ReGeo ISSN: 2177-3246

VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO E SUAS IMPLICAÇÕES ECOFISIOLÓGICAS PARA A CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA (*Bertholletia excelsa*) NA AMAZÔNIA ORIENTAL

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL FERTILITY AND ITS ECOPHYSIOLOGICAL IMPLICATIONS FOR THE BRAZIL NUT TREE (*Bertholletia excelsa*) IN EASTERN AMAZONIA

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO E IMPLICACIONES ECOFISIOLÓGICAS PARA LA CASTAÑA DE BRASIL (*Bertholletia excelsa*) EN LA AMAZONIA ORIENTAL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n9-132

Data de submissão: 21/08/2026 **Data de publicação:** 21/09/2026

Raimundo Cosme de Oliveira Junior
Doutor em Geologia e Geoquímica
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

Darlisson Bentes dos Santos
Mestre em Energia na Agricultura
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: engenheirodbs@hotmail.com

Patricia da Costa
Doutora em Biodiversidade e Conservação
Instituição: Embrapa Meio Ambiente
E-mail: patricia.da-costa@embrapa.br

Kátia Emídio da Silva
Doutora em Ciências Florestais
Instituição: Embrapa Amazônia Ocidental
E-mail: katia.emidio@embrapa.br

Lúcia Helena de Oliveira Wadt
Doutora em Agronomia - Genética e Melhoramento de Plantas
Instituição: Embrapa Rondônia
E-mail: lucia.wadt@embrapa.br

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

Carlos Alberto Costa Veloso
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: carlos.veloso@embrapa.br

RESUMO
A fertilidade dos solos amazônicos é amplamente controlada por processos pedogeoquímicos associados ao intemperismo intenso, à lixiviação de bases e à predominância de minerais secundários ricos em ferro e alumínio. Apesar da importância ecológica e socioeconômica da castanheira-da-amazônia (Bertholletia excelsa Bonpl.), ainda existem lacunas relacionadas à organização espacial da fertilidade do solo em castanhais naturais e às implicações desses padrões para o funcionamento ecofisiológico das árvores. Este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo em uma área de ocorrência natural de B. excelsa na região de Santarém, estado do Pará, utilizando ferramentas geoestatísticas para identificar padrões de dependência espacial e gradientes edáficos associados à fertilidade do solo. Foram avaliados atributos químicos e físicos do solo, incluindo alumínio trocável, acidez potencial, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, carbono e textura do solo. A análise geoestatística revelou diferentes níveis de dependência espacial entre os atributos, com forte dependência para H+Al, T e V%, indicando que a variabilidade desses parâmetros é predominantemente controlada por fatores estruturais do solo. Gradientes espaciais significativos foram observados para argila e fósforo disponível, sugerindo a influência de processos pedogenéticos e geomorfológicos na organização da fertilidade do solo. A krigagem evidenciou a presença de mosaicos edáficos intra-área, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia em escalas espaciais relativamente curtas. A integração entre atributos pedogeoquímicos, retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes indica que a estrutura física e química do solo exerce papel central na regulação do funcionamento hidráulico e do crescimento da castanheira. Esses resultados contribuem para ampliar o conhecimento sobre as interações entre solo, hidrologia e fisiologia arbórea em ecossistemas amazônicos, fornecendo subsídios para estudos de ecologia florestal, manejo sustentável e conservação de castanhais naturais.

Palavras-chave: Geoestatística. Fertilidade do Solo. Pedogeoquímica Tropical. Castanha-da-amazônia. Variabilidade Espacial.

ABSTRACT
The fertility of Amazonian soils is largely controlled by pedogeochemical processes associated with intense weathering, base cation leaching, and the predominance of secondary minerals rich in iron and aluminum oxides. Despite the ecological and socioeconomic importance of the Brazil nut tree (Bertholletia excelsa Bonpl.), significant gaps remain regarding the spatial organization of soil fertility in natural stands and its implications for tree ecophysiological functioning. This study aimed to assess the spatial variability of chemical and physical soil attributes in a natural B. excelsa stand located in Santarém, Pará State, Brazil, using geostatistical approaches to identify spatial dependence patterns and edaphic gradients associated with soil fertility. Soil attributes analyzed included exchangeable aluminum, potential acidity (H+Al), cation exchange capacity (CEC at pH 7), base saturation, soil carbon, and texture. Geostatistical analysis revealed distinct levels of spatial dependence among soil attributes, with strong spatial dependence observed for H+Al, CEC, base saturation, and available phosphorus, indicating that these variables are primarily controlled by intrinsic soil-forming factors. In contrast, attributes such as clay content and soil carbon exhibited weaker spatial dependence, suggesting greater influence of local-scale processes. Significant spatial gradients were identified for clay and available phosphorus, reflecting the combined influence of pedogenetic and geomorphological controls. Kriging interpolation demonstrated the presence of intra-site edaphic mosaics, where water and nutrient availability vary over relatively short distances. The integration of pedogeochemical attributes, water retention capacity, and nutrient availability indicates that soil physical and chemical structure plays a central role in regulating hydraulic functioning and growth of Brazil nut trees. These findings contribute to a better understanding of soil–plant–hydrology

interactions in Amazonian ecosystems and provide relevant insights for forest ecology, sustainable management, and conservation of natural Brazil nut stands.

Keywords: Geostatistics. Soil Fertility. Tropical Pedogeochemistry. Brazil Nut Tree. Spatial Variability.

RESUMEN

La fertilidad de los suelos amazónicos está ampliamente controlada por procesos pedogeoquímicos asociados al intemperismo intenso, a la lixiviación de bases y a la predominancia de minerales secundarios ricos en hierro y aluminio. A pesar de la importancia ecológica y socioeconómica de la castaña amazónica (Bertholletia excelsa Bonpl.), aún existen brechas relacionadas con la organización espacial de la fertilidad del suelo en castañales naturales y las implicaciones de estos patrones para el funcionamiento ecofisiológico de los árboles. Este estudio tuvo como objetivo analizar la variabilidad espacial de atributos químicos y físicos del suelo en un área de ocurrencia natural de B. excelsa en la región de Santarém, estado de Pará, utilizando herramientas geoestadísticas para identificar patrones de dependencia espacial y gradientes edáficos asociados a la fertilidad del suelo. Se evaluaron atributos químicos y físicos del suelo, incluyendo aluminio intercambiable, acidez potencial, capacidad de intercambio catiónico, saturación por bases, carbono y textura del suelo. El análisis geoestadístico reveló diferentes niveles de dependencia espacial entre los atributos, con fuerte dependencia para H+Al, T y V%, indicando que la variabilidad de estos parámetros está predominantemente controlada por factores estructurales del suelo. Gradientes espaciales significativos fueron observados para arcilla y fósforo disponible, sugiriendo la influencia de procesos pedogenéticos y geomorfológicos en la organización de la fertilidad del suelo. El kriging evidenció la presencia de mosaicos edáficos intra-área, en los cuales la disponibilidad de agua y nutrientes varía en escalas espaciales relativamente cortas. La integración entre atributos pedogeoquímicos, retención hídrica y disponibilidad de nutrientes indica que la estructura física y química del suelo ejerce un papel central en la regulación del funcionamiento hidráulico y del crecimiento de la castaña. Estos resultados contribuyen a ampliar el conocimiento sobre las interacciones entre suelo, hidrología y fisiología arbórea en ecosistemas amazónicos, proporcionando subsidios para estudios de ecología forestal, manejo sostenible y conservación de castañales naturales.

Palabras clave: Geoestadística. Fertilidad del Suelo. Pedogeoquímica Tropical. Castaña Amazónica. Variabilidad Espacial.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia abriga a maior floresta tropical contínua do planeta e desempenha papel fundamental na regulação do clima global, no ciclo hidrológico continental e na manutenção da biodiversidade terrestre. Apesar da elevada biomassa e produtividade da vegetação, grande parte dos solos amazônicos apresenta baixa fertilidade natural, resultante de processos pedogenéticos associados ao intemperismo químico prolongado sob condições quentes e úmidas. A intensa lixiviação de bases trocáveis ao longo do tempo favoreceu a formação de solos altamente intemperizados, dominados por minerais secundários ricos em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, caracterizados por elevada acidez, baixa saturação por bases e elevada saturação por alumínio (Quesada *et al.*, 2010; Cunha *et al.*, 2022).

Nesses ambientes, a fertilidade do solo é fortemente controlada por processos pedogeoquímicos associados à dinâmica de cargas variáveis na superfície mineral e à interação entre matéria orgânica e frações minerais reativas. Diferentemente de solos de regiões temperadas, nos quais a capacidade de troca catiônica está frequentemente associada a minerais 2:1 com carga permanente, nos solos tropicais a retenção de nutrientes depende predominantemente da matéria orgânica e da mineralogia da fração argilosa, incluindo caulinita e óxidos de ferro e alumínio (Alleoni *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2016). Como consequência, a capacidade de troca catiônica tende a ser relativamente baixa e altamente sensível às variações na composição mineralógica e no teor de matéria orgânica, tornando a fertilidade intrinsecamente heterogênea.

Além das limitações químicas, os solos amazônicos apresentam elevada heterogeneidade espacial de suas propriedades físicas e químicas. Processos pedogenéticos, geomorfológicos e hidrológicos atuam conjuntamente na formação de paisagens complexas, nas quais variações sutis de relevo, drenagem e deposição sedimentar podem gerar diferenças significativas na textura, na mineralogia e na distribuição de nutrientes (Holmes *et al.*, 2005; Quesada *et al.*, 2010). Esses processos resultam na formação de mosaicos edáficos intra-área, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia em escalas espaciais relativamente curtas, influenciando diretamente padrões ecológicos da vegetação.

A quantificação dessa heterogeneidade tornou-se mais acessível com o uso de ferramentas geoestatísticas, que permitem caracterizar padrões de dependência espacial e transformar dados pontuais em superfícies contínuas por meio de técnicas como variogramas e krigagem (Yavitt *et al.*, 2009; Bhunia, Shit & Chattopadhyay, 2018). Essas abordagens são particularmente relevantes em ecossistemas tropicais, onde a variabilidade edáfica pode exercer forte controle sobre processos

ecológicos e fisiológicos. No entanto, sua aplicação em castanhais naturais da Amazônia oriental ainda é limitada, evidenciando uma lacuna importante no conhecimento.

Embora estudos anteriores tenham documentado a variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes regiões amazônicas, ainda são escassas as investigações que integrem análises geoestatísticas da fertilidade do solo com potenciais implicações ecofisiológicas para espécies arbóreas hiperdominantes, como *Bertholletia excelsa*.

Nesse contexto, a compreensão da estrutura espacial da fertilidade do solo é especialmente relevante em sistemas dominados por espécies de grande porte e elevada importância socioeconômica, como a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) (Tourne, 2018; Waldhoff & Souza, 2023). Amplamente distribuída na Amazônia, essa espécie desempenha papel central na economia extrativista regional e constitui um dos principais produtos florestais não madeireiros da região (Anjos *et al.*, 2024). Além disso, sua condição de espécie hiperdominante (ter Steege *et al.*, 2013) reforça sua importância na estrutura e no funcionamento das florestas de terra firme.

Do ponto de vista ecofisiológico, o crescimento e a produtividade da castanheira estão diretamente associados às condições edáficas que regulam a disponibilidade de água e nutrientes. Árvores de grande porte desenvolvem sistemas radiculares extensos capazes de explorar diferentes camadas do solo, permitindo acessar recursos distribuídos ao longo do perfil. Dessa forma, a variabilidade espacial da textura, da matéria orgânica e da fertilidade química pode influenciar processos fisiológicos fundamentais, como absorção de nutrientes, transporte de água no xilema e regulação estomática (Anderegg *et al.*, 2018; Cusack *et al.*, 2021; Schroth *et al.*, 2015).

Estudos recentes destacam que o funcionamento hidráulico constitui um dos principais mecanismos que regulam a resposta das florestas tropicais à variabilidade hídrica. A capacidade de manter o fluxo de água e ajustar a condutância estomática durante períodos de déficit hídrico influencia diretamente o crescimento e a produtividade das árvores (Kotowska *et al.*, 2021; Ziegler *et al.*, 2024). Nesse contexto, a interação entre propriedades físicas do solo, retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes emerge como um componente central na regulação do desempenho fisiológico de espécies arbóreas tropicais. Em áreas com elevada argilosidade, a retenção de água pode desempenhar papel importante na modulação da disponibilidade hídrica para a vegetação.

Apesar dos avanços recentes, ainda existem lacunas importantes na compreensão da organização espacial da fertilidade do solo em castanhais naturais e de suas implicações para o funcionamento ecofisiológico da castanheira. A integração entre análises pedogeoquímicas e geoestatísticas permanece pouco explorada, especialmente na Amazônia oriental, onde os solos

apresentam características específicas, como textura muito argilosa e regimes climáticos com maior sazonalidade.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma área de ocorrência natural de *Bertholletia excelsa* na região de Santarém, estado do Pará, utilizando ferramentas geoestatísticas para identificar padrões de dependência espacial e gradientes pedogeoquímicos associados à fertilidade.

Parte-se da hipótese de que: **H1:** atributos associados à pedogênese apresentam maior continuidade espacial; **H2:** atributos químicos mais dinâmicos apresentam maior variabilidade local; e, **H3:** a elevada argilosidade favorece a retenção hídrica e influencia o funcionamento ecofisiológico da castanheira.

Os resultados deste estudo contribuem para ampliar a compreensão da organização espacial da fertilidade em solos amazônicos altamente intemperizados e suas implicações para o funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia. Além disso, fornecem subsídios para estudos de ecologia florestal, manejo sustentável e conservação, ao evidenciar a importância da dimensão espacial da fertilidade do solo na dinâmica de sistemas extrativistas amazônicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

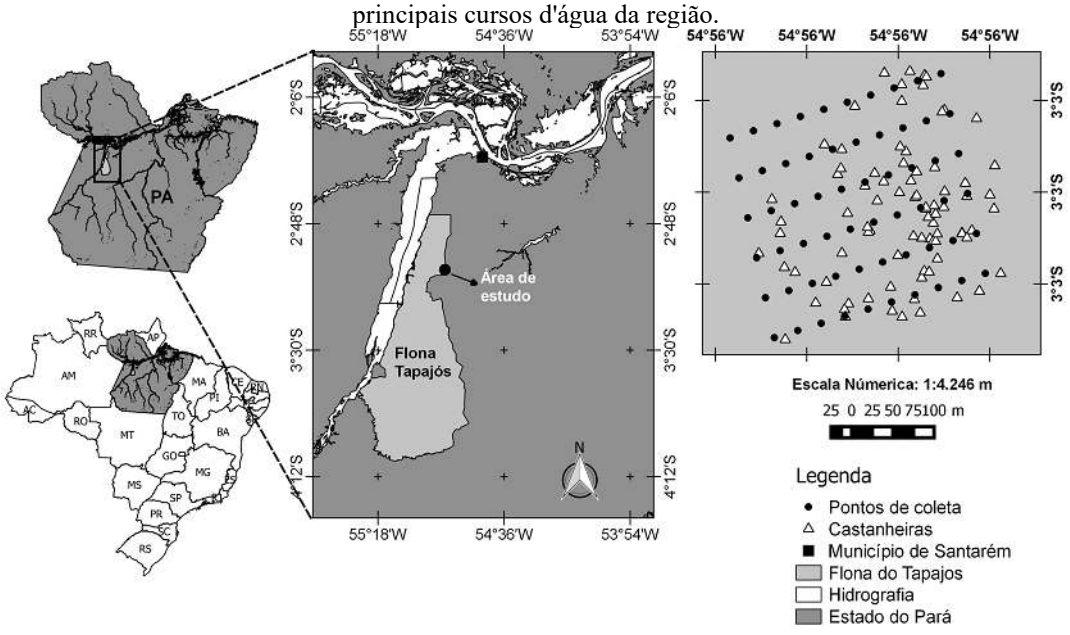
O local de estudo consiste em 01 parcela permanente de 300 m X 300 m, com linhas abertas a cada 50 m (totalizando 6 linhas), de estudo do Projeto MapCast, instalada em uma área de floresta nativa povoada por *Bertholletia excelsa*, onde todas os indivíduos da espécie foram georreferenciados (representados pelo símbolo em forma de triângulo na Figura 1). Este fragmento florestal está dentro dos limites territoriais da Floresta Nacional do Tapajós, entre os paralelos 2º45’ e 4º10’ S e os meridianos 54º45’ e 55º30’ W (Espirito-Santo et. al., 2005), estado do Pará (região norte do Brasil), na porção central da floresta amazônica (Figura 1). A área está localizada no município de Santarém, no oeste do estado do Pará, Brasil. A região está inserida no bioma Amazônia e caracteriza-se por clima tropical úmido, com precipitação média anual superior a 2.000 mm e temperatura média anual em torno de 26 °C. A sazonalidade climática é marcada por um período chuvoso predominante entre dezembro e maio e um período relativamente mais seco entre junho e novembro (Oliveira Junior *et al.*, 2015; Cordovil *et al.*, 2024). A estação seca mais pronunciada nesta região, em comparação com a Amazônia ocidental e central, constitui um fator importante para a interpretação dos padrões de fertilidade e da dinâmica de nutrientes, uma vez que os ciclos de umedecimento e secagem influenciam

processos como mineralização da matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes, além de impor estresse hídrico sazonal à vegetação.

Geologicamente, a região é composta por sedimentos terciários e quaternários associados à Bacia Amazônica, os quais deram origem a solos profundamente intemperizados típicos de ambientes tropicais úmidos. Esses solos são geralmente dominados por Latossolos e Argissolos, caracterizados por elevada acidez, baixa saturação por bases e presença significativa de alumínio trocável. Especificamente, a área de estudo situa-se sobre a Formação Alter do Chão, caracterizada por sedimentos arenosos e argilosos que originam solos com textura variável, predominando Latossolos Amarelos de textura muito argilosa (média de 515 g kg^{-1} de argila), conforme observado nos resultados. A vegetação predominante é floresta ombrófila densa, com ocorrência de castanhais naturais distribuídos em diferentes unidades de paisagem (Oliveira Junior & Correa, 2001).

A área experimental foi delimitada por uma poligonal georreferenciada, cujas coordenadas foram obtidas em sistema de projeção UTM, datum WGS84. A localização da área de estudo e a delimitação da poligonal amostral são apresentadas na **Figura 1**.

Figura 1. - Localização geográfica da área de estudo no município de Santarém, oeste do estado do Pará, Amazônia oriental brasileira. O mapa indica os limites municipais, a área de estudo delimitada pela poligonal amostral e os principais cursos d'água da região.



Fonte: Os Autores, 2026

2.2 AMOSTRAGEM DE SOLO

A amostragem de solo foi realizada em 60 pontos georreferenciados distribuídos em uma malha regular com espaçamento aproximado de 50 m, cobrindo integralmente a parcela permanente de 9 ha (300 × 300 m). O delineamento amostral foi dimensionado para representar a heterogeneidade espacial

esperada dos atributos edáficos, com base em estudos prévios conduzidos em solos amazônicos, e para possibilitar a modelagem geoestatística com número adequado de pares por classe de distância. Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras de solo utilizando trado de aço inoxidável na camada de 0–0,20 m, escolhida por concentrar a maior parte das raízes finas, da atividade microbiana e dos processos de ciclagem biogeoquímica, sendo amplamente utilizada em estudos de fertilidade do solo em ecossistemas florestais (Fuchslueger *et al.*, 2026).

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e encaminhadas ao laboratório para preparo e análise. No laboratório, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA), utilizada nas análises químicas e físicas.

2.3 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO

Para os atributos químicos determinados e calculador foram utilizados métodos descritos em Teixeira *et al.* (2017). Foram determinados os valores de pH em água (1:2,5); Al^{3+} e H+Al extraídos, respectivamente, com KCl 1 mol L^{-1} e acetado de cálcio e quantificados por titulação com NaOH 0,025 mol L^{-1}; teores de P, K e Na extraídos por Mehlich-1 e quantificados por colorimetria (P) e fotometria de chama (K e Na); teores de Ca e Mg extraídos por KCl 1 mol L^{-1} e quantificados por espectrometria de absorção atômica. Também foram determinados os teores de micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Se) que foram extraídos com DTPA a pH 7,3 (relação solo:solução 1:2) quantificados por espectrometria de absorção atômica (AAS), conforme metodologia padrão para elementos traço em solos tropicais (Lindsay & Norvell, 1978). Os atributos químicos calculados foram a CTC a pH 7,0, a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%), conforme cálculos indicados em Teixeira *et al.* (2017). Os atributos físicos determinados foram densidade e granulometria, adotando-se o método do anel volumétrico para densidade e o método da pipeta para a análise granulométrica (Teixeira *et al.* 2017).

Esses atributos são considerados fundamentais para a interpretação da fertilidade de solos tropicais altamente intemperizados, pois refletem processos pedogeoquímicos relacionados à acidez do solo, à disponibilidade de nutrientes e à capacidade de retenção de cátions (Quesada *et al.*, 2020; Bortoluzzi *et al.*, 2015).

A fração argila foi utilizada como indicador da textura do solo, uma vez que exerce influência direta sobre a retenção de água, a formação de agregados e a capacidade de troca catiônica do sistema edáfico. A textura do solo é particularmente relevante para a dinâmica hídrica, pois solos mais argilosos tendem a apresentar maior capacidade de retenção de água, influenciando a disponibilidade hídrica para a vegetação durante períodos de déficit pluviométrico.

A inclusão de elementos traço (Fe, Mn, Cu, Se) justifica-se por sua relevância fisiológica para a castanheira e por sua importância para a qualidade nutricional das castanhas produzidas, conforme demonstrado em estudo recente (Silva Junior *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2024).

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Inicialmente foi realizada análise estatística descritiva para caracterizar a variabilidade dos atributos do solo, incluindo cálculo de média, valores mínimos e máximos, mediana, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV). Essa etapa permitiu avaliar o grau de dispersão dos dados e identificar possíveis padrões de variabilidade nos atributos analisados. A classificação da variabilidade com base no CV seguiu os critérios de Warrick & Nielsen (1980): baixa (CV < 12%), moderada (12% ≤ CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%).

A distribuição dos dados também foi avaliada para verificar a presença de assimetria ou valores discrepantes que pudessem influenciar as análises subsequentes. A normalidade das distribuições foi avaliada por meio do coeficiente de assimetria e inspeção gráfica (histogramas e gráficos Q-Q), sendo que valores de assimetria superiores a 1,0 indicaram a necessidade de transformação dos dados para análises posteriores, embora nenhuma transformação tenha sido aplicada neste estudo, optando-se pela robustez do estimador variográfico frente a desvios moderados da normalidade.

2.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

2.5.1 Avaliação de tendência espacial

A presença de tendência espacial (drift) foi avaliada por regressão linear dos atributos em função das coordenadas X e Y. Esse procedimento permite verificar violação da hipótese de estacionaridade intrínseca, fundamental para a modelagem por variograma (Diggle, Tawn E Moyeed, 1998). Considerou-se tendência significativa quando os coeficientes da regressão apresentaram $p < 0,05$ e o coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 0,10. Nos casos em que a tendência foi detectada, optou-se pela modelagem com krigagem universal ou pela remoção da tendência por ajuste de superfície polinomial (Webster & Oliver, 2007).

2.5.2 Variograma experimental

O variograma experimental foi estimado conforme a equação (1):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

com adoção de oito classes de distância e limite máximo correspondente a 50% da distância máxima entre pontos, prática recomendada para evitar instabilidade em grandes distâncias (Webster; Oliver, 2007). A escolha de oito classes buscou equilibrar a necessidade de detalhamento da estrutura espacial com a manutenção de um número mínimo de pares (≥ 30 pares por classe) para assegurar estimativas estáveis do variograma experimental.

2.5.3 Ajuste do modelo teórico

Foi adotado o modelo esférico para ajuste dos variogramas devido à sua ampla aplicação em estudos de solos de regiões de clima tropical e sua capacidade de representar estrutura espacial com patamar definido (Nussbaum *et al.*, 2018; Webster; Oliver, 2007). O modelo esférico foi adotado por apresentar melhor ajuste para todos os atributos avaliados. O ajuste foi realizado pelo método dos mínimos quadrados ponderados, utilizando o software R (versão 4.2.2) e o pacote 'gstat' (Pebesma, 2004), com validação visual da qualidade do ajuste.Os parâmetros estimados foram:Efeito pepita (C_0), Patamar ($C_0 + C_1$) e Alcance (a)

O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado conforme a equação (2):

$$IDE = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \quad (2)$$

A classificação adotada foi aquela de CAMBARDELLA *et al.* (1994): Forte: IDE ≤ 0,25; Moderada: 0,25 < IDE ≤ 0,75; e, Fraca: IDE > 0,75

2.5.4 Validação cruzada

Foi aplicada validação cruzada do tipo 5-fold, estimando RMSE (Root Mean Square Error) e RMSSE (Root Mean Square Standardized Error).

A validação cruzada é amplamente recomendada para avaliar desempenho preditivo e robustez de modelos espaciais (Diggle, Tawn E Moyeed, 1998). Valores de RMSSE próximos a 1,0 indicaram modelos bem calibrados, enquanto desvios significativos (RMSSE < 0,5 ou > 1,5) foram utilizados como critério para reavaliação do ajuste do variograma ou da escolha do modelo teórico.

2.6 TESTE DE TENDÊNCIA ESPACIAL

A presença de tendência espacial nos atributos do solo foi avaliada por meio de regressão linear múltipla entre os valores dos atributos e as coordenadas espaciais (X, Y) dos pontos amostrais. Esse

procedimento permite identificar a existência de gradientes espaciais na área de estudo, os quais podem refletir variações ambientais ou pedológicas ao longo da paisagem.

A significância estatística da tendência espacial foi avaliada utilizando testes de regressão com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Considerou-se tendência significativa quando os coeficientes da regressão apresentaram $p < 0,05$, indicando que parte da variabilidade observada está associada a gradientes ambientais de maior escala. Nos casos em que a tendência foi detectada, optou-se por manter a abordagem com krigagem ordinária, considerando que os valores de R^2 foram relativamente baixos ($\leq 0,17$), indicando que a tendência contribui minoritariamente para a variabilidade total.

2.7 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL POR KRIGAGEM

A interpolação espacial foi realizada por krigagem ordinária (KO) para três atributos por área, priorizando variáveis pedogeoquimicamente integradoras (argila, CTC a pH 7 e P) e, quando necessário, substituindo por variáveis com melhor consistência amostral e relevância funcional (por exemplo, Fe como indicador redox). A KO foi aplicada somente a atributos com estrutura espacial interpretável a partir do variograma ajustado e com número mínimo de observações válido por área. A krigagem foi conduzida com base no modelo de variograma previamente ajustado (modelo esférico), utilizando os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e alcance (a) estimados para cada atributo.

As predições foram geradas em uma malha regular cobrindo a extensão da área amostrada (com pequena margem), produzindo mapas contínuos de predição. A resolução do grid de saída foi padronizada em 10 m para todas as áreas, garantindo detalhamento espacial compatível com a escala dos fenômenos investigados. Adicionalmente, foi obtida a variância de krigagem, interpretada como medida espacial de incerteza associada à densidade/distribuição amostral e ao modelo do variograma, permitindo identificar regiões com maior/menor confiabilidade cartográfica. A avaliação do desempenho preditivo seguiu princípios de validação e diagnóstico amplamente recomendados na literatura de mapeamento de solos e validação de modelos espaciais (Piikki *et al.*, 2021).

2.8 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas no software R (versão 4.2.2), utilizando os pacotes 'gstat' para análise variográfica e krigagem (Pebesma, 2004), 'ggplot2' para visualização gráfica, 'raster' para manipulação dos mapas interpolados e 'sf' para operações com dados espaciais. Os scripts utilizados nas análises estão disponíveis mediante solicitação aos autores, assegurando a reprodutibilidade dos resultados.

2.9 MODELO CONCEITUAL SOLO-ÁGUA-CASTANHEIRA

Com base na integração entre os resultados geoestatísticos e o conhecimento ecofisiológico da espécie *Bertholletia excelsa*, foi proposto um modelo conceitual representando as interações entre propriedades do solo, retenção de água e funcionamento hidráulico da castanheira. O modelo foi elaborado considerando as relações causais hipotéticas entre textura do solo, capacidade de troca catiônica, retenção hídrica, fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera e crescimento radial das árvores

O modelo conceitual ilustra como gradientes espaciais de textura e fertilidade podem influenciar simultaneamente a retenção de água no solo, a disponibilidade de nutrientes e o transporte de água no sistema solo-planta, afetando potencialmente o crescimento radial e o desempenho fisiológico das árvores em castanhais naturais. As setas indicam relações causais hipotéticas, e a espessura das setas representa a força relativa da influência de cada fator, conforme inferido a partir da estrutura espacial observada nas três áreas estudadas.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO SOLO

A análise estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo da área de estudo em Santarém (PA) revelou elevada variabilidade entre os parâmetros avaliados (Tabela 1). Os teores médios de alumínio trocável (Al) foram de 1,588 cmolc dm^{-3}, enquanto a acidez potencial (H+Al) apresentou média de 4,368 cmolc dm^{-3}. A capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) apresentou valor médio de 4,869 cmolc dm^{-3}. Esses valores indicam solos ácidos com moderada a elevada acidez potencial.

A saturação por bases (V%) apresentou média de 10,419%, enquanto a saturação por alumínio (m%) alcançou valores médios de 75,724%. A amplitude da saturação por alumínio variou de 34,17% a 91,07%.

O teor médio de carbono do solo foi de 13,919 g kg^{-1}, com coeficiente de variação de 19,1%. Em relação à textura, os solos apresentaram elevados teores de argila, com média de 515,525 g kg^{-1}. A variabilidade da argila foi baixa (CV = 7,3%).

Os coeficientes de variação indicaram níveis distintos de heterogeneidade entre os atributos. Enquanto a argila apresentou baixa variabilidade, atributos relacionados à fertilidade química, como V% e Cu, apresentaram maior variabilidade espacial (CV superiores a 50%).

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na área de ocorrência natural de Bertholletia excelsa em Santarém, Pará. São apresentados número de observações (n), valores mínimo e máximo, média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação (CV). A classificação da variabilidade com base no CV segue os critérios de Warrick & Nielsen (1980): baixa (CV < 12%), moderada (12% ≤ CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%).

Atributo	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	CV (%)
Al	59	0,72	2,31	1,588	1,65	0,355	22,334
H+Al	59	2,277	7,227	4,368	4,224	0,815	18,658
T (CTC pH7)	59	3,151	8,014	4,869	4,83	0,829	17,029
V%	59	3,799	27,745	10,419	8,562	5,42	52,02
m%	59	34,167	91,068	75,724	79,139	12,531	16,548
C	59	8,778	21,706	13,919	13,406	2,66	19,112
Argila	59	393	584,5	515,525	520,5	37,765	7,326
P	59	2,191	4,942	2,824	2,762	0,507	17,943
Ca	59	0,05	0,98	0,203	0,13	0,171	84,054
Mg	59	0,06	0,53	0,226	0,22	0,106	46,72
K	59	12	39	21,644	21	7,058	32,611
Na	59	1	10	3,695	3	1,976	53,484
Fe	59	44	375	224,508	225	53,655	23,899
Mn	59	0,72	13,7	3,642	3,01	2,905	79,761
Cu	59	0,1	1,44	0,4	0,33	0,299	74,836
Se	60	182,39	767,159	333,564	299,486	124,756	37,401

Fonte: Os Autores, 2026

3.2 ESTRUTURA DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise geoestatística evidenciou diferentes padrões de dependência espacial entre os atributos avaliados (Tabela 2). Os variogramas experimentais foram ajustados pelo modelo esférico para todos os atributos analisados. Dos 16 atributos avaliados, 4 (25%) apresentaram dependência espacial forte, 5 (31,25%) dependência moderada e 7 (43,75%) dependência fraca.

Os atributos H+Al, T (CTC pH7) e V% apresentaram dependência espacial forte, com valores de IDE de 15,76%, 22,45% e 21,19%, respectivamente.

O fósforo disponível apresentou dependência espacial forte, com IDE = 0%.

Os atributos Al, C e Argila apresentaram dependência espacial fraca, com valores de IDE superiores a 75%.

O alcance médio estimado para os variogramas foi de aproximadamente 331 m para todos os atributos (Tabela 2).

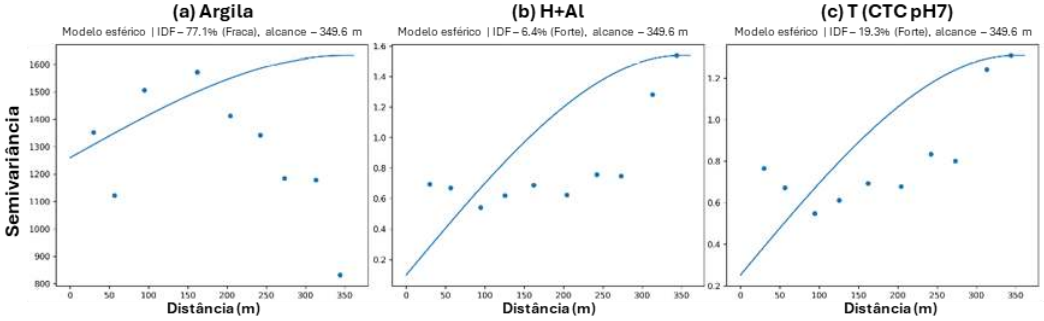
Exemplos representativos dos variogramas ajustados são apresentados na Figura 2, com legendas expandidas para incluir os parâmetros do modelo ajustado e a classificação da dependência espacial.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos variográficos ajustados aos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo em Santarém, Pará. São apresentados o modelo teórico ajustado, o efeito pepita (C_0), a variância estrutural (C_1), o patamar ($C_0 + C_1$), o alcance (A), o índice de dependência espacial (IDE) e a classe de dependência. A classificação do IDE segue Cambardella *et al.* (1994): forte (≤ 25%), moderada (25-75%) e fraca (> 75%).

Atributo	Modelo	C0 (pepita)	C1 (estrut.)	Patamar (C0+C1)	Alcance (m)	IDE (%)	Classe de dependência	n
Al	Esférico	0,111	0,028	0,14	331,171	79,661	Fraca	59
H+Al	Esférico	0,196	1,047	1,243	331,171	15,763	Forte	59
T (CTC pH7)	Esférico	0,27	0,934	1,204	331,171	22,445	Forte	59
V%	Esférico	11,551	42,959	54,51	331,171	21,191	Forte	59
m%	Esférico	138,933	52,234	191,167	331,171	72,676	Moderada	59
C	Esférico	6,262	2,035	8,297	331,171	75,469	Fraca	59
Argila	Esférico	1261,841	351,87	1613,711	331,171	78,195	Fraca	59
P	Esférico	0	0,663	0,663	331,171	0	Forte	59
Ca	Esférico	0,023	0,016	0,039	331,171	58,748	Moderada	59
Mg	Esférico	0,01	0,003	0,013	331,171	76,232	Fraca	59
K	Esférico	44,078	13,618	57,696	331,171	76,397	Fraca	59
Na	Esférico	3,455	0,95	4,405	331,171	78,44	Fraca	59
Fe	Esférico	2264,037	1237,885	3501,923	331,171	64,651	Moderada	59
Mn	Esférico	7,466	2,689	10,155	331,171	73,521	Moderada	59
Cu	Esférico	0,044	0,085	0,129	331,171	33,99	Moderada	59
Se	Esférico	13774,18	4226,974	18001,15	331,171	76,518	Fraca	60

Fonte: Os Autores, 2026

Figura 2. Variogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para atributos representativos do solo na área de ocorrência natural de Bertholletia excelsa em Santarém, Pará. Cada painel apresenta a semivariância (γ) em função da distância (h). A linha tracejada horizontal indica o patamar do modelo ajustado. Os parâmetros dos modelos (efeito pepita, patamar, alcance e IDE) estão apresentados na Tabela 2. Os painéis apresentam a estrutura de dependência espacial para argila, acidez potencial (H+Al) e capacidade de troca catiônica a pH 7 (T).



Fonte: Elaborada pelos autores

3.3 TENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

O teste de tendência espacial foi aplicado para avaliar a existência de gradientes espaciais sistemáticos associados às coordenadas geográficas da área de estudo (Tabela 3).

O teste de tendência espacial indicou ausência de tendência significativa para H+Al, T e C.

Para os atributos Argila e P foi observada tendência espacial significativa ($p < 0,05$). Para a argila, os coeficientes foram $\beta X = -0,115$ e $\beta Y = -0,092$. Para o fósforo, $\beta X = 0,0024$.

Os valores de R^2 foram de 0,11 para argila e 0,17 para fósforo.

Tabela 3. -Resultados do teste de tendência espacial para os atributos do solo analisados na área de estudo em Santarém, Pará. São apresentados os coeficientes angulares associados às coordenadas espaciais (βX e βY), o coeficiente de determinação (R^2), o valor da estatística F e o respectivo p-valor. Valores de $p < 0,05$ indicam tendência espacial significativa.

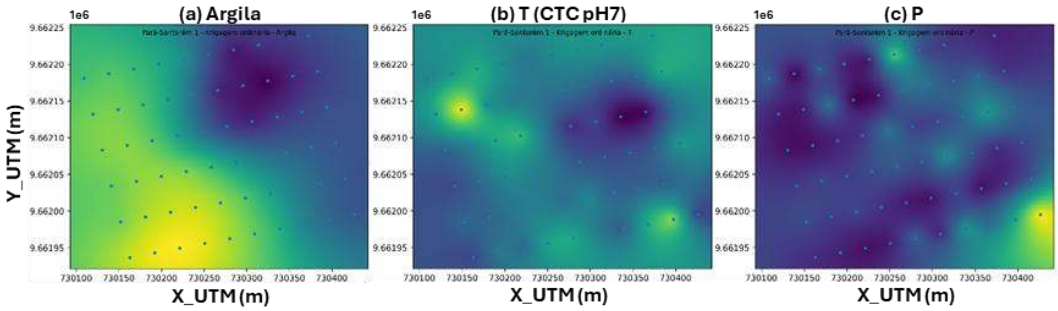
Atributo	n	βX	βY	R^2	F	p-valor	Interpretação
H+Al	59	-0,001453	0,00074	0,030523	0,881564	0,419802	Sem tendência espacial significativa
T (CTC pH7)	59	-0,000829	0,000557	0,01104	0,312573	0,73283	Sem tendência espacial significativa
Argila	59	-0,114507	-0,091901	0,109771	3,452579	0,038552	Tendência espacial significativa
C	59	-0,003995	-0,000746	0,017512	0,499062	0,609774	Sem tendência espacial significativa
P	59	0,002381	0,000035	0,167083	5,616782	0,005982	Tendência espacial significativa

Fonte: Os Autores, 2026

3.4 PADRÕES ESPACIAIS DA FERTILIDADE DO SOLO

Os mapas de krigagem evidenciaram a distribuição espacial dos atributos do solo (Figura 3).

Figura 3. Mapas de krigagem ordinária para atributos do solo na área de ocorrência natural de Bertholletia excelsa em Santarém, Pará. A escala de cores representa os valores preditos para cada atributo, com tons mais quentes (vermelho/amarelo) indicando maiores concentrações e tons mais frios (azul/verde) indicando menores concentrações. Os pontos pretos representam as localizações amostrais. Os painéis mostram a distribuição espacial da fração argila, da capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) e do fósforo disponível (P), evidenciando gradientes edáficos e mosaicos de fertilidade intra-área. Observa-se relativa homogeneidade para a fração argila, coerente com sua baixa variabilidade (CV = 7,3%), enquanto T e P apresentam padrões mais heterogêneos, refletindo as diferentes classes de dependência espacial apresentadas na Tabela 2.



Fonte: Elaborada pelos autores

Os mapas de argila indicaram zonas relativamente homogêneas, com leve gradiente espacial associado à tendência detectada no teste de drift. Observa-se uma zona com maiores teores de argila (> 540 g kg^{-1}) concentrada na porção central da área, enquanto as bordas apresentam teores ligeiramente inferiores (em torno de 480-500 g kg^{-1}), configurando um padrão de "mancha" central de maior teor de argila.

Em contraste, os mapas de capacidade de troca catiônica (T) e fósforo disponível (P) apresentaram padrões espaciais mais heterogêneos, com áreas de maior e menor fertilidade distribuídas

ao longo da área amostral. O mapa de T revela zonas de maior CTC (> 5,5 cmolc dm^{-3}) concentradas na porção sudoeste, enquanto o fósforo disponível exibe um padrão fragmentado, com manchas de maior concentração (> 3,2 mg dm^{-3}) distribuídas de forma descontínua, coerente com sua forte dependência espacial (IDE = 0%) mas com gradiente direcional detectado no teste de tendência.

A Tabela 4 sintetiza os principais parâmetros estatísticos e geoestatísticos dos atributos selecionados, integrando as informações de variabilidade (média, desvio padrão, CV) com a estrutura espacial (modelo, alcance, IDE e classe de dependência), permitindo uma visão consolidada dos padrões pedogeoquímicos da área de estudo.

Tabela 4. - Tabela-síntese dos atributos pedogeoquímicos do solo na área de estudo em Santarém, Pará. São apresentados número de observações (n), média ± desvio padrão, coeficiente de variação (CV), modelo variográfico ajustado, alcance (m), índice de dependência espacial (IDE) e classe de dependência.

Atributo	n	Média ± DP	CV (%)	Modelo	Alcance (m)	IDE (%)	Classe
Al	59	1,588 ± 0,355	22,334	Esférico	331,171	79,661	Fraca
H+Al	59	4,368 ± 0,815	18,658	Esférico	331,171	15,763	Forte
T (CTC pH7)	59	4,869 ± 0,829	17,029	Esférico	331,171	22,445	Forte
V%	59	10,419 ± 5,420	52,02	Esférico	331,171	21,191	Forte
m%	59	75,724 ± 12,531	16,548	Esférico	331,171	72,676	Moderada
C	59	13,919 ± 2,660	19,112	Esférico	331,171	75,469	Fraca
Argila	59	515,525 ± 37,765	7,326	Esférico	331,171	78,195	Fraca
P	59	2,824 ± 0,507	17,943	Esférico	331,171	0	Forte
Cu	59	0,400 ± 0,299	74,836	Esférico	331,171	33,99	Moderada

Fonte: Os Autores, 2026

3.5 SÍNTESE DOS PADRÕES ESPACIAIS

A integração dos resultados provenientes da estatística descritiva, da análise variográfica, do teste de tendência espacial e dos mapas de krigagem permite sintetizar os principais padrões espaciais observados na área de estudo em Santarém: Variabilidade dos atributos do solo: Os atributos químicos apresentaram coeficientes de variação variando de baixos a elevados, enquanto a fração argila apresentou baixa variabilidade (CV = 7,3%); Classes de dependência espacial: Dos 16 atributos avaliados, 4 apresentaram dependência espacial forte (25%), 5 dependência moderada (31,25%) e 7 dependência fraca (43,75%); Atributos com dependência espacial forte: Os atributos H+Al, T (CTC pH7), V% e P apresentaram dependência espacial forte, com valores de IDE variando entre 0% e 22,45%; Atributos com dependência espacial fraca: Os atributos Al, C, Argila, Mg, K, Na e Se apresentaram dependência espacial fraca, com valores de IDE superiores a 75%; Tendência espacial: Foi observada tendência espacial significativa para os atributos argila e fósforo ($p < 0,05$), com coeficientes de determinação de 0,11 e 0,17, respectivamente. Os demais atributos não apresentaram tendência significativa; Alcance dos variogramas: Todos os atributos apresentaram alcance variográfico semelhante, com valores próximos de 331 m; Distribuição espacial dos atributos: Os

mapas de krigagem indicaram variações espaciais na distribuição dos atributos do solo, incluindo zonas com diferentes teores de argila, capacidade de troca catiônica e fósforo disponível ao longo da área de estudo.

4 DISCUSSÃO

4.1 ESTRUTURA PEDOGEOQUÍMICA DA FERTILIDADE DO SOLO EM AMBIENTES ALTAMENTE INTEMPERIZADOS

Os resultados obtidos para a área de Santarém revelam um padrão pedogeoquímico típico de solos altamente intemperizados da Amazônia oriental, caracterizado por baixa saturação por bases, elevada acidez potencial e forte dominância de alumínio no complexo de troca. Esses atributos refletem a longa história de intemperismo químico sob condições climáticas úmidas, nas quais a lixiviação contínua de cátions básicos favorece o empobrecimento químico do solo e a formação de minerais secundários ricos em óxidos de ferro e alumínio (Quesada *et al.*, 2010). A saturação por alumínio média de 75,7% e os baixos teores de bases trocáveis (V% médio de 10,4%) confirmam o elevado grau de intemperismo dos solos da região, posicionando-os entre os mais empobrecidos quimicamente dentre as áreas estudadas nas diferentes regiões amazônicas.

Nesses ambientes, a fertilidade do solo é amplamente controlada por processos de adsorção e complexação em superfícies minerais reativas, bem como pela formação de associações organominerais estáveis que regulam a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de troca catiônica. Estudos recentes demonstram que, em solos tropicais profundamente intemperizados, a capacidade de troca catiônica é fortemente dependente da matéria orgânica e da mineralogia da fração argilosa, sendo frequentemente dominada por cargas variáveis associadas a óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Costa *et al.*, 2020; Bortoluzzi *et al.*, 2013; Ketrot *et al.*, 2013). No caso de Santarém, a textura muito argilosa (média de 515 g kg^{-1}) confere elevada superfície específica para adsorção, mas a CTC relativamente baixa (média de 4,87 cmolc dm^{-3}) reflete a predominância de minerais de baixa atividade, como caulinita e óxidos de Fe e Al, típicos da Formação Alter do Chão.

A elevada saturação por alumínio observada neste estudo sugere que grande parte dos sítios de troca do solo encontra-se ocupada por Al^{3+}, o que pode influenciar processos fisiológicos associados à absorção radicular e à disponibilidade de nutrientes essenciais. Em solos amazônicos, a dinâmica do alumínio trocável está frequentemente associada à intensidade do intemperismo e à remoção progressiva de bases ao longo do tempo geológico, resultando em sistemas edáficos quimicamente pobres, porém estruturalmente estáveis (Souza *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2017). A variabilidade da saturação por alumínio (CV = 16,5%) indica que, apesar da dominância generalizada de Al, existem

variações intra-área que podem gerar microsítios com diferentes níveis de toxidez potencial, influenciando o estabelecimento e o crescimento da vegetação.

4.2 DEPENDÊNCIA ESPACIAL E ORGANIZAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

A análise geoestatística revelou que os atributos do solo apresentam diferentes níveis de dependência espacial, evidenciando que a heterogeneidade edáfica da área resulta da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biológicos atuando em múltiplas escalas. A distribuição das classes de dependência (25% forte, 31% moderada e 44% fraca) caracteriza um padrão misto, no qual processos estruturais de larga escala coexistem com microprocessos locais (Takoutsing, B., 2024; De Caires *et al.*, 2025).

Os atributos relacionados à acidez potencial e à capacidade de troca catiônica, como H+Al, T e V%, apresentaram forte dependência espacial, indicando elevada continuidade desses parâmetros no espaço. Esse comportamento reflete o controle exercido por fatores estruturais do solo, associados à mineralogia da fração argilosa e ao grau de intemperismo, que tendem a variar de forma relativamente contínua na paisagem (Silva *et al.*, 2023; Cambardella *et al.*, 1994). Esse padrão é consistente com a influência do material de origem e da evolução pedogenética nos platôs da Formação Alter do Chão.

O fósforo disponível apresentou dependência espacial forte, com ausência de efeito pepita (IDE = 0%), indicando elevada continuidade espacial. Esse resultado contrasta com o padrão frequentemente descrito para solos tropicais, nos quais esse nutriente apresenta elevada variabilidade local devido à sua forte adsorção aos óxidos de ferro e alumínio e à dependência da ciclagem biológica (Fuchslueger *et al.*, 2020; Turner & Engelbrecht, 2011). A continuidade observada sugere que, na área de estudo, a distribuição do fósforo está associada a fatores pedogenéticos regionais, possivelmente relacionados à homogeneidade mineralógica da fração argilosa e à baixa variabilidade textural.

Em contraste, atributos como alumínio trocável, carbono e argila apresentaram dependência espacial fraca, indicando maior influência de processos locais. Em ecossistemas florestais tropicais, a ciclagem biogeoquímica, a deposição de serapilheira e a atividade biológica podem gerar padrões espaciais altamente heterogêneos, nos quais a vegetação exerce papel relevante na redistribuição de elementos no solo (Fujii *et al.*, 2018; Doetterl *et al.*, 2021). A dependência fraca da argila, apesar de sua baixa variabilidade estatística (CV = 7,3%), pode indicar que sua organização espacial ocorre em escalas inferiores ao espaçamento amostral, possivelmente associadas a microvariações na profundidade do solo ou na drenagem (Yemefack *et al.*, 2005; Molla *et al.*, 2022).

A magnitude dos alcances variográficos, próximos de 331 m para todos os atributos, indica uma escala espacial comum de continuidade. Esse padrão é consistente com estudos em solos tropicais,

nos quais a estrutura espacial da fertilidade reflete gradientes associados à topografia, drenagem e história geomorfológica da paisagem (Souza *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2018). A uniformidade dos alcances em Santarém contrasta com a variabilidade observada em outras regiões amazônicas (Acre: 3–30 km; Amazonas: 30–800 m; Roraima: ~330 m; Mato Grosso: 90–170 m), sugerindo um controle geomorfológico mais homogêneo na área, associado aos platôs da Formação Alter do Chão (Oliveira Junior *et al.*, 2026a; Oliveira Junior *et al.*, 2026b; Oliveira Junior *et al.*, 2026c; Oliveira Junior *et al.*, 2026d).

4.3 TENDÊNCIA ESPACIAL E FORMAÇÃO DE GRADIENTES EDÁFICOS

Os testes de tendência espacial indicaram a presença de gradientes significativos para a fração argilosa e para o fósforo disponível, evidenciando que parte da variabilidade desses atributos está associada a processos ambientais direcionais na área de estudo. No entanto, os baixos valores de R^2 (argila: 0,11; P: 0,17) indicam que esses gradientes explicam apenas uma fração da variabilidade total, sugerindo maior contribuição relativa de variações espaciais não explicadas pela tendência linear, potencialmente associadas a processos locais e à heterogeneidade edáfica em menor escala (Lark *et al.*, 2006; Webster & Oliver, 2007).

A ocorrência de gradientes texturais pode ser atribuída a processos geomorfológicos e hidrológicos atuando em escala local, como redistribuição de partículas finas ao longo do relevo, deposição coluvial e variações na intensidade do intemperismo. Em ambientes tropicais úmidos, a movimentação lateral de água no perfil e a erosão difusa contribuem para a formação de padrões espaciais relativamente contínuos na distribuição da fração argilosa (Schoonejans, Vanacker & Opfergelt, 2016; Boulet *et al.*, 2017). No caso de Santarém, o gradiente decrescente de argila em direção às bordas da área (coeficientes β negativos) indica maior preservação de materiais finos na porção central do platô, enquanto áreas próximas às vertentes tendem a apresentar menor teor de argila.

Para o fósforo, a tendência espacial observada está associada à sua forte interação com os óxidos de ferro e alumínio presentes na fração argilosa. Em solos altamente intemperizados, esse nutriente apresenta elevada afinidade por superfícies minerais reativas, sendo frequentemente imobilizado por processos de adsorção específica. Como consequência, sua distribuição espacial reflete não apenas processos biogeoquímicos, mas também a variabilidade mineralógica e textural do solo (de Souza *et al.*, 2025; Metha & Mathew, 2025). A tendência direcional do P, associada à sua forte dependência espacial (IDE = 0%), indica a influência de gradientes ambientais de maior escala, possivelmente relacionados a variações sutis na composição mineralógica da fração argilosa ou no teor de óxidos de ferro ao longo da área.

Em conjunto, esses resultados evidenciam que a organização espacial dos atributos do solo resulta da interação entre gradientes ambientais estruturados e processos locais de micro heterogeneidade, reforçando a necessidade de considerar múltiplas escalas na interpretação da variabilidade edáfica (Yemefack *et al.*, 2005; Zuo *et al.*, 2022).

4.4 INTEGRAÇÃO SOLO–ÁGUA–NUTRIENTES NO FUNCIONAMENTO ECOFISIOLÓGICO DA CASTANHEIRA

A heterogeneidade espacial da fertilidade observada neste estudo possui implicações diretas para o funcionamento ecofisiológico de espécies arbóreas de grande porte na Amazônia, incluindo a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*). Essa espécie apresenta elevada demanda por recursos edáficos e forte dependência da disponibilidade de água e nutrientes ao longo do perfil do solo (Anderegg *et al.*, 2018; Cusack *et al.*, 2021).

A identificação de zonas com maior teor de argila evidencia a formação de compartimentos edáficos funcionalmente distintos, nos quais a maior capacidade de retenção hídrica pode favorecer a disponibilidade de água durante períodos de déficit pluviométrico. Esses compartimentos podem influenciar o balanço hídrico e o crescimento das árvores ao modularem a disponibilidade e o acesso à água no sistema solo-planta, particularmente durante a estação seca (Meir *et al.*, 2015; Cordeiro *et al.*, 2020).

A interação entre textura do solo e capacidade de troca catiônica atua de forma integrada na regulação da disponibilidade de água e nutrientes, dois fatores centrais para o desempenho fisiológico de árvores tropicais. Solos mais argilosos apresentam maior superfície específica para adsorção de cátions e maior capacidade de retenção hídrica, favorecendo a manutenção da atividade fisiológica sob condições de estresse hídrico (Palmiotto *et al.*, 2004; Anderegg *et al.*, 2018; Cusack *et al.*, 2021). Na área de Santarém, a textura muito argilosa (média de 515 g kg^{-1}) reforça esse controle hidrológico, contribuindo para a estabilidade da disponibilidade hídrica ao longo do ano.

Em espécies amazônicas de grande porte, a capacidade de acessar água em profundidade constitui um mecanismo fundamental de adaptação à sazonalidade climática. Estudos ecofisiológicos indicam que árvores tropicais desenvolvem sistemas radiculares profundos capazes de explorar diferentes compartimentos do solo, mantendo a transpiração e o crescimento mesmo durante períodos de redução da disponibilidade hídrica superficial (Kübert *et al.*, 2023; Stahl *et al.*, 2013). Nesse contexto, a zona central de maior teor de argila identificada nos mapas de krigagem representa um compartimento com maior capacidade potencial de retenção de água, podendo favorecer o estabelecimento e o crescimento da castanheira em condições de maior estresse hídrico.

Evidências dendroecológicas indicam que o crescimento radial e a produtividade da castanheira estão diretamente associados às condições edáficas que regulam a disponibilidade de água e nutrientes ao longo do perfil do solo. Assim, a organização espacial da fertilidade influencia a distribuição de recursos no sistema solo-planta, afetando padrões de crescimento em castanhais naturais (Staudhammer *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022). A forte dependência espacial de atributos como H+Al, T e V% observada em Santarém indica elevada previsibilidade espacial da fertilidade potencial do solo, o que pode contribuir para a identificação de zonas com maior potencial produtivo e subsidiar estratégias de manejo diferenciadas.

4.5 IMPLICAÇÕES PARA MANEJO E CONSERVAÇÃO DE CASTANHAIS NATURAIS

A elevada heterogeneidade espacial da fertilidade observada neste estudo possui implicações diretas para o manejo e a conservação de castanhais naturais na Amazônia. Mesmo em áreas relativamente pequenas, variações na disponibilidade de nutrientes e nas propriedades físicas do solo resultam na formação de mosaicos edáficos que influenciam o crescimento e a produtividade das árvores (Staudhammer *et al.*, 2021; Tourne *et al.*, 2019).

A presença de compartimentos edáficos com diferentes níveis de fertilidade indica que estratégias de manejo uniformes podem não ser adequadas, sendo necessário incorporar explicitamente a variabilidade espacial do solo no planejamento e na conservação desses sistemas. Nesse contexto, a identificação de padrões espaciais de fertilidade permite delimitar zonas com diferentes potenciais edáficos e níveis de limitação nutricional, fornecendo uma base espacialmente explícita para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e ajustadas à heterogeneidade ambiental (Moral *et al.*, 2011; Oldoni *et al.*, 2019).

A integração entre análises pedogeoquímicas e geoestatísticas amplia a capacidade de interpretar os fatores ambientais que regulam a dinâmica de crescimento de espécies florestais de alto valor socioeconômico, como a castanheira-da-amazônia (Silva *et al.*, 2022; Guerreiro *et al.*, 2017; Mello *et al.*, 2021). Na área de Santarém, a zona central com maior teor de argila e a zona sudoeste com maior capacidade de troca catiônica destacam-se como compartimentos com maior potencial de retenção de água e nutrientes, podendo atuar como áreas prioritárias para conservação, especialmente sob cenários de intensificação do estresse hídrico associado às mudanças climáticas.

Do ponto de vista ecológico, a heterogeneidade espacial do solo contribui para a manutenção da diversidade estrutural e funcional das florestas tropicais, ao promover a formação de nichos edáficos distintos que influenciam padrões de regeneração, competição e distribuição de espécies arbóreas (John *et al.*, 2007; Umarani *et al.*, 2024). A preservação desses gradientes edáficos naturais é, portanto,

um elemento central para a conservação da biodiversidade e para a manutenção da resiliência dos castanhais naturais frente a mudanças ambientais.

4.6 MODELO CONCEITUAL INTEGRANDO SOLO, ÁGUA, NUTRIENTES E FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DA CASTANHEIRA

Os resultados deste estudo indicam que a organização espacial das propriedades físicas e químicas do solo constitui um componente central na regulação do funcionamento ecofisiológico de árvores tropicais de grande porte. A estrutura pedogeoquímica do solo, representada por atributos como teor de argila, acidez potencial, alumínio trocável e capacidade de troca catiônica, controla simultaneamente dois componentes fundamentais do ambiente radicular: a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes. Em solos altamente intemperizados da Amazônia, essas propriedades determinam a capacidade do sistema edáfico de armazenar água e regular a dinâmica nutricional, influenciando diretamente os recursos disponíveis para as plantas (Quesada *et al.*, 2011; Flores *et al.*, 2020).

Durante períodos de redução da disponibilidade hídrica, a retenção de água no solo torna-se um fator determinante para a manutenção do balanço hídrico das árvores. Solos com maior teor de argila e maior capacidade de troca catiônica tendem a apresentar maior capacidade de retenção hídrica e maior superfície específica para adsorção de nutrientes, favorecendo o acesso radicular a recursos essenciais mesmo sob estresse hídrico. Nesse contexto, a interação entre textura, matéria orgânica e acidez regula de forma integrada a disponibilidade de água e nutrientes ao longo do perfil do solo (Oliveira *et al.*, 2023; Almeida, Lunardi Neto & Vidal-Torrado, 2015). Na área de Santarém, a textura muito argilosa reforça esse controle hidrológico, contribuindo para a manutenção da disponibilidade hídrica durante a estação seca.

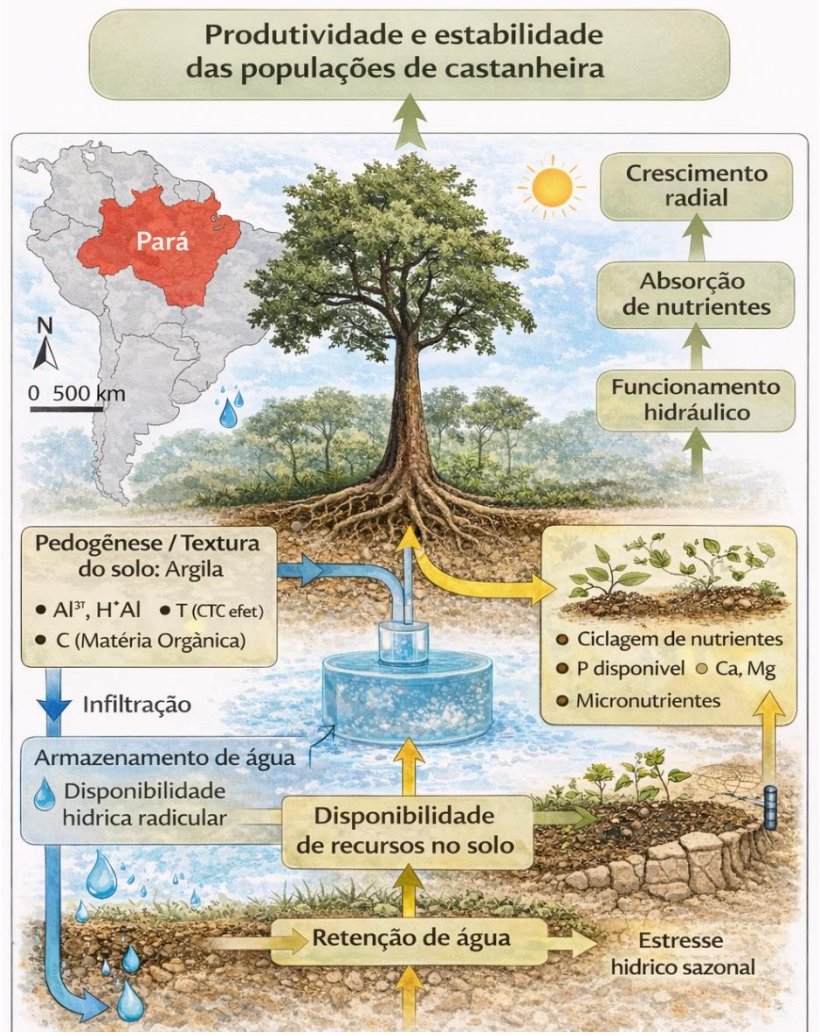
No caso da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*), a disponibilidade de água e nutrientes pode influenciar processos associados ao funcionamento hidráulico, incluindo o transporte de água no xilema, a regulação estomática e a manutenção da atividade fotossintética, com potenciais reflexos sobre o crescimento radial e a produtividade ao longo do tempo. Nesse sentido, a organização espacial da fertilidade e da estrutura física do solo pode resultar na formação de mosaicos edáficos, nos quais diferentes compartimentos apresentam condições distintas de disponibilidade hídrica e nutricional (Oliveira Junior *et al.*, 2026a; Oliveira Junior *et al.*, 2026d). O modelo conceitual proposto neste estudo integra esses componentes, indicando que a interação entre propriedades pedogeoquímicas, dinâmica hídrica e funcionamento hidráulico constitui um mecanismo central na

regulação do crescimento de *Bertholletia excelsa* em ecossistemas amazônicos (Staudhammer *et al.*, 2021; Oliveira, 2024).

Em Santarém, a forte dependência espacial de atributos-chave da fertilidade, associada à relativa homogeneidade textural, sugere que o controle edáfico sobre a disponibilidade hídrica tende a ser mais uniforme em escala local, enquanto a disponibilidade de nutrientes apresenta maior heterogeneidade espacial. Essa possível dissociação entre os controles hídrico e nutricional reforça a importância de considerar a organização espacial do solo na interpretação dos padrões de crescimento e produtividade em castanhais naturais (Costa, Tonini & Mendes Filho, 2017; Oliveira Junior *et al.*, 2026b) (Figura 4).

De forma integrada, os resultados demonstram que a organização espacial da fertilidade em solos amazônicos deve ser compreendida como um elemento estruturante do funcionamento ecofisiológico de espécies arbóreas. A interação entre pedogênese, dinâmica hídrica e disponibilidade de nutrientes regula a distribuição de recursos no sistema solo-planta, influenciando padrões locais de crescimento, produtividade e potencial resposta a variações climáticas (Staudhammer *et al.*, 2021; Oliveira, 2024). A abordagem comparativa entre diferentes regiões amazônicas reforça esse entendimento ao evidenciar que a heterogeneidade edáfica constitui um fator-chave na organização ecológica e funcional das florestas tropicais.

Figura 4. Modelo conceitual integrando propriedades pedogeoquímicas do solo, retenção hídrica, disponibilidade de nutrientes, estresse hídrico sazonal e funcionamento hidráulico de Bertholletia excelsa. A estrutura física e química do solo regula simultaneamente a disponibilidade de água e nutrientes no perfil do solo, influenciando processos fisiológicos associados ao transporte de água no xilema e ao crescimento radial das árvores em castanhais naturais da Amazônia. As setas indicam relações causais hipotéticas, e a espessura das setas representa a força relativa da influência de cada fator, conforme inferido a partir da estrutura espacial observada (seta mais espessa para retenção hídrica, refletindo a textura muito argilosa da área).



Fonte: Elaborada pelos autores

4.7 NOVIDADE CIENTÍFICA DO ESTUDO

Este estudo demonstra que a fertilidade do solo em castanhais naturais da Amazônia pode apresentar uma estrutura espacial bem definida, mesmo em ambientes altamente intemperizados tradicionalmente considerados homogêneos do ponto de vista edáfico. A integração entre análises pedogeoquímicas detalhadas e técnicas geoestatísticas permitiu identificar gradientes espaciais de fertilidade e textura que influenciam simultaneamente a disponibilidade de água e nutrientes no solo.

A principal contribuição científica deste estudo consiste em revelar que a Amazônia oriental apresenta um padrão de organização espacial do solo singular em relação às demais regiões estudadas, caracterizado por: (i) textura muito argilosa e homogênea (CV = 7,3%, mas com dependência fraca);

(ii) forte dependência espacial para atributos-chave da fertilidade (H+Al, T, V%, P), incluindo o comportamento notável do fósforo com IDE = 0%; (iii) alcances uniformes de aproximadamente 330 m, contrastando com a variabilidade observada em outras regiões; (iv) predominância de dependência moderada a fraca (75% dos atributos), indicando importante contribuição da micro-heterogeneidade local; e (v) compartimentalização funcional em escala de centenas de metros, com zona central de maior teor de argila e zona sudoeste de maior CTC.

Esse gradiente reforça a tese de que fatores regionais como geologia, geomorfologia, clima e histórico de sedimentação atuam de forma diferenciada na estruturação espacial dos solos ao longo da bacia amazônica. A Amazônia oriental, dominada pelos sedimentos argilosos da Formação Alter do Chão, apresenta a textura mais argilosa dentre as regiões estudadas, mas com organização espacial da argila surpreendentemente fraca, indicando que a homogeneidade estatística não implica necessariamente em estruturação espacial.

Ao revelar a existência de mosaicos edáficos intra-área associados à organização espacial da fertilidade, este trabalho fornece novas evidências de que a variabilidade do solo constitui um fator fundamental para compreender o funcionamento ecofisiológico de espécies florestais tropicais de grande porte. Essa abordagem integrada representa um avanço na compreensão das interações entre solo, hidrologia e crescimento arbóreo em castanhais naturais, contribuindo para o desenvolvimento de modelos mais robustos de funcionamento ecológico e manejo sustentável desses sistemas florestais. A inclusão da Amazônia oriental completa o quadro comparativo das cinco regiões estudadas, permitindo uma visão integrada e sem precedentes da heterogeneidade edáfica e de suas implicações para a ecologia e o manejo da castanheira em toda a Amazônia brasileira.

5 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que a fertilidade do solo em castanhais naturais da região de Santarém apresenta estrutura espacial bem definida, resultante da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos que regulam a distribuição de recursos no sistema edáfico. A análise geoestatística evidenciou forte dependência espacial para atributos associados à acidez potencial e à capacidade de troca catiônica, indicando que a fertilidade potencial do solo é predominantemente controlada por fatores estruturais. Em contraste, a fração argilosa, apesar de sua baixa variabilidade estatística, apresentou dependência espacial fraca, sugerindo organização em escala inferior ao espaçamento amostral.

A identificação de gradientes espaciais para argila e fósforo confirma a existência de heterogeneidade edáfica intra-área, associada a processos geomorfológicos e pedogenéticos. O

comportamento do fósforo, com forte dependência espacial e ausência de efeito pepita, destaca-se como um dos principais achados do estudo, indicando controle por fatores pedogenéticos regionais, em contraste com o padrão de alta variabilidade local frequentemente descrito para solos tropicais.

A integração entre atributos pedogeoquímicos, retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes evidencia que a estrutura física e química do solo exerce papel central no funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*). A textura muito argilosa dos solos de Santarém confere elevada capacidade de retenção de água, o que pode atenuar os efeitos do estresse hídrico sazonal e favorecer a manutenção da atividade fisiológica da espécie.

Os resultados indicam que a organização espacial da fertilidade promove a formação de compartimentos edáficos funcionalmente distintos, com implicações diretas para o crescimento e a produtividade das árvores. Nesse contexto, zonas com maior teor de argila e maior capacidade de troca catiônica destacam-se como áreas com maior potencial de retenção de água e nutrientes, sendo prioritárias para estratégias de manejo e conservação.

Do ponto de vista aplicado, este estudo demonstra que a incorporação da variabilidade espacial do solo é fundamental para o manejo sustentável de castanhais naturais. A utilização integrada de análises pedogeoquímicas e geoestatísticas permite identificar zonas de maior potencial produtivo e compreender a dinâmica de recursos no sistema solo-planta.

Em síntese, a principal contribuição deste trabalho consiste em evidenciar que a dimensão espacial da fertilidade do solo constitui um componente essencial para compreender os padrões de crescimento, produtividade e distribuição da castanheira-da-amazônia. Esses resultados fornecem base científica para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação mais eficientes, além de contribuir para a compreensão das interações entre solo, hidrologia e vegetação em ecossistemas amazônicos sob cenários de mudanças ambientais.

REFERÊNCIAS

ALLEONI, L. R. F.; PEIXOTO, R. T. G.; AZEVEDO, A. C.; MELO, L. C. A. Components of surface charge in tropical soils with contrasting mineralogies. Soil Science, v. 174, n. 11, p. 629-638, nov. 2009. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181c17a93.

ALMEIDA, J. A. de; LUNARDI NETO, A.; VIDAL-TORRADO, P. Sombric horizon: five decades without evolution. Scientia Agricola, v. 72, n. 1, p. 87-95, jan./fev. 2015. DOI: 10.1590/0103-9016-2014-0111.

ANDEREGG, W. R. L.; KONINGS, A. G.; TRUGMAN, A. T. *et al.* Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. Nature, v. 561, p. 538-541, set. 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0539-7.

ANJOS, L. J. S.; GONÇALVES, G. S. R.; DUTRA, V. A. B.; ROSA, A. G.; SANTOS, L. B.; BARROS, M. N. R. *et al.* Brazil nut journey under future climate change in Amazon. PLoS ONE, v. 19, n. 11, e0312308, nov. 2024. DOI: 10.1371/journal.pone.0312308.

ARAÚJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P.; SANTOS, S. M. Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 1, p. 38-44, jan. 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p38-44.

Barbosa, J. Z., Poggere, G., Mancini, M., Silva, S. H. G., Motta, A. C. V., & Curi, N. (2022). National-scale spatial variations of soil phosphorus retention capacity in Brazil. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 128, 103271. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103271

BHUNIA, G. S.; SHIT, P. K.; CHATTOPADHYAY, R. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). Annals of Agrarian Science, v. 16, n. 4, p. 436-443, dez. 2018. DOI: 10.1016/j.aasci.2018.06.003.

BORTOLUZZI, E. C.; SANTOS, D. R.; SANTANNA, M. A. *et al.* Mineralogy and nutrient desorption of suspended sediments during a storm event. Journal of Soils and Sediments, v. 13, p. 1093-1105, jul. 2013. DOI: 10.1007/s11368-013-0692-4.

BOULET, R.; LUCAS, Y.; FRITSCH, E.; PAQUET, H. Geochemical processes in tropical landscapes: role of the soil covers. In: Soils and sediments: mineralogy and geochemistry. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. p. 67-96.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, set./out. 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.

CORDEIRO, A. L. *et al.* Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in Central Amazonia. Plant-Environment Interactions, v. 1, 2020. DOI: 10.1002/pei3.10010.

CORDOVIL, K. P. S.; BROU, Y. T.; GUEDI, O. A.; PERES, L. V.; MACHADO, W. B.; GASPAR, A. B. S.; BENCHERIF, H.; GONÇALVES, L. R. M.; CARVALHO, L. G. Local Climate Zones

Classification Applied to a Brazilian Amazon City. Urban Science, v. 8, n. 4, 253, dez. 2024. DOI: 10.3390/urbansci8040253.

COSTA, A. C. S.; SOUZA JUNIOR, I. G.; CANTON, L. C.; GIL, L. G.; FIGUEIREDO, R. Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 44, e0200019, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200019.

COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. F. Atributos do solo relacionados com a produção da castanheira-do-Brasil (Bertholletia excelsa). Floresta e Ambiente, v. 24, e20150042, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.004215.

CUNHA, H. F. V.; ANDERSEN, K. M.; LUGLI, L. F. *et al.* Direct evidence for phosphorus limitation on Amazon forest productivity. Nature, v. 608, p. 558-562, ago. 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-05085-2.

CUSACK, D. F.; ADDO-DANSO, S. D.; AGEE, E. A.; ANDERSEN, K. M.; ARNAUD, M.; BATTERMAN, S. A.; BREARLEY, F. Q.; CIOCHINA, M. I.; CORDEIRO, A. L.; DALLSTREAM, C.; DIAZ-TORIBIO, M. H.; DIETTERICH, L. H.; FISHER, J. B.; FLEISCHER, K.; FORTUNEL, C.; FUCHSLUEGER, L.; GUERRERO-RAMÍREZ, N. R.; KOTOWSKA, M. M.; LUGLI, L. F.; MARÍN, C.; McCULLOCH, L. A.; MAEGHT, J.-L.; METCALFE, D.; NORBY, R. J.; OLIVEIRA, R. S.; POWERS, J. S.; REICHERT, T.; SMITH, S. W.; SMITH-MARTIN, C. M.; SOPER, F. M.; TORO, L.; UMAÑA, M. N.; VALVERDE-BARRANTES, O.; WEEMSTRA, M.; WERDEN, L. K.; WONG, M.; WRIGHT, C. L.; WRIGHT, S. J.; YAFFAR, D. Tradeoffs and synergies in tropical forest root traits and dynamics for nutrient and water acquisition: field and modeling advances. Frontiers in Forests and Global Change, v. 4, 704469, set. 2021. DOI: 10.3389/ffgc.2021.704469.

DE CAIRES, S. A.; MARTIN, C. S.; ATWELL, M. A.; KAYA, F.; WUDDIVIRA, G. A.; WUDDIVIRA, M. N. Advancing soil mapping and management using geostatistics and integrated machine learning and remote sensing techniques: A synoptic review. Discover Soil, v. 2, n. 1, 53, 2025.

DE SOUSA, R. N.; PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L.; ALLEONI, L. R. F. Liming and soil texture affect the miscible displacement of phosphorus from organic and mineral sources in tropical oxisols. Science of the Total Environment, v. 961, 178341, fev. 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178341.

DOETTERL, S.; ASIFIWE, R. K.; BAERT, G.; BAMBA, F.; BAUTERS, M.; BOECKX, P.; BUKOMBE, B.; CADISCH, G.; COOPER, M.; CIZUNGU, L. N.; HOYT, A.; KABASeke, C.; KALBITZ, K.; KIDINDA, L.; MAIER, A.; MAINKA, M.; MAYROCK, J.; MUHINDO, D.; MUJINYA, B. B.; MUKOTANYI, S. M.; NABAHUNGU, L.; REICHENBACH, M.; REWALD, B.; SIX, J.; STEGMANN, A.; SUMMERAUER, L.; UNSELD, R.; VANLAUWE, B.; VAN OOST, K.; VERHEYEN, K.; VOGEL, C.; WILKEN, F.; FIENER, P. Organic matter cycling along geochemical, geomorphic, and disturbance gradients in forest and cropland of the African Tropics – project TropSOC database version 1.0. Earth System Science Data, v. 13, p. 4133-4153, 2021. DOI: 10.5194/essd-13-4133-2021.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MACHADO, E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. Acta Amazonica, Manaus, v. 35, n. 2, p. 155-173, abr./jun. 2005. DOI: 10.1590/S0044-59672005000200006.

FLORES, B. M.; OLIVEIRA, R. S.; ROWLAND, L. *et al.* Editorial special issue: plant-soil interactions in the Amazon rainforest. Plant and Soil, v. 450, p. 1-9, maio 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04544-x.

Fuchslueger, L., Pires Martins, N., Figueiredo Lugli, L., Souza, C. C., Santana, F., Marinho, N., Pires, M., Hartley, I., Norby, R., and Quesada, C. A. and the AmazonFACE team: Going deeper underground – unravelling microbial activity and carbon cycling in deep soils in the Central Amazon, EGU General Assembly 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-21795, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-21795, 2026.

FUCHSLUEGER, L.; ZEZULA, D.; PÜSPÖK, J.; VAN LANGENHOVE, L.; MARGALEF, O.; CANARINI, A.; RANITS, C.; QUESADA, C. A.; SALINAS, N.; COSIO, E.; PENUELAS, J.; WANEK, W.; RICHTER, A.; JANSSENS, I. Controls over phosphorus mineralization and immobilization rates in different tropical soils. In: EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 maio 2020. Vienna: EGU, 2020. EGU2020-15473. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-15473.

FUJII, K.; SHIBATA, M.; KITAJIMA, K.; ICHIE, T.; KITAYAMA, K.; TURNER, B. L. Plant–soil interactions maintain biodiversity and functions of tropical forest ecosystems. Ecological Research, v. 33, n. 1, p. 149-160, jan. 2018. DOI: 10.1007/s11284-017-1511-y.

GOMES, E.; FIRMINO, A. V.; GUEDES, A. C. L.; BAIA, A. P.; GONÇALVES, D. A.; MACIEL, S. P. O.; GUEDES, M. C. Nutritional quality of Brazil nuts from different trees and under different storage conditions. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 59, e1744, 2024. DOI: 10.5327/Z2176-94781744.

GUERREIRO, Q. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; SANTOS, G. R.; RUIVO, M. L. P.; BELDINI, T. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, K. E.; GUEDES, M. C.; SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. African Journal of Agricultural Research, v. 12, n. 4, p. 237-250, jan. 2017. DOI: 10.5897/AJAR2016.11766.

Hanyabui, E., Apori, S. O., Frimpong, K. A., Atiah, K., Abindaw, T., Ali, M., ... & Byalebeka, J. (2020). Phosphorus sorption in tropical soils. AIMS Agriculture and Food, 5(4). doi: 10.3934/agrfood.2020.4.599

HOLMES, K.; KYRIAKIDIS, P.; CHADWICK, O. *et al.* Multi-scale variability in tropical soil nutrients following land-cover change. Biogeochemistry, v. 74, p. 173-203, jun. 2005. DOI: 10.1007/s10533-004-3544-x.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JOHN, R.; DALLING, J. W.; HARMS, K. E.; YAVITT, J. B.; STALLARD, R. F.; MIRABELLO, M. *et al.* Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 104, n. 3, p. 864-869, jan. 2007. DOI: 10.1073/pnas.0604666104.

KETROT, D.; SUDDHIPRAKARN, A.; KHEORUENROMNE, I.; SINGH, B. Interactive effects of iron oxides and organic matter on charge properties of red soils in Thailand. Soil Research, v. 51, n. 3, p. 222-231, 2013. DOI: 10.1071/SR13021.

KOTOWSKA, M. M.; LINK, R. M.; RÖLL, A.; HERTEL, D.; HÖLSCHER, D.; WAITE, P. A. *et al.* Effects of wood hydraulic properties on water use and productivity of tropical rainforest

trees. Frontiers in Forests and Global Change, v. 3, 598759, jan. 2021. DOI: 10.3389/ffgc.2020.598759.

KÜBERT, A.; GÖTZ, M.; KÜHNHAMMER, K.; DUBBERT, M. Deep roots mitigate drought impacts on tropical trees despite limited quantitative contribution to transpiration. Science of the Total Environment, v. 893, 164763, out. 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164763.

LARK, R. M.; CULLIS, B. R.; WELHAM, S. J. On spatial prediction of soil properties in the presence of a spatial trend: the empirical best linear unbiased predictor (E-BLUP) with REML. European Journal of Soil Science, v. 57, n. 6, p. 787–799, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2005.00768.x.

Laurenti, N., Pezzopane, J. R., Guimarães, E. D. S., Bernardi, A. C. D. C., & Rodrigues, J. (2024). Spatial variability of soil and vegetation properties in integrated production systems. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 28(10), e280481. http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n10e280481

MEHTA, S.; MATHEW, G. Influence of Soil Mineralogy on Phosphorus Sorption, Partitioning, and Bioavailability in Contrasting Tropical Soils of India. In: EGU General Assembly 2025, Vienna, 2025. EGU25-14701. DOI: 10.5194/egusphere-egu25-14701.

MEIR, P.; WOOD, T. E.; GALBRAITH, D. R.; BRANDO, P. M.; DA COSTA, A. C. L.; ROWLAND, L.; FERREIRA, L. V. Threshold responses to soil moisture deficit by trees and soil in tropical rain forests: insights from field experiments. BioScience, v. 65, n. 9, p. 882–892, 2015. DOI: 10.1093/biosci/biv107.

MELLO, J. M. D.; GUEDES, M. C.; TERRA, M. D. C. N. S. Variabilidade espacial da produtividade e estrutura arbórea de castanhais nativos na Amazônia oriental. 2021. No prelo.

Miranda, R. D. Q., Nóbrega, R. L., Verhoef, A., da Silva, E. L., da Silva, J. F., de Araújo Filho, J. C., ... & Galvíncio, J. D. (2025). A scalable framework for soil property mapping tested across a highly diverse tropical data-scarce region. Soil Advances, 4, 100064. https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100064

MOLLA, A.; REN, Y.; ZUO, S.; QIU, Y.; LI, L.; ZHANG, Q.; JU, J.; ZHU, J.; ZHOU, Y. Evaluating sample sizes and design for monitoring and characterizing the spatial variations of potentially toxic elements in the soil. Science of the Total Environment, v. 847, art. 157489, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157489.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; REBOLLO, F. J. Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. Computers and Electronics in Agriculture, v. 75, n. 2, p. 223–230, 2011. DOI: 10.1016/j.compag.2010.10.014.

OLDONI, H.; TERRA, V. S. S.; TIMM, L. C.; REISSER JÚNIOR, C.; MONTEIRO, A. B. Delineation of management zones in a peach orchard using multivariate and geostatistical analyses. Soil & Tillage Research, v. 191, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.008.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; COSTA, M. C. G.; COSTA, P. da; SANTOS, D. B. dos; BATISTA, K. D.; WADT, L. H. de O. Heterogeneidade do solo e disponibilidade de recursos em castanhais amazônicos: uma análise geoestatística de gradientes de fertilidade em Roraima. Revista de Geopolítica, v. 17, n. 6, e2633, 2026d. DOI: 10.56238/revgeov17n6-076.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; MAGALHÃES, C. A. de S.; SANTOS, D. B. dos; COSTA, P. da; GUEDES, M. C.; MELEM JUNIOR, N. J. Variabilidade espacial de atributos do solo em área de ocorrência natural de castanheira (Bertholletia excelsa) na Amazônia meridional: Mato Grosso. Revista de Geopolítica, v. 17, n. 6, p. 1–27, 2026b. DOI: 10.56238/revgeov17n6-009.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; SILVA, K. E. da; SANTOS, D. B. dos; COSTA, M. C. G.; COSTA, P. da. Modelagem geoestatística da fertilidade do solo em cinco áreas com ocorrência de castanheira-da-amazônia no Amazonas. Revista de Geopolítica, v. 17, n. 5, 2026a. DOI: 10.56238/revgeov17n5-043

OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; WADT, L. H. de O.; SANTOS, D. B. dos; COSTA, P. da; SILVA, K. E. da. Estrutura espacial da fertilidade do solo em castanhais amazônicos: implicações pedogeoquímicas para retenção hídrica e crescimento de Bertholletia excelsa no estado do Acre. Revista de Geopolítica, v. 17, n. 8, e3190, 2026c. DOI: https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-143

OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; *et al.* Chemical analysis of rainfall and throughfall in the Tapajós National Forest, Belterra, Pará, Brazil. Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 2, p. 263-275, abr./jun. 2015. DOI: 10.4136/ambi-agua.1552.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; CORREA, J. R. V. Caracterização dos solos do município de Belterra, Estado do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001. 39 p. (Série Documentos, 88).

OLIVEIRA, D. M. S.; *et al.* Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: A systematic review. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 47, n. spe, e0220055, 2023. DOI: 10.36783/18069657rbcs20220055.

OLIVEIRA, S. S. D. Growth and functional characteristics of young Bertholletia excelsa plants grown in association with an N2-fixing tree under fertilization. 2024. 105 f. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2024.

PALMIOTTO, P. A.; DAVIES, S. J.; VOGT, K. A.; ASHTON, M. S.; VOGT, D. J.; ASHTON, P. S. Soil-related habitat specialization in dipterocarp rain forest tree species in Borneo. Journal of Ecology, v. 92, n. 4, p. 609-623, ago. 2004. DOI: 10.1111/j.0022-0477.2004.00894.x.

PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Computers & Geosciences, v. 30, n. 7, p. 683-691, ago. 2004. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. Biogeosciences, v. 8, p. 1415-1440, 2011. DOI: 10.5194/bg-8-1415-2011.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; PATINO, S.; BAKER, T. R.; CZIMCZIK, C. *et al.* Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. Biogeosciences, v. 7, n. 5, p. 1515-1541, 2010. Disponível em: www.biogeosciences-discuss.net/6/3923/2009/.

RODRIGUES, M.; RABÊLO, F. H. S.; CASTRO, H. A.; ROBOREDO, D.; CARVALHO, M. A. C.; ROQUE, C. G. Changes in chemical properties by use and management of an Oxisol in the Amazon biome. Revista Caatinga, v. 30, n. 2, p. 278-286, abr./jun. 2017. DOI: 10.1590/1983-21252017v30n202rc.

SCHOO.NEJANS, J.; VANACKER, V.; OPFERGELT, S. Vertical and lateral particle and element fluxes across soil catenas in southern Brazil. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, 2016. p. EPSC2016-3784.

SCHROTH, G.; MOTA, M. S. S.; ASSIS ELIAS, M. E. Growth and nutrient accumulation of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa) in agroforestry at different fertilizer levels. Journal of Forest Research, v. 26, n. 2, p. 347-353, jun. 2015. DOI: 10.1007/s11676-015-0037-9.

SILVA JUNIOR, E. C.; WADT, L. H. O.; SILVA, K. E.; LIMA, R. M. B.; BATISTA, K. D.; GUEDES, M. C. *et al.* Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. Chemosphere, v. 188, p. 650-658, dez. 2017. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.158.

SILVA, A. L.; MARIANO, D. C.; EBLING, Â. A.; OLIVEIRA NETO, C. F.; VIÉGAS, I. J. M.; OKUMURA, R. S. 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, v. 16, n. 1, p. 1-16, 2023. DOI: 10.17765/2176-9168.2023v16n1e9417.

SILVA, C. S.; SILVA, L. M.; WADT, L. H. O.; MIQUELONI, D. P.; SILVA, K. E.; PEREIRA, M. G. Soil classes and properties explain the occurrence and fruit production of Brazil nut. 2022. No prelo.

SOUZA, J. J. L. L.; FONTES, M. P. F.; GILKES, R.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, T. S. Geochemical signature of Amazon tropical rainforest soils. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 42, e0170192, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbcs20170192.

STAHL, C.; HÉRAULT, B.; ROSSI, V. *et al.* Depth of soil water uptake by tropical rainforest trees during dry periods: does tree dimension matter? Oecologia, v. 173, p. 1191-1201, dez. 2013. DOI: 10.1007/s00442-013-2724-6.

STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O.; KAINER, K. A. *et al.* Comparative models disentangle drivers of fruit production variability of an economically and ecologically important long-lived Amazonian tree. Scientific Reports, v. 11, 2563, jan. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-81948-4.

TAKOUTSING, B. Digital soil mapping using uncertain soil observations to support agricultural intensification in West and Central Africa. 2024. Tese (Doutorado) – Wageningen University and Research, Wageningen, 2024.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* (org.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N. C.; SABATIER, D.; BARALOTO, C.; SALOMÃO, R. P.; GUEVARA, J. E. *et al.* Hyperdominance in the Amazonian tree flora. Science, v. 342, n. 6156, 1243092, out. 2013. DOI: 10.1126/science.1243092.

TOURNE, D. C. M.; BALLESTER, M. V. R.; JAMES, P. M. A.; MARTORANO, L. G.; GUEDES, M. C.; THOMAS, E. Strategies to optimize modeling habitat suitability of Bertholletia excelsa in the Pan-Amazonia. Ecology and Evolution, v. 9, n. 22, p. 12623-12638, nov. 2019. DOI: 10.1002/ece3.5726.

TOURNE, D. C. M. Combining species distribution modelling and environmental perceptions to support sustainable strategies for Amazon-nut (Bertholletia excelsa Bonpl.) planting and conservation.

2018. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. DOI: 10.11606/T.91.2019.tde-14032019-160707.

TURNER, B. L.; ENGELBRECHT, B. M. J. Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. Biogeochemistry, v. 103, n. 1-3, p. 297-315, abr. 2011. DOI: 10.1007/s10533-010-9466-x.

UMARANI, M. S.; WANG, D.; O'DWYER, J. P.; D'ANDREA, R. A spatial signal of niche differentiation in tropical forests. The American Naturalist, v. 203, n. 4, p. 445-457, abr. 2024. DOI: 10.1086/729218.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

WALDHOFF, P.; SOUZA, S. E. X. F. Bertholletia excelsa: key species for sustainable livelihoods and forest conservation. In: Tropical Forests – Ecology, Diversity and Conservation Status. London: IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.109775.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). Applications of Soil Physics. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for environmental scientists. 3. ed. Chichester: Wiley, 2007.

XU, R. K.; QAFOKU, N. P.; VAN RANST, E.; LI, J. Y.; JIANG, J. Adsorption properties of subtropical and tropical variable charge soils: implications from climate change and biochar amendment. Advances in Agronomy, v. 135, p. 1-58, 2016. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.09.001.

YAVITT, J. B.; HARMS, K. E.; GARCIA, M. N.; WRIGHT, S. J.; HE, F.; MIRABELLO, M. J. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest, Panama. Australian Journal of Soil Research, v. 47, n. 7, p. 674-687, 2009. DOI: 10.1071/SR08258.

YEMEFACK, M.; ROSSITER, D. G.; NJOMGANG, R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. Geoderma, v. 125, n. 1–2, p. 117–143, 2005. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.07.007.

Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, X., Wu, W., & Liu, H. (2024). The Spatiotemporal Variability of Soil Available Phosphorus and Potassium in Karst Region: The Crucial Role of Socio-Geographical Factors. Land, 13(6), 882. https://doi.org/10.3390/land13060882

Zhao W, Xie X, He T, Zhang J, Liu J. Study on vertical variation characteristics of soil phosphorus adsorption and desorption in black soil region of Northeast China. PLoS One. 2024 Jun 24;19(6):e0306145. doi: 10.1371/journal.pone.0306145.

ZIEGLER, C.; COCHARD, H.; STAHL, C.; FOLTZER, L.; GÉRARD, B.; GORET, J. Y. *et al.* Residual water losses mediate the trade-off between growth and drought survival across saplings of 12 tropical rainforest tree species with contrasting hydraulic strategies. Journal of Experimental Botany, v. 75, n. 13, p. 4128-4147, jul. 2024. DOI: 10.1093/jxb/erae159.

ZUO, X. H.; LAI, J. X.; LIU, F.; SHI, X. Spatial heterogeneity and zoning of soil organic matter based on geostatistics and spatial autocorrelation: A perspective from land consolidation. Chinese Journal of

Agricultural Resources and Regional Planning, v. 43, n. 3, p. 240-252, 2022. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20220325.