

VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS

NICOLLE LAURENTI¹; JOSIANE RODRIGUES²; EDILSON DA SILVA GUIMARÃES³; JOSÉ RICARDO MACEDO PEZZOPANE⁴; ALBERTO CARLOS DE CAMPOS BERNARDI⁵

¹Engenheira Agrônoma, Mestranda em Agricultura e Ambiente - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Araras - SP. nicollelaurenti2@gmail.com / (16) 9 9791-3353; ²Doutora em Ciências, Professora - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Araras - SP; ³Mestre em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria, Supervisor do Núcleo de Tecnologia da Informação - Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos - SP; ⁴Doutor em Física do Ambiente Agrícola, Pesquisador - Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos - SP; ⁵Doutor em Agronomia, Pesquisador - Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos - SP

Apresentado no
Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão- ConBAP 2022
Campinas, SP, 09 a 11 de agosto de 2022

RESUMO: O fornecimento balanceado de nutrientes é fator chave para a intensificação dos sistemas agropecuários e, nesse sentido, as ferramentas de agricultura de precisão podem ser utilizadas a fim de permitir a identificação de zonas homogêneas e heterogêneas em uma determinada área e, consequentemente, possibilitando definir estratégias de manejo mais eficientes. Assim, o objetivo do presente trabalho é estudar a variabilidade espacial de atributos do solo numa área que compreende um sistema de integração pecuária-floresta (IPF) e um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP, utilizando para isso o processo de interpolação espacial pelo Inverso da Distância Ponderada. As variáveis analisadas foram: matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia, argila (profundidades 0-0,2 e 0,2-0,4 m) e resistividade elétrica (RE) (profundidades 0-0,5, 0-1,0 e 0-2,0 m). Como resultado, foram obtidos valores médios e altos de MO e CTC na área de estudo, o que está associado ao maior depósito de resíduos vegetais e animais no solo. Por sua vez, a partir dos valores obtidos para os atributos físicos, foi possível caracterizar o solo como argiloso e, com relação à RE, notou-se que a mesma cresceu com o aumento da profundidade. A menos da CTC (0-0,2 m), em que os valores obtidos foram superiores no sistema ILPF, para todas as outras variáveis os valores se mantiveram homogêneos nos dois sistemas.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura sustentável; interpolação espacial; sistemas integrados

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES IN INTEGRATED SYSTEMS

ABSTRACT: The balanced supply of nutrients is a key factor for the intensification of agricultural systems and, in this sense, precision agriculture tools can be used in order to allow the identification of homogeneous and heterogeneous zones in an area and, consequently, making possible to define management strategies more efficient. Thus, the aim of the present work is to study the spatial variability of soil attributes in an area that comprises an integrated livestock-forest system (ILF) and an integrated crop-livestock-forest system (ICLF) of Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP, using the Inverse Distance Weight interpolation. The variables analyzed were: organic matter (OM), cation exchange capacity (CEC), sand, clay (depths 0-0.2 and 0.2-0.4 m) and electrical resistivity (ER) (depths 0-0.5, 0-1.0 and 0-2.0 m). As result, medium and high values of OM and CEC were obtained in the study area, which is associated with the greater deposit of plant and animal residues in the soil. In turn, from the values obtained for the physical attributes, it was possible to characterize the soil as clayey and, with regard to the ER, it was noted that it increased with depth increasing. Except for CEC (0-0.2 m), in which the values obtained were higher in the ICLF system, for all other variables the values remained homogeneous in both systems.

KEYWORDS: sustainable agriculture; spatial interpolation; integrated systems

INTRODUÇÃO: Nos dias atuais a humanidade se depara com desafios cada vez maiores para a produção de alimentos e produtos 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 o conceito de agricultura sustentável. De acordo com

esse conceito, os agroecossistemas do século XXI devem ser capazes de 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 (MULLER et al., 2015).

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) caracterizam-se por agregar atividades agrícolas, pecuárias e florestais numa mesma área, e buscam efeitos de cooperação entre os componentes do agroecossistema, contemplando a preservação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica da atividade agropecuária (BALBINO et al., 2012). No Brasil, a utilização dos sistemas integrados tem aumentado como forma de minimizar os riscos das atividades praticadas de forma isolada, assim como para diminuir as áreas de pastagens degradadas, devido à melhoria das propriedades do solo (EMBRAPA, 2021).

No que diz respeito às propriedades do solo, elas podem variar espacialmente em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas, e a compreensão da variabilidade no espaço das propriedades edáficas nos diferentes sistemas produtivos possui potencial para contribuir com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumo e redução do impacto ambiental (CAMBARDELLA; KARLEN, 1999).

Dentro deste contexto, a obtenção e o processamento de informações georreferenciadas de amostras de solo da área de estudo são importantes pois possibilitam, por meio de procedimento de interpolação espacial, gerar mapas relacionados aos sistemas de produção agrícola, o que constitui um aspecto de inquestionável importância, uma vez que os mapas gerados amparam tecnicamente as decisões estratégicas, permitindo observar os pontos mais complexos da área em estudo, comparando-os com o sistema de manejo adotado, seus efeitos ambientais e a produtividade das diferentes culturas (GREGO et al., 2014).

Diante o exposto, o objetivo do presente trabalho é estudar a variabilidade espacial de atributos do solo numa área compreendida por um sistema de integração pecuária-floresta (IPF) e por um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP, utilizando o processo de interpolação pelo Inverso da Distância Ponderada. Com isso, pretende-se contribuir para com as tomadas de decisões que serão feitas sobre essa área, visando definir estratégias de manejo mais eficientes, em especial o uso racional de insumos e a preservação ambiental, assim também como enfatizar os benefícios dos sistemas integrados.

MATERIAIS E MÉTODOS: O estudo foi desenvolvido em uma área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil (21°57'S, 47°51'W, 860 m de altitude). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura argilosa média (CALDERANO FILHO et al., 1998), e o seu clima é tropical (classificação de Köppen: Cwa), com duas estações bem definidas, sendo ela seca de abril a setembro, com temperatura média de 19,9 °C e precipitação média de 250 mm, e úmida de outubro a março, com temperatura média de 23,0 °C e média de precipitação de 1100 mm (PEZZOPANE et al., 2021).

A área experimental está localizada dentro de uma extensão que compreende um sistema de 30 ha que inclui (PEZZOPANE et al., 2019): i) pastagem intensiva de capim Piatã (*Urochloa brizantha*); ii) Integração lavoura-pecuária (ILP), em que um terço da área é renovada anualmente plantando milho consorciado com capim Piatã; iii) Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) plantado com *Eucalyptus urograndis* (GG100) em fileiras simples com espaçamento de 15 m e distância de 2 m entre árvores; iv) Integração de pastagem-floresta (IPF), com capim Piatã e eucalipto; v) sistema extensivo de capim braquiária (*Urochloa decumbens*). As pastagens são manejadas em sistema rotacionado com 6 dias de pastejo e 35 dias de repouso em épocas de chuvas e secas.

No presente trabalho foram estudados o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da área experimental (Figura 1). As variáveis analisadas na área foram: i) propriedades químicas do solo - matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC); ii) propriedades físicas do solo - argila e areia; e iii) resistividade.

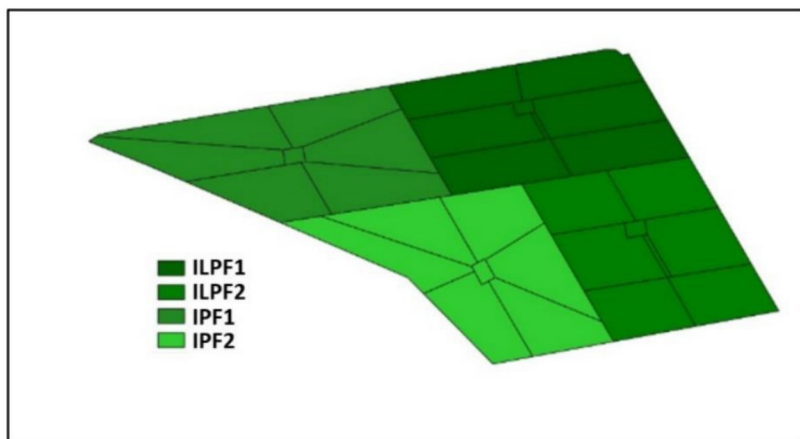


FIGURA 1. Área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

Para a realização das análises químicas e físicas 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, visando assim atender à tipificação dos solos atualmente adotada no Zoneamento Agrícola de Risco Climático pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2008), que diz que as amostras devem ser coletadas na camada de 0 a 0,5 m de profundidade. Em cada piquete foram coletas seis sub-amostras para compor uma amostra composta georreferenciada pelo centroide do piquete (Figura 2).

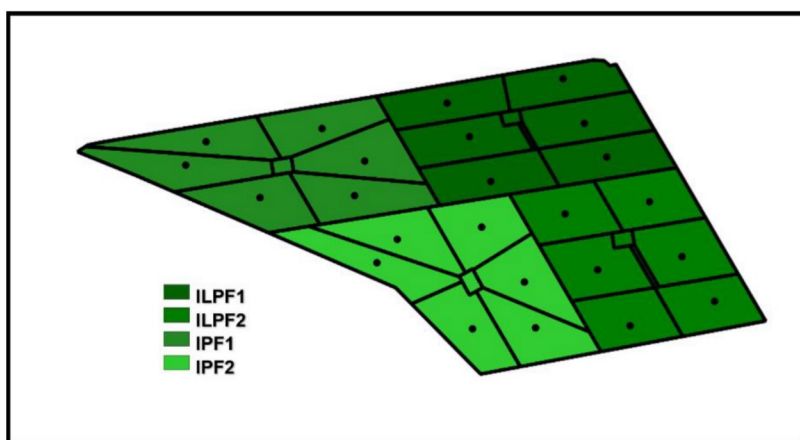


FIGURA 2. Pontos de amostragem para estudo da fertilidade do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos, São Paulo, Brasil.

As análises das propriedades físicas das amostras de solo foram realizadas a partir dos métodos de análise física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas (MARIA et al., 2021), e as análises das propriedades químicas das amostras, por sua vez, foram realizadas a partir dos métodos de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais do Instituto Agrônomo de Campinas (RAIJ et al., 2001).

Já as medidas de resistividade elétrica do solo foram obtidas com o sensor comercial ARP system® (Geocarta, Paris, França) (Figura 3), 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. A coleta foi realizada 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 3. Sensor comercial ARP system®.

Todas as variáveis analisadas foram submetidas inicialmente a uma análise exploratória. Nessa etapa inicial, procedeu-se com a construção do boxplot de cada uma das variáveis. Por meio da construção dos boxplots é possível, dentre outras coisas, identificar os *outliers* presentes nos dados (SCHWERTMAN et al., 2004), os quais são caracterizados por se distanciar drasticamente dos demais pontos do conjunto, podendo viesar todo o resultado de uma análise. Após a retirada dos *outliers* dos dados, procedeu-se com o cálculo das seguintes medidas estatísticas: média, desvio padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação e as medidas de curtose e assimetria.

Finalizada a análise exploratória, seguiu-se com o processo de interpolação espacial de cada uma das variáveis, o qual possibilita a criação de mapas, a partir dos quais é possível visualizar a distribuição espacial das variáveis 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 (análises físicas e químicas – total de 24 amostras), o método utilizado no presente trabalho foi a interpolação IDW (WATSON; PHILIP, 1985).

A interpolação IDW 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. Esse 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 da variável a ser interpolado, z_i é o valor da variável do i -ésimo ponto amostrado, d_i corresponde à distância euclidiana entre o ponto a ser interpolado e o i -ésimo ponto amostrado, p é o valor do expoente a ser considerado no processo de interpolação, e n representa o número de pontos amostrados.

O expoente p utilizado no processo de interpolação, atribui alguns efeitos nos resultados e, portanto, sua escolha foi realizada segundo o processo de validação cruzada, tendo por base o menor valor da raiz quadrada do erro médio (do inglês, *Root Mean Square Error* - RMSE), a qual é comumente utilizada para expressar a acurácia dos resultados numéricos (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011). 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, o que indica que, no processo de validação, o valor de z_p que leva ao menor valor da RSME é o valor que deve ser escolhido para realizar a interpolação IDW.

Todas as análises foram desenvolvidas utilizando o *software* estatístico R (R CORE TEAM, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A estatística descritiva de cada um dos atributos do solo, após a retirada dos *outliers* dos dados, estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1. Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos 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.

Medidas Estatísticas	MO*	MO**	CTC*	CTC**	Areia*	Areia**	Argila*	Argila**
Média	49,53	32,00	83,77	63,00	551,00	560,41	339,69	391,58
Desvio Padrão	6,96	5,85	9,81	2,87	24,37	25,30	22,66	34,63
Mínimo	37,50	25,00	64,50	58,00	492,00	504,00	297,00	308,00
Máximo	69,00	46,50	99,50	69,50	581,00	602,00	384,00	445,00
CV (%)	14,05	18,30	11,71	4,56	4,42	4,51	6,67	8,84
Curtose	1,54	0,45	-0,53	-0,57	3,10	2,57	2,25	2,63
Assimetria	0,95	0,93	-0,50	0,25	-0,89	-0,43	-0,17	-0,48

* Variáveis matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia e argila avaliadas na profundidade 0-0,2 m. ** Variáveis matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia e argila avaliadas na profundidade 0,2-0,4 m.

TABELA 2. Estatística descritiva da resistividade elétrica (RE) 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.

Medidas Estatísticas	RE (0-0,5 m)	RE (0-1,0 m)	RE (0-2,0 m)
Média	366,78	552,94	929,99
Desvio Padrão	132,07	199,79	317,01
Mínimo	9,03	18,44	96,66
Máximo	727,74	1094,09	1782,50
CV (%)	36,00	36,13	34,08
Curtose	2,75	2,75	2,76
Assimetria	0,16	0,08	0,05

Tendo-se finalizada a análise exploratória, seguiu-se com a interpolação IDW para cada atributo. O valor do expoente p utilizado na interpolação, bem como os valores da RSME correspondentes, estão apresentados na Tabela 3. Os mapas gerados pelo processo, por sua vez, estão apresentados nas Figuras de 3 a 7.

TABELA 3. Valores do expoente p utilizado na interpolação pelo inverso da distância ponderada (IDW) e respectivo valor da raiz quadrada do erro médio (RSME) para cada atributo 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.

Variável	p	RSME
Matéria Orgânica (MO) (0-0,2 m)	3	3,70
Matéria Orgânica (MO) (0,2-0,4 m)	1	3,83
Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (0-0,2 m)	4	6,68
Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (0,2-0,4 m)	2	2,32
Areia (0-0,2 m)	2	17,80
Areia (0,2-0,4 m)	4	17,70
Argila (0-0,2 m)	1	20,80
Argila (0,2-0,4 m)	3	25,10
Resistividade Elétrica (RE) (0-0,5 m)	4	8,51
Resistividade Elétrica (RE) (0-1,0 m)	1	10,20
Resistividade Elétrica (RE) (0-2,0 m)	4	11,90

* Valores de p escolhidos com base no processo de validação cruzada, tendo por base o menor valor da RSME.

A matéria orgânica tem sido sugerida como um indicador chave da qualidade do solo, considerando sua influência nos demais atributos essenciais para que o solo desempenhe as suas funções (CONCEIÇÃO et al., 2005). Analisando os mapas de matéria orgânica gerados pelo processo de interpolação, observa-se que em ambas as profundidades o teor de matéria orgânica esteve nos intervalos considerados como médios (cor azul) e altos (cor verde) (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999), sendo que na superfície a quantidade de matéria orgânica foi superior àquela obtida em subsuperfície, sendo que nesta última não houve variabilidade espacial da característica em estudo e, na primeira, a variabilidade foi baixa (Figura 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. (2011), 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 trazidas 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., 2011).

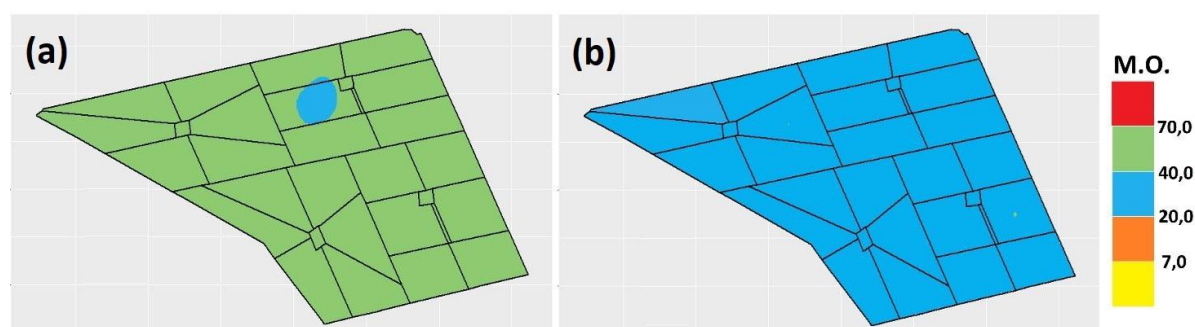


FIGURA 4. Variação espacial de Matéria Orgânica (MO) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta.

A capacidade de troca catiônica (CTC), por sua vez, representa a capacidade de reter cátions, ou seja, elementos de carga positiva, que são retidos nos colóides no solo, sendo este um dos parâmetros que melhor define a fertilidade do solo (GLÓRIA, 1992). Quanto maior a CTC do solo, maior será a quantidade de cátions que ele pode reter. Através dos mapas gerados pela interpolação espacial, pode-se dizer que a capacidade de retenção de cátions da área de estudo é de média a alta (cor azul e cor verde, respectivamente) (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999), sendo que na superfície houve maior retenção de cátions que na subsuperfície, sendo que nesta última não existiu variabilidade espacial da característica em estudo (Figura 5). Esse resultado está diretamente associado aos obtidos para o teor de matéria orgânica na área: de acordo com Baldotto e Baldotto (2018), 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 profundidade 0-0,2 m, verifica-se que os maiores teores de CTC foram obtidos, em sua maioria, nas áreas correspondentes aos sistemas ILPF.

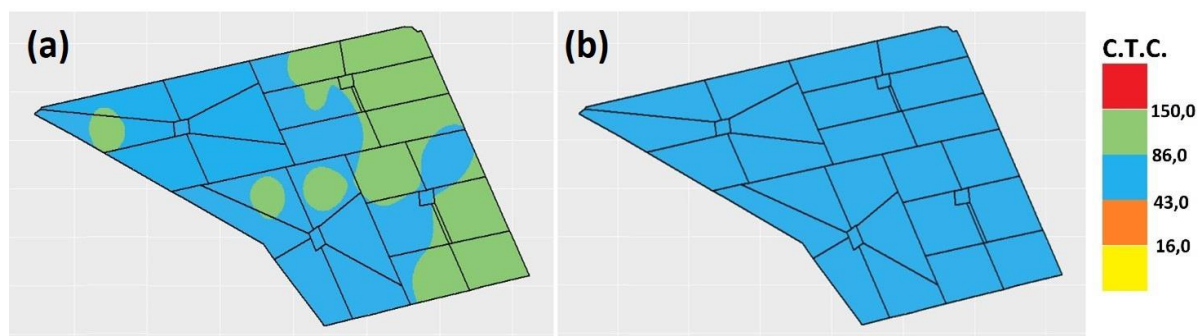


FIGURA 5. Variação espacial da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) na área de estudo. (a) Profundidade 0 – 0,2 m. (b) Profundidade 0,2 – 0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta.

No que diz respeito aos atributos físicos, notou-se que em ambas as profundidades a quantidade de areia no solo se manteve no intervalo de 150 a 700 (cor azul), o que mostra que não houve variabilidade espacial da característica na área em estudo (Figura 6). Além disso, os valores obtidos em superfície não diferiram dos obtidos em subsuperfície. Já para a quantidade de argila, notou-se a sua variabilidade espacial, embora baixa, nas duas profundidades avaliadas, sendo que os valores obtidos na superfície foram inferiores aos obtidos na subsuperfície (Figura 7). Na profundidade 0-0,2 m, o teor de argila na maior parte da área está localizado no intervalo de 150 a 350 (cor cinza) e, na profundidade 0,2-0,4 m, o teor de argila está, na maior parte da área, no intervalo de 350 a 600 (cor roxa). De acordo com os resultados obtidos para os atributos físicos, a classe textural do solo da área de estudo é, em sua maioria, argilosa (SANTOS et al., 2013). Para ambos os atributos físicos, não foi verificada diferença na distribuição espacial dos valores obtidos entre os sistemas IPF e ILPF.

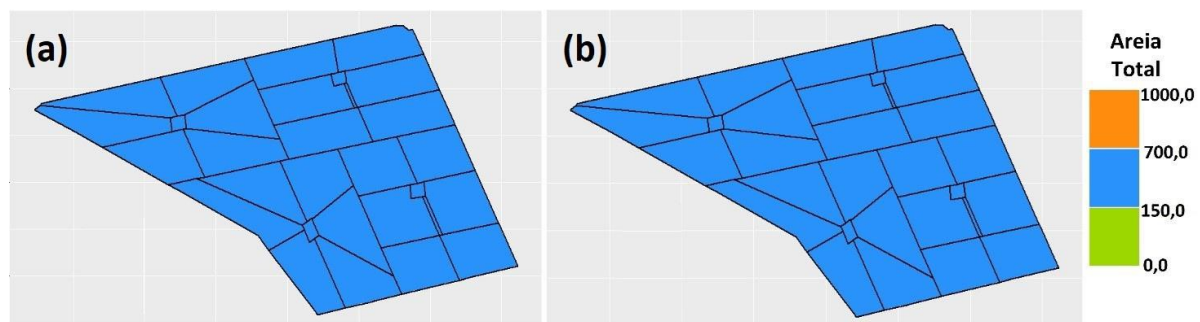


FIGURA 6. Variação espacial da quantidade de Areia no solo na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m

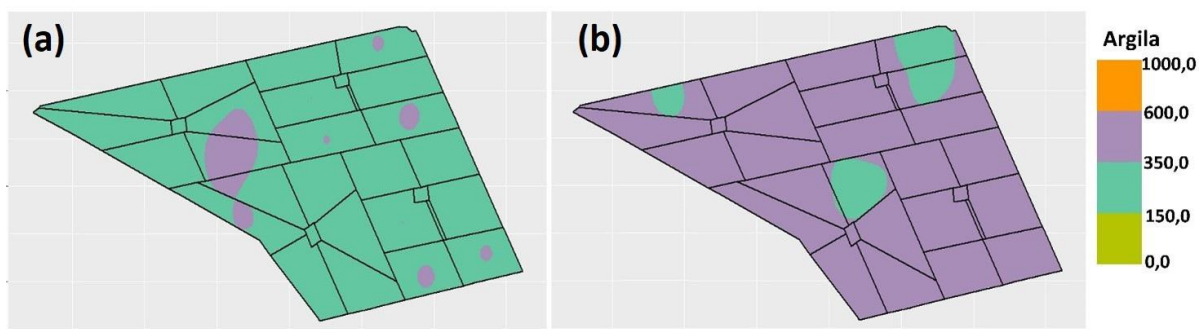


FIGURA 7. Variação espacial da quantidade de Argila no solo na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m.

A resistividade elétrica do solo, por fim, é uma medida de quanto o solo resiste ao fluxo de eletricidade, e ela varia de acordo com a profundidade. A resistividade elétrica está ligada às propriedades intrínsecas do solo, tais como teor de argila, capacidade de retenção de água, pedregosidade e material de origem, bem como às propriedades extrínsecas, tais como estrutura, temperatura e conteúdo de água (SANTOS et al., 2016). Nos mapas gerados pela interpolação, é possível notar que a resistividade na profundidade 0-0,5 m é menor, com o predomínio das cores em verde, diferentemente do que ocorre na maior profundidade, de 0-2,0 m, onde há o predomínio das cores laranja e vermelho (Figura 8). Para este atributo não foi observada uma diferença entre os sistemas ILPF e IPF, uma vez que a distribuição dos valores se manteve homogênea nos dois sistemas, para as três profundidades avaliadas.

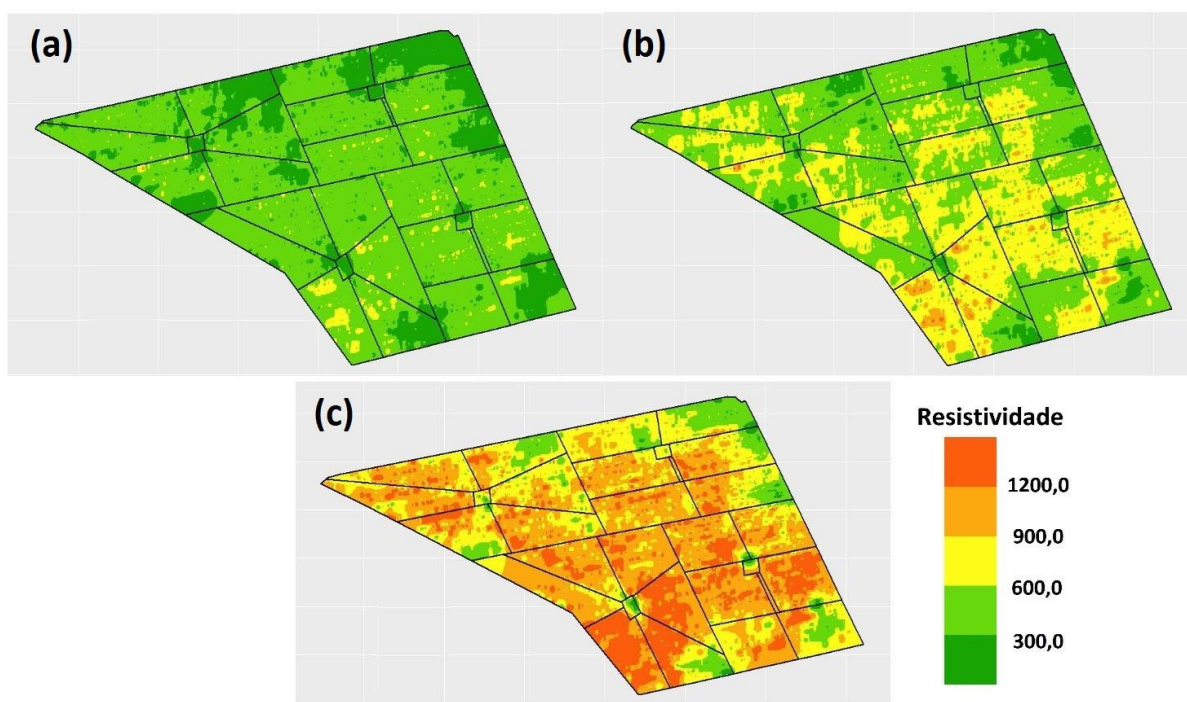


FIGURA 8. Variação espacial da resistividade elétrica do solo na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,5 m. (b) Profundidade 0-1,0 m. (c) Profundidade 0-2,0 m.

CONCLUSÃO:

Em relação às propriedades químicas do solo, foram obtidos valores médios e altos de MO e CTC em toda a área de estudo, o que está associado ao maior depósito de resíduos vegetais e animais no solo, ocasionado pelos sistemas integrados. Para ambas as variáveis, os valores obtidos em superfície foram, em maioria, superiores aos obtidos na subsuperfície, uma vez que há uma deposição maior de resíduos na camada superficial do solo.

Por sua vez, a partir dos resultados obtidos para os atributos físicos, foi possível caracterizar o solo da área de estudo como argiloso. Com relação à quantidade de areia, os valores obtidos foram sempre os mesmos tanto na superfície como na subsuperfície. Já para a quantidade de argila, houve maior depósito da mesma na subsuperfície do solo.

Por fim, para a resistividade elétrica, verificou-se um aumento da resistência do solo conforme houve aumento da profundidade. Na comparação dos sistemas IPF e ILPF, verificou-se que, a menos da variável CTC, na profundidade 0-0,2 m, onde os valores obtidos foram superiores no sistema ILPF, para todas as outras variáveis os valores se mantiveram homogêneos nos dois sistemas integrados, o que ocorreu também para a CTC na profundidade 0,2-0,4 m.

As informações obtidas no presente trabalho serão úteis para definir estratégias de manejo mais eficientes na área de estudo, o que contribuirá para com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumos e redução do impacto ambiental.

Como sugestão para trabalhos futuros, para amostras de tamanho mínimo entre 100 e 150 pontos, a interpolação espacial realizada através da krigagem pode ser utilizada para gerar os mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo na área de estudo, sendo esta uma técnica de regressão utilizada para interpolar dados que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas.

AGRADECIMENTOS: Ao Projeto Rural Sustentável – Cerrado, parceria entre BID, Governo do Reino Unido, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, IABS e ICLF Network Association, por meio da Embrapa.

REFERÊNCIAS

- 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.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 1999. p.25-32.
- BALBINO, L.C.; KICHEL, A.N.; BUNGENSTAB, D.J.; ALMEIDA, R.G. de. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D.J. (Ed.). **Sistemas de integração: a produção sustentável**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012.
- 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.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H.D.S.; DA FONSECA, O.O.M.; 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**. Embrapa CNPS/São Carlos, 1998.
- CAMBARDELLA, C.A.; KARLEN, D.L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v.1, n.1, p.5-14, 1999.
- 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.
- EMBRAPA. **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. Portal Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/nota-tecnica>. Acesso em: 15 fev. 2022.

- FLEMING, K.L.; WESTFALL, D.G.; WIENS, D.W.; BRODAHL, M.C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. **Precision Agriculture**, v.2, p.201-215, 2000.
- FREITAS, I.C.; FRAZÃO, L.A.; FERREIRA, E.A.; CABRAL, C.M. Como os Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta influenciam a Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo? **Revista Vozes dos Vales**, v.5, p.1-13, 2011.
- GLÓRIA, N.A. Resíduos industriais como fonte de matéria orgânica. In: **Encontro sobre matéria orgânica do solo: problemas e soluções**, Botucatu, 1992. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 1992. p.129-148.
- 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.
- MAPA. 2008. Secretaria de Política Agrícola. **Instrução Normativa nº 2, de 9 de outubro de 2008**. Adota, no Zoneamento Agrícola de Risco Climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, as especificações para solos que menciona, e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=77786>>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- 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.
- 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.
- MULLER, M. D. et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta como alternativa para produção pecuária leiteira sustentável em áreas declivosas. Capítulo 17. In: MARTINS, P.; PICCININI, G.A.; KRUG, E.E.B.; MARTINS, C.E.; LOPES, F.C.F. **Sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite: desafios e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- PEZZOPANE, J.R.M.; BERNARDI, A.C. de C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P.P.A.; MARCONATO, M.H.; PEDROSO, A. de F.; ESTEVES, S.N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v.93, p.39-49, 2019.
- PEZZOPANE, J.R.M.; 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.
- R CORE TEAM (2021). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.
- SANTOS, D.P.; PITRAT, T.; RABELLO, L.M.; INAMASU, R.Y.; BETTIOL, G.M.; PEZZOPANE, J.R.; BERNARDI, A.C.C. Resistividade elétrica do solo para o estabelecimento de zonas de manejo e em um

sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: Jornada Científica – Embrapa São Carlos, 8., 2016, São Carlos. **Anais** [...] São Carlos: 2016. p.22.

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.

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.

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.; LEHMANNJ, J.; O'DONNELL, A.G.; PARTON, W.J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, know nunknows and of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.164, p.80-99, 2013.

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.

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