolc dm⁻³), Magnésio (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica (mmolc dm⁻³), Saturação por Base (%) e Sulfato (mg dm⁻³) – foram realizadas a partir dos métodos de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais do Instituto Agronômico de Campinas (RAIJ et al., 2001).

A Tabela 2 resume as faixas de interpretação dos resultados de análise dos atributos químicos do solo para fins de recomendação de calagem e fertilizantes, e foram organizadas a partir das publicações de Raij et al. (1996) e Alvarez Venegas et al. (1999).

Tabela 2. Faixas de interpretação de resultados de análise de solo no Sistema Internacional de Unidades.

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

¹Raij et al. (1996); ²Alvarez Venegas et al. (1999)

4.2.2 Resistividade elétrica do solo

As medidas de resistividade elétrica do solo foram obtidas com o sensor comercial ARP system® (*Automatic Resistivity Profiling*, Geocarta, Paris, França) (Figura 6), em 3 diferentes profundidades, sendo elas: 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m. O sensor possui 8 eletrodos no total, em formato de disco com ponta periférica, sendo 2 emissores e 6 receptores de corrente, e ele foi desenvolvido na França pelo Centro Nacional de Pesquisa Científica (CNRS) e pela Universidade de Paris-Sorbonne IV, e trata-se de um sistema multieletrodo que mede os três níveis de solo simultaneamente.

O sistema é projetado para ser usado em movimento, rebocado no campo, e possui uma geometria 2D em forma de V (definida “vol-de-canard” por Panissod et al., 1997) onde os eletrodos rolantes são rodados pelas dentadas. Um radar é acoplado por um GPS e posicionado no dispositivo para fornecer um posicionamento preciso de cada dado coletado (PIRODDI et al., 2020). Para registrar as coordenadas utilizou-se um receptor Trimble AgGPS 114 (Trimble Navigation, Califórnia, EUA), de categoria L1 com correção diferencial (OmniSTAR – G2) (KARP et al., 2015).



Figura 6. Sensor comercial ARP system®.

A coleta foi realizada no dia 22 de outubro de 2021, a cada 0,1 m, com velocidade aproximada de 6 m/s, sendo os dados de resistividade (Ω m) registrados para cada profundidade, com as respectivas coordenadas de cada ponto amostrado. No total, para cada profundidade, foram coletados aproximadamente 480.000 dados georreferenciados (Figura 7).

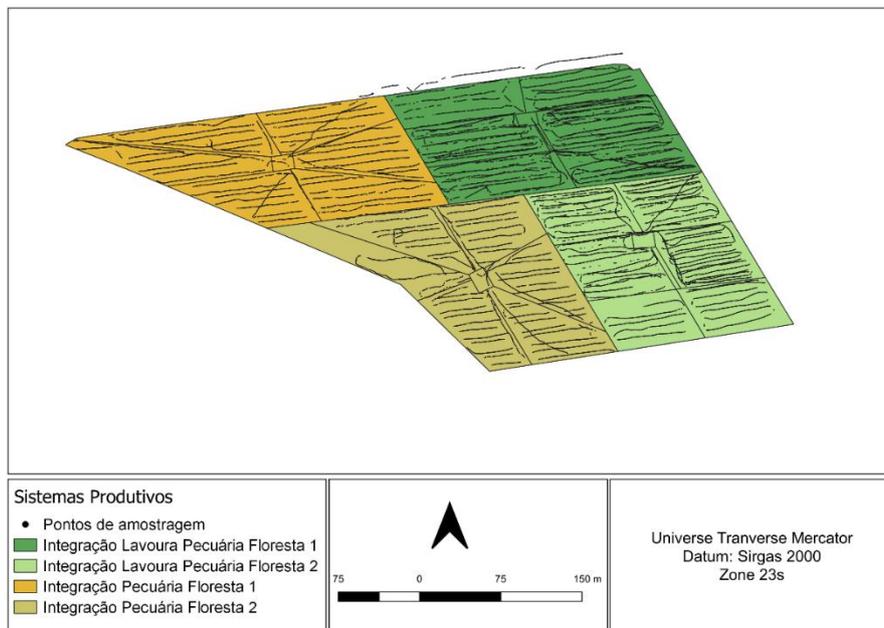


Figura 7. Pontos de amostragem para estudo da resistividade elétrica do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

Para o estudo dos dados de resistividade elétrica do solo, as informações de temperatura e precipitação na área de estudo foram coletadas a partir da estação meteorológica da Embrapa Pecuária Sudeste (EMBRAPA, 2021), considerando o período de novembro de 2020 a outubro de 2021 (Figura 8).

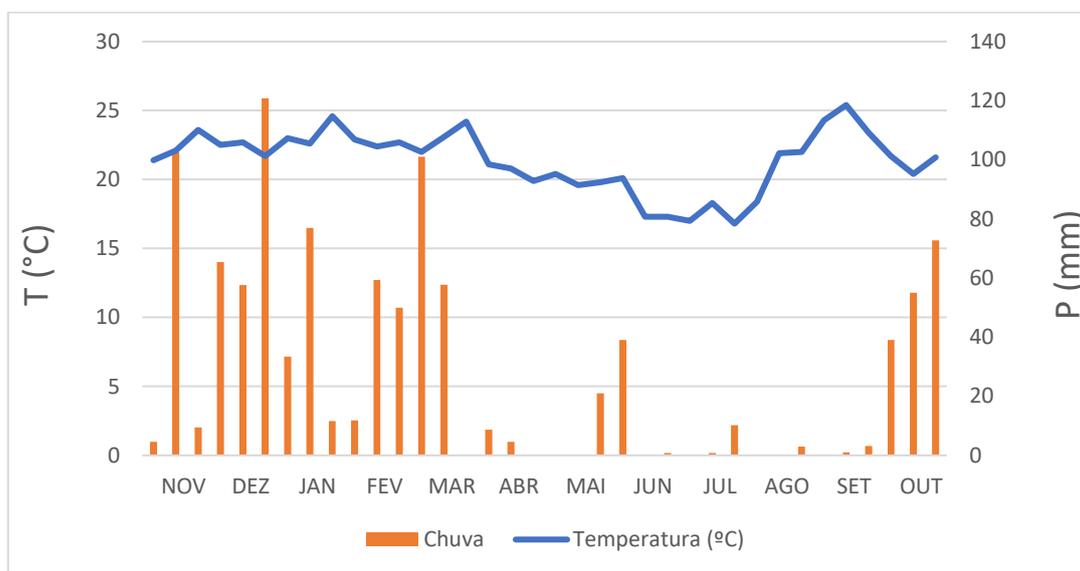


Figura 8. Temperatura e precipitação de novembro de 2020 a outubro de 2021 no município de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil.

Fonte: EMBRAPA (2021).

4.2.3 Altura, diâmetro à altura do peito e volume de eucaliptos

Além dos atributos do solo, também foram feitas medições de altura e diâmetro à 1,3 m do solo (diâmetro à altura do peito - DAP) dos eucaliptos que compõe os sistemas da área de estudo. As medições foram realizadas nos meses de abril de 2021 e abril de 2022 em quinze árvores por piquete da área experimental. As árvores estão plantadas em fileiras simples com espaçamento atual de 30 m entre linhas e 4 m entre plantas, totalizado cerca de 83 árvores por hectare (PEZZOPANE et al., 2021). Nessa configuração, foram medidas cerca de 35% das árvores em cada piquete.

A variável altura (m) pode ser definida como a distância linear ao longo do eixo principal da árvore, medida do solo até o seu topo ou até outro ponto de referência (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). Os dados de altura dos eucaliptos da área de estudo foram obtidos utilizando um hipsômetro digital Haglof®, que se baseia no

princípio trigonométrico, a partir da relação entre ângulo e distância (LAURO et al., 2018). O aparelho permite medir a altura dos objetos com precisão, baseado em uma distância conhecida do operador até o alvo (OLIVEIRA et al., 2014) e visadas para a base e topo da árvore, aferindo assim o valor da altura, observada no visor do próprio aparelho (Figura 9).



Figura 9. Medição de altura de árvore de eucalipto na área de estudo utilizando o hipsômetro.

O DAP (cm) é uma medida do diâmetro da árvore à 1,3 m de altura em relação ao nível do solo, e a medição do DAP de uma árvore pode ser feita com o auxílio de fita métrica, seja mecânica ou digital (CORTE et al., 2016). No presente trabalho, os dados de DAP das árvores de eucalipto foram coletados com o auxílio de uma fita diamétrica. O primeiro passo consistiu na marcação de 1,3 metro vertical partindo da base da árvore. Com a altura marcada, o segundo passo foi medir o seu diâmetro (Figura 10).



Figura 10. Medição do diâmetro à altura do peito (DAP) de árvore de eucalipto na área de estudo.

Por fim, os dados de volume dos eucaliptos (m^3) foram calculados utilizando o modelo de Schumacher-Hall (PEZZOPANE, 2021), sendo o logaritmo natural do volume descrito segundo o modelo:

$$\ln V = - 10,2101 + 1,6808 \times \ln DAP + 1,2910 \times \ln H$$

em que DAP representa o diâmetro à altura do peito do eucalipto, em centímetros, e H a sua altura, em metros.

Fez-se, em seguida, o cálculo da média da altura, do DAP e do volume das árvores de eucalipto localizadas num mesmo piquete experimental, uma vez que cada piquete é considerado uma unidade homogênea de manejo. Cada valor obtido foi então georreferenciado a partir do centroide do piquete, os mesmos que foram utilizados para os atributos físicos e químicos do solo, gerando assim 24 dados georreferenciados para cada atributo da vegetação avaliado.

4.3 Análises estatísticas

4.3.1 Estatística descritiva

Todos os atributos do solo e da vegetação foram submetidos a uma análise exploratória, sendo construídos inicialmente os boxplots associados a cada um deles. Por meio da construção dos boxplots é possível identificar a presença de *outliers* nos dados (SCHWERTMAN et al., 2004), os quais são caracterizados por se distanciar drasticamente dos demais pontos do conjunto, podendo enviesar todo o resultado de uma análise. Após a identificação e retirada dos *outliers*, foram calculadas as seguintes medidas estatísticas associadas aos atributos: média, desvio padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação e as medidas de curtose e assimetria. 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.

4.3.2 Interpolação espacial

Finalizada a análise exploratória, seguiu-se com o processo de interpolação espacial de cada um dos atributos avaliados. 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 estão a interpolação pelo inverso da distância ponderada (do inglês, *Inverse Distance Weight* - IDW) e a krigagem, os quais podem ser classificados pela sua natureza determinística e geoestatística, respectivamente. Para realizar a análise geoestatística, entretanto, deve-se utilizar uma amostra com no mínimo de 100 a 150 pontos (SOUZA et al., 2014). Devido ao tamanho amostral considerado nas análises de fertilidade do solo e nas análises da vegetação (total de 24 amostras), o método utilizado no presente trabalho foi a interpolação IDW (WATSON; PHILIP, 1985).

4.3.2.1 Interpolação pelo Inverso da Distância Ponderada (IDW)

A interpolação IDW é classificada como determinística, ou seja, não utiliza de elementos da teoria das probabilidades, e produz uma superfície contínua a partir de pontos conhecidos. 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 descrita por 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. No presente trabalho, todos os pontos amostrados foram considerados no processo de interpolação.

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 *k-fold* foi aplicada para cada um dos valores de expoente $p = 1, 2, 3$ e 4 . Para cada um deles, nas k iterações utilizadas no método, calculou-se a RMSE, sendo que ao final do procedimento calculou-se a média dos erros obtidos em todas as iterações. Para a escolha do valor do expoente p a ser utilizado na interpolação para cada atributo, foi feita a média, para cada valor de p , entre a RMSE média obtida para cada profundidade

(no caso dos atributos do solo) e para cada período (no caso dos atributos da vegetação). O valor de p que levou ao menor valor médio da RMSE foi o valor escolhido para realizar a interpolação IDW. Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software* R (R CORE TEAM, 2021).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Fertilidade do solo

Os boxplots associados a cada um dos atributos químicos e físicos do solo estão apresentados a seguir (Figuras 11 a 13). A partir dos gráficos, é possível notar a presença de *outliers* nos dados. Após a retirada de tais pontos do conjunto, foi realizada a estatística descritiva dos atributos, considerando cada um dos sistemas integrados ILPF e IPF individualmente (Tabelas 3 a 6).

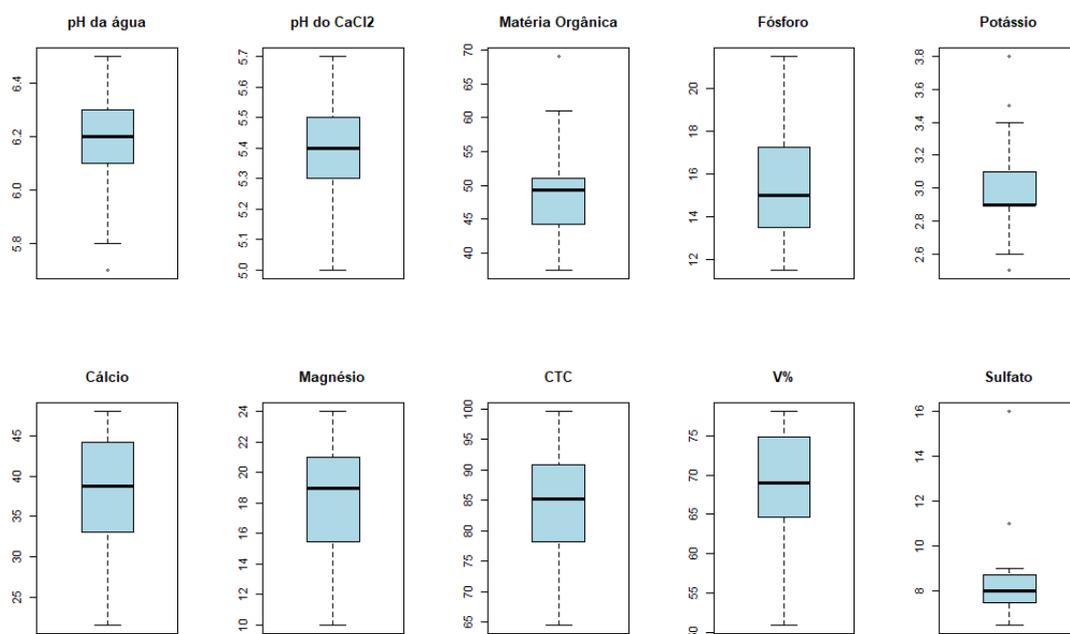


Figura 11. Boxplots dos atributos químicos do solo (pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica – MO (g dm⁻³), Fósforo – P (mg dm⁻³), Potássio – K (mmolc dm⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm⁻³)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, na profundidade 0 – 0,2 m.

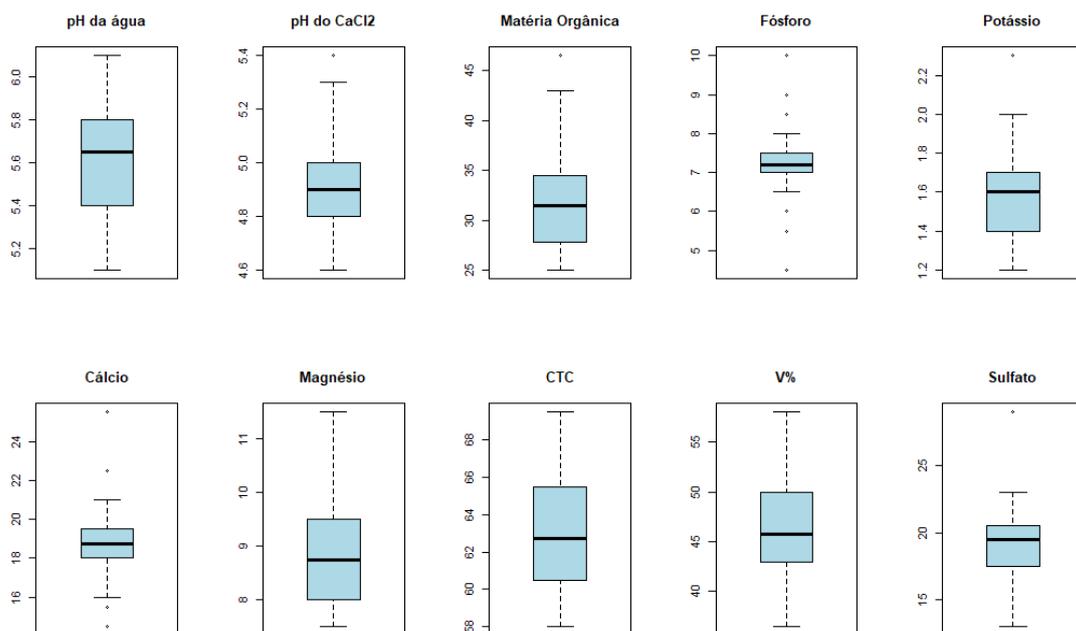


Figura 12. Boxplots dos atributos químicos do solo (pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica – MO (g dm⁻³), Fósforo – P (mg dm⁻³), Potássio – K (mmolc dm⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm⁻³)) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, na profundidade 0,2 – 0,4 m.

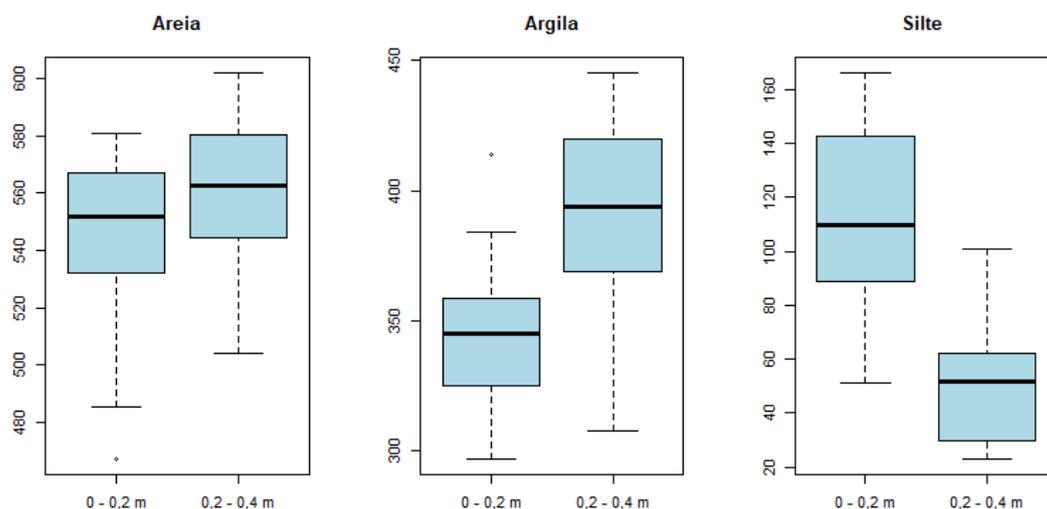


Figura 13. Boxplots dos atributos físicos do solo (Areia Total, Argila e Silte) (g kg⁻¹) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica – MO (g dm⁻³), Fósforo – P (mg dm⁻³), Potássio – K (mmolc dm⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm⁻³) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.

| Medidas Estatísticas | pH em Água | pH em CaCl ₂ | MO | P | K | Ca | Mg | CTC | V | Sulfato |
|----------------------|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0 – 0,2 m | | | | | | | | | | |
| Média | 6,24 | 5,45 | 47,62 | 14,79 | 3,12 | 41,37 | 19,70 | 88,70 | 71,25 | 8,45 |
| Desvio Padrão | 0,14 | 0,13 | 6,56 | 2,31 | 0,37 | 5,95 | 2,46 | 7,12 | 5,03 | 1,03 |
| Mínimo | 6,00 | 5,30 | 37,50 | 11,50 | 2,50 | 28,50 | 14,50 | 75,00 | 60,50 | 7,50 |
| Máximo | 6,50 | 5,70 | 61,00 | 19,00 | 3,80 | 48,00 | 24,00 | 99,50 | 77,00 | 11,00 |
| CV (%) | 2,31 | 2,52 | 13,79 | 15,62 | 12,13 | 14,40 | 32,26 | 8,02 | 7,06 | 12,20 |
| Curtose | 2,27 | 1,85 | 2,66 | 2,10 | 2,27 | 2,74 | 3,14 | 2,36 | 2,61 | 3,97 |
| Assimetria | 0,17 | 0,15 | 0,45 | 0,26 | -0,01 | -0,84 | -0,41 | -0,29 | -0,80 | 1,15 |
| 0,2 – 0,4 m | | | | | | | | | | |
| Média | 5,81 | 5,07 | 30,75 | 7,50 | 1,69 | 20,20 | 9,37 | 62,54 | 50,00 | 18,37 |
| Desvio Padrão | 0,15 | 0,16 | 5,33 | 1,34 | 0,36 | 2,08 | 1,06 | 3,32 | 4,71 | 2,97 |
| Mínimo | 5,60 | 4,90 | 25,00 | 4,50 | 1,20 | 18,00 | 8,00 | 58,00 | 41,50 | 13,00 |
| Máximo | 6,10 | 5,40 | 43,00 | 10,00 | 2,30 | 25,50 | 11,50 | 69,50 | 58,00 | 23,00 |
| CV (%) | 2,62 | 3,26 | 17,34 | 17,97 | 21,60 | 10,30 | 11,39 | 5,31 | 9,42 | 16,16 |
| Curtose | 2,13 | 2,24 | 3,51 | 3,79 | 2,12 | 4,50 | 2,68 | 2,61 | 2,46 | 2,26 |
| Assimetria | 0,50 | 0,66 | 1,13 | -0,29 | 0,50 | 1,44 | 0,36 | 0,70 | -0,01 | -0,21 |

Tabela 4. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (pH do solo em H₂O, pH do solo em CaCl₂, Matéria Orgânica – MO (g dm⁻³), Fósforo – P (mg dm⁻³), Potássio – K (mmolc dm⁻³), Cálcio – Ca (mmolc dm⁻³), Magnésio – Mg (mmolc dm⁻³), Capacidade de Troca Catiônica – CTC (mmolc dm⁻³), Saturação por base – V (%) e Sulfato (mg dm⁻³) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.

| Medidas Estatísticas | pH em Água | pH em CaCl ₂ | MO | P | K | Ca | Mg | CTC | V | Sulfato |
|----------------------|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0 – 0,2 m | | | | | | | | | | |
| Média | 6,07 | 5,34 | 51,44 | 15,75 | 2,90 | 33,75 | 16,20 | 78,83 | 65,35 | 8,50 |
| Desvio Padrão | 0,18 | 0,16 | 7,07 | 2,76 | 0,10 | 8,74 | 4,16 | 9,85 | 8,29 | 2,42 |
| Mínimo | 5,70 | 5,00 | 43,50 | 11,50 | 2,60 | 21,50 | 10,00 | 64,50 | 51,00 | 6,50 |
| Máximo | 6,30 | 5,60 | 69,00 | 21,50 | 3,00 | 46,00 | 22,00 | 92,00 | 78,00 | 16,00 |
| CV (%) | 2,98 | 3,13 | 13,76 | 17,57 | 3,60 | 25,90 | 25,90 | 12,50 | 12,69 | 28,52 |
| Curtose | 2,84 | 2,86 | 4,19 | 2,77 | 7,00 | 1,67 | 1,66 | 1,66 | 2,16 | 9,05 |
| Assimetria | -0,76 | -0,57 | 1,32 | 0,42 | -2,00 | -0,13 | -0,15 | -0,13 | -0,22 | 2,71 |
| 0,2 – 0,4 m | | | | | | | | | | |
| Média | 5,40 | 4,78 | 33,24 | 6,99 | 1,51 | 17,41 | 8,36 | 63,45 | 43,15 | 20,03 |
| Desvio Padrão | 0,16 | 0,13 | 6,31 | 0,84 | 0,18 | 1,63 | 0,56 | 2,39 | 3,89 | 3,14 |
| Mínimo | 5,10 | 4,60 | 25,00 | 5,50 | 1,20 | 14,50 | 7,50 | 59,50 | 36,50 | 17,00 |
| Máximo | 5,70 | 5,00 | 46,50 | 8,50 | 1,80 | 19,50 | 9,50 | 66,50 | 50,00 | 29,00 |
| CV (%) | 2,99 | 2,79 | 18,99 | 12,12 | 12,20 | 9,38 | 6,78 | 3,77 | 9,01 | 15,69 |
| Curtose | 2,63 | 2,41 | 2,86 | 2,38 | 1,98 | 1,89 | 2,50 | 1,88 | 2,30 | 6,74 |
| Assimetria | -0,01 | 0,08 | 0,62 | -0,21 | -0,25 | -0,50 | 0,56 | -0,46 | -0,16 | 2,01 |

Tabela 5. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo (Areia, Argila e Silte (g kg^{-1})) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.

| Medidas Estatísticas | Areia | Argila | Silte | Areia | Argila | Silte |
|----------------------|-----------|--------|--------|-------------|--------|-------|
| | 0 – 0,2 m | | | 0,2 – 0,4 m | | |
| Média | 560,50 | 344,25 | 95,41 | 571,33 | 385,33 | 43,66 |
| Desvio Padrão | 15,28 | 26,25 | 30,78 | 14,86 | 26,74 | 17,35 |
| Mínimo | 535,00 | 297,00 | 51,00 | 546,00 | 346,00 | 23,00 |
| Máximo | 580,00 | 384,00 | 156,00 | 592,00 | 422,00 | 71,00 |
| CV (%) | 2,72 | 7,62 | 32,26 | 2,60 | 6,94 | 39,74 |
| Curtose | 2,00 | 2,31 | 2,48 | 1,86 | 1,68 | 1,48 |
| Assimetria | -0,53 | -0,55 | 0,53 | -0,23 | -0,09 | 0,34 |

Tabela 6. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo (Areia, Argila e Silte (g kg^{-1})) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.

| Medidas Estatísticas | Areia | Argila | Silte | Areia | Argila | Silte |
|----------------------|-----------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| | 0 – 0,2 m | | | 0,2 – 0,4 m | | |
| Média | 529,00 | 341,33 | 129,50 | 579,50 | 397,83 | 53,33 |
| Desvio Padrão | 36,21 | 28,53 | 25,48 | 29,29 | 41,31 | 20,90 |
| Mínimo | 467,00 | 306,00 | 93,00 | 504,00 | 308,00 | 26,00 |
| Máximo | 581,00 | 414,00 | 166,00 | 602,00 | 445,00 | 101,00 |
| CV (%) | 6,84 | 8,35 | 19,68 | 5,33 | 10,38 | 39,19 |
| Curtose | 1,89 | 4,58 | 1,47 | 2,32 | 2,85 | 3,43 |
| Assimetria | -0,26 | 1,32 | 0,07 | 0,29 | -0,86 | 0,63 |

No sistema ILPF, os atributos químicos com baixa dispersão foram pH em H₂O, pH em CaCl₂, CTC e V, tanto na superfície como na subsuperfície do solo (CV < 10%). Por sua vez, os atributos com média dispersão (10% < CV < 30%) foram MO, P, K, Ca e Sulfato na superfície e MO, P, K, Ca, Mg e Sulfato na subsuperfície. Na camada superficial do solo, Mg apresentou alta dispersão (CV > 30%).

No sistema IPF, entretanto, foi possível notar um comportamento menos homogêneo ao comparar a dispersão dos atributos químicos nas diferentes camadas do solo. Na subsuperfície, por exemplo, os atributos com baixa dispersão foram pH em H₂O, pH em CaCl₂ e K. Já na superfície, os atributos com essa característica foram pH em H₂O, pH em CaCl₂, Ca, Mg, CTC e V. Por sua vez, os atributos com média dispersão na superfície foram MO, P, Ca, Mg, CTC, V e Sulfato, enquanto na subsuperfície os atributos com essa característica foram MO, P, K e Sulfato.

As tendências na variação dos atributos do solo obtidas neste estudo são consistentes com as observadas por Trotter et al. (2014) e Bernardi et al. (2016, 2017 e 2018).

Com relação aos atributos físicos do solo no sistema ILFP, a areia e a argila apresentaram baixa dispersão nas duas profundidades avaliadas, enquanto o silte apresentou alta dispersão tanto na superfície quanto na subsuperfície do solo. No sistema IPF, entretanto, notou-se um comportamento diferente quanto à dispersão dos atributos nas duas profundidades. Enquanto na superfície a areia e a argila apresentaram baixa dispersão e o silte apresentou média dispersão, na subsuperfície a areia, a argila e o silte mostraram baixa, média e alta dispersão, nessa mesma ordem.

O nível de dispersão dos diferentes atributos do solo é importante no manejo de agricultura de precisão, uma vez que os atributos com alta variabilidade são potencialmente melhores candidatos a serem manejados em uma base específica do que os atributos do solo com baixa variabilidade. Por outro lado, 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, 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 químico/físico na área de estudo, considerando o valor de p obtido no processo de validação (Figuras 14 a 26).

Tabela 7. Média, para cada atributo do solo avaliado, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos para cada profundidade (0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m) a partir de processo de validação cruzada *k-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 | 0,3700 | 0,3600* | 0,3800 | 0,4100 |
| pH em CaCl ₂ | 0,1310 | 0,1225* | 0,1225 | 0,1295 |
| Matéria Orgânica | 5,5350* | 5,8300 | 6,1050 | 6,6350 |
| Fósforo | 2,8350* | 2,9500 | 2,9300 | 3,1950 |
| Potássio | 0,8345 | 0,8065 | 0,7145 | 0,6750* |
| Cálcio | 6,2750 | 5,7100 | 5,4000 | 5,3350* |
| Magnésio | 1,7955 | 1,7145* | 1,8415 | 1,8285 |
| CTC | 5,0000 | 4,6000 | 4,6000 | 4,4000* |
| V | 4,8100 | 4,3200* | 4,4300 | 4,3300 |
| Sulfato | 2,6750* | 3,0000 | 3,4000 | 3,5750 |
| Areia | 22,0500 | 18,8500* | 19,2500 | 19,1500 |
| Argila | 25,4000 | 25,2500* | 25,6000 | 25,9000 |
| Silte | 21,0000 | 21,5000 | 20,8500* | 20,9500 |

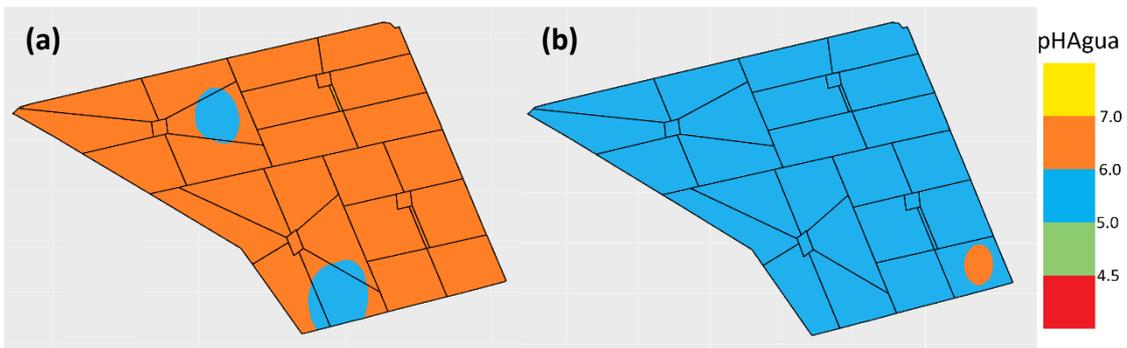


Figura 14. Variação espacial do atributo químico do solo ‘pH em H₂O’ na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).

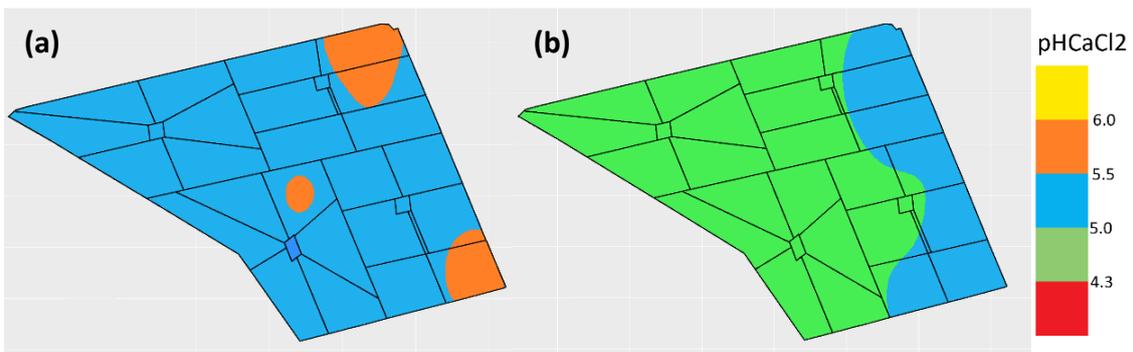


Figura 15. Variação espacial do atributo químico do solo ‘pH em CaCl₂’ na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).

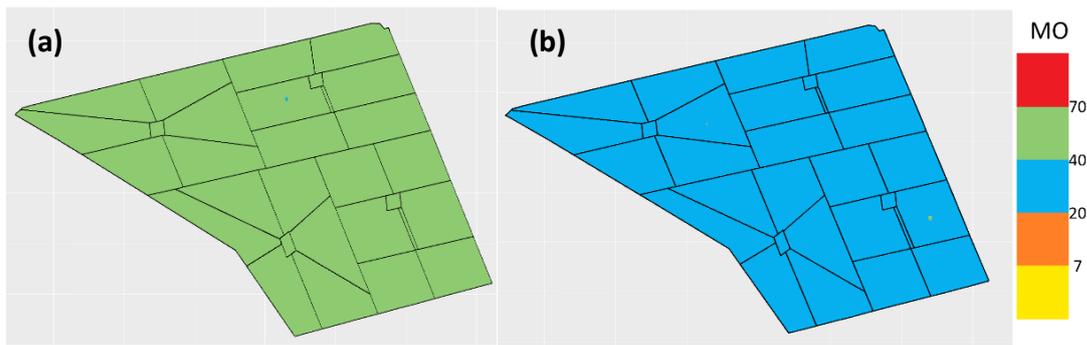


Figura 16. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Matéria Orgânica (MO)’ (g dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).

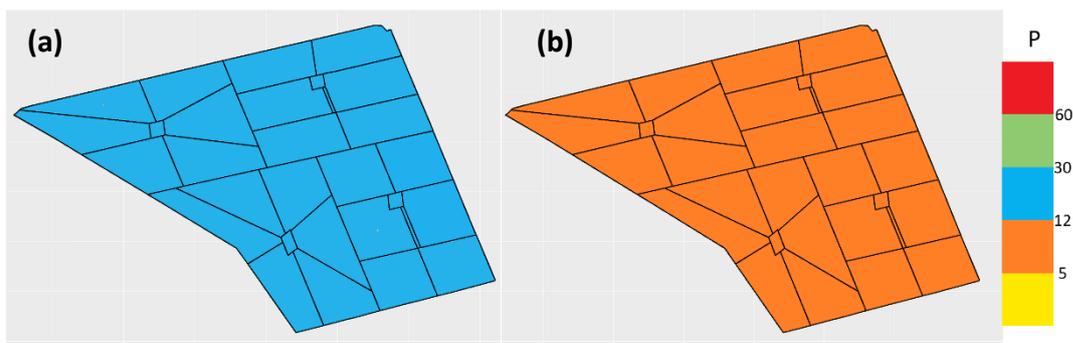


Figura 17. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Fósforo (P)’ (mg dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).

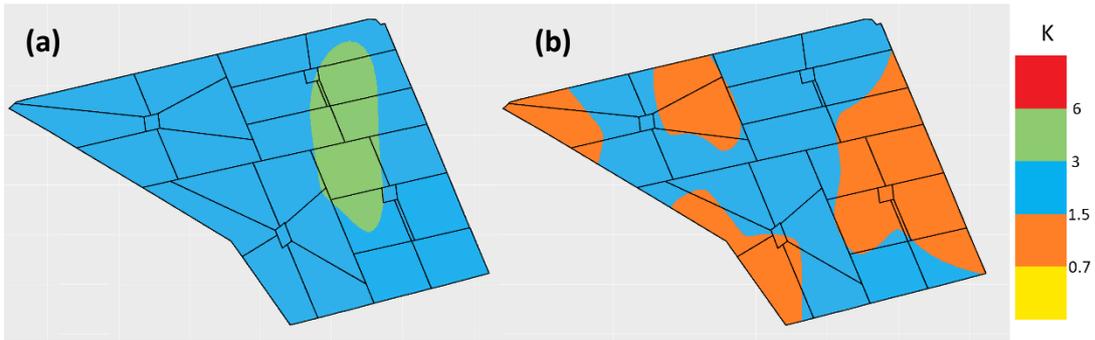


Figura 18. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Potássio (K)’ (mmolc dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).

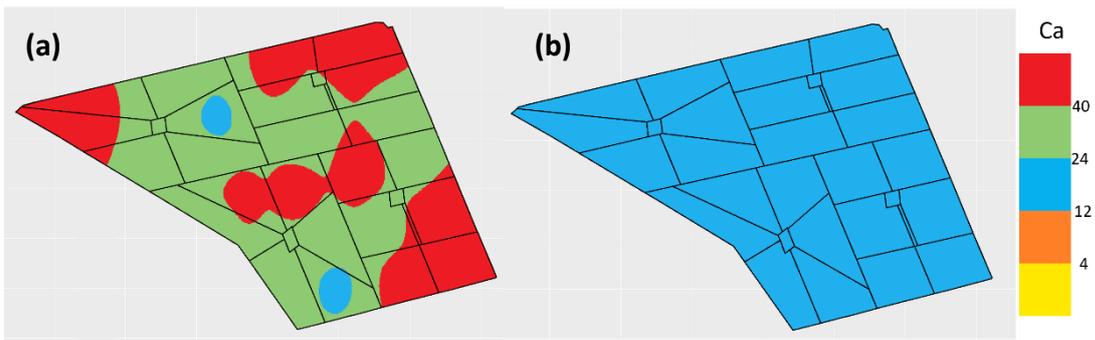


Figura 19. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Cálcio (Ca)’ (mmolc dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).

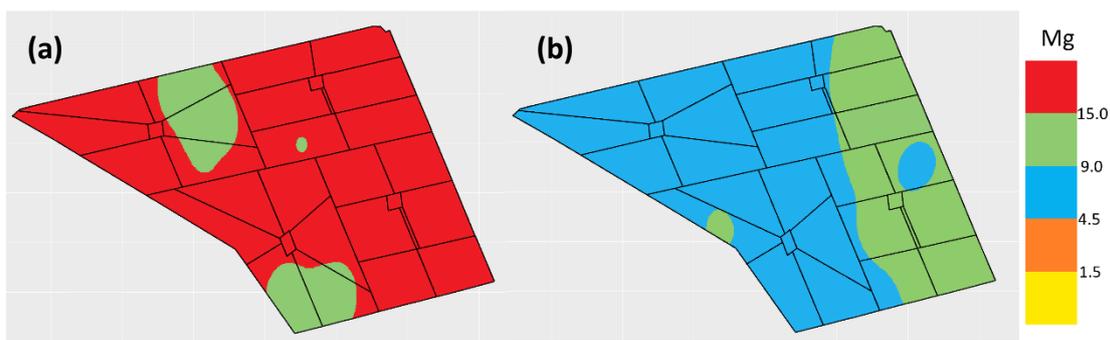


Figura 20. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Magnésio (Mg)’ (mmolc dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).

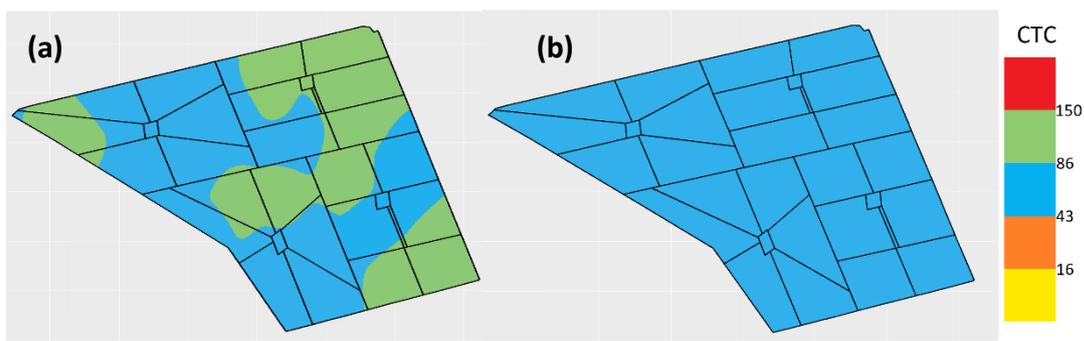


Figura 21. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Capacidade de Troca Catiônica (CTC)’ (mmolc dm^{-3}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999).

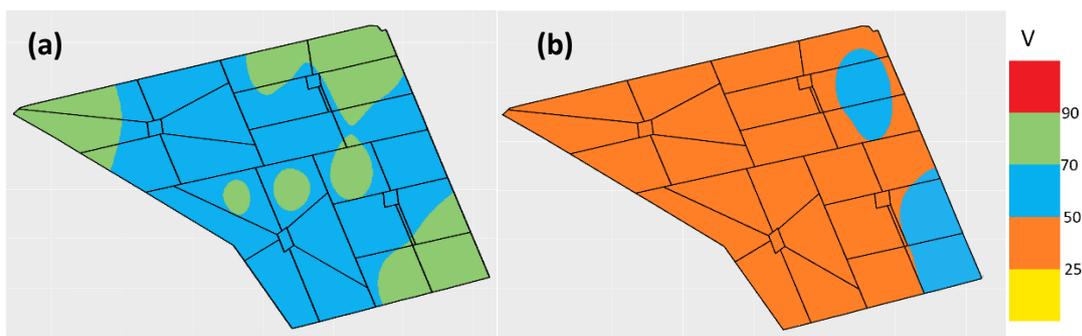


Figura 22. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Saturação por base (V)’ (%) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta (RAIJ et al., 1996).

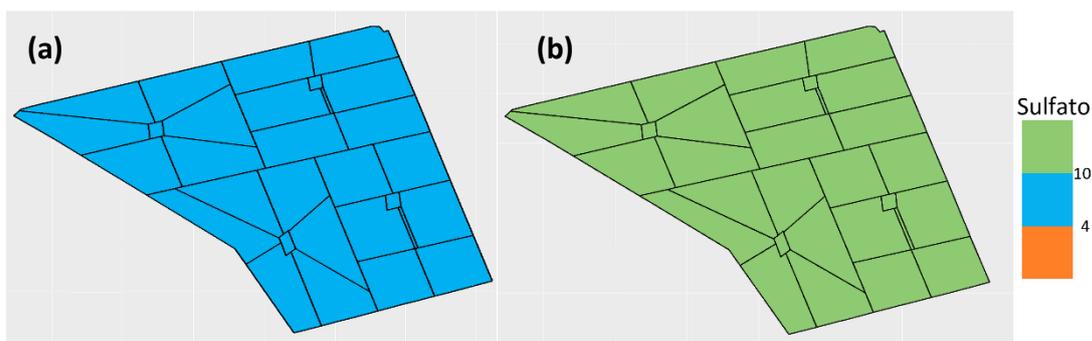


Figura 23. Variação espacial do atributo químico do solo ‘Sulfato’ (mg dm⁻³) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: laranja – baixa; azul – média; verde – alta (REIN; SOUSA, 2004).

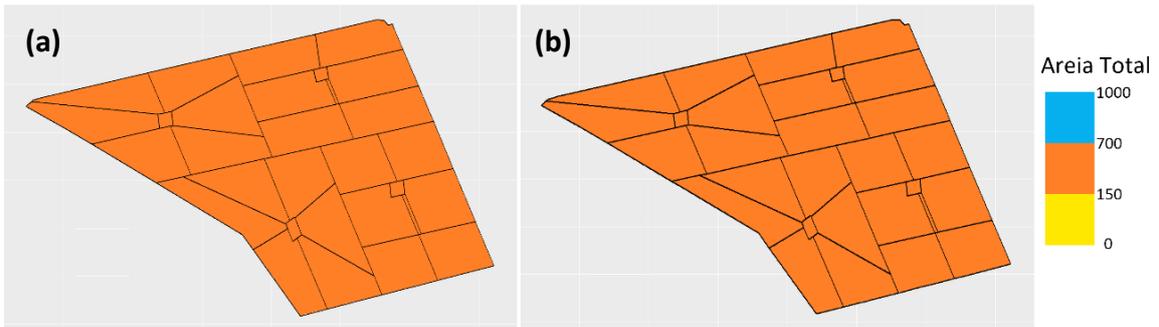


Figura 24. Variação espacial do atributo físico do solo ‘Areia’ (g kg^{-1}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.

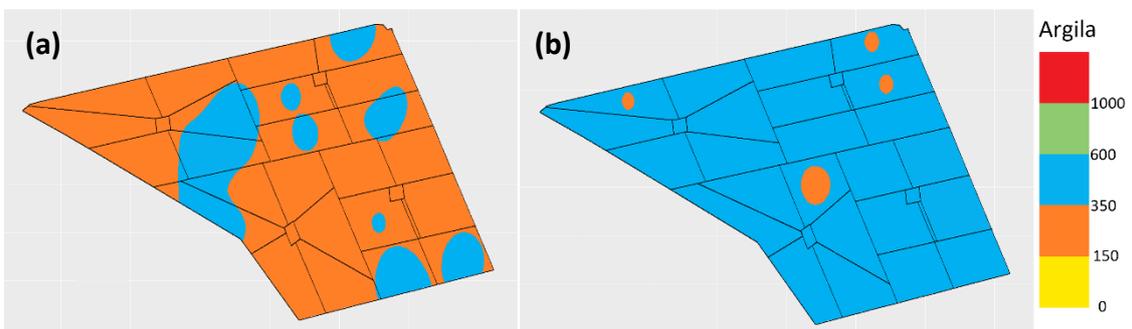


Figura 25. Variação espacial do atributo físico do solo ‘Argila’ (g kg^{-1}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.

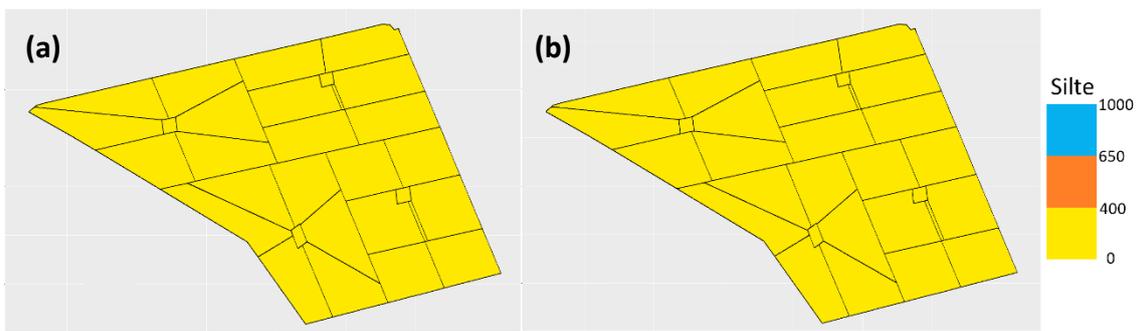


Figura 26. Variação espacial do atributo físico do solo ‘Silte’ (g kg^{-1}) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m.

O pH é um indicador da acidez ou alcalinidade do solo. A condição ideal para cultivos agrícolas é que o seu valor esteja entre 6 e 7, o que significa que os nutrientes se mantêm mais disponíveis no solo. O pH pode ser aferido tanto em H₂O como em CaCl₂, sendo que, geralmente, a leitura do pH em CaCl₂ é cerca de 0,5 ponto abaixo da leitura em H₂O, e uma leitura é complementar à outra, sendo que as duas são consideradas de extrema importância (RAIJ et al., 2001; PRIMAVESI et al., 2005; LIMA et al., 2006).

Observando os mapas gerados para o pH do solo em H₂O (Figura 14), observa-se que na superfície os valores interpolados permaneceram no intervalo de 6 a 7, a menos de duas pequenas áreas dentro do sistema IPF, em que os valores ficaram pouco abaixo, no intervalo de 5 a 6. Na subsuperfície, por sua vez, os valores interpolados para este atributo foram menores quando comparados à superfície, estando no intervalo de 5 a 6, a menos de uma pequena região dentro do sistema ILPF, em que os valores se mantiveram dentro do intervalo de 6 a 7. De forma similar, por meio da estatística descritiva dos dados, obteve-se uma média de 6,24 para o pH do solo em H₂O na superfície no sistema ILPF, sendo que essa média no sistema IPF foi de 6,07. Já na subsuperfície, a média do pH em H₂O no sistema ILPF foi de 5,81 e no sistema IPF de 5,4 (Tabelas 3 e 4). Assim, concluiu-se que, em média, os valores de pH do solo estão dentro da condição considerada ideal no que diz respeito à disponibilidade de nutrientes (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999; LIMA et al., 1996).

Já nos mapas gerados para o pH em CaCl₂ (Figura 15), é possível notar que na superfície os valores estiveram, em sua maioria, na faixa de 5 a 5,5 e, em duas pequenas regiões do sistema ILPF, os valores permaneceram no intervalo de 5,5 a 6, o que também ocorreu em uma pequena região do sistema IPF. Na subsuperfície, porém, no sistema IPF, o pH esteve no intervalo de 4,3 a 5, o que ocorreu em praticamente metade da região correspondente ao sistema ILPF. Na outra metade deste último sistema, porém, os valores permaneceram na faixa de 5 a 5,5. Pela estatística dos dados, encontrou-se uma média do pH em CaCl₂ na superfície do ILPF igual a 5,45, sendo ela igual a 5,34 no sistema IPF. Já na subsuperfície, a média do atributo no ILPF foi de 5,07, e no IPF de 4,78 (Tabelas 3 e 4).

Os valores mais altos de pH na superfície podem ser explicados devido ao efeito positivo da calagem realizada anualmente na área em estudo. Apesar do calcário ser aplicado à lanço, em área total e sem incorporação, observa-se um efeito de correção,

especialmente na camada superficial (0 – 0,2 m). Esta redução da acidez do solo pela calagem já havia sido demonstrada por Caires et al. (1998), Rheinheimer et al. (2000), Cantarella et al. (2002) e Kaminski et al. (2005). Além desse fator, na superfície ocorre também uma maior decomposição de matéria orgânica, o que também interfere no pH do solo (MELLO; VITTI, 2002), uma vez que os microrganismos que a decompõe são responsáveis por corrigir as medidas de pH (TREVISAN et al., 2002).

O fato de que em algumas regiões do sistema ILPF o pH é maior quando comparado aos valores obtidos no sistema IPF pode ser justificado devido a um maior depósito de resíduos vegetais no primeiro sistema, uma vez que nele, além da presença das árvores, ocorre também o cultivo do milho (PEZZOPANE et al., 2017; 2020). Segundo Franchini et al. (2001), é possível notar aumento do pH conforme ocorre a elevação de depósito dos resíduos vegetais no solo.

A matéria orgânica, por sua vez, tem sido sugerida como um indicador chave da qualidade do solo, considerando sua influência nos demais atributos essenciais para que o solo desempenhe bem as suas funções (CONCEIÇÃO et al., 2005; BERNARDI et al., 2023). Analisando os mapas de matéria orgânica gerados pelo processo de interpolação, observa-se que, na superfície, todos os valores se enquadraram na faixa classificada como alta para este atributo, sendo que na subsuperfície todos os valores se enquadraram dentro da faixa considerada média (Figura 16). Corroborando com este comportamento, a média de matéria orgânica na superfície no sistema ILPF foi igual a $47,62 \text{ g dm}^{-3}$ e, no sistema IPF, de $51,44 \text{ g dm}^{-3}$. Já na subsuperfície, a média de matéria orgânica nos sistemas ILPF e IPF foi de $30,75$ e $33,24 \text{ g dm}^{-3}$, respectivamente (Tabelas 3 e 4).

De acordo com Stockmann et al. (2013), a matéria orgânica do solo apresenta em média 58% de carbono orgânico e, segundo Torres et al. (2014), a quantidade de carbono orgânico do solo está diretamente associada à quantidade de material vegetal presente no solo. Além disso, de acordo com Freitas et al. (2020), o teor de matéria orgânica também é influenciado pelos resíduos de animais aportados no solo. Dessa forma, a quantidade de matéria orgânica na área de estudo pode ser justificada devido a maior diversificação e produção de resíduos vegetais e animais trazidos pelos sistemas integrados. Sobre o teor de matéria orgânica ser superior na superfície, isso já era esperado, uma vez que há uma deposição maior de resíduos animais e vegetais na camada superficial do solo (FREITAS

et al., 2020). A revisão de Bernardi et al. (2023) também indicou em diferentes regiões o aumento nos teores de carbono nos solos sob cultivo de sistemas ILPF.

Com relação ao fósforo, é sabido que o seu baixo nível é um dos principais problemas no estabelecimento e na manutenção de pastagens nos solos tropicais (BERNARDI et al., 2012). Nos mapas gerados para este atributo nota-se que, na superfície, os valores interpolados em toda a área estiveram no intervalo classificado como médio, enquanto na subsuperfície os valores interpolados estiveram dentro do intervalo classificado como baixo (Figura 17). Em média, obteve-se um valor de fósforo na superfície igual a $14,79 \text{ mg dm}^{-3}$ no sistema ILPF e $15,75 \text{ mg dm}^{-3}$ no sistema IPF. Na subsuperfície, estes valores foram de $7,50 \text{ mg dm}^{-3}$ no sistema ILPF e $6,99 \text{ mg dm}^{-3}$ no sistema IPF (Tabelas 3 e 4).

A disponibilidade do fósforo está diretamente relacionada ao grau de intemperização, mineralogia, textura, teor de matéria orgânica, características físico-químicas, da atividade biológica e da vegetação predominante (WALKER; SYERS, 1976; CROSS; SCHLESINGER, 1995) e adubação (CANTARELLA et al., 2002; BERNARDI et al., 2017; 2019). Dessa forma, é possível inferir que o maior teor de fósforo na camada superficial do solo está relacionado, dentre outros fatores, a uma maior presença de matéria orgânica nessa camada do solo, bem como o efeito da adubação fosfatada realizada anualmente na área de estudo (BERNARDI et al., 2017; 2019).

Por sua vez, nos mapas gerados para o potássio, observa-se que na superfície, na maior parte da área, os seus valores estiveram no intervalo classificado como médio, sendo que em uma parte do sistema ILPF os valores estiveram no intervalo considerado alto (Figura 18). Em média, obteve-se um valor de potássio na superfície igual a $3,12 \text{ mmolc dm}^{-3}$ no sistema ILPF e igual a $2,90 \text{ mmolc dm}^{-3}$ no sistema IPF (Tabelas 3 e 4). Na subsuperfície, na maior parte da área, os valores para este atributo também estiveram no intervalo classificado como médio, mas em algumas porções de terra dos dois sistemas, os valores podem ser classificados como baixos (Figura 18). De modo geral, obteve-se uma média de potássio na subsuperfície igual a $1,69 \text{ mmolc dm}^{-3}$ no sistema ILPF e $1,51 \text{ mmolc dm}^{-3}$ no sistema IPF (Tabelas 3 e 4).

Essa diferença entre as profundidades ocorreu, pois, a dinâmica do potássio depende, dentre outros fatores, do pH, da CTC e da relação $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}/\text{K}$, sendo que esses atributos regulam a sua disponibilidade (BERNARDI et al., 2012). Na área de

estudo, todos esses fatores estão em uma maior escala na superfície, fazendo, assim, com que o potássio também fique em maior quantidade na camada superficial do solo. Isso também justifica um valor maior de potássio em algumas regiões do sistema ILPF.

Com relação ao cálcio, sabe-se que se trata de um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, além de exercer função bioquímica (TAIZ et al., 2017; REIS, 1998). A principal forma de fornecer cálcio para a planta é por meio da calagem, isto é, pela aplicação de calcário no solo, que além de corrigir a acidez, também atua na precipitação do Al tóxico e fornece Ca e Mg (REIS, 1998; CANTARELLA et al., 2002; BERNARDI et al., 2012). Nos mapas gerados pela interpolação para este atributo (Figura 19), foi grande a diferença entre os resultados obtidos para cada uma das profundidades, o que novamente reforça o efeito da calagem superficial, indicando que o efeito em profundidade do calcário é mais lento na subsuperfície (KAMINSKI et al., 2005). Na superfície, o valor médio de cálcio no sistema ILPF foi igual a 41,37 mmolc dm⁻³ no sistema ILPF e 33,75 mmolc dm⁻³ no sistema IPF, enquanto na subsuperfície esta média foi de apenas 20,20 mmolc dm⁻³ no ILPF e 17,41 mmolc dm⁻³ no IPF (Tabelas 3 e 4).

Na superfície, no sistema IPF, é possível identificar algumas porções de terra dentro da faixa de cálcio considerada como muito alta, uma porção pouco maior dentro da faixa classificada como alta, e duas porções menores classificadas dentro da faixa média. No sistema ILPF, porém, nessa mesma profundidade, toda a região esteve dentro das faixas classificadas como muito alta e alta, respectivamente. Já na subsuperfície, não houve variabilidade espacial em relação as classes para este atributo, e toda a região foi classificada dentro da faixa considerada como média (Figura 19).

Segundo Foelkel (2005), o cálcio é um elemento muito reciclado, apesar de não ser muito móvel, e está presente em tecidos como os galhos e as cascas, sendo encontrado nos restos vegetais que ficam depositados no solo. Além disso, para que a decomposição do elemento seja mais rápida, é necessário ter uma umidade elevada no solo. Esses fatores também justificam uma maior quantidade de cálcio na camada superficial do solo e no sistema ILPF, uma vez que este sistema produz mais resíduos vegetais, por ter em seu sistema integrado também o componente da lavoura.

No que concerne ao magnésio, os mapas gerados para este atributo (Figura 20) mostram que, na superfície, em praticamente quase toda a extensão correspondente ao

sistema ILPF, o teor de magnésio esteve no intervalo considerado muito alto, sendo que na área correspondente ao sistema IPF, os valores obtidos também estiveram, em maioria, dentro desta faixa, mas em uma extensão significativa da área os valores ficaram na faixa classificada como alta. A média de magnésio na superfície foi de 19,70 mmolc dm⁻³ no sistema ILPF e de 16,20 mmolc dm⁻³ no sistema IPF (Tabelas 3 e 4). Já na subsuperfície, os valores de magnésio baixaram, e é possível notar que, em praticamente toda a extensão do sistema IPF, os teores estiveram dentro da faixa média e, no sistema ILPF, os valores intercalaram entre as faixas média e alta. A média de magnésio na subsuperfície foi de 9,37 mmolc dm⁻³ no ILPF e de 8,36 mmolc dm⁻³ no IPF.

Conforme descrito por Favarin et al. (2013), é possível apontar que a presença do magnésio é maior no sistema ILPF pelo fato desse sistema ter maior presença de biomassa seca quando comparado ao IPF, devido ao fato desse sistema ter também incorporado à sua área a cultura do milho. A diferença no teor de magnésio entre as profundidades, por sua vez, pode ser justificada, além da maior presença de biomassa seca na subsuperfície, a uma maior quantidade de matéria orgânica na camada superficial do solo (REIS, 1998).

A capacidade de troca catiônica (CTC) é um dos parâmetros que melhor define a fertilidade do solo (BERNARDI et al, 2019). A CTC é função da mineralogia do solo, da matéria orgânica e do pH, e promove a retenção de cátions (K, Ca e Mg) e diminui as perdas por lixiviação destes nutrientes. Por meio dos mapas gerados pela interpolação, pode-se dizer que a capacidade de retenção de cátions da área de estudo é de média a alta na superfície e média na subsuperfície (Figura 21). Devido ao maior teor de matéria orgânica e pH mais elevado, na superfície houve maior retenção de cátions que na subsuperfície. De modo geral, considerando os dois sistemas produtivos, obteve-se um valor de CTC na superfície igual a 83,77 mmolc dm⁻³ no sistema ILPF e igual a 78,83 mmolc dm⁻³ no sistema IPF e, na subsuperfície, um valor de CTC igual a 62,54 mmolc dm⁻³ no ILPF e igual a 63,45 mmolc dm⁻³ no IPF (Tabelas 3 e 4).

Esse resultado está diretamente associado aos obtidos para o teor de matéria orgânica na área. De acordo com Baldotto e Baldotto (2018) e Bernardi et al. (2023), aumentos nos níveis de matéria orgânica melhoram a fertilidade do solo, uma vez que promovem alterações nas suas propriedades, dentre elas a CTC. A respeito da variabilidade espacial obtida para este atributo na superfície, verifica-se que os maiores teores de CTC foram obtidos, em sua maioria, nas áreas correspondentes ao sistema ILPF,

o que se justifica pelo fato de que neste sistema há uma maior diversificação de resíduos vegetais, devido ao fato de ele integrar todos os tipos de sistemas (lavoura-pecuária-floresta).

Os mapas de superfície gerados para a saturação por base (Figura 22) mostram que, na superfície, seus valores intercalaram entre as faixas consideradas média e alta, com uma média de 71,25% no sistema ILPF e de 65,35% no sistema IPF (Tabelas 3 e 4), sendo que no sistema ILPF há maior predomínio de valores na faixa alta que no sistema IPF. Por sua vez, na subsuperfície, os valores para a saturação baixaram, intercalando entre as faixas baixa e média, com uma média de 50% no sistema ILPF e de 43,15% no sistema IPF, sendo que os valores correspondentes à faixa média apareceram somente no sistema ILPF. A diminuição da saturação por base na subsuperfície do solo ocorre, pois, a presença de matéria orgânica, cálcio, magnésio e potássio diminuíram com a profundidade, e a saturação está diretamente associada a eles (RONQUIM, 2020). Em relação ao ILPF ter maior saturação por base que o IPF, isso se deve ao fato desse sistema ter maior quantidade de cátions, Ca^{2+} e Mg^{2+} , e o valor da saturação por base está diretamente associada a esses componentes (AZEVEDO, 2019).

Com relação à quantidade de sulfato, nota-se pela interpolação espacial que ela é maior na subsuperfície que na superfície, ao contrário do que ocorreu para todos os outros atributos químicos avaliados (Figura 23). Em superfície, encontrou-se uma média de sulfato de $8,45 \text{ mg dm}^{-3}$ no sistema ILPF e de $8,50 \text{ mg dm}^{-3}$ no sistema IPF, enquanto na subsuperfície encontrou-se uma média de sulfato igual a $18,37 \text{ mg dm}^{-3}$ no ILPF e $20,03 \text{ mg dm}^{-3}$ no IPF (Tabelas 3 e 4). Em nenhuma das profundidades foi observada diferença entre os dois sistemas produtivos.

No que diz respeito aos atributos físicos que foram avaliados, notou-se que em ambas as profundidades a quantidade de areia no solo se manteve no intervalo de 150 a 700 g kg^{-1} (Figura 24), com uma média de $560,5 \text{ g kg}^{-1}$ na superfície do sistema ILPF e 529 g kg^{-1} na superfície do sistema IPF, enquanto na subsuperfície essas médias foram iguais a $571,33 \text{ g kg}^{-1}$ no ILPF e $579,5 \text{ g kg}^{-1}$ no IPF (Tabelas 5 e 6). Em relação a quantidade de silte, os valores interpolados se mantiveram dentro do intervalo de 0 a 400 g kg^{-1} em ambas as profundidades avaliadas (Figura 26), com uma média de $95,41 \text{ g kg}^{-1}$ na superfície do ILPF e $129,5 \text{ g kg}^{-1}$ na superfície do IPF, sendo essas médias iguais a

43,66 g kg⁻¹ na subsuperfície do ILPF e 53,33 g kg⁻¹ na subsuperfície do IPF (Tabelas 5 e 6).

Por fim, para a quantidade de argila, notou-se a sua variabilidade espacial, embora baixa, nas duas profundidades estudadas, sendo que os valores obtidos na superfície foram inferiores aos obtidos na subsuperfície (Figura 25). Na profundidade 0 – 0,2 m, o teor de argila na maior parte da área esteve localizado no intervalo de 150 a 350 g kg⁻¹, com uma média de 344,35 g kg⁻¹ no sistema ILPF e 341,33 no sistema IPF (Tabelas 5 e 6). Por sua vez, na profundidade 0,2 – 0,4 m, o teor de argila esteve, na maior parte da área, no intervalo de 350 a 600 g kg⁻¹, com uma média de 385,33 g kg⁻¹ no ILPF e 397,83 g kg⁻¹ no IPF. Em nenhuma das profundidades, entretanto, foi encontrada diferença significativa entre os dois sistemas.

Calderano Filho et al. (1998) observaram em levantamento pedológico da área de estudo que o teor de argila na área variou entre os valores de 200 a 350 g kg⁻¹. A partir do presente trabalho, entretanto, foi possível verificar na superfície pequenas porções de terra, para ambos os sistemas de produção, em que o teor de argila esteve localizado na faixa entre 350 e 600 g kg⁻¹. Esta diferença deve-se à escala de amostragem, uma vez que no presente trabalho houve um maior detalhamento, pois avaliou-se um talhão da propriedade. Na subsuperfície, por sua vez, na maior parte de ambos os sistemas, o teor de argila esteve localizado na faixa de 350 a 600 g kg⁻¹. Segundo Silva et al. (2021), a matéria orgânica do solo em suas frações é responsável por favorecer a melhoria da qualidade estrutural do solo, bem como influenciar na flocculação de argila no solo. Desse modo, pode-se dizer que esse aumento também foi reflexo da implantação dos sistemas integrados na área, o que levou a um aumento de resíduos vegetais e animais no solo, ocasionando desse modo um aumento na sua matéria orgânica.

5.2 Resistividade elétrica do solo

Sobre os dados referentes à resistividade elétrica do solo, é possível notar a presença de *outliers* no conjunto, para as três profundidades avaliadas (Figura 27). Após a retirada de tais pontos, foi feita a estatística descritiva referente aos dados,

considerando cada um dos sistemas integrados ILPF e IPF individualmente (Tabelas 8 e 9).

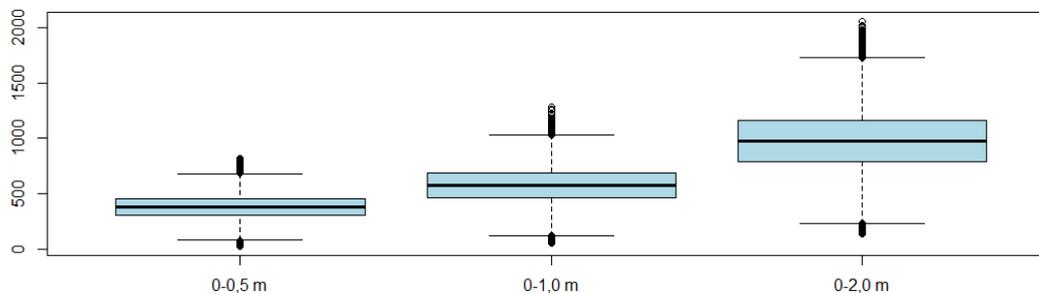


Figura 27. Boxplots da resistividade elétrica do solo (Ω m) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m.

Tabela 8. Estatística descritiva da resistividade elétrica do solo (Ω m) no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m.

| Medidas Estatísticas | Profundidade | | |
|------------------------------|--------------|-----------|-----------|
| | 0 – 0,5 m | 0 – 1,0 m | 0 – 2,0 m |
| Média | 368,59 | 552,58 | 928,76 |
| Desvio Padrão | 114,16 | 164,07 | 276,02 |
| Mínimo | 77,91 | 131,20 | 218,00 |
| Máximo | 714,65 | 1089,70 | 1712,00 |
| Coefficiente de Variação (%) | 30,97 | 29,69 | 29,71 |
| Curtose | 2,60 | 2,62 | 2,59 |
| Assimetria | -0,01 | -0,13 | -0,25 |

Tabela 9. Estatística descritiva da resistividade elétrica do solo (Ω m) no sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nas profundidades 0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m.

| Medidas Estatísticas | Profundidade | | |
|------------------------------|--------------|-----------|-----------|
| | 0 – 0,5 m | 0 – 1,0 m | 0 – 2,0 m |
| Média | 360,49 | 544,77 | 940,04 |
| Desvio Padrão | 129,42 | 186,82 | 312,74 |
| Mínimo | 34,23 | 89,09 | 140,30 |
| Máximo | 813,66 | 1169,24 | 2003,00 |
| Coefficiente de Variação (%) | 35,90 | 34,29 | 33,26 |
| Curtose | 3,10 | 3,05 | 3,09 |
| Assimetria | 360,49 | 544,77 | 940,04 |

Com relação à dispersão dos dados de resistividade no sistema ILPF, eles apresentaram alta dispersão na profundidade 0 – 0,5 m ($CV > 30\%$), e média dispersão nas profundidades 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m ($10\% < CV < 30\%$). É válido ressaltar, entretanto, que embora nas duas últimas profundidades os valores do coeficiente de variação estiveram na faixa de dispersão considerada média, eles quase atingiram o patamar de 30%. Por sua vez, no sistema IPF, a resistividade elétrica sempre apresentou alta dispersão ($CV > 30\%$), em cada uma das profundidades avaliadas.

Sobre a média dos valores de resistividade, observou-se que ela aumentou com o aumento da profundidade, em ambos os sistemas produtivos (Tabelas 8 e 9). No sistema ILPF, por exemplo, passou-se de uma resistividade elétrica média de 368,59 Ω m na profundidade 0 – 0,5 m, para 552,58 Ω m na profundidade 0 – 1,0 m e 928,76 Ω m na profundidade 0 – 2,0 m. No sistema IPF, notou-se o mesmo comportamento dos dados, com uma resistividade média de 360,49 Ω m na profundidade 0 – 0,5 m, para 544,77 Ω m na profundidade 0 – 1,0 m e 940,04 Ω m na profundidade 0 – 2,0 m. Estes valores estão próximos dos observados por Bernardi et al. (2019) na mesma área.

Terminada a análise descritiva dos dados, foi realizado o processo de validação cruzada para determinar o valor de p a ser utilizado na interpolação IDW para este atributo (Tabela 10). Os mapas de variabilidade espacial da resistividade na área de estudo a partir do valor de p escolhido estão apresentados a seguir (Figura 28).

Tabela 10. Média, para a resistividade elétrica do solo, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos para cada profundidade (0 – 0,5 m, 0 – 1,0 m e 0 – 2,0 m) a partir de processo de validação cruzada *k-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 |
| Resistividade elétrica | 150,667 | 15,867 | 11,253 | 10,937* |

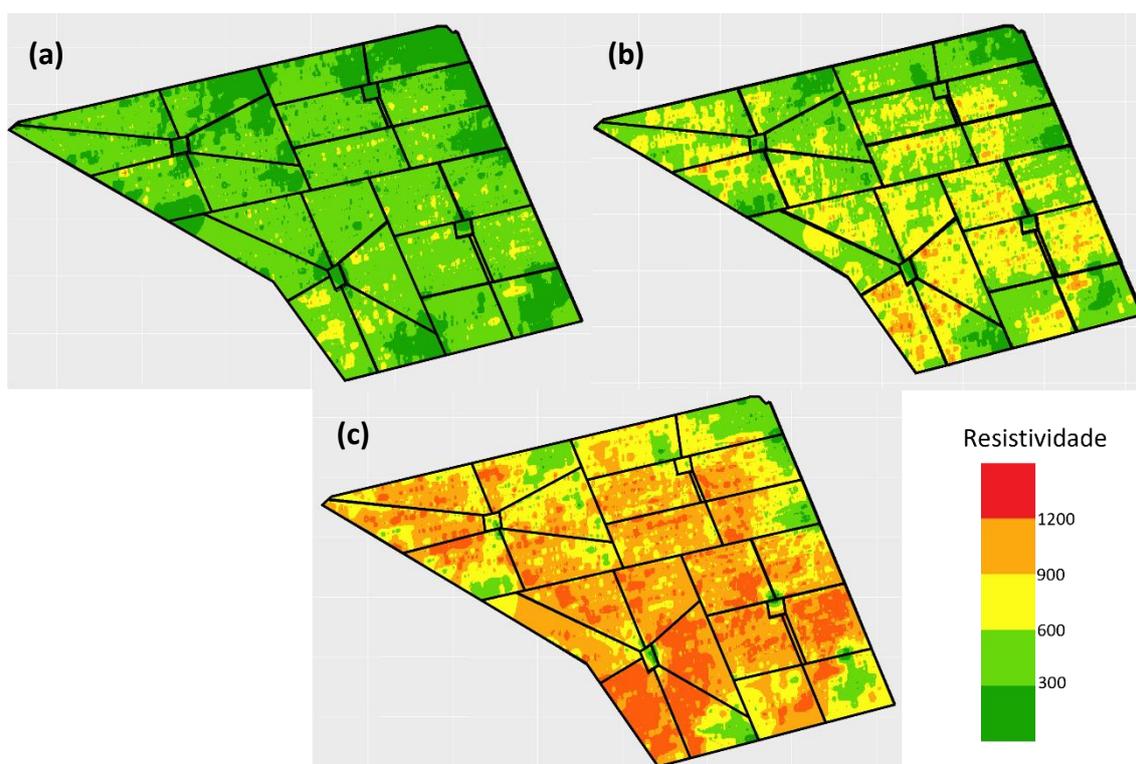


Figura 28. Variabilidade espacial da resistividade elétrica do solo (RE) (Ω m) na área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil. (a) Profundidade 0 – 0,5 m. (b) Profundidade 0 – 1,0 m. (c) Profundidade 0 – 2,0 m.

Nos mapas gerados é possível notar que houve um aumento da resistividade com o aumento da profundidade, nos dois sistemas produtivos avaliados (Figura 28), corroborando com os resultados obtidos com a análise descritiva dos dados coletados na área. Bernardi et al. (2019), ao estudarem a resistividade elétrica do solo em sistema agropecuário integrado de produção em dois períodos (seco e úmido, respectivamente),

observaram que a resistividade do solo diminuiu conforme ocorreu o aumento da quantidade de água no solo. A relação inversamente proporcional entre a quantidade de água no solo e a sua resistividade elétrica também foi observada por Samouëlian et al. (2005).

Portanto, pode-se inferir que na área de estudo as camadas superficiais do solo retêm maior quantidade de água, nos dois sistemas integrados, uma vez que a sua resistividade foi menor, comportamento este também observado no estudo de Bernardi et al. (2019), nos dois períodos considerados na pesquisa.

Os menores valores da resistividade elétrica observados na superfície do solo da área de estudo, em ambos os sistemas ILPF e IPF, podem ser justificados devido às características próprias aos sistemas integrados de produção agropecuária. De acordo com Fonseca et al. (2018), por exemplo, uma maior umidade do solo está diretamente associada à presença de vegetação no sistema, uma vez que ela auxilia na manutenção da temperatura ambiental, na redução da incidência de radiação solar, bem como numa menor evaporação da água presente nas camadas superficiais do solo (SANTOS et al., 2020). Ainda, a matéria orgânica presente na superfície do solo dos sistemas integrados, decorrente do depósito dos resíduos animais e vegetais, também é responsável por proporcionar melhor retenção de água pelo solo e, conseqüentemente, por aumentar os seus teores de umidade (COSTA; ALVEZ; SOUSA, 2016).

Além disso, durante o período de 30 dias que antecedeu a coleta dos dados de resistividade elétrica na área de estudo, foi registrado um acumulado de 97,2 mm de chuva (Figura 8), indicando assim uma maior quantidade de água no solo.

Por fim, não foi observada uma diferença significativa entre os sistemas ILPF e IPF quanto à resistividade elétrica do solo, uma vez que a distribuição dos valores do atributo se manteve homogênea nos dois sistemas, para as três profundidades avaliadas, o que foi observado tanto na estatística descritiva dos dados (Tabelas 8 e 9), bem como nos mapas de variabilidade espacial do atributo (Figura 28).

5.3 Altura, diâmetro à altura do peito e volume de eucaliptos

Para os dados referentes aos atributos da vegetação, foi verificada a presença de *outliers* apenas para o volume dos eucaliptos (Figura 29). Após a retirada de tais pontos do conjunto, procedeu-se com o cálculo das estatísticas dos dados, considerando cada sistema integrado individualmente (Tabelas 11 e 12). Também foi realizado o processo validação cruzada para determinar o valor de p a ser utilizado na interpolação, para cada atributo (Tabela 13). Os mapas de variabilidade espacial gerados a partir dos valores de p escolhidos estão apresentados a seguir (Figura 30).

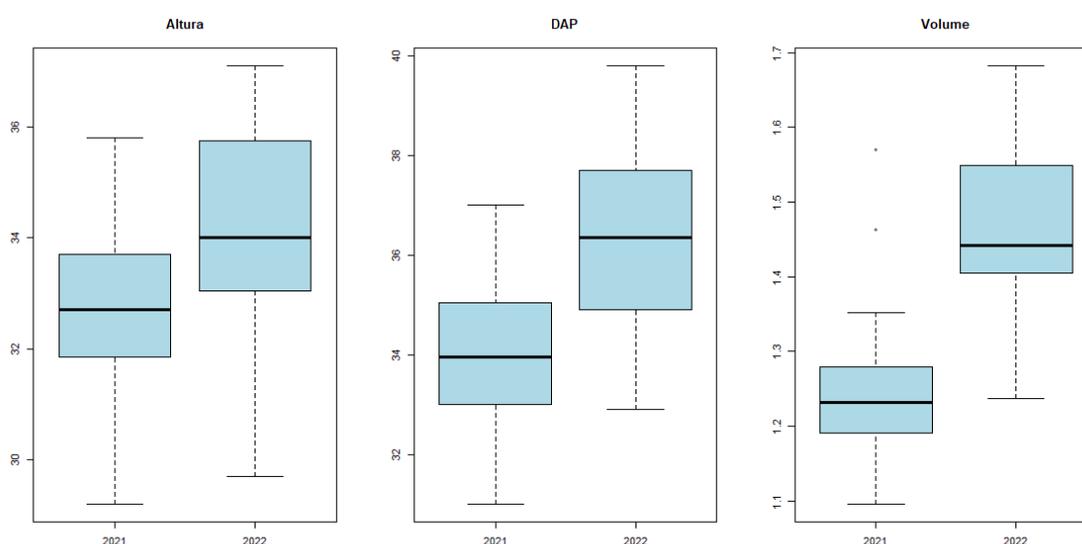


Figura 29. Boxplots da altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m³) de eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e no sistema de integração-pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil, nos períodos de abril/2021 e abril/2022.

Tabela 11. Estatística descritiva dos dados de eucaliptos – altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m³) – no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

| Medidas Estatísticas | Abril/2021 | | | Abril/2022 | | |
|------------------------------|------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| | Altura | DAP | Volume | Altura | DAP | Volume |
| Média | 33,22 | 33,72 | 1,25 | 33,91 | 35,92 | 1,43 |
| Desvio Padrão | 0,11 | 1,81 | 0,10 | 1,82 | 2,06 | 0,11 |
| Mínimo | 30,70 | 31,00 | 1,10 | 29,70 | 32,90 | 1,24 |
| Máximo | 35,80 | 37,00 | 1,57 | 36,30 | 39,80 | 1,66 |
| Coefficiente de Variação (%) | 4,53 | 5,37 | 8,18 | 5,37 | 5,74 | 7,50 |
| Curtose | 2,14 | 2,19 | 4,26 | 3,50 | 2,28 | 1,41 |
| Assimetria | 0,10 | 0,27 | 1,79 | -0,88 | 0,26 | 0,37 |

Tabela 12. Estatística descritiva dos dados de eucaliptos – altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m³) – do sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

| Medidas Estatísticas | Abril/2021 | | | Abril/2022 | | |
|------------------------------|------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| | Altura | DAP | Volume | Altura | DAP | Volume |
| Média | 32,30 | 34,24 | 1,25 | 34,15 | 36,65 | 1,49 |
| Desvio Padrão | 0,10 | 1,49 | 0,10 | 1,86 | 1,58 | 0,11 |
| Mínimo | 29,20 | 31,90 | 1,10 | 30,80 | 34,30 | 1,32 |
| Máximo | 34,90 | 36,80 | 1,57 | 37,10 | 39,00 | 1,68 |
| Coefficiente de Variação (%) | 4,98 | 4,36 | 8,15 | 5,45 | 4,31 | 7,43 |
| Curtose | 2,47 | 2,42 | 3,52 | 2,12 | 1,90 | -0,71 |
| Assimetria | -0,36 | 0,15 | 1,61 | -0,13 | 0,05 | -0,17 |

Tabela 13. Média, para os atributos da vegetação, entre os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) obtidos em cada período de avaliação (abril/2021 e abril/2022) a partir de processo de validação cruzada *k-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 |
| Altura | 1,350* | 1,365 | 1,410 | 1,470 |
| DAP | 1,445* | 1,540 | 1,665 | 1,760 |
| Volume | 0,086* | 0,094 | 0,099 | 0,102 |

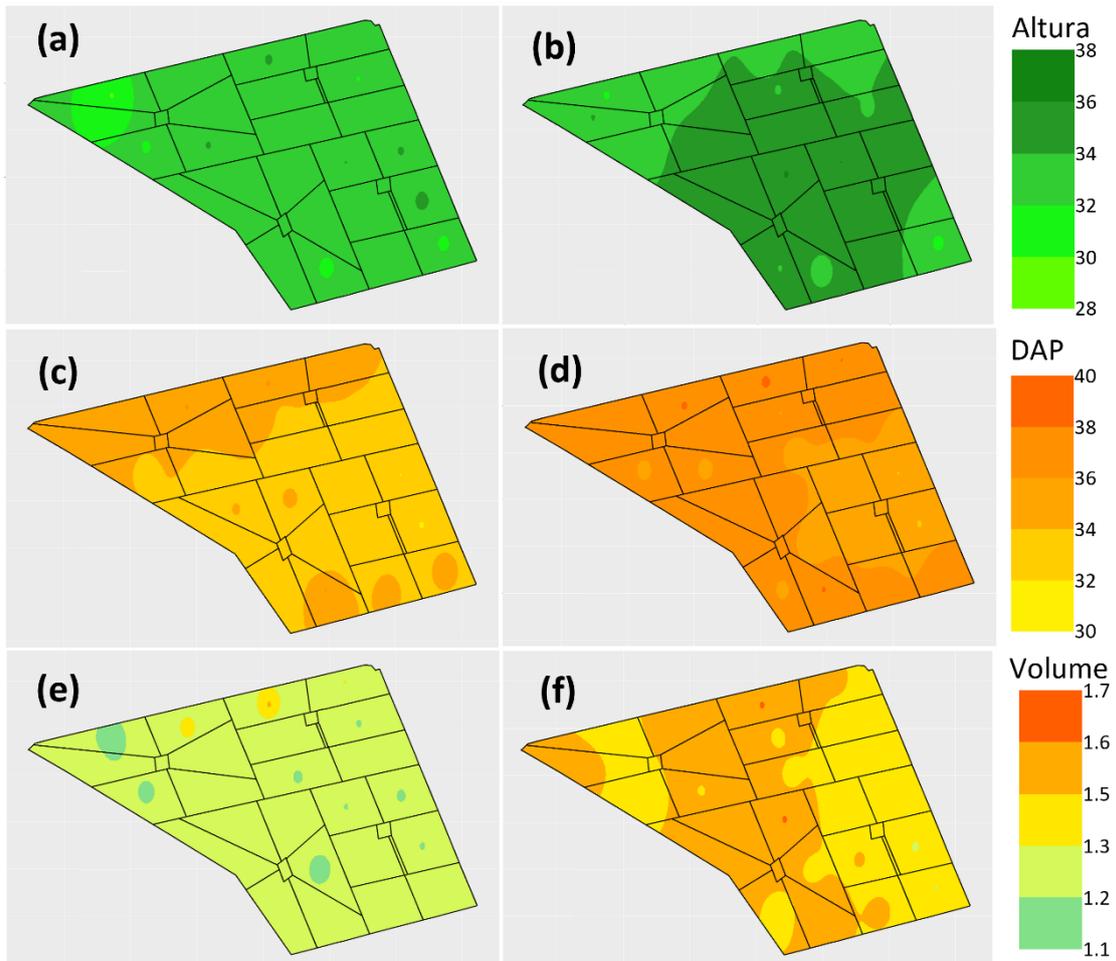


Figura 30. Variabilidade espacial da altura (m), do diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e do volume (m^3) de árvores de eucalipto na área de estudo. (a) Altura em abril/2021. (b) Altura em abril/2022. (c) DAP em abril/2021. (d) DAP em abril/2022. (e) Volume em abril/2021. (f) Volume em abril/2022.

A partir da estatística dos dados de altura das árvores de eucalipto na área de estudo (Tabelas 11 e 12), verificou-se um aumento da altura média das árvores do ano de 2021 para o ano de 2022. No sistema ILPF, por exemplo, as árvores apresentaram uma altura média de 33,22 m no ano de 2021, enquanto no ano de 2022 essa altura foi de 33,91 m. O mesmo ocorreu para o sistema IPF, em que as árvores passaram de uma altura média de 32,30 m em 2021 para 34,15 m em 2022.

Assim como ocorreu para a altura, notou-se, a partir da estatística dos dados, um aumento no DAP das árvores de eucalipto do ano de 2021 para o ano de 2022 (Tabelas 11 e 12). No sistema ILPF, o DAP médio das árvores no ano de 2021 foi de 33,72 cm, enquanto no ano de 2022 o seu DAP médio foi de 35,92 cm. Por sua vez, no sistema IPF

as árvores passaram de um DAP médio de 34,24 cm em 2021 para um DAP médio de 36,65 cm em 2022.

Da mesma forma que para os outros atributos da vegetação, verificou-se um aumento do volume das árvores de eucalipto na área do ano de 2021 para o ano de 2022 (Tabelas 11 e 12). No sistema ILPF, o volume das árvores passou de 1,25 m³ em 2021 para 1,43 m³ em 2022. No sistema IPF, o aumento foi de 1,25 m³ em 2021 para 1,49 m³ em 2022. O aumento nos valores de cada um dos atributos da vegetação também pode ser observado nos mapas de variabilidade espacial gerados (Figura 30).

Em cada um dos períodos de avaliação considerados, observou-se baixa dispersão dos atributos da vegetação em cada um dos sistemas ILPF e IPF, uma vez que o coeficiente de variação sempre se manteve inferior a 10% (Tabelas 11 e 12). O mesmo comportamento foi observado nos mapas de variabilidades gerados para os atributos, nos dois períodos considerados (Figura 30).

Ao comparar os sistemas IPF e ILPF, verificou-se que em nenhum dos períodos foi observada diferença significativa na altura das árvores entre os dois sistemas produtivos, dentro do contexto das classes consideradas no processo de interpolação. Ainda, a partir dos mapas gerados para o DAP das árvores, observou-se que no ano de 2021 também não houve diferença significativa entre os dois sistemas produtivos, mas no ano de 2022, entretanto, é possível notar que o DAP das árvores foi pouco maior no sistema IPF. Por fim, para os dados de volume das árvores, no ano de 2021, não se notou diferença entre os dois sistemas produtivos, dentro do contexto das classes consideradas na interpolação. Já no ano de 2022, o sistema IPF mostrou valores de volume das árvores pouco maiores que no sistema ILPF (Figura 30).

O *Eucalyptus urograndis* é o híbrido utilizado na área de estudo, sendo ele proveniente do cruzamento *E. grandis* x *E. urophylla* (FARIA et al., 2013). É particularidade do *E. grandis* o crescimento em altura e do *E. urophylla* o crescimento em diâmetro, e estas duas qualidades juntas promovem melhorias no rendimento e uma madeira de boa qualidade (BRIGATTI; SILVA; FREITAS, 1980). Além disso, as árvores oriundas do cruzamento dessas espécies tendem a crescer de forma mais homogênea em ambos os parâmetros. O *E. urograndis* tem uma fácil adaptabilidade, e seus problemas referentes a fertilidade, compactação e acidez podem ser corrigidos através do manejo (HIGA; MORA; HIGA, 2000). Com o manejo feito na área de forma correta, o

crescimento tanto na altura como no DAP e no volume das árvores foi relativamente homogêneo nos dois sistemas produtivos, conforme já esperado.

6. CONCLUSÕES

Com relação aos atributos químicos do solo avaliados, observou-se valores maiores de pH em H₂O, pH em CaCl₂, potássio, cálcio, magnésio, capacidade de troca catiônica e saturação por base no sistema ILPF. Já para os atributos matéria orgânica, fósforo e sulfato, não houve diferença entre os dois sistemas produtivos. Para todos os atributos químicos, com exceção do sulfato, notou-se diminuição dos valores com o aumento da profundidade.

Por sua vez, não houve diferença entre os sistemas ILPF e IPF para os atributos físicos areia, argila e silte, sendo que a quantidade de areia e silte no solo não se alterou com o aumento da profundidade, dentro do contexto das classes consideradas no processo de interpolação. Para a argila, ao contrário, notou-se que ela aumentou com o aumento da profundidade.

Com relação à resistividade elétrica do solo, verificou-se que ela cresceu com o aumento da profundidade, não havendo diferença significativa entre os dois sistemas.

Por fim, também não foi observada diferença significativa entre os sistemas para os atributos da vegetação, concluindo-se que o crescimento tanto na altura como no DAP e no volume das árvores foi relativamente homogêneo, conforme já esperado.

Os resultados indicaram que as técnicas de geoprocessamento permitiram armazenar, disponibilizar e integrar dados georreferenciados dos atributos do solo e das plantas. E a análise espacial desses atributos por meio dos mapas interpolados pode fornecer ferramentas de gestão para o manejo dos sistemas integrados.

7. REFERÊNCIAS

- AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J. Evolução das atividades lavoureira e pecuária nos Cerrados. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p.25-58.
- 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. (Eds.) **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.
- ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M.P.; MONTANARI, R.; BASSO, F.C.; PARIZ, C.M.; AZENHA, M.V.; VERCESE, F. Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. **Ciência Rural**, v.40, n.3, p.520-526, 2010.
- ARLOT, S., CELISSE, A. A Survey of Cross-validation Procedures for Model Selection. **Statistics Surveys**, v.4, p.40-79, 2010.
- ASSAD, E.D.; CORDEIRO, L.A.; MARCHÃO, R.L.; ALMEIDA, R.G.; JÚNIOR, R.G.; BERNDT, L.; SALTON, J.C.; EVANGELISTA, B.A. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D.J. (Ed.). **Potencial de Mitigação da Emissão de Gases de Efeito Estufa por Meio da Adoção da Estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p.300-301.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Indústria Automobilística Brasileira - 50 anos**. São Paulo: Autodata Editora, 2006. 194p.
- AZEVEDO, S.D. **Qualidade físico-química do solo sob sistemas de integração lavoura pecuária floresta no município de terra Alta/PA**. Trabalho de conclusão de curso da Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, 2019.
- 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.; SILVA, V.P.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G.B.; ALVARENGA, R.C.; KICHEL, A.N.; FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.;

FRANCHINI, J.C.; GALERANI, P.R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura pecuária floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1-12, 2011.

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

BALDOTTO, M.A.; BALDOTTO, L.E.B. Relationships between soil quality indicators, redox properties, and bioactivity of humic substances of soils under integrated farming, livestock, and forestry. **Revista Ceres**, v.65, p.373-380, 2018.

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

BERNARDI, A.C.C.; 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.

BERNARDI, A.C.C.; PITRAT, T.; RABELLO, L.M.; PEZZOPANE, J.R.M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G.G.; BETTIOL, G.M. Differences in soil electrical resistivity tomography due to soil water contents in an integrated agricultural system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, e00774, p.1-5, 2019.

BERNARDI, A.C.C.; TUPY, O.; SANTOS, K.E.L.; MAZZUCO, G.G.; BETTIOL, G.M.; RABELLO, L.M.; INAMASU, R.Y. Mapping of yield, economic return, soil electrical conductivity, and management zones of irrigated corn for silage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.12, p.1289-1298, 2018.

BERNARDI, A.C.C.; BETTIOL, G.M.; GREGO, C.R.; ANDRADE, R.G.; RABELLO, L.M.; INAMASU, R.Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n.1/2, p.205-221, 2015.

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

BERNARDI, A.C.C.; BUENO, J.O.A.; LAURENTI, N.; SANTOS, K.E.L.; ALVES, T.C. Efeito da calagem e fertilizantes aplicados à taxa variável nos atributos químicos do solo e custos de produção de pastagem de capim Tanzânia manejadas intensivamente. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.12, n.4, p.368-382, 2018.

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

BERNARDI, A.C.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.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.

BORGES, W.L.B.; CALONEGO, J.C., ROSOLEM, C.A. Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems**, v.93, p.2111-2119, 2019.

BRIGATTI, R.A.M.; SILVA, A.P.; FREITAS, M. Estudo comparativo do comportamento de alguns híbridos de *Eucalyptus* ssp. **Circular Técnica**, Piracicaba, n.123, 1980.

CAIRES, F.E.; CHVEIRI, A.W.; MADRUGA, E.F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicado na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.27-34, 1998.

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H.G.; FONSECA, O.O.M.; SANTOS, R.D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado**,

propriedade e potenciais. Rio de Janeiro: EMBRAPA CNPS/São Carlos: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95p.

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

CANTARELLA, H.; CORREA, L.A.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C. Fertilidade do solo em sistemas intensivos de manejo de pastagens. In: **Anais do Simpósio sobre Manejo de Pastagens**. Piracicaba: FEALQ. 2002. p.99-131.

COELHO, J.P.C.; SILVA, J.R.M. **Agricultura de Precisão**. 1.ed. Lisboa: Associação dos Jovens Agricultores de Portugal (AJAP), 2009. 141p.

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.

CORDEIRO, L.A.M; VILELA, L.; MARCHÃO, R.L.; KLUTHCOUSKI, J.; JÚNIOR, G.B.M. Integração Lavoura-Pecuária e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Estratégia para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**. Brasília, v.32, n.1/2, p.15-53, 2015.

CORTE, A.P. et al. Desempenho de diferentes equipamentos para mensuração de diâmetro a 1,30 m, altura individual total, e volume do fuste em *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don. **Enciclopédia Biosfera**, v.13, n.23, 2016.

CORTNER, O.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; FERREIRA, J.; NILES, M. T.; REIS, J.; GIL, J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v.82, p.841-853, 2019.

COSTA, C.D.O.; ALVES, M.C.; SOUSA, A.P. Armazenamento de água em dois solos sob diferentes usos e manejos. **Revista de Ciências Ambientais**, v.10, p.55-65, 2016.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v.64, p.197-214, 1995.

CUNHA NETO, F.V.; PEREIRA, M.G.; LELES, P.S.S.; ABEL, E.L.S. Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba - MG. **Ciência Florestal**, v.28, n.1, 2018. p.13-24.

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. 2021.

EMBRAPA Pecuária Sudeste. **Estação**. Condições meteorológicas. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=automatica>>. Acesso em: 07 ago. 2022.

FARIA, J.R.; SILVA, J.F.; NERIS, K.P.; LOPES, F.L.R.; SILVA, M.C.; LISBOA, E.S.; RODRIGUES, J.; CENTENO, A.J.; LOPES, F.M.; Desenvolvimento de eucalipto urograndis no município de corumbá-GO. **Ensaio e ciência: ciências biológicas, agrárias e da saúde**. v.17, n.2, p.09-27, 2013

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.

FUGLIE, K.; WANG, S. Productivity Growth in Global Agriculture Shifting to Developing Countries. **Choices**, v.27, n.4, 2012.

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.

FOELKEL, C. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores. **Eucalyptus newsletter**, v.2, 2005.

FONSECA, R.R.; BARBOSA, K.S.S; JESUS, K.E.; SILVA, L.M.; SOUSA, N.T.B.; SILVA, G.R.; PAULETTO, D.; OTAKE, M.Y.F. Densidade e umidade do solo em sistemas agroflorestais. **Agroecossistemas**, v.10, n.2, p.367-374, 2018.

FRANCHINI, J.C.; GONZALEZ-VILA, F.J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant Soil**, v.231, p.55-63, 2001.

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.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V.I. Precision agriculture and food security. **Science**, v.327, n.5967, p.828-831, 2010.

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.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; DE MARIA, I.C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J.N. A erosão e o seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J.R.R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p.47-60.

HIGA, R.C.V.; MORA, A.L.; HIGA, A.R. Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural. **Colombo: Embrapa Florestas**, 2000. 31p.

Integrated Crop-Livestock-Forestry Systems. **EMBRAPA**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf>. Acesso em: 28 mar. 2023.

ILPF: os benefícios econômicos e ecológicos da integração Lavoura-Pecuária-Floresta para o país. **WRI BRASIL**, 2021. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/ilpf-os-beneficios-economicos-e-ecologicos-da-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-para-o>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INAMASU, R.Y.; BERNARDI, A.C.C.; VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; QUEIROS, L.R.; RESENDE, A.V.; VILELA, M.F.; JORGE, L.A.C.; BASSOI, L.H.; PEREZ, N.B.; FRAGALLE, E.P. Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro. In: INAMASU, R.Y.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.; BERNARDI, A.C.C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, Embrapa Instrumentação, 2011. p. 14-26.

INAMASU, R.Y.; BERNARDI, A.C.C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p.21-33.

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

KAMINSKI, J. et al. Acidez e calagem no sul do Brasil: Aspectos históricos e perspectivas futuras. In: CERETTA, C.A. et al (Ed.) **Tópicos em ciências do solo**. N5. Viçosa: SBCS, cap.5, 2007.

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

KARP, F.H.S.; COLAÇO, A.F.; TREVISAN, R.G.; MOLIN, O. Comparação entre sensores de condutividade e resistividade elétrica do solo. In: X Congresso Brasileiro de Agroinformática, 2015, Ponta Grossa. **Anais [...]** Ponta Grossa: UEPG, 2015.

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

LAURO, A.C.; CURTO, R.D.A.; TONINI, H.; BIZATTI, S.C.; KOHLER, S.V. Operacionalidade de instrumentos na obtenção da altura total de árvores em sistema agrossilvipastoril. **Advances in Forestry Science**, v.5, n.4, p.445-451, 2018.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.J.; CARVALHO, P.C.F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.4-8, 2014.

LIMA, M.R.; SIRTOLI, A.E. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba, 2006. 341p.

LINSLEY, C.M.; BAUER, F.C. **Test your soil for acidity**. University of Illinois. Agricultural Experiment Station, Circular 346, p.1-16, 1929. 2015.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009.

MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2.ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2009. 316p.

MARIA, I.C; COELHO, R.M; ABREU, M.F; CANTARELLA, H. **Métodos de Análise Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2021. 33p.

McBRATNEY, A.B.; PRINGLE, M.J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, v.1, p.219-236, 1999.

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.

MIRANDA, A.C.C.; VERÍSSIMO, A.M.; CEOLIN, A.C. Agricultura de Precisão: Um Mapeamento da Base SciELO. **Revista Gestão Org.**, v.15, Edição Especial, p.129-137, 2017.

MOLIN, J.P.; TAVARES, T.R. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: Challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. **Engenharia Agrícola**, v.39, p.126-147, 2019.

MORAES, A.; CARVALHO, P.C.F.; LUSTOSA, S.B.C.; LANG, C.R.; DEISS, L. Research on Integrated Crop-Livestock Systems in Brazil. **Revista Ciência Agrônomo**, v.45, p.1024-1031, 2014.

OLIVEIRA, X. et al. Precisão e tempo de operação de alguns instrumentos para medir altura de árvores. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.18, 2014.

PANISSOD, C.; DABAS, M.; JOLIVET, A.; TABBAGH, A. A Novel Mobile Multipole System (MU.C.E.P.) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: The 'Voldecanards' arrays. **Geophysical Prospecting**, v.45, p.983-1002, 1997.

PÉREZ-PLANELLS, 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.C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P.P.A.; MARCONATO, M.H.; PEDROSO, A.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.; BERNARDI, A.C.C.; OLIVEIRA, P.P.A.; PEDROSO, A. 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.C.; MULLER, M.D.; OLIVEIRA, P.P.A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.312, p.107350, 2021.

PIRODDI, L.; CALCINA, S.V.; TROGU, A.; RANIERI, G. Automated Resistivity Profiling (ARP) to Explore Wide Archaeological Areas: The Prehistoric Site of Mont'e Prama, Sardinia, Italy. **Remote sensing**, v.12, n.3, 461, 2020.

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.

PRIMAVESI, A.C.; ANDRADE, A.G.; ALVES, B.J.R.; ROSSO, C.; BATISTA, E.M.; PRATES, H.T.; ORTIZ, F.R.; MELLO, J.; FERRAZ, M.R.; LINHARES, N.W.; MACHADO, P.L.O.A.; MOELLER, R.; ALVES, R.C.S.; SILVA, W.M. Métodos de análise de solo. In: NOGUEIRA, A. R.A.; SOUZA, G.B. **Manual de laboratórios: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 67-130.

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/>.

RABELLO, L.M.; BERNARDI, A.C.C.; INAMASU, R.Y. Condutividade elétrica aparente do solo. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI,

L.H.; INAMASU, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p.48-57.

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

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. Adubação com enxofre. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, Embrapa informação tecnológica, 2004, p.227-244.

REIS, T.C. **Variação da acidez do solo em resposta à adição de materiais orgânicos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 76p. 1998.

RESENDE, A.V.; SHIRATSUCHI, L.S.; COELHO, A.M.; CORAZZA, E.J.; VILELA, M.F.; INAMASU, R.Y.; BERNARDI, A.C.C, BASSOI, L.H., NAIME. Agricultura de precisão no Brasil: Avanços, Dificuldades e Impactos no Manejo e Conservação do solo, Segurança Alimentar e Sustentabilidade. In: **XVIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do solo e da água**, Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2010.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E.E.; GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.795-805, 2000.

RONQUIM, C.C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2.ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2022. 34p.

SÁ, J.C.M.; LAL, R.; CERRI, C.C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; FACCIO CARVALHO, P.C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v.98, p.102-112, 2017.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1349-1356, 2011.

SAMOUEËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage Research**, v.83, p.173-193, 2005.

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, V.H.N.; MORBACH, M.L.; TEIXEIRA, L.P. Fatores que afetam a resistividade elétrica do solo. **Revista Tecnológica da FATEC-PR**, v.1, n.11, 2020.

SCHWERTMAN, N.C.; OWENS, M.; ADNAN, R. A simple more general boxplot method for identifying outliers. **Computational Statistics & Data Analysis**, v.47, n.1, p.165-174, 2004.

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

SOUZA, Z.M.; SOUZA, G.S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, v.44, n.2, p.261-268, 2014.

SILVA, P.L.F.; OLIVEIRA, F.P.; PEREIRA, W.E.; MARTINS, A.F.; ZONTA, J.H.; AMARAL, A.J.; TAVARES, D.D.; SILVA, A.J. Qualidade física de solo arenoso em ambiente semiárido sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.15, n.4, p.598-616, 2021.

SILVA, R.A.; CRESTE, J.E.; MEDRADO, M.J.S.; RIGOLIN, I.M. Sistemas integrados de produção – o novo desafio para a agropecuária brasileira. **Colloquium Agrariae**, Curitiba, v.10, n.1, p.55-58, 2014.

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.

SOTERRONI, A.C.; RAMOS, F.M.; MOSNIER, A.; CARVALHO, A.X.Y.; CÂMARA, G.; OBERSTEINER, M.; ANDRADE, P.R.; SOUZA, R.C.; PENA, M.C.; MANT, R.; PIRKER, J.; KRAXNER, J.; KRAXNER, F.; HAVLIK, P.; KAPOS, V. Modelagem de mudanças de uso da terra no Brasil: 2000-2050. In: VIEIRA FILHO, J.E.R.; GASQUES, J.G. **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, 2016. p.301-342.

SOUZA, F.C.S. Repensando a agricultura: o enfoque da sustentabilidade como padrão alternativo à agricultura moderna. **HOLOS**, v.2, p.1-14, 2004.

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

STOCKMANN, U.; ADAMS, M.A.; CRAWFORDA, J.W.; FIELDA, D.J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNYA, B.; MCBRATNEYA, A.B.; COURCELLES, V.R.; SINGHA, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D.A.; BALDOCK, J.; BIRDE, M.; BROOKES, P.C.; CHENUG, C.; JASTROWH, J.D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A.G.; PARTON, W.J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, know unknowns and of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.164, p.80-99, 2013.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TORRES, C.M.M.E.; JACOVINE, L.A.G.; OLIVEIRA NETO, S.N.; BRIANEZI, D.; ALVES, E.B.B.M. Sistemas Agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.34, p.235-244, 2014.

TREVISAN, R.; MATTOS, M.L.T.; HERTER, F.G. Atividade microbiana em argissolo vermelho-amarelo distrófico típico coberto com aveia preta (*Avena sp.*) no outono, em um pomar de pessegueiro. **Revista Científica Rural**, v.7, p.83-89, 2002.

TROTTER, M.; GUPPY, C.; HALING, R.; TROTTER, T.; EDWARDS, C.; LAMB, D. Spatial variability in pH and key soil nutrients: is this an opportunity to increase fertiliser and lime-use efficiency in grazing systems? **Crop and Pasture Science**, v.65, p. 817-827, 2014.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

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

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.

WALKERS, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p.01-19, 1976.

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