ReGeo ISSN: 2177-3246

ESTRUTURA ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO EM CASTANHAIS AMAZÔNICOS: IMPLICAÇÕES PEDOGEOQUÍMICAS PARA RETENÇÃO HÍDRICA E CRESCIMENTO DE BERTHOLLETIA EXCELSA NO ESTADO DO ACRE

UNDERSTANDING THE SPATIAL ORGANIZATION OF SOIL ATTRIBUTES IS ESSENTIAL TO ELUCIDATE THE MECHANISMS CONTROLLING THE ECOLOGICAL FUNCTIONING OF TROPICAL FORESTS

ESTRUCTURA ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN CASTAÑALES AMAZÓNICOS: IMPLICACIONES PEDOGEOQUÍMICAS PARA LA RETENCIÓN HÍDRICA Y EL CRECIMIENTO DE BERTHOLLETIA EXCELSA EN EL ESTADO DE ACRE

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-143

Data de submissão: 29/06/2026 **Data de publicação:** 13/08/2026

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

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

RESUMO

A compreensão da organização espacial dos atributos do solo é fundamental para elucidar os mecanismos que controlam o funcionamento ecológico de florestas tropicais. Neste estudo, analisou-se a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma área natural de ocorrência de Bertholletia excelsa no estado do Acre, Amazônia ocidental brasileira. Foram coletadas 240 amostras de solo georreferenciadas na camada de 0–20 cm, nas quais foram determinados atributos químicos de fertilidade e propriedades físicas. Inicialmente, realizou-se análise estatística descritiva, seguida de modelagem geoestatística por meio de variogramas experimentais e ajuste de modelos teóricos, com interpolação por krigagem ordinária. Os resultados evidenciaram predominância de dependência

espacial moderada (87,5% dos atributos), enquanto a fração argila apresentou dependência forte, indicando elevada continuidade espacial. Os alcances variográficos variaram de 3 a 30 km, revelando que a organização espacial do solo ocorre predominantemente em escala regional, diferenciando a Amazônia ocidental de outras regiões da bacia. Os mapas de krigagem indicaram a presença de compartimentos edáficos com variação estruturada na textura e na fertilidade do solo. A integração dos resultados permitiu propor um modelo conceitual no qual a estrutura pedológica regula a retenção de água, influenciando o funcionamento hidráulico e o crescimento radial da espécie. Esses resultados ampliam a compreensão dos controles pedogeoquímicos sobre o funcionamento de sistemas florestais amazônicos e fornecem subsídios para estratégias de manejo e conservação baseadas na variabilidade espacial do solo.

Palavras-chave: Dependência Espacial. Krigagem Ordinária. Funcionamento Hidráulico. Retenção Hídrica. Compartimentalização Edáfica.

ABSTRACT
Understanding the spatial organization of soil attributes is essential to elucidate the mechanisms controlling the ecological functioning of tropical forests. This study analyzed the spatial variability of physical and chemical soil properties in a natural Bertholletia excelsa stand located in the state of Acre, western Brazilian Amazon. A total of 240 georeferenced soil samples (0–20 cm depth) were collected and analyzed for chemical fertility attributes and physical properties. Descriptive statistics were followed by geostatistical modeling using experimental variograms and fitted theoretical models, with spatial interpolation performed through ordinary kriging. Results showed a predominance of moderate spatial dependence (87.5% of the attributes), while clay content exhibited strong spatial dependence, indicating high spatial continuity. Variogram ranges varied from 3 to 30 km, revealing that soil spatial organization operates predominantly at a regional scale in the western Amazon, contrasting with other regions of the basin. Kriging maps revealed the presence of edaphic compartments characterized by structured variation in soil texture and fertility. Integrating these findings allowed the development of a conceptual model in which pedological structure regulates soil water retention, influencing tree hydraulic functioning and radial growth. These results improve the understanding of pedogeochemical controls on Amazon forest functioning and provide a basis for management and conservation strategies that explicitly incorporate soil spatial variability.

Keywords: Spatial Dependence. Ordinary Kriging. Hydraulic Functioning. Water Retention. Edaphic Compartmentalization.

RESUMEN
La comprensión de la organización espacial de los atributos del suelo es fundamental para elucidar los mecanismos que controlan el funcionamiento ecológico de bosques tropicales. En este estudio, se analizó la variabilidad espacial de atributos físicos y químicos del suelo en un área natural de ocurrencia de Bertholletia excelsa en el estado de Acre, Amazonía occidental brasileña. Se recolectaron 240 muestras de suelo georreferenciadas en la capa de 0–20 cm, en las cuales se determinaron atributos químicos de fertilidad y propiedades físicas. Inicialmente, se realizó análisis estadístico descriptivo, seguido de modelado geoestadístico por medio de variogramas experimentales y ajuste de modelos teóricos, con interpolación por krigeaje ordinario. Los resultados evidenciaron predominancia de dependencia espacial moderada (87,5% de los atributos), mientras que la fracción arcilla presentó dependencia fuerte, indicando elevada continuidad espacial. Los alcances variográficos variaron de 3 a 30 km, revelando que la organización espacial del suelo ocurre predominantemente en escala regional, diferenciando la Amazonía occidental de otras regiones de la cuenca. Los mapas de krigeaje indicaron la presencia de compartimentos edáficos con variación estructurada en la textura y en la fertilidad del suelo. La integración de los resultados permitió proponer un modelo conceptual en el cual la estructura pedológica regula la retención de agua, influyendo en el funcionamiento hidráulico y el crecimiento

radial de la especie. Estos resultados amplían la comprensión de los controles pedogeoquímicos sobre el funcionamiento de sistemas forestales amazónicos y proporcionan fundamentos para estrategias de manejo y conservación basadas en la variabilidad espacial del suelo.

Palabras clave: Dependencia Espacial. Krigeaje Ordinario. Funcionamiento Hidráulico. Retención Hídrica. Compartimentalización Edáfica.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia constitui o maior sistema florestal tropical contínuo do planeta e desempenha papel fundamental nos ciclos globais de carbono, água e nutrientes. Apesar da elevada biomassa e produtividade primária desses ecossistemas, grande parte dos solos amazônicos apresenta baixa fertilidade natural, resultado de intensos processos de intemperismo químico que atuaram por longos períodos sob condições tropicais úmidas. Esses processos promovem a lixiviação de bases, a remoção de cátions alcalinos e alcalino-terrosos e a formação de minerais secundários de baixa atividade, como caulinita e óxidos de ferro e alumínio, que passam a dominar a fração argila. Como consequência, esses solos apresentam elevada acidez, baixa saturação por bases e reduzida disponibilidade de nutrientes essenciais ao crescimento vegetal (Quesada *et al.*, 2011; Quesada *et al.*, 2020).

Do ponto de vista geoquímico, a fertilidade dos solos amazônicos está fortemente associada à interação entre mineralogia, matéria orgânica e processos de ciclagem biológica. Em ambientes altamente lixiviados, a maior parte dos nutrientes disponíveis para a vegetação é mantida por meio da reciclagem interna promovida pela serrapilheira, atividade microbiana e absorção radicular superficial. Esse mecanismo permite que florestas tropicais altamente produtivas se mantenham sobre solos quimicamente pobres, constituindo um dos aspectos mais característicos do funcionamento ecológico da Amazônia (Grau *et al.*, 2017; Quesada *et al.*, 2020; Lange *et al.*, 2024). No entanto, a eficiência desse sistema depende da heterogeneidade espacial dos processos pedológicos e biológicos, que pode gerar mosaicos de fertilidade mesmo em áreas de floresta madura.

Além da fertilidade química, as propriedades físicas do solo desempenham papel central na regulação dos processos hidrológicos e fisiológicos das plantas. A textura, particularmente o teor de argila, controla propriedades como porosidade, retenção de água e condutividade hidráulica. Em solos tropicais altamente intemperizados, essas propriedades são determinantes para a disponibilidade hídrica durante períodos de redução da precipitação, influenciando diretamente o funcionamento do sistema solo–planta–atmosfera (Oliveira *et al.*, 2019; Anderegg *et al.*, 2018; Moratelli *et al.*, 2023). Assim, a variabilidade espacial da textura pode gerar gradientes de disponibilidade hídrica capazes de modular o desempenho ecofisiológico das árvores em escala local e regional.

Entre as espécies arbóreas de maior relevância ecológica e socioeconômica da Amazônia destaca-se a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), uma espécie emergente de grande porte amplamente distribuída em florestas de terra firme. Essa espécie pode atingir alturas superiores a 50 m, apresenta elevada longevidade e desempenha papel importante na estrutura vertical das florestas e no armazenamento de carbono. Além disso, constitui um recurso econômico fundamental para populações tradicionais, sendo uma das principais espécies exploradas em sistemas extrativistas

amazônicos (Waldhoff & Souza, 2023; Firmino *et al.*, 2025). Considerada hiperdominante na Amazônia (ter Steege *et al.*, 2013), a castanheira contribui significativamente para a biomassa e o funcionamento dos ecossistemas florestais.

O crescimento e a produtividade de *Bertholletia excelsa* são determinados por uma combinação de fatores ambientais, incluindo clima, disponibilidade hídrica e condições edáficas. Estudos recentes indicam que propriedades do solo influenciam significativamente o crescimento radial e o funcionamento fisiológico da espécie, especialmente por meio do controle da disponibilidade de água e nutrientes (Gomes *et al.*, 2024). Em árvores emergentes, o funcionamento hidráulico é um processo crítico, uma vez que o transporte de água ao longo do xilema depende da continuidade do gradiente de potencial hídrico entre o solo e o dossel. Dessa forma, atributos do solo que regulam a retenção de água podem exercer efeitos diretos sobre a transpiração, a assimilação de carbono e o crescimento das árvores (Anderegg *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a heterogeneidade espacial do solo emerge como um fator chave na compreensão do funcionamento ecológico de castanhais naturais. A paisagem amazônica apresenta elevada diversidade pedológica, resultante da interação entre material de origem, relevo, processos de intemperismo e dinâmica hidrológica. Esses fatores geram mosaicos espaciais de fertilidade e textura, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia significativamente, influenciando a distribuição de recursos para as plantas (Águas, 2019; Chadwick & Asner, 2018; Bentos, Nascimento & Williamson, 2013). Em escalas locais e regionais, essa heterogeneidade pode resultar em compartimentos edáficos distintos, com implicações diretas para o desempenho fisiológico das árvores.

A análise da variabilidade espacial dos atributos do solo constitui uma abordagem fundamental para compreender a organização pedológica da paisagem e seus efeitos sobre o funcionamento dos ecossistemas florestais. Técnicas geoestatísticas permitem identificar padrões de dependência espacial, estimar escalas de variação e gerar modelos contínuos da distribuição de atributos edáficos. Esses métodos têm sido amplamente utilizados em estudos de solos tropicais, contribuindo para o entendimento da dinâmica pedogeoquímica e da heterogeneidade ambiental (Águas, 2019; Sales *et al.*, 2020). No entanto, sua aplicação em castanhais naturais da Amazônia ocidental ainda é limitada, especialmente em abordagens que integrem estrutura espacial do solo e funcionamento ecofisiológico de espécies arbóreas.

Apesar dos avanços no conhecimento sobre solos amazônicos, persistem lacunas importantes na compreensão da organização espacial dos atributos do solo em áreas naturais de ocorrência de castanhais. Em particular, ainda é pouco compreendido como a estrutura espacial da fertilidade e da

textura do solo se traduz em gradientes de disponibilidade hídrica e nutricional capazes de influenciar o funcionamento hidráulico e o crescimento de *Bertholletia excelsa*. Essa lacuna é especialmente relevante na Amazônia ocidental, onde os solos apresentam características pedogenéticas específicas e a dinâmica hidrológica difere de outras regiões da bacia.

Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma área natural de ocorrência de *Bertholletia excelsa* no estado do Acre, utilizando técnicas de geoestatística para caracterizar a estrutura espacial desses atributos e gerar mapas de distribuição por krigagem. Parte-se da hipótese de que a fertilidade e a textura do solo apresentam organização espacial estruturada e que essa estrutura influencia processos hidrológicos e pedogeoquímicos que regulam a disponibilidade de água e nutrientes para as árvores. Especificamente, espera-se que atributos relacionados à pedogênese, como a fração argila, apresentem maior continuidade espacial, enquanto atributos químicos mais dinâmicos exibam dependência moderada, refletindo diferentes controles sobre sua distribuição.

Espera-se que os resultados contribuam para ampliar a compreensão dos controles edáficos sobre o funcionamento ecológico de castanhais amazônicos, integrando processos pedogeoquímicos do solo com respostas ecofisiológicas das árvores. Essa abordagem fornece uma base conceitual para compreender como a dinâmica espacial do solo influencia o funcionamento hidráulico e o crescimento radial de *Bertholletia excelsa*, além de subsidiar estratégias de manejo sustentável e conservação desses sistemas florestais. Adicionalmente, este estudo contribui para uma visão comparativa da organização espacial da fertilidade do solo ao longo da Amazônia, incorporando a região ocidental ao gradiente edafoclimático da bacia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma área de ocorrência natural de *Bertholletia excelsa* Bonpl. localizada no estado do Acre, Amazônia ocidental brasileira (Figura 1). A região insere-se no bioma Amazônia e apresenta clima tropical úmido, caracterizado por elevada precipitação anual e pequena variação térmica ao longo do ano. A precipitação média anual varia entre aproximadamente 2.000 e 2.400 mm, com período relativamente mais seco entre os meses de junho e setembro (de Souza, 2020; de Lima *et al.*, 2022). A sazonalidade hídrica, embora menos pronunciada que em outras regiões amazônicas, 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 (Lopez-Sangil *et al.*, 2018; Oliveira Junior *et al.*, 2026).

A vegetação predominante é composta por floresta ombrófila densa de terra firme, caracterizada por elevada diversidade florística e presença de espécies arbóreas emergentes de grande porte, entre as quais se destaca *Bertholletia excelsa* (Piva *et al.*, 2020; Tourne *et al.*, 2019). Essa espécie pode atingir alturas superiores a 50 m e desempenha papel importante na estrutura vertical da floresta e na dinâmica de produção de biomassa (Thomas, Atkinson & Kettle, 2018; Schroth *et al.*, 2015).

Os solos da região são predominantemente altamente intemperizados e apresentam características típicas de solos tropicais úmidos, incluindo elevada acidez, baixa saturação por bases e predominância de minerais secundários de baixa atividade na fração argila (Mendonça *et al.*, 2020; da Silva *et al.*, 2021). Esses solos exercem forte influência sobre processos hidrológicos e biogeoquímicos que regulam o funcionamento dos ecossistemas florestais amazônicos (Bernini *et al.*, 2013; Mendonça *et al.*, 2020). A geologia local é caracterizada por sedimentos da Formação Solimões, que contribuem para a formação de solos com textura variável e mineralogia dominada por caulinita e óxidos de ferro, conferindo características específicas à fertilidade e à dinâmica hídrica da região (Inda *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2024).

Figura 1. - Localização da área de estudo no estado do Acre, Amazônia ocidental brasileira. O mapa apresenta os limites municipais, a delimitação da área amostrada e os principais cursos d'água da região. A base cartográfica foi elaborada a partir de dados do IBGE (2022) e modelo digital de elevação SRTM, no sistema de coordenadas geográficas (datum WGS84).



Fonte: Os Autores, 2026

2.2 AMOSTRAGEM E COLETA DE SOLOS

A amostragem de solo foi realizada em pontos distribuídos sistematicamente dentro da área delimitada pela poligonal, permitindo capturar a variabilidade espacial dos atributos edáficos. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras de solo na camada superficial, utilizando trado de aço inoxidável. Foram estabelecidos 60 pontos amostrais georreferenciados, distribuídos em malha regular com espaçamento aproximado de 50 m, dimensionada para cobrir a heterogeneidade espacial esperada com base em estudos prévios em solos amazônicos e para permitir a modelagem geoestatística com número suficiente de pares por classe de distância. A profundidade de 0 a 0,20 m, pois nela concentra-se a maior parte das raízes finas, atividade microbiana e processos de ciclagem biogeoquímica, sendo a mais frequentemente adotada em estudos de fertilidade do solo em ecossistemas florestais (Fuchslueger *et al.*, 2026).

O delineamento amostral buscou capturar a variabilidade espacial dos atributos do solo na área de ocorrência da castanheira, permitindo posteriormente a aplicação de técnicas geoestatísticas para caracterizar a estrutura espacial das variáveis edáficas. A densidade amostral (60 pontos em 9 hectares) é compatível com estudos geoestatísticos em solos tropicais e permite estimar variogramas com estabilidade adequada, conforme recomendações da literatura (Webster & Oliver, 2007).

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 *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).

As análises físicas incluíram a determinação da fração granulométrica do solo, particularmente o teor de argila, obtido pelo método da pipeta após dispersão química e mecânica da amostra. A textura do solo exerce papel fundamental na retenção de água e na disponibilidade hídrica para as plantas, sendo considerada um atributo chave na avaliação do funcionamento hidrológico do solo (Fatichi *et al.*, 2020; Lal, 2020). A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme procedimentos padronizados em estudos de física do solo.

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 ($12\% \leq CV \leq 60\%$) 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):

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum ¿ \qquad (1)$$

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 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; 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 & 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 (≤ 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 VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise estatística descritiva revelou variabilidade entre os atributos químicos e físicos do solo na área de ocorrência de *Bertholletia excelsa* no estado do Acre (Tabela 1).

A saturação por alumínio apresentou média de 78,6%, variando de 0% a 94,2%.

Os teores de carbono orgânico apresentaram média de 7,55 g kg^{-1}, com coeficiente de variação de 39,9%.

A fração argila apresentou média de 153,53 g kg^{-1} e coeficiente de variação de 40,2%.

Os teores médios de cálcio e magnésio foram de 0,132 e 0,259 cmolc dm^{-3}, respectivamente, enquanto o fósforo disponível apresentou média de 4,50 mg dm^{-3}.

Os coeficientes de variação variaram entre os atributos, com valores elevados para cálcio (168,9%), manganês (102,9%) e ferro (65,2%), e menores para saturação por alumínio (19,5%) e CTC (25,3%).

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos do solo na área de ocorrência natural de Bertholletia excelsa no estado do Acre, Amazônia ocidental.

Atributo	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	CV (%)
Al	240	0	4,93	2,05	2,095	0,773	37,716
H+Al	240	1,172	8,118	3,995	3,927	1,086	27,183
T (CTC pH7)	240	1,37	8,488	4,508	4,406	1,139	25,263
V%	240	2,385	56,13	11,572	10,031	7,027	60,72
m%	240	0	94,227	78,635	83,366	15,314	19,475
C	240	1,496	19,731	7,545	7,222	3,013	39,936
Argila	240	46	355,5	153,53	139,75	61,682	40,176
Densidade	240	0,99	1,673	1,33	1,334	0,104	7,844
P	240	2,194	8,569	4,495	4,333	1,26	28,035
Ca	240	0,01	2,04	0,132	0,06	0,222	168,883
Mg	240	0,04	1,25	0,259	0,23	0,157	60,516
K	240	16	127	45,25	40	20,298	44,858
Na	240	1	7	1,588	1	0,839	52,839
Fe	240	41	980	184,379	149,5	120,168	65,175
Mn	240	0,78	204,22	38,867	25,405	39,976	102,854
Cu	240	0,34	1,94	0,858	0,81	0,264	30,784

Nota: São apresentados número de observações (n), valores mínimo e máximo, média, mediana, desvio padrão (DP) 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%).
Fonte: Os Autores, 2026

3.2 ESTRUTURA DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL

A análise geoestatística indicou que a maioria dos atributos do solo apresentou dependência espacial moderada, com valores de IDE entre 42% e 66% (Tabela 2).

Dos 16 atributos analisados:

- 14 apresentaram dependência moderada
- 1 apresentou dependência forte (argila)
- 1 apresentou dependência fraca (cobre)

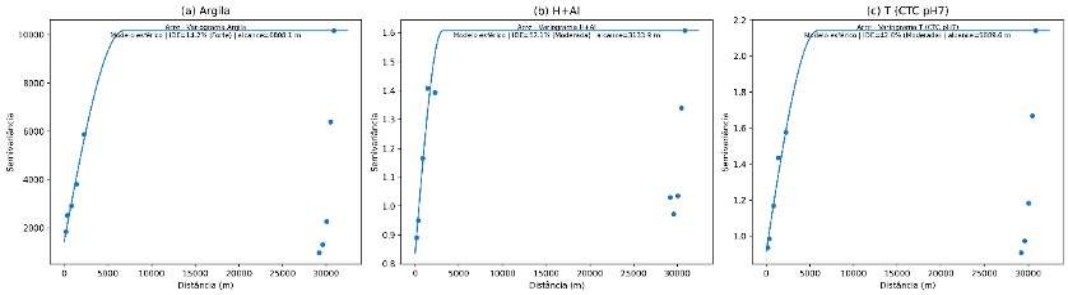
A fração argila apresentou IDE de 14,2%.

O cobre apresentou IDE de 85,3%.

Os alcances variaram entre aproximadamente 3,1 km e 29,8 km (Tabela 2), com valores máximos observados para fósforo (29,8 km), potássio (25,2 km) e sódio (16,0 km).

Os variogramas experimentais e os modelos ajustados estão apresentados na Figura 2.

Figura 2. Variogramas experimentais (pontos) e modelos teóricos ajustados (linhas) para atributos representativos do solo na área de ocorrência de Bertholletia excelsa no estado do Acre.



Nota: A semivariância (γ) é apresentada em função da distância entre pares de amostras (h). A linha tracejada indica o patamar ($C_0 + C_1$), enquanto o intercepto representa o efeito pepita (C_0). Os parâmetros variográficos (C_0, C_1, alcance e IDE) estão detalhados na Tabela 2. Os modelos ajustados descrevem a estrutura de dependência espacial dos atributos edáficos.

Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 2. Parâmetros dos modelos variográficos ajustados aos atributos físicos e químicos do solo na área de estudo.

Atributo	Modelo	C0 (pepita)	C1 (estrut.)	Patamar (C0+C1)	Alcance (m)	IDE (%)	Classe de dependência	n
Al	Esférico	0,5	0,254	0,755	3133,909	66,316	Moderada	240
H+Al	Esférico	0,838	0,77	1,608	3133,909	52,105	Moderada	240
T (CTC pH7)	Esférico	0,913	1,228	2,141	5889,588	42,632	Moderada	240
V%	Esférico	41,821	21,242	63,063	12319,506	66,316	Moderada	240
m%	Esférico	206,009	104,64	310,649	12319,506	66,316	Moderada	240
C	Esférico	7,46	3,789	11,249	3133,909	66,316	Moderada	240
Argila	Esférico	1444,503	8720,52	10165,024	6808,148	14,211	Forte	240
Densidade	Esférico	0,008	0,006	0,014	3133,909	56,842	Moderada	240
P	Esférico	1,093	1,214	2,307	29772,14	47,368	Moderada	240
Ca	Esférico	0,041	0,031	0,071	6808,148	56,842	Moderada	240
Mg	Esférico	0,016	0,027	0,043	12319,506	37,895	Moderada	240
K	Esférico	283,183	314,648	597,831	25179,342	47,368	Moderada	240
Na	Esférico	0,481	0,788	1,268	15993,745	37,895	Moderada	240
Fe	Esférico	10001,973	13459,445	23461,418	14156,626	42,632	Moderada	240
Mn	Esférico	1286,336	653,377	1939,713	3133,909	66,316	Moderada	240
Cu	Esférico	0,065	0,011	0,076	3133,909	85,263	Fraca	240

Nota: São apresentados o modelo teórico ajustado, o efeito pepita (C_0), a variância estrutural (C_1), o patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance (A). O grau de dependência espacial foi avaliado por meio do Índice de Dependência Espacial (IDE), calculado pela razão entre o efeito pepita e o patamar do variograma. A classificação do IDE segue Cambardella *et al.* (1994): forte (≤ 25%), moderada (25-75%) e fraca (> 75%).

Fonte: Os Autores, 2026

3.3 TENDÊNCIA ESPACIAL

A análise de tendência espacial indicou significância ($p < 0,05$) para:

- capacidade de troca catiônica (T)
- fração argila
- fósforo disponível

Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,07 e 0,28 (Tabela 3).

Os atributos H+Al e carbono orgânico não apresentaram tendência significativa (p > 0,05).

Tabela 3. Resultados do teste de tendência espacial para os atributos do solo analisados na área de estudo.

Atributo	n	βX	βY	R²	F	p-valor	Interpretação
H+Al	240	0,000006	-0,000029	0,021918	2,655424	0,072359	Sem tendência espacial significativa
T (CTC pH7)	240	0,000003	-0,000097	0,071151	9,077307	0,000159	Tendência espacial significativa
Argila	240	-0,003198	-0,026811	0,19456	28,624602	0	Tendência espacial significativa
C	240	0,00001	0,000137	0,005588	0,665885	0,514777	Sem tendência espacial significativa
P	240	0,000069	0,000137	0,284433	47,102982	0	Tendência espacial significativa

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. Esses parâmetros permitem avaliar a presença de gradientes espaciais significativos nos atributos do solo ao longo da área amostrada. Valores de p < 0,05 indicam tendência espacial significativa.

Fonte: Os Autores, 2026

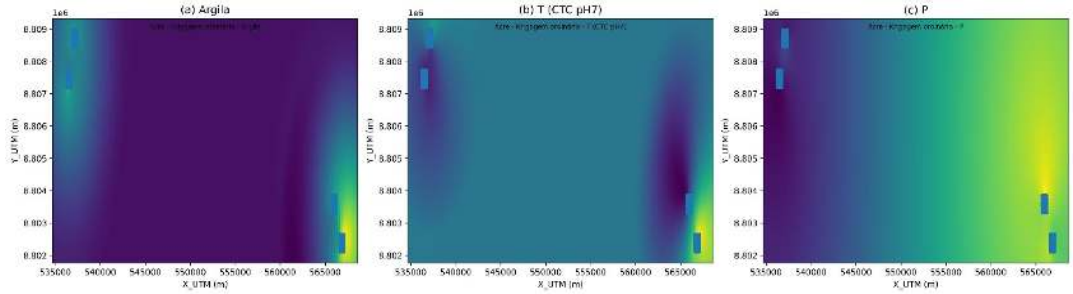
3.4 PADRÕES ESPACIAIS DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A interpolação espacial por krigagem ordinária permitiu gerar superfícies contínuas de distribuição dos atributos do solo na área estudada (Figura 3). Os mapas resultantes evidenciam a variação espacial da textura e da fertilidade do solo, com padrões distintos entre atributos físicos e químicos.

O mapa da fração argila indica a presença de zonas com maior continuidade espacial, enquanto os atributos químicos apresentam distribuição mais heterogênea ao longo da área. Esses padrões são coerentes com os parâmetros variográficos ajustados e com os valores de alcance e índice de dependência espacial observados.

A síntese dos principais parâmetros estatísticos e geoestatísticos que sustentam esses padrões espaciais encontra-se apresentada na Tabela 4, permitindo a integração entre a análise descritiva, a modelagem variográfica e a representação espacial por krigagem.

Figura 3. Mapas de distribuição espacial de atributos do solo obtidos por krigagem ordinária na área de ocorrência de Bertholletia excelsa no estado do Acre.



Nota: As superfícies representam os valores preditos para cada atributo, com gradiente de cores indicando variação espacial (valores mais elevados em tons quentes e menores em tons frios). Os pontos pretos correspondem às localizações amostrais. Os mapas foram gerados com base nos modelos variográficos ajustados, permitindo a visualização da organização espacial da textura e da fertilidade do solo na paisagem. Observa-se maior continuidade espacial para a fração argila, enquanto os atributos químicos apresentam padrões mais heterogêneos, coerentes com os valores de dependência espacial apresentados na Tabela 2.
Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 4. - Síntese dos parâmetros estatísticos e geoestatísticos dos atributos físicos e químicos do solo na área de ocorrência de Bertholletia excelsa no estado do Acre, Amazônia ocidental.

Atributo	n	Média ± DP	CV (%)	Modelo	Alcance (m)	IDE (%)	Classe
Al	240	2.050 ± 0.773	37,716	Esférico	3133,909	66,316	Moderada
H+Al	240	3.995 ± 1.086	27,183	Esférico	3133,909	52,105	Moderada
T (CTC pH7)	240	4.508 ± 1.139	25,263	Esférico	5889,588	42,632	Moderada
V%	240	11.572 ± 7.027	60,72	Esférico	12319,506	66,316	Moderada
m%	240	78.635 ± 15.314	19,475	Esférico	12319,506	66,316	Moderada
C	240	7.545 ± 3.013	39,936	Esférico	3133,909	66,316	Moderada
Argila	240	153.530 ± 61.682	40,176	Esférico	6808,148	14,211	Forte
P	240	4.495 ± 1.260	28,035	Esférico	29772,14	47,368	Moderada
Cu	240	0.858 ± 0.264	30,784	Esférico	3133,909	85,263	Fraca

Nota: São apresentados o número de observações (n), média ± desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), modelo variográfico ajustado, alcance (A, m), índice de dependência espacial (IDE, %) e classe de dependência espacial. O IDE foi calculado como $C_0/(C_0 + C_1) \times 100$ e classificado conforme Cambardella *et al.* (1994) em forte (≤ 25%), moderada (25–75%) e fraca (> 75%).
IDE: índice de dependência espacial.

Fonte: Autores, 2026.

3.5 SÍNTESE DOS PADRÕES ESPACIAIS

A integração dos resultados de estatística descritiva, análise variográfica, teste de tendência e mapas de krigagem permite sintetizar os principais padrões espaciais observados na área de estudo no Acre: 1. Predomínio de dependência espacial moderada: A maioria dos atributos (87,5%) apresentou IDE entre 37% e 66%; 2. Forte estruturação textural: A fração argila destacou-se como o único atributo com dependência espacial forte (IDE = 14,2%) e elevada continuidade espacial; Micro-heterogeneidade para cobre: O cobre apresentou dependência espacial fraca (IDE = 85,3%); Gradientes regionais pronunciados: A detecção de tendência espacial significativa para argila, CTC e fósforo, com

alcances expressivos (6,8 a 29,8 km); Escalas de variação contrastantes: Os alcances variográficos revelaram dois grupos distintos de atributos: (i) aqueles com alcances em torno de 3 km (Al, H+Al, C, densidade, Mn, Cu); e Compartimentalização funcional da paisagem: Os mapas de krigagem revelaram a existência de compartimentos edáficos distintos, com zona nordeste apresentando maiores teores de argila e, consequentemente, maior capacidade potencial de retenção de água e nutrientes.

4 DISCUSSÃO

4.1 ESTRUTURA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM CASTANHAIS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL

Os resultados geoestatísticos evidenciam que a maioria dos atributos químicos e físicos do solo na área de ocorrência de *Bertholletia excelsa* no estado do Acre apresenta dependência espacial moderada, indicando que a variabilidade observada não ocorre de forma aleatória, mas reflete processos estruturais associados à pedogênese, à dinâmica hidrológica e à heterogeneidade do material de origem. Esse padrão é consistente com estudos realizados em solos amazônicos, nos quais a organização espacial dos atributos edáficos é frequentemente controlada por gradientes geomorfológicos, processos de intemperismo e redistribuição de nutrientes ao longo da paisagem (Quesada *et al.*, 2011; Flores *et al.*, 2020; Chadwick & Asner, 2018).

A predominância de dependência moderada (87,5% dos atributos) indica um equilíbrio entre controles regionais e processos locais, no qual fatores estruturais da paisagem definem a organização espacial em larga escala, enquanto processos biogeoquímicos introduzem variabilidade em escala mais fina. Esse comportamento reflete a natureza dinâmica dos solos tropicais altamente intemperizados, nos quais a interação entre lixiviação intensa, ciclagem biológica e redistribuição lateral de materiais controla a variabilidade edáfica (Fujii *et al.*, 2018; Kurniawan *et al.*, 2018).

A fração argila destacou-se como o único atributo com dependência espacial forte, evidenciando elevada continuidade espacial desse componente textural. Esse resultado confirma que a textura do solo é predominantemente controlada por fatores geológicos e geomorfológicos relativamente estáveis, como material de origem e processos deposicionais (Quesada *et al.*, 2011; Quesada *et al.*, 2020). A forte estruturação da argila indica que esse atributo atua como um elemento organizador primário do sistema edáfico.

Por outro lado, o cobre apresentou dependência espacial fraca, indicando predominância de variabilidade em escala fina, inferior ao espaçamento amostral. Esse padrão sugere forte influência de processos biogeoquímicos locais, como deposição de serapilheira, atividade microbiana e heterogeneidade de microsítios, reforçando o papel da biota do solo na modulação de micronutrientes.

4.2 GRADIENTES PEDOGEOQUÍMICOS E ORGANIZAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

A análise de tendência espacial revelou gradientes significativos para atributos como capacidade de troca catiônica, teor de argila e fósforo disponível, evidenciando que a fertilidade do solo apresenta organização espacial estruturada ao longo da paisagem. Esses gradientes refletem a atuação combinada de fatores pedogenéticos, hidrológicos e geomorfológicos, frequentemente associados a variações topográficas sutis e à redistribuição lateral de materiais (Águas, 2019; Quesada *et al.*, 2020).

Os resultados indicam que, embora esses gradientes sejam estatisticamente significativos, os valores de R^2 relativamente baixos demonstram que a maior parte da variabilidade permanece associada a processos locais, caracterizando um sistema edáfico no qual controles regionais e locais atuam simultaneamente.

Os baixos teores de fósforo observados confirmam limitações nutricionais típicas de solos altamente intemperizados da Amazônia, nos quais esse nutriente encontra-se frequentemente imobilizado em formas associadas a óxidos de ferro e alumínio (Fuchslueger *et al.*, 2020; Turner & Engelbrecht, 2011). A dependência espacial moderada e o elevado alcance do fósforo indicam que sua distribuição resulta da interação entre processos regionais de formação do solo e mecanismos locais de ciclagem biológica, gerando mosaicos edáficos complexos.

Além disso, a heterogeneidade observada nos atributos químicos, especialmente nos teores de cálcio, magnésio e micronutrientes, reforça a existência de compartimentos edáficos com diferentes níveis de fertilidade, possivelmente associados à deposição diferenciada de serapilheira e à atividade biológica.

4.3 INTERAÇÕES ENTRE SOLO, DISPONIBILIDADE HÍDRICA E FUNCIONAMENTO ECOLÓGICO DA CASTANHEIRA

A organização espacial dos atributos do solo possui implicações diretas para o funcionamento ecológico de *Bertholletia excelsa*. A textura do solo, particularmente o teor de argila, exerce forte controle sobre propriedades hidrológicas fundamentais, como retenção de água, condutividade hidráulica e disponibilidade hídrica para as plantas (Fan *et al.*, 2017; Sakschewski *et al.*, 2016).

O gradiente textural identificado na área de estudo, com zonas contrastantes de teor de argila, indica que a capacidade de retenção hídrica do solo varia de forma estruturada na paisagem. Essa variabilidade pode influenciar diretamente o balanço hídrico das plantas, especialmente em períodos de redução da precipitação, quando a disponibilidade de água no solo se torna fator limitante para a atividade fisiológica (Anderegg *et al.*, 2018; Choat *et al.*, 2018).

Solos com maior teor de argila tendem a apresentar maior capacidade de armazenamento de água, o que pode reduzir o estresse hídrico em espécies arbóreas de grande porte. Nesse contexto, a heterogeneidade espacial da textura pode gerar diferenças locais no funcionamento hidráulico das árvores, influenciando processos como transporte xilemático, abertura estomática e assimilação de carbono (Oliveira *et al.*, 2019).

Adicionalmente, atributos químicos como capacidade de troca catiônica e carbono orgânico influenciam a retenção e disponibilidade de nutrientes, interagindo com a textura para definir a qualidade do ambiente edáfico. Essa interação entre propriedades físicas e químicas cria condições que podem favorecer ou limitar o desenvolvimento da castanheira, contribuindo para a variabilidade espacial do desempenho fisiológico da espécie.

4.4 IMPLICAÇÕES ECOLÓGICAS PARA CASTANHAIS NATURAIS

A presença de mosaicos espaciais de fertilidade e textura do solo indica que a paisagem é composta por compartimentos edáficos distintos, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia significativamente. Essa compartimentalização funcional pode influenciar a distribuição, o crescimento e a produtividade de *Bertholletia excelsa* (Tourne *et al.*, 2019).

Áreas com maior teor de argila e maior capacidade de troca catiônica tendem a apresentar melhores condições para o desenvolvimento da espécie, devido à maior retenção de água e nutrientes. Em contraste, áreas com textura mais arenosa e menor fertilidade podem impor restrições ao crescimento, resultando em padrões espaciais diferenciados de produtividade.

Além disso, a heterogeneidade edáfica pode contribuir para a resiliência dos castanhais frente a variações climáticas, uma vez que diferentes compartimentos da paisagem podem responder de forma distinta a eventos de seca (de Oliveira *et al.*, 2024). Essa variabilidade funcional aumenta a estabilidade do sistema como um todo, permitindo que parte da população mantenha desempenho adequado mesmo sob condições adversas.

4.5 NOVIDADE CIENTÍFICA DO ESTUDO

Este estudo demonstra que a fertilidade do solo em castanhais naturais da Amazônia ocidental se organiza em mosaicos espaciais estruturados, nos quais atributos físicos e químicos interagem para controlar a disponibilidade de água e nutrientes.

A principal contribuição científica reside na identificação de: predominância de dependência espacial moderada; alcances variográficos elevados (3 a 30 km); forte estruturação textural; e, compartimentalização funcional da paisagem

Esses resultados indicam que, na Amazônia ocidental, os processos pedogenéticos atuam em escala regional, diferentemente de outras regiões amazônicas onde predominam padrões de menor escala. Essa distinção revela um gradiente de organização espacial ao longo da bacia amazônica, associado a diferenças geológicas, geomorfológicas e climáticas.

A integração entre geoestatística, pedologia e ecofisiologia proposta neste estudo fornece um arcabouço conceitual robusto para compreender os controles edáficos sobre o funcionamento ecológico de espécies arbóreas tropicais.

4.6 MODELO CONCEITUAL DAS INTERAÇÕES SOLO–ÁGUA–FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DA CASTANHEIRA

A organização espacial dos atributos físicos e químicos do solo observada na área de estudo permite propor um modelo conceitual no qual a estrutura pedológica atua como elemento central na regulação do funcionamento ecofisiológico de *Bertholletia excelsa*. Nesse modelo, a textura do solo — especialmente o teor de argila — exerce controle primário sobre propriedades hidrológicas fundamentais, incluindo capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica e disponibilidade hídrica no perfil do solo. Solos com maior conteúdo de argila apresentam maior proporção de microporos, o que favorece o armazenamento de água e reduz a velocidade de drenagem, aumentando a disponibilidade hídrica para as plantas durante períodos de redução da precipitação (Brum *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2021).

Em ambientes amazônicos sujeitos à sazonalidade climática, essa regulação hidrológica assume papel determinante na manutenção do funcionamento fisiológico das árvores. A forte dependência espacial da fração argila e a presença de gradientes texturais em escala de paisagem indicam que esse controle opera de forma estruturada, criando zonas com diferentes capacidades de suporte hídrico. Consequentemente, a variabilidade espacial da textura do solo se traduz em heterogeneidade na disponibilidade de água, estabelecendo compartimentos edáficos com distintas condições ecofisiológicas.

A disponibilidade de água no solo influencia diretamente o funcionamento hidráulico da castanheira, uma vez que o transporte de água no sistema solo–planta–atmosfera depende da continuidade do gradiente de potencial hídrico entre o solo, as raízes e o xilema. Durante períodos de menor disponibilidade hídrica, a redução do potencial hídrico do solo pode comprometer a condutividade hidráulica e aumentar o risco de embolia xilemática, limitando o fluxo transpiratório e a atividade fotossintética (Choat *et al.*, 2018). Nesse contexto, solos com maior capacidade de retenção hídrica atuam como amortecedores do estresse hídrico, permitindo a manutenção do transporte de água

e da atividade metabólica por períodos mais prolongados, especialmente em espécies emergentes de grande porte, cuja demanda hidráulica é elevada.

Além das propriedades físicas, atributos químicos como capacidade de troca catiônica e teor de matéria orgânica desempenham papel relevante na retenção e disponibilização de nutrientes, interagindo com a textura para definir a qualidade funcional do ambiente edáfico. Essa interação entre propriedades físicas e químicas influencia o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e a eficiência do uso da água, estabelecendo um sistema integrado no qual a fertilidade do solo e a disponibilidade hídrica atuam de forma sinérgica (Quesada *et al.*, 2020; Toledo *et al.*, 2017).

Como consequência, as condições edáficas que favorecem maior retenção de água e maior disponibilidade de nutrientes influenciam diretamente o crescimento radial da castanheira. O crescimento do lenho depende da manutenção do balanço hídrico da planta, uma vez que a expansão celular no câmbio vascular requer níveis adequados de turgescência e suprimento contínuo de assimilados. Dessa forma, variações espaciais nas propriedades do solo podem gerar diferenças locais no desempenho fisiológico das árvores, refletindo-se em padrões diferenciados de crescimento radial.

O modelo conceitual proposto sintetiza, portanto, um encadeamento funcional no qual a estrutura pedológica controla a dinâmica hídrica do solo, que por sua vez regula o funcionamento hidráulico e, consequentemente, o crescimento da espécie: solo → retenção de água → funcionamento hidráulico → crescimento radial.

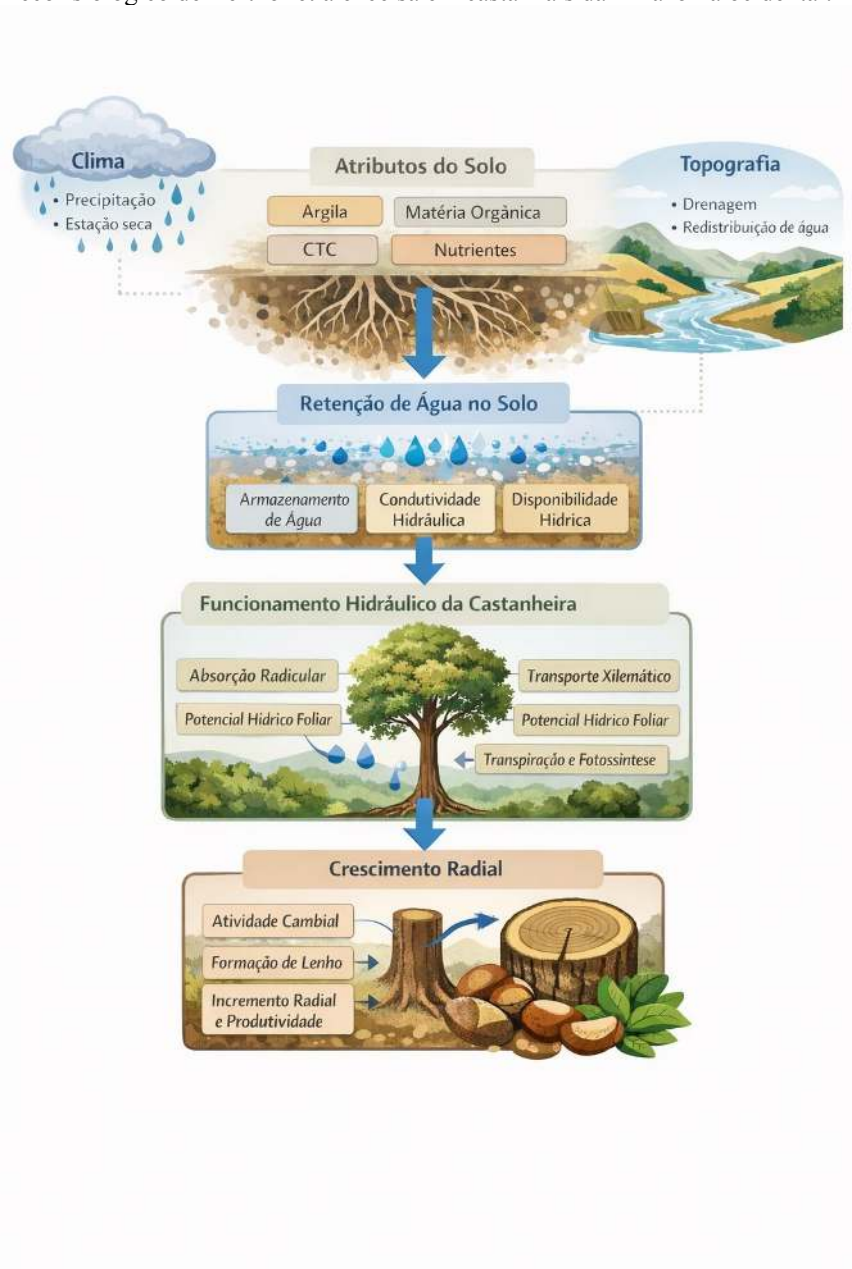
Esse encadeamento integra processos pedológicos, hidrológicos e ecofisiológicos, evidenciando que a heterogeneidade espacial do solo constitui um componente estruturante do funcionamento ecológico de castanhais amazônicos.

A compartimentalização funcional da paisagem identificada neste estudo permite ainda inferir a existência de zonas com diferentes níveis de vulnerabilidade hidráulica, nas quais a disponibilidade de água e nutrientes varia em função da posição nos gradientes edáficos. Em cenários de variabilidade climática ou aumento da frequência de eventos de seca, essas diferenças podem desempenhar papel crucial na resiliência das populações de *Bertholletia excelsa*, com áreas de maior teor de argila funcionando como refúgios eco-hidrológicos.

Assim, a abordagem integrada adotada — combinando geoestatística, pedologia e ecofisiologia — fornece uma base conceitual robusta para compreender como a heterogeneidade edáfica em múltiplas escalas influencia o funcionamento de espécies arbóreas tropicais. Esse modelo amplia a interpretação dos resultados ao conectar explicitamente padrões espaciais do solo com mecanismos fisiológicos das plantas, contribuindo para o desenvolvimento de modelos preditivos de crescimento, produtividade e resiliência de castanhais naturais frente às mudanças ambientais.

A integração desses processos é sintetizada no modelo conceitual apresentado na Figura 4.

Figura 4. Modelo conceitual das interações entre atributos do solo, disponibilidade hídrica e funcionamento ecofisiológico de Bertholletia excelsa em castanhais da Amazônia ocidental.



Nota: A heterogeneidade espacial dos atributos edáficos, particularmente da fração argila e da capacidade de troca catiônica (CTC), controla a retenção e a disponibilidade de água no solo, influenciando o gradiente de potencial hídrico no sistema solo–planta–atmosfera. Esse controle regula o funcionamento hidráulico das árvores, afetando processos fisiológicos como condutância estomática, assimilação de carbono e crescimento radial. O modelo integra processos pedogenéticos, hidrológicos e ecofisiológicos, evidenciando o encadeamento funcional solo → retenção de água → funcionamento hidráulico → crescimento radial. As setas indicam relações causais hipotéticas, e sua espessura representa a intensidade relativa das interações, inferida a partir da estrutura de dependência espacial dos atributos do solo (maior para argila, moderada para CTC e fósforo). O modelo é suportado pelos padrões espaciais identificados por análise geoestatística e interpolação por krigagem.
Fonte: Elaborada pelos autores

5 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que os atributos físicos e químicos do solo em áreas naturais de ocorrência de *Bertholletia excelsa* no estado do Acre apresentam variabilidade espacial estruturada, com predominância de dependência espacial moderada. Esse padrão evidencia que a distribuição da fertilidade e das propriedades físicas do solo é controlada por processos pedogenéticos, hidrológicos e geomorfológicos que atuam de forma integrada na paisagem, resultando em um sistema edáfico organizado em múltiplas escalas.

A fração argila destacou-se como o principal atributo estruturador do sistema, apresentando dependência espacial forte e elevada continuidade na paisagem. Esse comportamento confirma seu papel central na regulação de propriedades hidrológicas do solo, particularmente na retenção e disponibilidade de água. O gradiente textural identificado define compartimentos edáficos com diferentes capacidades de suporte hídrico, constituindo um elemento chave para a compreensão do funcionamento ecofisiológico da castanheira.

Os alcances variográficos elevados (3 a 30 km) constituem o principal achado deste estudo, indicando que, na Amazônia ocidental, os processos pedogenéticos e a organização da fertilidade do solo operam predominantemente em escala regional. Esse padrão contrasta com outras regiões da Amazônia, onde a variabilidade ocorre em escalas locais a intermediárias, e evidencia a necessidade de abordagens metodológicas e estratégias de manejo ajustadas à escala espacial dominante de cada contexto.

A integração entre análise geoestatística e interpretação ecofisiológica permitiu demonstrar que a heterogeneidade espacial do solo se traduz em diferenças na disponibilidade de água e nutrientes, influenciando diretamente o funcionamento hidráulico e o crescimento de *Bertholletia excelsa*. O modelo conceitual proposto sintetiza esse encadeamento funcional, solo-retenção de água-funcionamento hidráulico-crescimento radial, estabelecendo uma conexão mecanística entre a estrutura do solo e o desempenho fisiológico da espécie.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que estratégias de manejo, conservação e monitoramento de castanhais devem incorporar explicitamente a heterogeneidade espacial dos solos e, sobretudo, a escala regional em que essa variabilidade se organiza na Amazônia ocidental. Nesse contexto, destacam-se as seguintes recomendações: Adoção de malhas amostrais compatíveis com a escala regional dos processos (quilométrica), de modo a capturar adequadamente os gradientes edáficos identificados; Implementação de programas de monitoramento distribuídos ao longo dos gradientes texturais, permitindo avaliar respostas ecofisiológicas da espécie em diferentes compartimentos da paisagem; Incorporação da estrutura espacial dos atributos do solo em modelos de

adequabilidade ambiental e produtividade da castanheira; e, Desenvolvimento de estratégias de manejo adaptativo que considerem a compartimentalização funcional do solo e sua influência sobre a disponibilidade hídrica.

Em síntese, este estudo evidencia que a dimensão espacial da fertilidade do solo constitui um componente fundamental na estruturação ecológica de castanhais amazônicos. A abordagem integrada proposta, combinando geoestatística, pedologia e ecofisiologia, avança na compreensão dos mecanismos que conectam a heterogeneidade edáfica ao funcionamento de espécies arbóreas tropicais, fornecendo uma base conceitual e metodológica para estudos futuros e para o manejo sustentável da castanheira na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ANDEREGG, W. R. L.; KONINGS, A. G.; TRUGMAN, A. T.; YU, K.; BOWLING, D. R.; GABBITAS, R.; KARP, D. S.; PACALA, S.; SPERRY, J. S.; SULMAN, B. N.; ZENES, N. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. Nature, v. 561, p. 538-541, set. 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0539-7.

BENTOS, T. V.; NASCIMENTO, H. E.; WILLIAMSON, G. B. Tree seedling recruitment in Amazon secondary forest: importance of topography and gap micro-site conditions. Forest Ecology and Management, v. 287, p. 140-146, jan. 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.09.016.

BERNINI, T. A.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; ANJOS, L. H. C.; CALDERANO, S. B.; WADT, P. G. S. *et al.* Taxonomia de solos desenvolvidos sobre depósitos sedimentares da Formação Solimões no Estado do Acre. Bragantia, v. 72, n. 1, p. 71-80, jan./mar. 2013. DOI: 10.1590/S0006-87052013005000014.

BRUM, M.; VADEBONCOEUR, M. A.; IVANOV, V. *et al.* Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. Journal of Ecology, v. 107, n. 1, p. 318-333, jan. 2019. DOI: 10.1111/1365-2745.13022.

CAETANO ANDRADE, V. L.; FLORES, B. M.; LEVIS, C.; CLEMENT, C. R.; ROBERTS, P.; SCHÖNGART, J. Growth rings of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa) as a living record of historical human disturbance in Central Amazonia. PLoS ONE, v. 14, n. 4, e0214128, abr. 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0214128.

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.

CHADWICK, K. D.; ASNER, G. P. Landscape evolution and nutrient rejuvenation reflected in Amazon forest canopy chemistry. Ecology Letters, v. 21, n. 7, p. 978-988, jul. 2018. DOI: 10.1111/ele.12963.

CHOAT, B.; BRODRIBB, T. J.; BRODERSEN, C. R. *et al.* Triggers of tree mortality under drought. Nature, v. 558, p. 531-539, jun. 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0240-x.

da Silva, C. P., Araújo, E. A. de, Silva, J. de F., Moreira, W. C. de L., Negri, F. R., & Oliveira, W. M. S. (2021). Caracterização de perfis geológicos desenvolvidos em geoambientes da Formação Cruzeiro do Sul, Amazônia sul-ocidental. Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais, 16(1), 115-127. https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v16i1.304

de Lima, A. F. B., Ferreira, J. B., do Vale Moreira, J. G., de Oliveira Nascimento, L., dos Santos, D. M., dos Santos, V. B., & de Araujo, D. R. (2022). Distribuição espaço-temporal das anomalias de precipitação pluviométrica no Acre.

DE OLIVEIRA, S. S.; COSTA, K. C. P.; LIMA, R. M.; JUNIOR, A. D. R. N.; CARVALHO, J. C.; NUNES-NESI, A. *et al.* Bertholletia excelsa saplings respond to seasonal precipitation variations by changing metabolism when fertilized with NPK in different planting systems. Forest Ecology and Management, v. 572, 122325, nov. 2024. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122325.

de Sousa, J. W. (2020). Características climáticas do município de Rio Branco, Acre, período de 1990-2019. Scientia Naturalis, 2(2).

FAN, Y.; MIGUEZ-MACHO, G.; JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B.; OTERO-CASAL, C. Hydrologic regulation of plant rooting depth. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 114, n. 40, p. 10572-10577, out. 2017. DOI: 10.1073/pnas.1712381114.

FATICHI, S.; OR, D.; WALKO, R. *et al.* Soil structure is an important omission in Earth System Models. Nature Communications, v. 11, 522, jan. 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-14411-z.

FIRMINO, A. V.; KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; SILVA, H. J. P.; GONÇALVES, D. A.; RODRIGUES, E. G.; GUEDES, M. C. Amazonian forest conservation through sustainable use: evidence based on Brazil nut life histories linked to human occupation. Environmental Conservation, p. 1-10, mar. 2025. DOI: 10.1017/S0376892925100143.

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, n. 1-2, p. 1-9, maio 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04544-x.

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.

GRAU, O.; PEÑUELAS, J.; FERRY, B. *et al.* Nutrient-cycling mechanisms other than the direct absorption from soil may control forest structure and dynamics in poor Amazonian soils. Scientific Reports, v. 7, 45017, mar. 2017. DOI: 10.1038/srep45017.

Inda, A. V., Fink, J. R., & Santos, T. F. (2018). Pedogenic iron oxides in soils of the Acre State, Brazil. Ciência Rural, 48(8). DOI: 10.1590/0103-8478cr20180209

IVANOV, G. B. Influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de Bertholletia excelsa H.B.K. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8692.

KURNIAWAN, S.; CORRE, M. D.; MATSON, A. L.; SCHULTE-BISPING, H.; UTAMI, S. R.; VAN STRAATEN, O.; VELDKAMP, E. Conversion of tropical forests to smallholder rubber and oil palm plantations impacts nutrient leaching losses and nutrient retention efficiency in highly weathered soils. Biogeosciences, v. 15, n. 16, p. 5131-5154, ago. 2018. DOI: 10.5194/bg-15-5131-2018.

LAL, R. Soil organic matter and water retention. Agronomy Journal, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, set./out. 2020. DOI: 10.1002/agj2.20282.

LANGE, D. F.; SCHRÖTER, S. A.; LUZ, F. M.; PIRES, E.; SANTOS, Y. R.; SILVA, J. S. *et al.* Cycling of dissolved organic nutrients and indications for nutrient limitations in contrasting Amazon rainforest ecosystems. Biogeochemistry, v. 167, n. 12, p. 1567-1588, dez. 2024. DOI: 10.1007/s10533-024-01187-3.

Lopez-Sangil, L., Hartley, I. P., Rovira, P., Casals, P., & Sayer, E. J. (2018). Drying and rewetting conditions differentially affect the mineralization of fresh plant litter and extant soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 124, 81-89. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.001

MENDONÇA, B. A. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I.; SIMAS, F. N. B.; AMARAL, E. F. Genesis and micropedology of soils at Serra do Divisor and Moa river floodplain, northwestern Acre, Brazilian Amazonia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 44, e0200038, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200038.

Mendonça, B. A. F. de, *et al.* (2020). Genesis and micropedology of soils at Serra do Divisor and Moa river floodplain, northwestern Acre, Brazilian Amazonia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 44, e0200038. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200038

MORATELLI, F. A.; ALVES, M. A. B.; BORELLA, D. R.; KRAESKI, A.; ALMEIDA, F. T.; ZOLIN, C. A.; HOSHIDE, A. K.; SOUZA, A. P. Effects of land use on soil physical-hydric attributes in two watersheds in the Southern Amazon, Brazil. Soil Systems, v. 7, n. 4, 103, dez. 2023. DOI: 10.3390/soilsystems7040103.

MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Using indicator kriging for evaluating soil fertility indicators. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, n. 3, p. 485-496, maio/jun. 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000300010.

Oliveira Junior, R. C. de, Moura, Q. L. de, Costa, P. da, Melem Junior, N. J., Guedes, M. C., Santos, D. B. dos, Moraes, B. L. T. de, & Mota, A. F. L. (2026). Seasonal dynamics of chemical soil properties under native Brazil-nut (Bertholletia Excelsa) groves in the Tapajós National Forest, brazilian Amazon. Caderno Pedagógico, 23(1), e22983.

OLIVEIRA, R. S.; COSTA, F. R.; VAN BAALEN, E.; JONGE, A.; BITTENCOURT, P. R.; ALMANZA, Y. *et al.* Embolism resistance drives the distribution of Amazonian rainforest tree species along hydro-topographic gradients. New Phytologist, v. 221, n. 3, p. 1457-1465, fev. 2019. DOI: 10.1111/nph.15463.

OLIVEIRA, R. S.; ELLER, C. B.; BARROS, F. V.; HIROTA, M.; BRUM, M.; BITTENCOURT, P. Linking plant hydraulics and the fast–slow continuum to understand resilience to drought in tropical ecosystems. New Phytologist, v. 230, n. 3, p. 904-923, maio 2021. DOI: 10.1111/nph.17266.

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.

Piva, L. R. de O., Sanquetta, C. R., Wojciechowski, J., & Dalla Corte, A. P. (2020). FITOSSOCIOLOGIA EM COMUNIDADES FLORESTAIS DO PROJETO RADAMBRASIL NO BIOMA AMAZÔNIA. Biofix Scientific Journal, 5(2), 264–271. https://doi.org/10.5380/biofix.v5i2.73668

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, n. 6, p. 1415-1440, jun. 2011. DOI: 10.5194/bg-8-1415-2011.

QUESADA, C. A.; PAZ, C.; OBLITAS MENDOZA, E.; PHILLIPS, O. L.; SAIZ, G.; LLOYD, J. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. SOIL, v. 6, n. 1, p. 53-88, 2020. DOI: 10.5194/soil-6-53-2020.

SAKSCHEWSKI, B.; VON BLOH, W.; BOIT, A.; POORTER, L.; PEÑA-CLAROS, M.; HEINKE, J.; JOSHI, J.; THONICKE, K. Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. Nature Climate Change, v. 6, n. 11, p. 1032-1036, nov. 2016. DOI: 10.1038/nclimate3109.

SALES, M. C. G.; BRITO FILHO, E. G.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; SILVA, G. A.; PINHEIRO, E. N. *et al.* Behavior of soil chemical attributes in field-forest succession in Southern Amazonas. Journal of Agricultural Studies, v. 8, n. 3, p. 807-819, 2020. DOI: 10.5296/jas.v8i3.16846.

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.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Proposal and validation of geostatistical-based metrics to quantify within-field variability. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 49, e0250042, 2025. DOI: 10.36783/18069657rbcs20250042.

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. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 45, e0200188, 2021. Disponível em: https://www.rcaap.pt/detail.jsp?id=oai:locus.ufv.br:123456789/29917.

SILVA, C. S. Associação da produção de frutos de Bertholletia excelsa com os atributos do solo em dois castanhais nativos na Amazônia Ocidental. 2022. 77 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2022. Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui//handle/20.500.14407/9417.

Silva, J. de F., Araújo, E. A. de, Moreira, W. C. de L., Filgueira, V., & Moreira, J. G. do V. (2024). Caracterização pedológica e estoques de carbono em solos da formação geológica Solimões, Amazônia sul-ocidental. Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais, 19(2). https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v19i2.816

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.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

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

THOMAS, E.; ATKINSON, R.; KETTLE, C. Fine-scale processes shape ecosystem service provision by an Amazonian hyperdominant tree species. Scientific Reports, v. 8, 11690, ago. 2018. DOI:

10.1038/s41598-018-29886-6.

TOLEDO, J. J.; CASTILHO, C. V.; MAGNUSSON, W. E. *et al.* Soil controls biomass and dynamics of an Amazonian forest through the shifting of species and traits. Brazilian Journal of Botany, v. 40, n. 2, p. 451-461, jun. 2017. DOI: 10.1007/s40415-016-0351-2.

Tourne DCM, Ballester MVR, James PMA, Martorano LG, Guedes MC, Thomas E. Strategies to optimize modeling habitat suitability of Bertholletia excelsa in the Pan-Amazonia. Ecol Evol. 2019;9:12623–12638. https://doi.org/10.1002/ece3.5726

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.

TOWNSEND, A. R.; ASNER, G. P.; CLEVELAND, C. C. The biogeochemical heterogeneity of tropical forests. Trends in Ecology & Evolution, v. 23, n. 8, p. 424-431, ago. 2008. DOI: 10.1016/j.tree.2008.04.009.

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.

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.

ÁGUAS, M. A. Espacialização de características granulométricas e químicas em solo hidromórfico irrigado. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal Goiano, Campos Ceres, 2019.