



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Variabilidade espacial dos componentes da acidez do solo sob sistema agroflorestal no médio Amazonas

Romário Pimenta Gomes¹, Luís Antônio Coutrim dos Santos², Lohanne Vitor Carvalho³, Alexandre Gomes de Oliveira⁴, Sabrina Hentges de Oliveira⁵, Cleumar Silva de Souza⁶, João Miguel Moraes e Farah⁷, Hadson Roque Almeida⁸

¹Universidade do Estado do Amazonas, e-mail: rpgagronomia@gmail.com, ²Doutor em ciência do solo, professor do Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil e-mail: lacsantos@uea.edu.br, ³Graduanda em engenharia florestal, Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil E-mail: lvc.gfl19@uea.edu.br, ⁴Graduado em engenharia florestal, do Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil e-mail: alexandreoliveirak.o@gmail.com, ⁵Graduanda em engenharia florestal, Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil e-mail: sabrinahentges20@gmail.com, ⁶Graduando em engenharia florestal, Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil e-mail: csds.gfl20@uea.edu.br, ⁷Graduando em engenharia florestal, Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil e-mail: jmmf.gfl19@uea.edu.br, ⁸Graduando em engenharia florestal, Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), Itacoatiara (AM), Brasil e-mail: hadsonroque.19@gmail.com

Artigo recebido em 11/09/2024 e aceito em 25/10/2024

RESUMO

Adotar um sistema conservacionista na Amazônia, como o sistema agroflorestal (SAF), pode beneficiar a qualidade química do solo, além de promover ganhos ambientais e econômicos. Todavia, é necessário intensificar os estudos sobre a variabilidade espacial do manejo florestal nos solos Amazônicos. Diante do exposto, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da acidez ativa, trocável e potencial do solo, em áreas sob uso de SAF e floresta nativa (FN) na região do médio Amazonas. O estudo foi realizado no município de Silves-AM, com amostragens de solo em uma área de SAF e uma de FN, sob três profundidades, 0,0 – 0,10, 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m, em malhas amostrais e espaçamentos regulares (10 x 10 m), com 64 pontos e 192 amostras por área. Os resultados foram submetidos à análise de comparação de médias, estatística descritiva e geoestatística. O SAF que foi implementado e conduzido por 22 anos, promoveu alterações nos componentes da acidez do solo, possibilitando melhorias em sua qualidade química. O pH foi ligeiramente maior no SAF, o mesmo foi observado no H⁺Al, enquanto o Al³⁺ apresentou média geral superior na FN. As áreas apresentaram, de modo geral, forte grau de dependência espacial. Os padrões espaciais dos componentes da acidez do solo na área de SAF podem proporcionar a criação de zonas diferenciadas de manejo. A aplicação da geoestatística em estudos a respeito da qualidade química do solo poderão auxiliar produtores familiares e agricultores agroflorestais da Amazônia.

Palavras-chave: Fertilidade do solo, Manejo florestal, Mapeamento do solo, Geoestatística, Solos Amazônicos.

Spatial variability of soil acidity components under agroforestry system in the middle Amazon

ABSTRACT

Adopting a conservation system in the Amazon, such as the agroforestry system (SAF), can benefit the chemical quality of the soil, in addition to promoting environmental and economic gains. However, it is necessary to intensify studies on the spatial variability of forest management in Amazonian soils. In view of the above, the objective was to evaluate the spatial

variability of active, exchangeable and potential soil acidity, in areas under the use of SAF and native forest (FN) in the mid-Amazon region. The study was carried out in the municipality of Silves-AM, with soil sampling in one area of SAF and one of FN, at three depths, 0.0 – 0.10, 0.10 – 0.20 and 0.20 – 0.40 m, in sampling grids and regular spacing (10 x 10 m), with 64 points and 192 samples per area. The results were subjected to mean comparison analysis, descriptive statistics and geostatistics. The SAF, which was implemented and conducted for 22 years, promoted changes in soil acidity components, enabling improvements in its chemical quality. The pH was slightly higher in SAF, the same was observed in H+Al, while Al³⁺ presented a higher overall average in FN. The areas generally showed a strong degree of spatial dependence. The spatial patterns of soil acidity components in the SAF area can allow for the creation of differentiated management zones. The application of geostatistics in studies regarding the chemical quality of the soil can help family producers and agroforestry farmers in the Amazon.

Keywords: Soil fertility, Forest management, Soil mapping, Geostatistics, Amazonian soils.

Introdução

A grande maioria dos solos amazônicos são considerados pobres em nutrientes devido às altas taxas de lixiviação e ao próprio material de origem do solo, tendo como característica a acidez e a saturação por alumínio elevadas e a baixa capacidade de troca catiônica (Moline & Coutinho, 2015; Mantovanelli et al., 2016). Dessa forma, quanto menos a capacidade de troca de cátions for preenchida por cátions básicos mais ácido o solo se tornará.

O principal tipo de acidez presente nos solos é a acidez ativa. Trata-se da fração ou parte do hidrogênio que está desintegrada na forma de H⁺, na solução do solo, onde seus valores são mostrados em pH, influenciando na absorção de nutrientes pelas plantas. Outro importante tipo de acidez é a potencial (H+Al), que persistem na fase sólida, na forma não dissociada. Pode ser dividida em acidez trocável, pertencente ao alumínio trocável que está ligado por força eletrostática à superfície dos coloides, sendo retirados com solução de cloreto de potássio, e acidez não trocável, que se refere ao hidrogênio ligado aos coloides (Raij, 1991).

Com fim de recuperar áreas degradadas, inclusive a perda de nutrientes do solo (Tremblay et al., 2015), os sistemas agroflorestais (SAFs) têm bom desempenho no quesito correção de solos ácidos (Ribeiro et al., 2019). Sendo um sistema de interesse para os solos tropicais da região Amazônica, pois estes solos são habitualmente os mais ácidos, devido ao processo de lixiviação em decorrência das chuvas constantes.

Os SAFs têm como principal intuito a recuperação ambiental, principalmente do solo

(Amaral et al., 2021). O SAF é um sistema produtivo que pode se basear na propagação ecológica, semelhante aos ecossistemas naturais (Crespo et al., 2023), onde a vegetação mais exótica ou nativa pode ser unida com culturas agrícolas, trepadeiras, forrageiras, arbustivas, de acordo com um arranjo espacial e temporal pré-estabelecido.

Desse modo, cada vez mais nos dias atuais a aplicação de ferramentas geoespaciais que possibilitem e/ou auxiliem na determinação do padrão espacial do solo em diferentes escalas e condições ambientais da Amazônia (Mantovanelli et al., 2016; Lima et al., 2022; Silva et al., 2023; Oliveira et al., 2024) vem sendo cada vez mais disseminado e aplicado no manejo de solos da região.

Nesse sentido, o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo (Soares et al., 2018; Lima et al., 2022), poderá auxiliar em práticas de fertilidade e manejo do solo de maneira mais eficiente, o que pode se refletir na produtividade e no impacto ambiental, afinal é sabido que os solos possuem certo grau de heterogeneidade, devido a intensidade de influência de seus fatores de formação, além de alterações a curto prazo por atividades antrópicas, permitindo avaliar a qualidade química do solo em função do manejo.

Em um sistema de manejo atual, cada vez mais tecnificado e monitorado no campo, é de suma importância o entendimento da heterogeneidade das características e propriedades do solo, e consequentes de diversos processos e interações complexas para sua formação (Delarmelina et al., 2022).

No panorama atual, torna-se imprescindível estudos que apresentem a modelagem espacial, principalmente em pesquisas que tratam da acidez do solo, refletindo na aplicação de insumos (Santos et al., 2017), no diagnóstico atual e nas possíveis consequências ao ambiente (Lima et al., 2022), uma vez que seus valores regem a dinâmica das outras variáveis químicas presentes no solo (Costa et al., 2019). Desta forma, este estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da acidez ativa, trocável e potencial do solo em áreas de floresta nativa (FN) e em sistema agroflorestal na região do médio Amazonas.

Material e métodos

Caracterização do meio físico

O município de Silves, AM está localizado na margem esquerda do rio Amazonas, distante da capital amazonense 335 km por via terrestre, percurso feito pela rodovia estadual AM-010 e AM 363, pertencente a mesorregião do médio Amazonas localizado ao leste do Estado do Amazonas, tendo seus limites territoriais com os municípios de Itacoatiara, Itapiranga e Urucurituba.

Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Af tropical úmido, tendo precipitação anual abundante ultrapassando 2.000 mm e temperatura média anual de 27 °C em que, devido à alta precipitação, a estação seca é de pequena duração e a vegetação predominante é de

Floresta Ombrófila Densa (Alvares et al., 2014). Apresenta relevo plano descrito como Planície Aluvial e formação do relevo denominado como “platô” e as classes de solos preponderante são: Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo (Silva, 2003).

Caracterização da área de estudo

A amostragem ocorreu em uma propriedade rural, localizada às margens da rodovia AM-363, em duas áreas: uma de floresta nativa (FN) nas coordenadas (02° 47' 15'' S e 58° 27' 23'' W) e outra área com sistema agroflorestal (SAF) sob as coordenadas (02° 47' 16'' S e 58° 27' 20'' W; Figura 1). Ambos os locais fazem parte da propriedade rural ‘Sítio Estrada da Vida’ localizada no km 57 da rodovia AM-363, próximo à Estrada de Várzea.

A propriedade rural iniciou suas atividades em 1990 com um projeto dividido em duas partes: 1 ha para recuperação ambiental utilizando o plantio de espécies como *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl. (castanheiro) em 1991; e 2,5 ha destinados ao cultivo de *Manihot esculenta* Crantz (mandioca) em 1995. Os cultivos de mandioca foram substituídos pelo SAF em 2001 após o apoio financeiro de um banco ('Banco da Amazônia S.A. – BASA') e a implementação pela 'Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) introduzindo lavouras de *Theobroma cacao* (cacau).

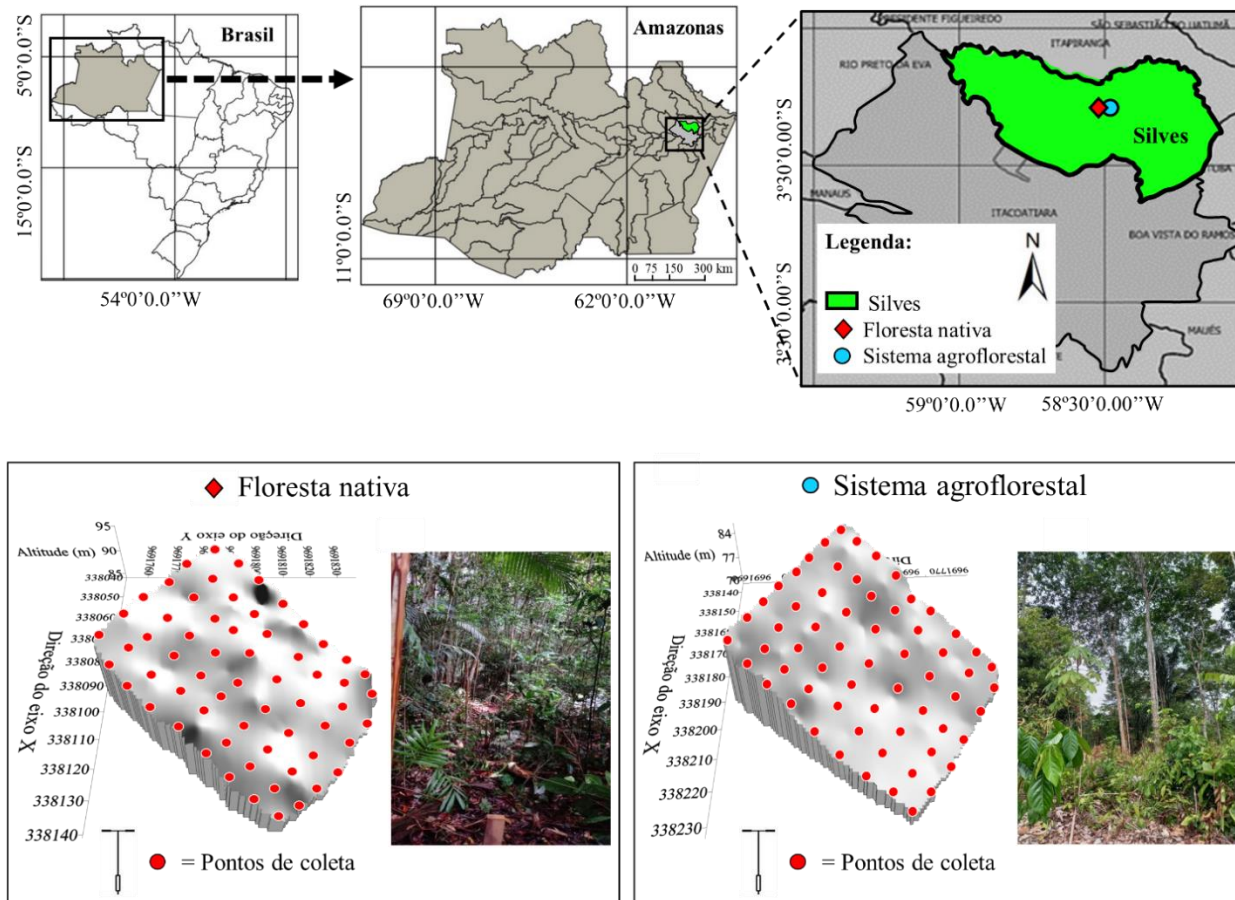


Figura 1. Mapa de localização e malha de amostragem do solo em área de floresta nativa e sistema agroflorestal no município de Silves, AM.

O plantio iniciou com adubos orgânicos à base de esterco bovino e um ano depois foi adicionado o fertilizante superfosfato triplo. As culturas de mandioca e cacau tiveram um fraco desenvolvimento, enquanto as espécies nativas dominaram a área, especialmente *B. excelsa*, *Carapa guianensis* Aubl. (andiroba) e *Euterpe oleracea* Mart. (açaí). As árvores de andiroba e açaí permitiram a extração de óleo e polpa para consumo e comercialização na comunidade local. Hoje o SAF auxilia na conservação e recuperação do local, permitindo que a lavoura de mandioca se desenvolva em uma vegetação sucessional ('capoeira') com queima controlada e derrubada de materiais vegetais.

Coleta de campo

Estabelecemos grades amostrais de 70x70 m em cada local de estudo, com pontos de amostragem em intervalos de 10 m, totalizando 64 pontos amostrais por local (Figura 1). Em cada ponto de amostragem foram coletadas amostras de solo em três camadas de profundidade: 0,0 – 0,10 m (camada superior), 0,10 – 0,20 m (camada intermediária) e 0,20 – 0,40 m (camada inferior). Assim, coletamos 192 amostras de solo por local de estudo. Cada amostra foi formada por amostras de solo perturbadas e não perturbadas (anéis volumétricos). Coletamos coordenadas nos pontos de amostragem utilizando GPS para a construção do modelo digital de elevação.

Análises laboratoriais

As amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) foram levadas para o Laboratório de Solos do Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara da Universidade do Estado do Amazonas (CESIT/UEA), para pesagem e preparo de acordo com cada metodologia pré-estabelecida.

As análises referentes aos componentes da acidez do solo, foram realizadas seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017). O pH do solo foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação solo: solução (água) de 1:2,5. Para a determinação da acidez trocável (Al^{3+}) foram pesados 10 g de solo e adicionado à solução extratora de KCl (cloreto de potássio), no qual este foi agitado em aparelho horizontal por 5 min e deixado em repouso por 16 h, após este período procedeu-se a extração de uma alíquota de 25 ml para titulação com NaOH 0,0025 mol l⁻¹, como a concentração de íons H⁺ é muito baixa no solo, pode se considerar que a leitura realizada na titulação compreende ao teor de Al^{3+} em cmol_c dm⁻³.

A acidez potencial (H+Al), foi extraída com solução de acetato de cálcio (Ca (C₂H₃O₂)₂) a pH 7,0, foram pesados 5 g de solo e adicionada a solução de acetato de cálcio e posteriormente agitada em aparelho horizontal por 10 minutos e após deixada em repouso por 16 h, após este período procedeu-se a extração de uma alíquota de 25 ml para titulação com NaOH 0,0025 mol l⁻¹ (Teixeira et al., 2017).

Análise estatística

Os resultados de pH, alumínio trocável e acidez potencial do solo foram submetidos à análise descritiva para obtenção dos valores de média, mediana, mínimo, máximo, coeficiente de variação (CV%), coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. Para a hipótese de normalidade, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Foram realizadas as análises de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste t Student a 5% de probabilidade para verificar as diferenças dos atributos entre os ambientes. Estas análises foram conduzidas com auxílio do programa computacional STATISTICA versão 7.0.

Análise geoestatística

A variabilidade espacial dos componentes da acidez do solo foi estimada por meio da análise geoestatística, sendo o variograma experimental estimado segundo a equação 1:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. 1}$$

sendo: $\gamma(h)$ - valor da semivariância para uma distância h; N(h) - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; Z(x_i) - valor do atributo Z na posição x_i; Z(x_i+h) - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos variogramas com base no número de pares envolvidos na estimativa da semivariância, na soma do quadrado dos resíduos (SQR), na presença do patamar e no coeficiente de determinação (R²). O grau de dependência espacial (GDE) obtido a partir da razão do efeito pepita (C₀) e o patamar do variograma (C₀+C₁). A estimativa dos valores dos pontos não amostrados foi obtida por meio da krigagem ordinária, para produzir mapas de padrões espaciais utilizando o programa Surfer 11.

Resultados e discussão

Análise descritiva dos componentes da acidez do solo

As variações dos resultados dos atributos referentes a acidez do solo foram relativamente similares entre as duas áreas de estudo (pH: min = 3,82, máx = 6,26; Al^{3+} : min = 0,7, máx = 2,41 cmol_c dm⁻³; H+Al: min = 1,5, máx = 7,4 cmol_c dm⁻³; Tabela 1).

A estatística descritiva mostrou que os resultados de média e mediana de todos os atributos estudados estão bem próximos (Tabela 1), demonstrando que as mesmas se aproximam de uma distribuição normal, ou seja, estes não apresentam influência de valores extremos. A grande maioria dos atributos apresentam valores de assimetria e curtose próximos à zero, exceto no pH 0,0 – 0,10 m, H+Al 0,10 – 0,20 m e no pH e H+Al a 0,20 – 0,40 m em área de SAF, representando boa simetria dos dados, possibilitando a aplicação das técnicas

geoestatísticas a estes atributos. Isso pode ser um indicio que os dados de modo geral seguem

distribuições simétricas, devido aos coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero.

Tabela 1. Estatística descritiva do pH do solo, alumínio trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas.

	pH (H_2O)		Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)		$\text{H}+\text{Al}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	
	FN	SAF	FN	SAF	FN	SAF
Profundidade 0,0 – 0,10 m						
Média	4,2 b	4,63 a	1,7 a	1,5 b	4,2 b	4,83 a
Mediana	4,17	4,61	1,71	1,49	4,12	4,81
CV (%)	4,52	4,53	12,3	18,67	18,3	22,2
Assimetria	0,75	1,5	0,51	0,8	0,7	0,9
Curtose	2,3	8,1	0,41	1,22	0,3	1,9
d	0,09	0,12	0,06	0,08	0,12	0,08
Profundidade 0,10 - 0,20 m						
Média	4,52 b	4,82 a	1,21 a	1,2 a	2,39 b	3,05 a
Mediana	4,49	4,8	1,17	1,18	2,32	2,98
CV (%)	3,31	4,14	13,2	10,83	18,4	22,6
Assimetria	0,54	0,15	0,33	0,5	0,7	3,7
Curtose	0,1	0,3	-0,5	0,2	0,1	21,2
d	0,09	0,08	0,13	0,11	0,13	0,14
Profundidade 0,20 – 0,40 m						
Média	4,64 b	4,87 a	1,1 a	1,05 a	2,21 a	1,96 b
Mediana	4,62	4,88	1,05	1,05	2,14	1,89
CV (%)	3,01	4,9	14,5	20,95	17,6	41,3
Assimetria	0,15	3,05	0,33	-1,2	1,3	-4,1
Curtose	3,05	17,1	-0,5	6,32	2,4	26,8
d	0,07	0,20	0,13	0,11	0,14	0,21
Total						
	FN	SAF	FN	SAF	FN	SAF
Média geral	4,43	4,73	1,33	1,25	3,03	3,27
Mínimo	3,82	4,16	0,7	0,82	1,5	1,5
Máximo	4,98	6,26	2,33	2,41	6,26	7,4

Número de pontos em cada área (n = 64). CV: Coeficiente de variação, d: teste de normalidade Kolmogorov–Smirnov. Médias seguidas de mesma letra na linha, em cada profundidade, não se diferem entre si estatisticamente.

Seguindo os critérios propostos por Warrick e Nielsen (1980), o CV do pH do solo foi baixo ($CV < 12\%$) em ambos os locais, contudo, o CV do Al^{3+} e da acidez potencial ($H+Al$) foi classificado como médio ($12\% < CV < 60\%$) variando entre 12,3 e 41%, com porcentagens de CV próximas com o aumento da profundidade, exceto no SAF do Al^{3+} (0,10 – 0,20 m) e no $H+Al$ (0,20 – 0,40 m). Vale ressaltar que valores elevados de CV servem como indício de maior heterogeneidade dos atributos, e, por conseguinte, indicando maior variabilidade. Nessa circunstância, observa-se então maiores valores de CV principalmente no SAF, refletindo em maior heterogeneidade. Brito et al. (2021) e Lima et al. (2022) trabalhando com solos em diferentes regiões e ambientes da Amazônia, também visualizaram valores elevados no coeficiente de variação em alguns atributos.

Os resultados referentes ao teste de Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para todas as variáveis em ambas as áreas de estudo. Apesar da normalidade dos dados não ser estritamente fundamental para aplicação da ferramenta geoestatística, é importante ter uma distribuição sem caudas muito longas, o que poderia dificultar as estimativas da krigagem, uma vez que são baseadas em os valores médios (Oliveira et al., 2024).

Em todas as camadas do solo, o pH foi ligeiramente maior no SAF, diferindo estatisticamente da FN, o mesmo foi observado no $H+Al$, enquanto que o Al^{3+} foi semelhante nas profundidades 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, não diferindo entre si pelo teste t Student (Tabela 1).

Sistema agroflorestal e acidez do solo

Ao analisar os resultados médios dos atributos (Tabela 1) foi possível observar diferenças estatísticas entre os locais de estudo, sendo detectadas em todas as camadas do solo, exceto no Al^{3+} nas camadas inferiores (0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m).

O pH do solo apresentou menores valores na camada superior em ambas as áreas, enquanto que o Al^{3+} apresentou os maiores. Resultados condizentes foram encontrados por Sales et al. (2022) estudando solos de floresta da Amazônia

Ocidental em estações secas e chuvosas, sendo correlacionado de forma inversamente proporcional os teores de pH com a acidez ativa e potencial do solo na camada 0,0 – 0,10 m. O maior valor de pH na área de SAF (Tabela 1) pode ser justificada pela influência das técnicas de manejo adotadas na condução do SAF ao longo dos anos, afinal, a heterogeneidade de atributos físicos e químicos do solo pode ser resultante de fatores extrínsecos, normalmente relacionados com as práticas de manejo (Campos & Montanari, 2024), principalmente as relacionadas a melhoria da qualidade química do solo. Pois os SAFs podem ser protagonistas na recuperação de áreas degradadas em propriedades rurais mais tecnificadas e, principalmente na atividade agrícola e/ou florestal das famílias na região.

Em relação à acidez trocável do solo, as áreas de estudo apresentaram diferenças estatísticas, contudo, o Al^{3+} foi em média levemente maior na FN (Tabela 1) na camada de 0-20 cm. Possivelmente sendo consequência de ações corretivas pretéritas realizadas no SAF, que ainda podem ser verificadas no tempo atual. Pois a prática da calagem pode aumentar os valores de pH, fornecimento de Ca e Mg, diminuição ou eliminação dos efeitos tóxicos do Al, Mn e Fe, diminuição da “fixação” de P (Corrêa et al., 2011), elevando a capacidade de troca de cátions (CTC) (Maraschin et al., 2020) e atividade microbiana do solo.

Em diferentes estados da região Amazônica incluindo a região onde o trabalho está inserido, os valores de acidez do solo são em sua maioria elevados, a exemplo de estudos de Aquino et al. (2016) em sistemas agroflorestais na região sul do Amazonas, Lima et al. (2022) em floresta nativa na região de Porto Velho, Rondônia, Moline e Coutinho (2015) em mata nativa no município de Manacapuru, AM, inserida na Amazônia Ocidental e em SAFs na região Norte do Pará (Silva Júnior et al., 2012). Sendo assim, um dos principais motivos que resultam nesses baixos valores de pH do solo, são a perda de bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ principalmente) no solo, gerando altas concentrações de íons H^+ no solo (Reis et al., 2009).

Avaliando o potencial de acidez do solo, este apresentou diferença estatística entre as áreas de FN e SAF em todas as profundidades (Tabela 1), com média em ambas as áreas de $4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada superior (0,0 – 0,10 m) e $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada inferior (0,20 – 0,40 m). Essa diminuição do teor de H^+/Al em profundidade também foi observado por Silva Júnior et al. (2012) trabalhando com diferentes sistemas de manejo, inclusive SAF em Latossolo no Norte do Pará. Todavia, ainda há uma carência de estudos voltados a influência do manejo agroflorestal na qualidade química do solo e

como isto pode alterar ou não a variabilidade espacial do ambiente.

Geoestatística

A dependência espacial da acidez ativa, trocável e potencial do solo foi explicada pelos modelos esférico e exponencial (Figuras 2, 3 e 4) e o coeficiente de determinação (R^2) variou de 0,75 a 0,87 (Figura 2), de 0,73 a 0,85 (Figura 3) e de 0,71 a 0,88 (Figura 4).

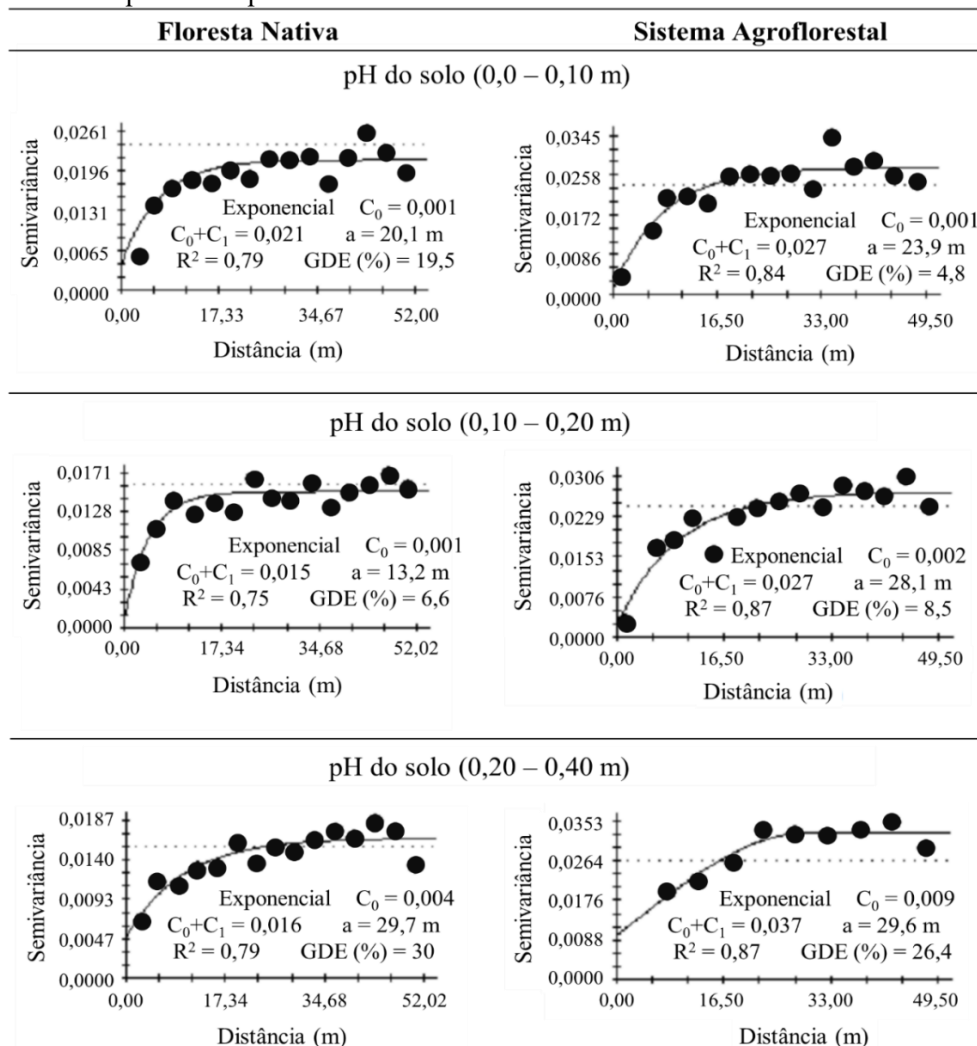


Figura 2. Semivariogramas de pH do solo em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas. Modelo, C_0 = efeito pepita, $C_0 + C_1$ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial, R^2 = coeficiente de determinação.

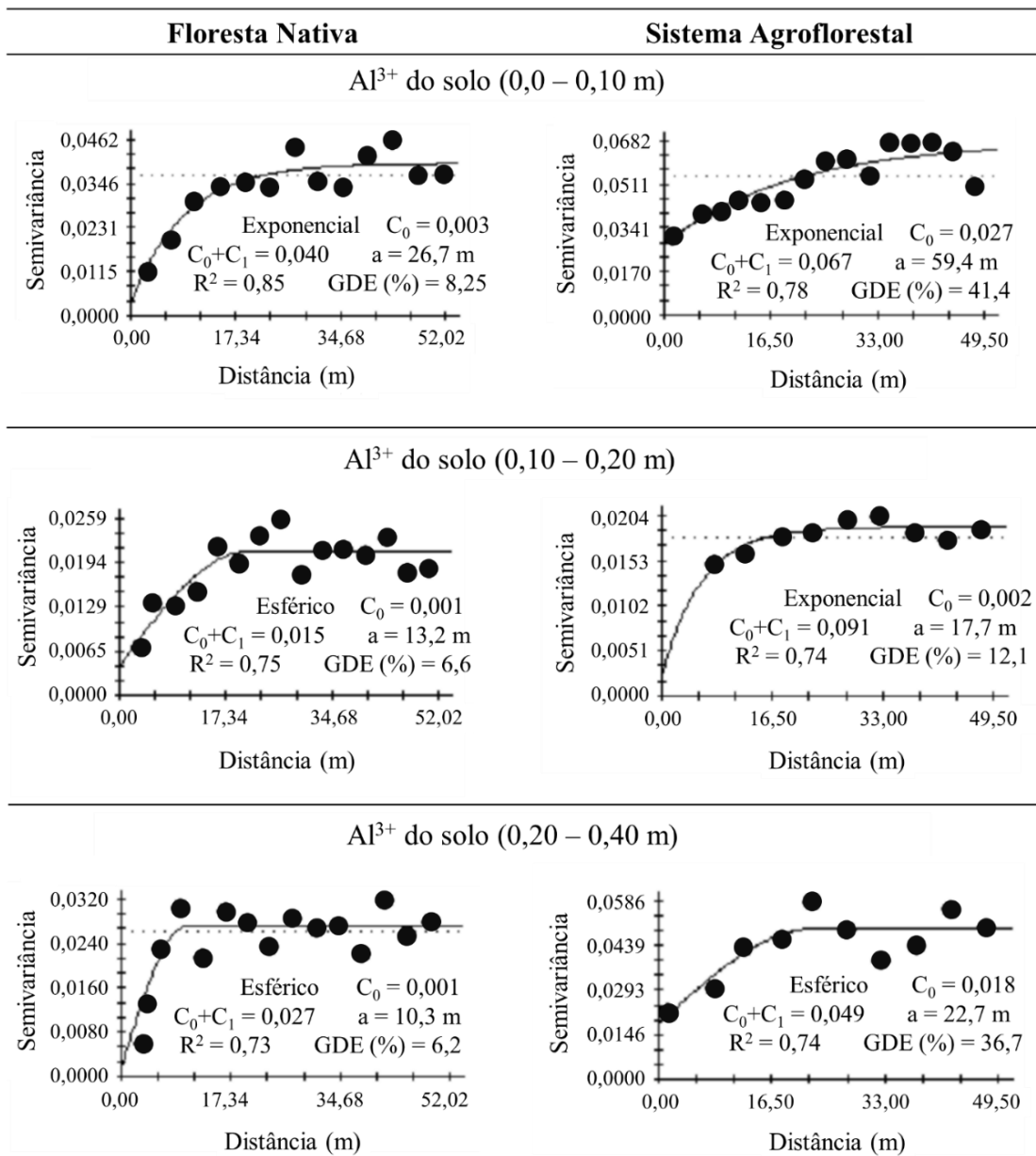


Figura 3. Semivariogramas de acidez trocável (Al^{3+}) em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas. Modelo, C_0 = efeito pepita, C_0+C_1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial, R^2 = coeficiente de determinação.

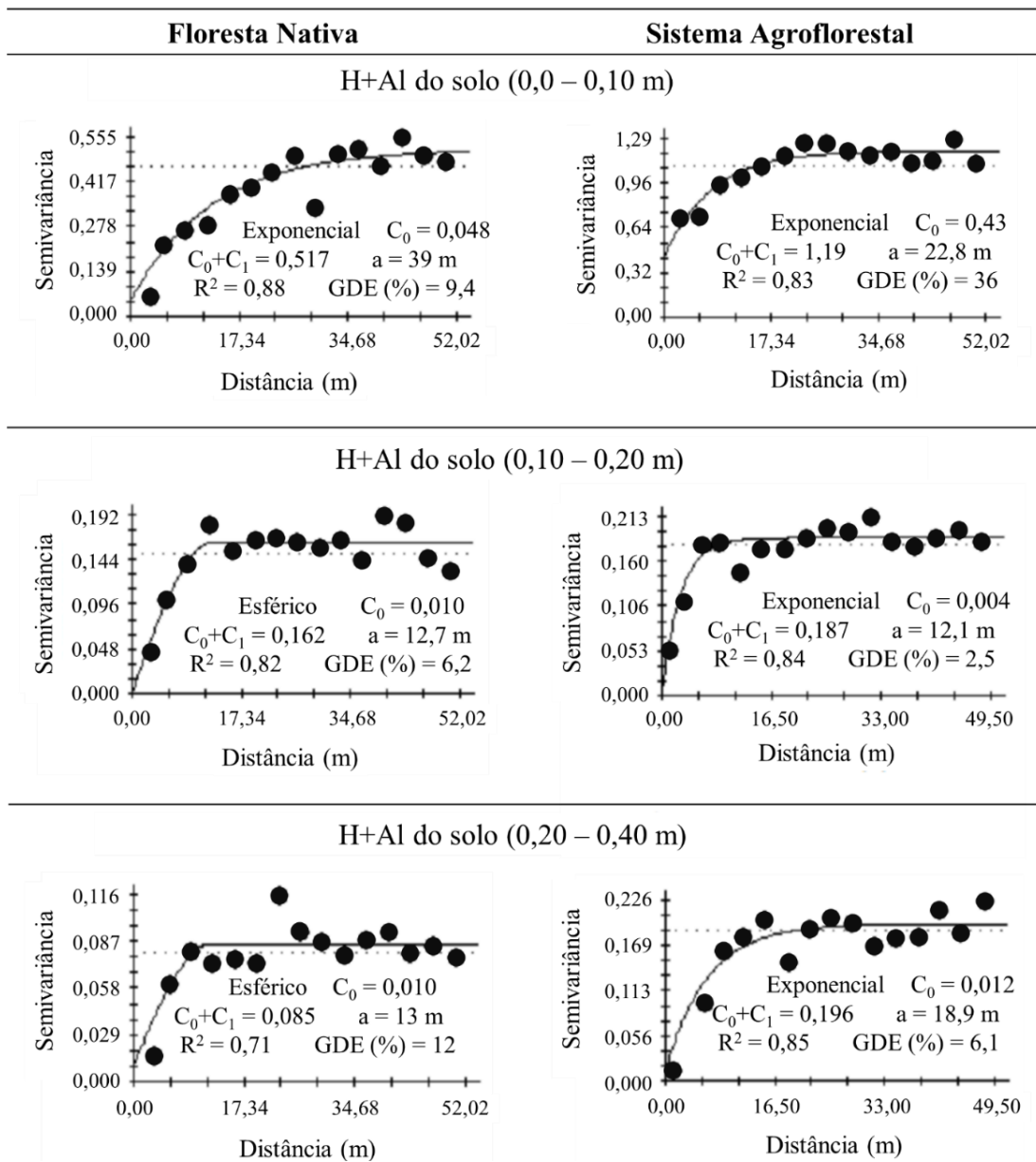


Figura 4. Semivariogramas de acidez potencial (H+Al) em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas. C_0 = efeito pepita, C_0+C_1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação.

Os modelos matemáticos citados são comuns no estudo de solos e geralmente fornecem o melhor ajuste para as características do mesmo (Soares et al., 2018; Lima et al., 2022). Vale ressaltar que essas observações são o primeiro indício de uma possível relação entre estes fatores e

a caracterização detalhada da variabilidade espacial e a definição de unidades de mapeamento.

A relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar do semivariograma (C_0+C_1) indica o grau da dependência espacial (GDE) dos atributos estudados. Sabendo disso, segundo a classificação

proposta por Cambardella et al. (1994) o GDE foi considerado forte [$C_0/(C_0+C_1) \leq 25\%$] para a maioria dos modelos, exceto para o Al^{3+} e $H+Al$ na camada superior (0,0 – 0,10 m) e somente Al^{3+} na inferior (0,20 – 0,40 m), ambos na área de SAF, que teve GDE moderado [$C_0/(C_0+C_1)$ entre 25% e 75%]. Em estudos de geoestatística, o grau de dependência espacial forte e moderado aponta que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais com grande confiabilidade na estimativa. O que corrobora com outros trabalhos realizados na região Amazônica, onde Oliveira et al. (2024) e Souza et al. (2024) estudando os efeitos no manejo de solos aplicando técnicas geoespaciais também encontraram modelos com forte e moderada dependência espacial.

Os resultados de alcance (a) que representam a máxima distância na qual as variáveis correlacionam-se entre si (Souza et al., 2024), variaram dentro dos limites estabelecidos na grade amostral (de 13 a 29 m, Figura 2, de 10 a 59 m, Figura 3 e de 12 a 39 m, Figura 4) e indicaram continuidade espacial das características do solo. A variabilidade dos componentes da acidez do solo foi menor na camada superficial, aumentando em profundidade (Figuras 3 e 4).

Variabilidade espacial da acidez ativa, trocável e potencial do solo

O mapeamento dos componentes da acidez do solo (Figuras 5, 6 e 7) por meio da técnica de krigagem, permitiu analisar o padrão espacial em todas as profundidades, com base no mapa de isolinhas, afinal é sabido que esta ferramenta possibilita a identificação de regiões heterogêneas (Silva et al., 2023) reforçando a necessidade de ampliação da malha amostral e da densidade dos pontos de forma a caracterizar a variabilidade espacial de todos os atributos da área (Mantovanelli et al., 2016).

O mapa de pH do solo com os maiores valores (cores em vermelho e laranja), apresentaram manchas ocupando metade da área de FN nas três profundidades, contudo o SAF apresentou um padrão espacial diferente e amplitudes de valor superior a FN (Figura 5). Evidenciando a influência externa causada pelas práticas de manejo que

podem afetar as características físicas e químicas do solo (Campos & Montanari, 2024).

Os maiores teores de Al^{3+} ocuparam grande parte do mapa na camada inferior do solo (0,20 – 0,40 m) nas duas áreas, porém no SAF com maior predominância (Figura 6). O que pode ser justificado pelo tempo de implantação e condução do SAF reduzindo o Al^{3+} da camada superficial do solo.

Linhares et al. (2021) trabalhando em diferentes classes e profundidades de solo em floresta primária e SAF na colônia agrícola do município de Lábrea-AM, demonstraram que os SAFs implantados há mais de dez anos apresentaram elevada capacidade para estocar C orgânico, semelhante a floresta primária, sendo assim, a capacidade que os SAFs têm de promover a recuperação em médio e longo prazo da qualidade do solo, fortalece a hipótese de que os SAFs são tecnologias de produção agrícola com potencial para mitigar as emissões de gases de CO_2 e, ao mesmo tempo, produzir alimentos e matéria-prima de origem vegetal seguindo preceitos sustentáveis.

Crespo et al. (2023) manifesta que os SAFs bem manejados podem apresentar uma biodiversidade vegetal e estoque de C na fitomassa, na serapilheira e no solo semelhantes à área de vegetação nativa adjacente, devido ao maior aporte de serapilheira das espécies florestais e agrícolas implantadas, aumentando o teor de matéria orgânica do solo, devido a decomposição dos componentes florísticos e faunísticos presentes no sistema.

Assim, quanto maior o tempo de adoção de um SAF maior será a conservação da qualidade química do solo e maior o equilíbrio desse sistema, baseado na diversidade dos seus componentes e no arranjo estrutural que o aproxima de uma vegetação nativa (Crespo et al., 2023).

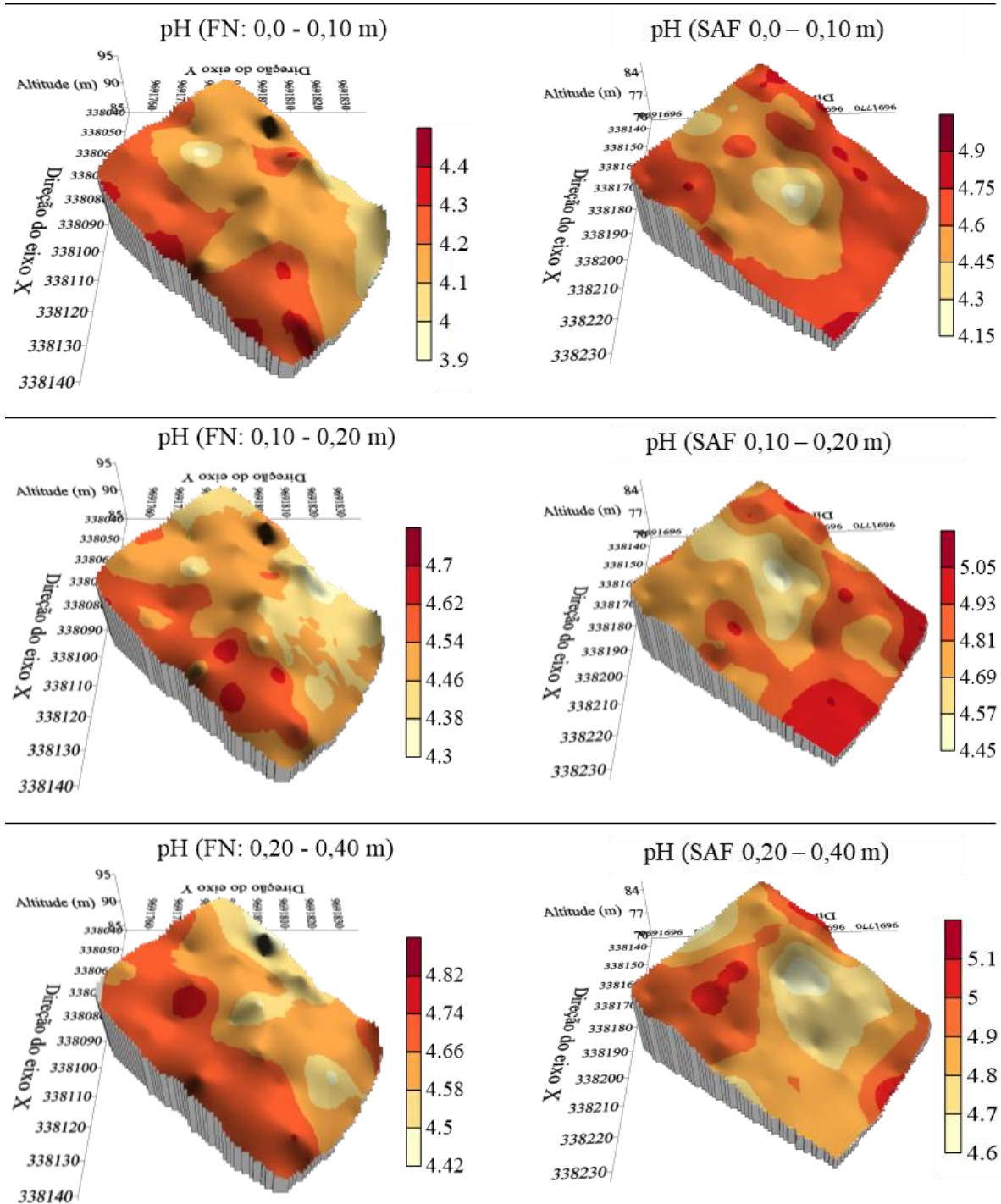


Figura 5. Mapas de krigagem de pH do solo em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas.

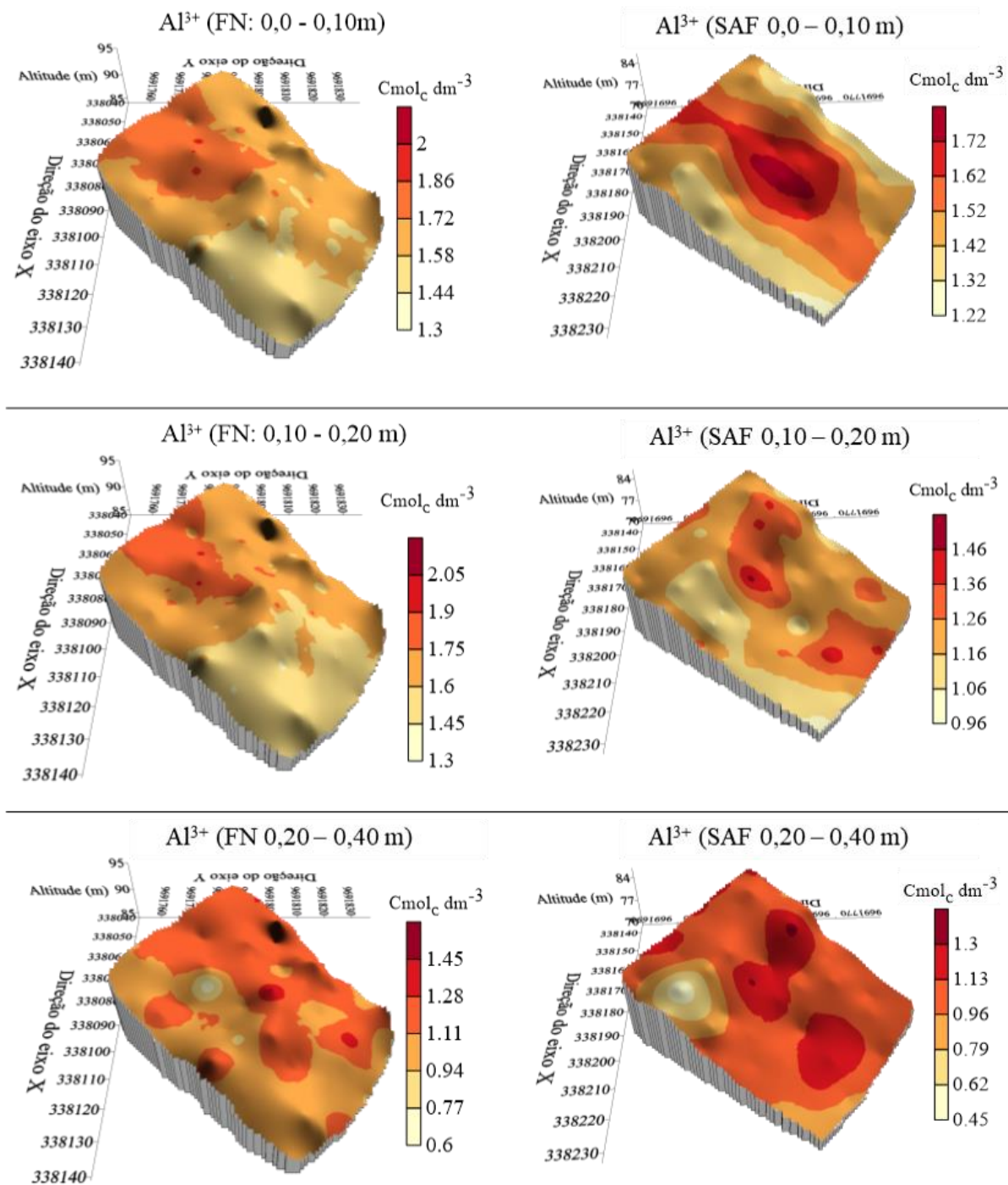


Figura 6. Mapas de krigagem de acidez trocável (Al^{3+}) do solo em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas.

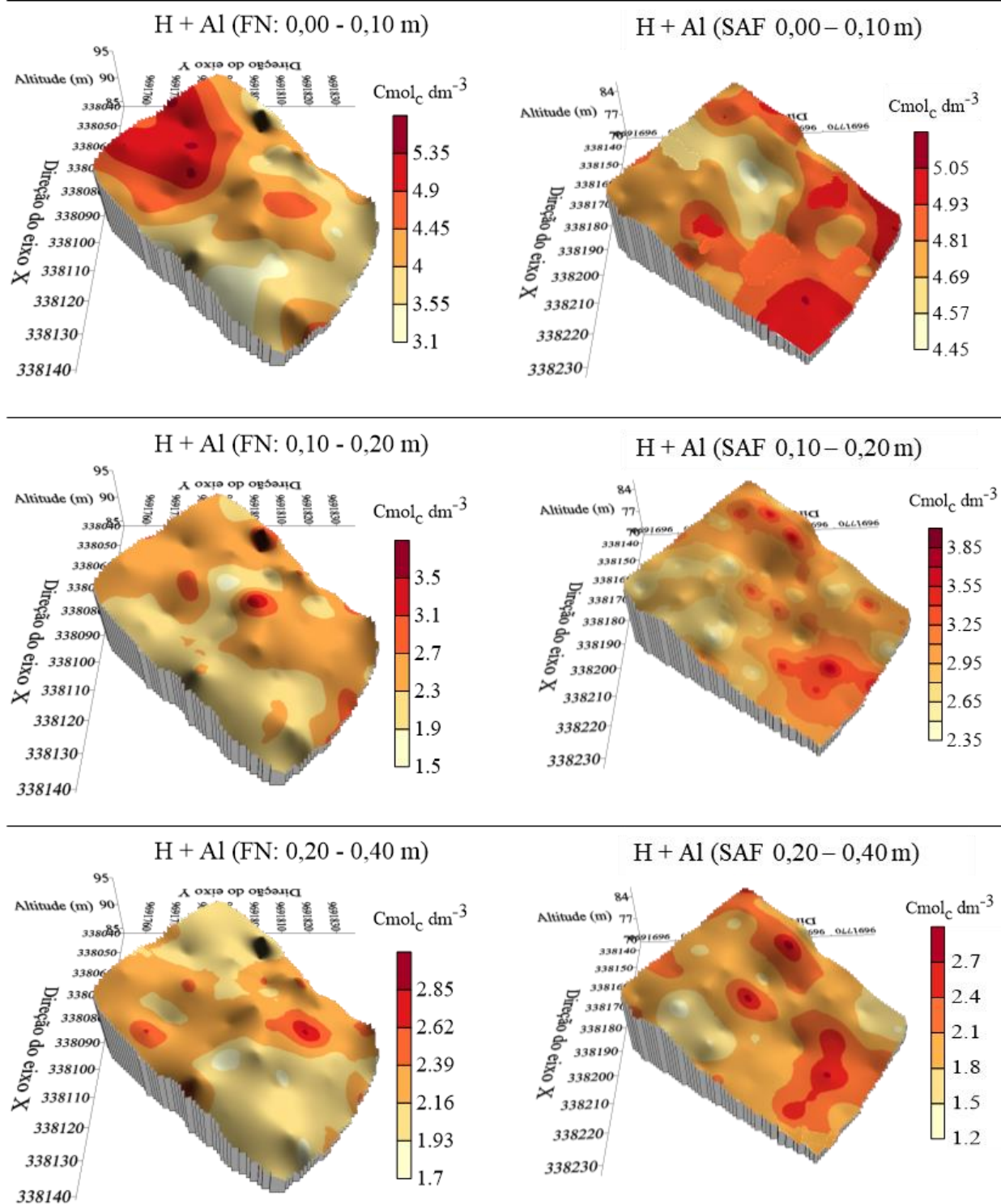


Figura 7. Mapas de krigagem de acidez potencial (H+Al) do solo em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) no médio Amazonas.

A acidez potencial do solo com menores amplitudes de valor (cores em amarelo) nos mapas de FN e SAF, se apresentaram predominantes nas camadas 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m (Figura 7). Nesse sentido, os SAFs emulam condições relativamente semelhantes às dos locais de FN, demonstrando menor variabilidade dos dados, justificando o fato de esse sistema de manejo conservacionista causar menos impacto ao solo e, conseqüentemente, os atributos do solo apresentarem menor variabilidade (Oliveira et al., 2013), permitindo o uso mais sustentável e eficiente dos recursos naturais (Miccolis et al., 2016).

Os maiores teores de H+Al do solo se apresentaram nas partes inferiores dos mapas de SAF nas três profundidades (Figura 7). Desse modo, o SAF apresenta-se como uma excelente alternativa para a sustentabilidade do cultivo, pois tem potencial de assemelhar padrões ecológicos naturais, o que permite otimizar a produção por unidade de superfície, respeitando o princípio de rendimento contínuo, devido a manutenção e recirculação do potencial produtivo dos recursos naturais renováveis (Crespo et al., 2023). Além de poder influenciar positivamente a qualidade química do solo, e gerar harmonicamente alimentos e produtos florestais, reduzindo-se os impactos à vegetação nativa.

Conclusões

O SAF que foi implementado e conduzido por 22 anos, promoveu alterações nos componentes da acidez do solo, possibilitando melhorias em sua qualidade química. O pH foi ligeiramente maior no SAF, o mesmo foi observado no H+Al, enquanto que o Al³⁺ apresentou média geral superior na FN.

Tanto a FN quanto o SAF apresentaram, de modo geral, forte grau de dependência espacial, com continuidade espacial maior que o espaçamento estipulado entre os pontos em todas as profundidades.

Os padrões espaciais dos componentes da acidez do solo na área de SAF podem proporcionar a criação de zonas diferenciadas de manejo. A aplicação da geoestatística em estudos a respeito da qualidade química do solo poderão auxiliar

produtores familiares e agricultores agroflorestais da Amazônia.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Amazonas (FAPEAM; PROSPAM 008/2021 - 54272.UNI849.8873.23082021 e FAPEAM; PRODUTIVIDADE-CT&I 013/2022 - 62835.UNI910.8873.05082022), a Universal CNPq (chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 18/2021), a Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI-AM) e ao Governo do Estado do Amazonas.

Referências

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., & Sparovek, G. (2014). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amaral, L.P., Ferreira, R.A., Vanz, M.G., Motter, C., & Gonçalves, A.L.R. (2021). Variabilidade espacial em sistema agroflorestal silvibananeiro, no litoral do Rio Grande do Sul com gvSIG. *Nativa*, 9(1), 44-53. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i1.11111>
- Aquino, R.E., Campos, M. C.C., Soares, M.D.R., Oliveira, I.A., Franciscon, U., Silva, D.M.P., & Cunha, J.M. (2016). Chemical soil attributes evaluated by multivariate techniques and geostatistics in the area with agroforestry and sugarcane in Humaitá, AM, Brazil. *Bioscience Journal*, 32(1), 61-72.
- Brito, W.B.M., Campos, M.C.C., Oliveira, I.A., Cunha, J.M., Freitas, L., Soares, M.D.R., & Mantovanelli, B.C. (2021). Pedotransfer functions to estimate some soil properties in Indian Black Earth, south of Amazonas State. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(4), e20190543. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190543>
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlem, D.L., Turco, R.F., & Konopa, A.E. (1994). Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science Society American Journal*, Madison, 58(4), 1501–1511.

- <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Campos, R.P., & Montanari, R. (2024). Manejo dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo no sistema de integração lavoura pecuária –ILP. *Revista observatório de la economia latinoamericana*, 22(12), 01-45.
- Corrêa, R.M., Nascimento, C.W.A., & Rocha, A.T., (2011). Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. *Acta Scientiarum Agronomy*, 33(1), 153-159. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.3129>
- Costa, J.J.F., Silva, E.B., Coelho, F.F., Tiecher, T., Bissani, C.A., & Filippi, D., (2019). Atributos químicos relacionados à acidez e capacidade de troca de cátions de solos do Rio Grande do Sul com diferentes graus de intemperização. *Acta Iguazu*, 8(2), 81-100. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v8i2.19885>
- Crespo, A.M., Souza, M.N., & Silva, A.B. (2023). Ciclo do carbono (c) e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura. *Incaper em Revista*, 13 e 14, 6-19. <https://doi.org/10.54682/ier.v.13e14.p06.19>
- Delarmelina, W.M., Caldeira, M.V.W., Gomes Junior, D., Godinho, T.O., Caliman, J.P., Gonçalves, E.O., Kunz, S.H., Pereira, M.G., & Silva, C.S., (2022). Atributos do solo e variabilidade espacial do estoque de carbono orgânico do solo sob Floresta Atlântica, Brasil. *Revista Ciência Florestal*, 32(3), 1528-51. <https://doi.org/10.5902/1980509867028>.
- Lima, A.F.L., Campos, M.C.C., Martins, T.S., Silva, G.A., Mendes Brito, W.B., Santos, L.A.C., Oliveira, I.A., & Cunha, J.M., (2022). Soil chemical attributes in áreas under conversion from forest to pasture in southern Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, 12, 22555. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25406-9>
- Linhares, J.M.S., Bastos, W.R., Manzatto, A.G., Almeida, R., Silva, D.P.L., & Souza, R.M.S. (2021). Estoque de carbono orgânico no solo sob floresta primária (FP) e sistemas agroflorestais (SAF) em assentamento rural no sul do Amazonas. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, 8(2), 497-519.
- <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/4285>
- Mantovanelli, B.C., Campos, M.C.C., Alho, L.C., Francisco, U., Nascimento, M.F., & Santos, L.A.C., (2016). Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. *Revista de Ciências Agroambientais*, 14(1) 01-09. <https://doi.org/10.5327/rcaa.v14i1.817>
- Maraschin, L., Scaramuzza, J.F., & Vieira, C.R. (2020). Incubação do calcário e as características químicas de solos com texturas diferentes. *Nativa*, 8(1), 43-51. <https://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i1.6908>
- Miccolis, A., Peneireiro, F.M., Marques, H.R., Vieira, D.L.M., Arco-Verde, M.F., Hoffmann, M. R., Rehder, T., & Pereira, A.V.B., (2016). Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: Como conciliar conservação com produção opções para Cerrado e Caatinga. Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal, 266p.
- Moline, E.F.V., & Coutinho, E.L.M., (2015). Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. *Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 58(1), 14-20. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1683>
- Oliveira, A.G., Santos, L.A.C., Gomes, R.P., Santos, M.C., & Santos, N.C. (2024). Qualidade física do solo sob conversão de floresta em sistema agroflorestal na Amazônia central. *Revista caminhos de geografia*. 25(101), 264-284. <https://doi.org/10.14393/RCG2510171662>
- Oliveira, I.A., Santos, R.V., Silva, D.M.P., Almeida, R.G., Freitas, L., Cunha, J.M., Oliveira, F.P., Cavalcante, E.C., & Campos, M.C.C. (2024). Geoestatística Aplicada a Atributos Físicos e Químicos em Área com Mandioca na Região de Humaitá, Amazonas. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 13(2), 35-49. <http://dx.doi.org/10.21664/22388869.2024v13i2p.35-49>

- Oliveira, I.A., Campos, M.C.C., Soares, M.D.R., Aquino, R. E., Marques Júnior, J., & Nascimento, E. P., (2013). Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1103-1112. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>
- Reis, M. S., Fernandes, A. R., Grimaldi, C., Desjardins, T., & Grimaldi, M. (2009). Características químicas dos solos de uma toposequência sob pastagem em uma frente pioneira da Amazônia Oriental. *Revista Ciências Agrárias*, 52, 37-47.
- Ribeiro, J.M., Frazão, L.A., Cardoso, P.H.S., Oliveira, A.L.G., Sampaio, R.A., & Fernandes, L.A. (2019). Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. *Ciência Florestal*, 29(2), 913-923. <https://doi.org/10.5902/1980509825310>
- Sales, M.C.G., Brito Filho, E.G., Campos, M.C.C., Helvas, C.H.G., Santos, L.A.C., Gomes, M.M., Cunha, J.M., Oliveira, F.P., & Almeida, R.G. (2022). Seasonality, soil attributes and root biomass in Cerrado, Cerradão and Forest environments, Western Amazon. *Bioscience Journal*, 38, e38092. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-53707>
- Santos, K.E.L., Bernardi, A.D.C., Bettiol, G.M., & Crestana, S. (2017). Geoestatística e geoprocessamento na tomada de decisão do uso de insumos em uma pastagem. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 11, 294-307. <https://doi.org/10.18011/bioeng2017v11n3p294-307>
- Silva, A.L., Mariano, D.C., Ebling, A.A., Oliveira Neto, C.F., Viégas, I.J.M., & Okumura, R.S. (2023). Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 16(1), 9417.
- Silva, J.M.L., (2003). Levantamento de Reconhecimento de Alta Intensidade dos Solos do município de Itacoatiara - Estado do Amazonas. Embrapa Amazônia Oriental. Belém, PA.
- Silva Junior, C.A., Boechat, C.L., & Carvalho, L.A., (2012). Atributos químicos do solo sob conversão de floresta Amazônica para diferentes sistemas na região Norte do Pará, Brasil. *Bioscience Journal*, 28(4), 566-572.
- Soares, M.D.R., Campos, M.C.C., Oliveira, I.A., Cunha, J.M., Souza, Z.M., Aquino, R.E., Silva, D. M. P., & Silva, J. F. (2018). Variabilidade espacial dos atributos do solo sob agrofloresta na região de Humaitá, AM. *Gaia Scientia*, 12(1), 33-41. doi: 10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n1.34353.
- Souza, F.G., Campos, M.C.C., Mantovanelli, B.C., Santos, R.V., Cunha, J.M., Oliveira, F.P., Lima, A.F.L., Mendes Brito, W.B., Freitas, L., Brito Filho, E.G., & Brito Silva, J. (2024). Spatial variability of soil resistance penetration in forest areas converted for agricultural uses in the Amazon, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(1), 332-348. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p332-348>
- Teixeira, P.C., Donagema, G.K., Ademir, F., & Teixeira, W.G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. – (3. ed.), rev. e ampl. – Brasília: Embrapa, 573p.
- Tremblay, S., Lucotte, M., Revéret, J., Davidson, R., Mertens, F., Passos, C.J.S., Christina A., & Romanã, C.A. (2015). Agroforestry systems as a profitable alternative to slash andburnpractices in small-scale agriculture of the Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*, Dordetch, 89(2), 193–204. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9753-y>
- Van Raij, B. (1991). Fertilidade do solo e adubação. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: Potafos. 343p.
- Warrick, A.W., & Nielsen, D.R., (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.) Applications of soil physics. New York: Academic Press. 400p.