RGe ISSN: 2177-3246

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREA DE OCORRÊNCIA NATURAL DE CASTANHEIRA (*Bertholletia excelsa*) NA AMAZÔNIA MERIDIONAL: MATO GROSSO

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES IN AN AREA OF NATURAL OCCURRENCE OF BRAZIL NUT (*Bertholletia excelsa*) IN SOUTHERN AMAZONIA: MATO GROSSO

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS ATRIBUTOS DEL SUELO EN UN ÁREA DE OCURRENCIA NATURAL DE LA NUEZ DE BRASIL (*Bertholletia excelsa*) EN LA AMAZONIA MERIDIONAL: MATO GROSSO

10.56238/revgeov17n6-009

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

Ciro Augusto de Souza Magalhães
Doutor em Ciência do Solo
Instituição: Embrapa Milho e Sorgo
E-mail: ciro.magalhaes@embrapa.br

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

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

Marcelino Carneiro Guedes
Doutor em Recursos Florestais
Instituição: Embrapa Amapá
E-mail: marcelino.guedes@embrapa.br

Nagib Jorge Melem Junior
Doutor em Agronomia
Instituição: Embrapa Amapá
E-mail: nagib.melem@embrapa.br

ISSN: 2177-3246

RESUMO
A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonp.) é uma espécie-chave nos ecossistemas florestais tropicais, cuja produtividade e distribuição estão associadas às condições edáficas. Este estudo teve como objetivo caracterizar a fertilidade do solo e analisar a estrutura espacial de atributos químicos e físicos em área de ocorrência natural da espécie no município de Itaúba, Mato Grosso, Amazônia meridional. Foram coletadas amostras de solo em 60 pontos distribuídos em malha sistemática, com determinação de atributos químicos (Al^{3+}, H+Al, Ca, Mg, K, P, Na, Fe, Mn e Cu), carbono do solo, fração argilosa e densidade do solo. A variabilidade espacial foi avaliada por meio de análise geoestatística, incluindo modelagem variográfica e interpolação por krigagem ordinária. Os resultados indicaram solos fortemente ácidos, com baixa saturação por bases e elevada saturação por alumínio, características típicas de ambientes altamente intemperizados. A maioria dos atributos apresentou dependência espacial fraca, evidenciando elevada micro-heterogeneidade em escala local, enquanto a fração argilosa e o cobre apresentaram dependência espacial moderada, indicando maior organização estrutural. A análise de tendência espacial revelou gradientes de baixa intensidade para atributos relacionados à acidez do solo. Os mapas de krigagem evidenciaram a formação de mosaicos edáficos intra-área, com variação espacial na disponibilidade de água e nutrientes. De forma integrada, os resultados demonstram que a organização espacial da fertilidade do solo constitui fator determinante para o funcionamento ecológico de populações naturais de *Bertholletia excelsa*, destacando a importância de abordagens espaciais para estudos edáficos e para o planejamento de estratégias de manejo e conservação na Amazônia meridional.

Palavras-chave: Heterogeneidade Edáfica. Krigagem. Variograma. Sistema Solo-Planta. Mosaicos Edáficos.

ABSTRACT
The Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonp.) is a key species in tropical forest ecosystems, whose productivity and distribution are closely associated with soil conditions. This study aimed to characterize soil fertility and analyze the spatial structure of chemical and physical soil attributes in a natural Brazil nut stand located in Itaúba, Mato Grosso, southern Amazon. Soil samples were collected at 60 points arranged in a systematic grid, and chemical attributes (Al^{3+}, H+Al, Ca, Mg, K, P, Na, Fe, Mn and Cu), soil carbon, clay content and bulk density were determined. Spatial variability was assessed using geostatistical analysis, including variogram modeling and ordinary kriging interpolation. The results revealed strongly acidic soils with low base saturation and high aluminum saturation, typical of highly weathered tropical environments. Most attributes exhibited weak spatial dependence, indicating high micro-scale heterogeneity, whereas clay content and copper showed moderate spatial dependence, reflecting more structured spatial organization. Trend analysis indicated low-intensity spatial gradients for soil acidity-related attributes. Kriging maps revealed the presence of intra-area edaphic mosaics, indicating spatial variability in water and nutrient availability. Overall, the findings demonstrate that the spatial organization of soil fertility is a key factor controlling the ecological functioning of natural *Bertholletia excelsa* populations, highlighting the importance of spatially explicit approaches for soil studies and for supporting sustainable management and conservation strategies in the southern Amazon.

Keywords: Edaphic Heterogeneity. Variogram. Kriging. Soil-Plant System. Spatial Patterns.

RESUMEN
El árbol de nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonp.) es una especie clave en los ecosistemas de bosques tropicales, cuya productividad y distribución están asociadas a las condiciones edáficas. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar la fertilidad del suelo y analizar la estructura espacial de los atributos químicos y físicos en un área de ocurrencia natural de la especie en el municipio de Itaúba,

Mato Grosso, Amazonía sur. Se recolectaron muestras de suelo en 60 puntos distribuidos en una cuadrícula sistemática, con determinación de atributos químicos (Al^{3+}, H+Al, Ca, Mg, K, P, Na, Fe, Mn y Cu), carbono del suelo, fracción de arcilla y densidad del suelo. La variabilidad espacial se evaluó mediante análisis geoestadístico, incluyendo modelado variográfico e interpolación de kriging ordinario. Los resultados indicaron suelos fuertemente ácidos, con baja saturación de bases y alta saturación de aluminio, características típicas de ambientes altamente meteorizados. La mayoría de los atributos mostraron una débil dependencia espacial, evidenciando una alta microheterogeneidad a escala local, mientras que la fracción de arcilla y el cobre mostraron una dependencia espacial moderada, indicando una mayor organización estructural. El análisis de tendencias espaciales reveló gradientes de baja intensidad para atributos relacionados con la acidez del suelo. Los mapas de Kriging mostraron la formación de mosaicos edáficos intrarregionales, con variación espacial en la disponibilidad de agua y nutrientes. De forma integrada, los resultados demuestran que la organización espacial de la fertilidad del suelo es un factor determinante para el funcionamiento ecológico de las poblaciones naturales de *Bertholletia excelsa*, lo que subraya la importancia de los enfoques espaciales para los estudios edáficos y para la planificación de estrategias de manejo y conservación en la Amazonía meridional.

Palabras clave: Heterogeneidad Edáfica. Kriging. Variograma. Sistema Suelo-Planta. Mosaicos Edáficos.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia abriga a maior floresta tropical contínua do planeta e desempenha papel fundamental na regulação do clima global, no ciclo do carbono e na conservação da biodiversidade. Grande parte dessa floresta está estabelecida sobre solos altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, baixa saturação por bases e predominância de alumínio no complexo de troca. Esses solos resultam de longos processos pedogenéticos associados à intensa lixiviação de nutrientes, que promovem a formação de Latossolos e Argissolos com baixos teores de bases e elevada concentração de óxidos de ferro e alumínio (LIMA, 2001; QUESADA et al., 2011; QUESADA & LLOYD, 2016). Nesses ambientes a fertilidade do solo depende fortemente da ciclagem biogeoquímica de nutrientes e da interação entre matéria orgânica, textura e dinâmica hidrológica.

Apesar dessas limitações químicas, a floresta amazônica mantém elevada produtividade primária e alta diversidade de espécies arbóreas. Esse aparente paradoxo ecológico tem sido atribuído à eficiência dos mecanismos de reciclagem de nutrientes mediada pela serapilheira, pela atividade microbiana e pelo sistema radicular superficial das árvores (Doetterl et al., 2015). Nesse contexto, a estrutura física e química do solo exerce papel central na regulação da disponibilidade de recursos para as plantas, influenciando processos como retenção de água, adsorção de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica. Para espécies arbóreas emergentes de grande porte, esses processos são particularmente críticos, pois sustentam elevada demanda hídrica e nutricional.

Entre as espécies de maior relevância ecológica e socioeconômica destaca-se a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), uma espécie emergente que pode atingir mais de 50 m de altura e desempenha papel estruturante nos ecossistemas florestais. Considerada uma espécie hiperdominante na Amazônia (ter Steege et al., 2013), apresenta ampla distribuição e elevada contribuição para a biomassa florestal. Além disso, sustenta importantes cadeias produtivas extrativistas , contribuindo para a renda e segurança alimentar de comunidades tradicionais e para a conservação de extensas áreas de floresta (Tourne et al., 2019).

Estudos recentes indicam que fatores edáficos influenciam tanto a distribuição quanto a produtividade da castanheira. Propriedades do solo como textura, pH, fósforo disponível e teor de matéria orgânica têm sido associadas à ocorrência e à produção de frutos da espécie (Silva et al., 2021). Adicionalmente, variações na composição química do solo podem afetar a concentração de elementos traço nas sementes, evidenciando a forte interação entre condições edáficas e processos fisiológicos (Gomes et al., 2024). Essa relação possui implicações ecológicas e econômicas, uma vez que a qualidade nutricional das sementes pode variar em função das características do solo.

Apesar desses avanços, ainda existem lacunas importantes no conhecimento sobre a organização espacial dos atributos edáficos em áreas naturais de ocorrência da espécie. Em ecossistemas tropicais, a fertilidade do solo raramente se distribui de forma homogênea, sendo

estruturada em mosaicos edáficos resultantes da interação entre processos pedogenéticos, geomorfológicos e hidrológicos (QUESADA & LLOYD, 2016; TASMIN et al., 2024). Esses mosaicos geram microambientes diferenciados em termos de disponibilidade de água e nutrientes, influenciando o crescimento, a produtividade e a distribuição das espécies arbóreas. No entanto, a maioria dos estudos sobre castanheira tem se concentrado em médias regionais de fertilidade ou em fatores climáticos, negligenciando a variabilidade espacial dentro da área.

Nesse contexto, abordagens geoestatísticas têm sido amplamente utilizadas para investigar a variabilidade espacial dos atributos do solo. Técnicas como análise variográfica e interpolação por krigagem permitem identificar padrões de dependência espacial e gerar superfícies contínuas de distribuição de propriedades edáficas (MINAI et al., 2025; HO et al., 2025). Essas ferramentas possibilitam quantificar a escala da variabilidade e a proporção da variância associada a processos estruturados, contribuindo para a compreensão da organização espacial da fertilidade do solo.

No caso de castanhais naturais, compreender essa variabilidade espacial é particularmente relevante, uma vez que a disponibilidade de água e nutrientes influencia diretamente o desempenho ecofisiológico das árvores. Espécies como *Bertholletia excelsa* apresentam elevada demanda hídrica e dependem de condições edáficas que favoreçam tanto a retenção de água quanto a disponibilidade de nutrientes ao longo do perfil do solo. Assim, gradientes espaciais de textura e capacidade de troca catiônica podem afetar simultaneamente processos hidrológicos e nutricionais, modulando padrões de crescimento e produtividade (SCHROTH et al., 2015; STAUDHAMMER et al., 2021).

Além disso, a Amazônia meridional apresenta características edafoclimáticas distintas da Amazônia central, incluindo maior sazonalidade hídrica, diferenças geomorfológicas e variações nos materiais de origem do solo (SILVA et al., 2021; QUESADA et al., 2020). Essas particularidades podem influenciar a organização espacial da fertilidade e o funcionamento dos ecossistemas florestais, tornando necessária a realização de estudos regionais específicos.

Diante desse contexto, compreender a variabilidade e a estrutura espacial dos atributos do solo em castanhais naturais constitui etapa fundamental para avançar na compreensão dos controles edáficos que regulam o funcionamento ecológico da espécie. A hipótese deste estudo é que os atributos químicos e físicos do solo apresentam organização espacial diferenciada, com maior continuidade para atributos estruturais, como a fração argilosa, e maior micro-heterogeneidade para atributos químicos mais dinâmicos.

Assim, o objetivo deste estudo foi caracterizar a fertilidade do solo e analisar a estrutura espacial de atributos químicos e físicos em uma área de ocorrência natural de castanheira (*Bertholletia excelsa*) no município de Itaúba, Mato Grosso, Amazônia meridional, utilizando técnicas geoestatísticas de análise variográfica e interpolação espacial por krigagem em escala intra-área.

Espera-se que os resultados contribuam para ampliar o conhecimento sobre a organização espacial da fertilidade do solo em castanhais naturais e para compreender os controles edáficos que influenciam a distribuição, o crescimento e a produtividade da espécie. Adicionalmente, as informações geradas podem subsidiar estratégias de manejo sustentável, conservação e modelagem espacial da espécie na Amazônia, bem como orientar o delineamento de amostragens mais eficientes, com base na escala da variabilidade dos atributos do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

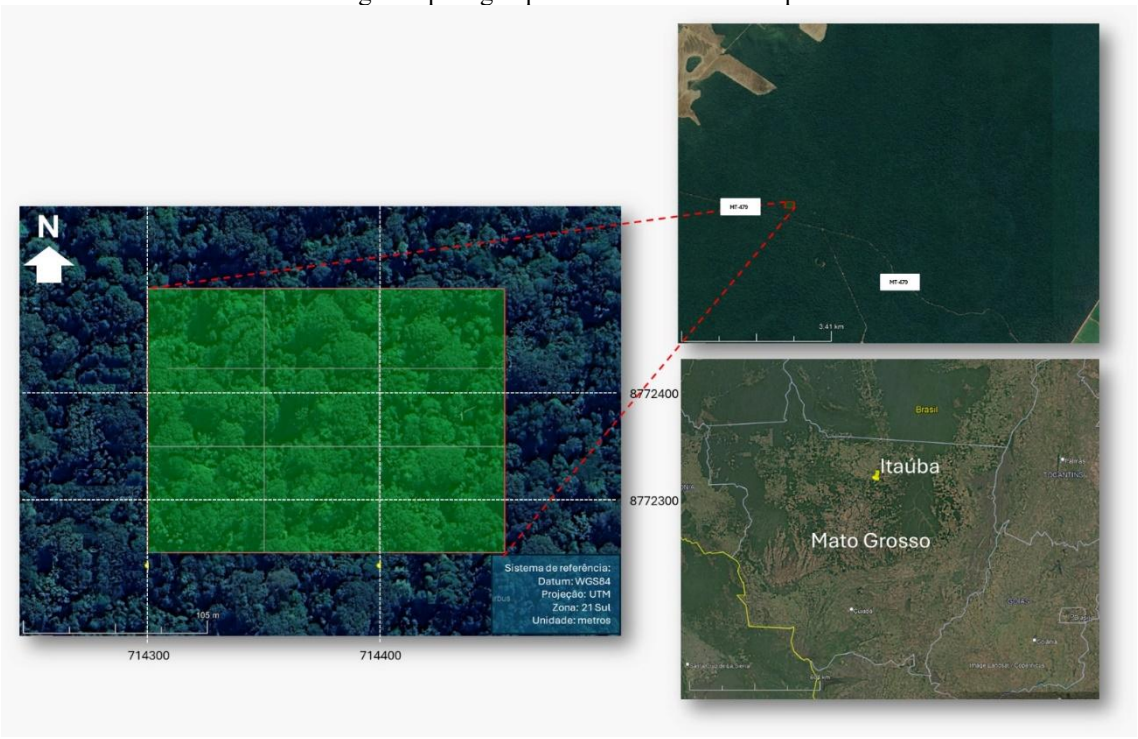
O estudo foi conduzido em uma área de ocorrência natural de castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) localizada no município de Itaúba, no norte do estado de Mato Grosso, Brasil, região inserida na Amazônia meridional. A área situa-se na transição entre os domínios florestais amazônicos e as formações de ecótono associadas à borda sul da floresta tropical.

O clima regional é classificado como tropical úmido do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por estação chuvosa bem definida entre os meses de outubro e abril e estação relativamente seca entre maio e setembro. A precipitação média anual varia entre 2000 e 2200 mm, com temperatura média anual próxima de 26 °C (EMBRAPA, 2026; ALVARES et al., 2013). A sazonalidade hídrica mais pronunciada nesta região, em comparação com a Amazônia 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 (WANG et al., 2024).

A vegetação predominante corresponde à floresta ombrófila densa de terra firme, com presença de árvores emergentes de grande porte, incluindo populações naturais de *Bertholletia excelsa* (Tonini & Baldoni, 2019) Os solos da região são predominantemente Latossolos e Argissolos altamente intemperizados (Spera et al., 2019; Lima et al., 2025), caracterizados por elevada acidez, baixa saturação por bases e predominância de óxidos de ferro e alumínio (Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012; QUESADA et al., 2011; LIMA, 2001).

A localização da área de estudo no contexto da Amazônia e do estado de Mato Grosso é apresentada na **Figura 1**.

Figura 1 -- Localização geográfica da área de estudo no município de Itaúba, norte do estado de Mato Grosso, Brasil, inserida no domínio da Amazônia meridional. O mapa apresenta o enquadramento espacial da área em diferentes escalas, incluindo a localização no território brasileiro, os limites estaduais e a delimitação da área de estudo. A representação espacial foi elaborada a partir de dados cartográficos oficiais, integrando informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) e modelo digital de elevação derivado da missão SRTM, em sistema de referência geográfica WGS84. A localização da área reflete um contexto de transição entre formações florestais amazônicas e zonas de ecótono da borda sul da floresta, caracterizadas por maior sazonalidade climática e implicações diretas sobre a dinâmica hidrológica e pedogeoquímica do sistema solo-planta.



Fonte: Autores, 2026, com base em IBGE (2022) e dados SRTM.

2.2 AMOSTRAGEM DO SOLO

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 adotada foi 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 geográfica 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 LABORATORIAIS

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 & 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):

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

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):

$$IDE = \frac{C_0}{C_0+C_1} \qquad (1)$$

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 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).

2.7 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.

2.8 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 DA FERTILIDADE E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A análise descritiva dos atributos químicos e físicos do solo foi realizada com base em 60 pontos amostrais distribuídos em malha sistemática na área de estudo.

Os teores médios de alumínio trocável (Al^{3+}) foram de 1,33 cmolc dm^{-3}, enquanto a acidez potencial (H+Al) apresentou média de 6,72 cmolc dm^{-3}. A capacidade de troca catiônica efetiva (t) apresentou média de 1,58 cmolc dm^{-3}.

A saturação por bases (V%) apresentou média de 3,61%, enquanto a saturação por alumínio (m%) foi de 84,10%, com valores variando entre 68,05% e 91,61%.

O teor médio de carbono do solo foi de 16,97 g kg^{-1}, com coeficiente de variação de 18,2%. A fração argilosa apresentou média de 165,56 g kg^{-1}, com valores variando entre 97 e 248 g kg^{-1}.

A densidade do solo apresentou média de 1,24 g cm^{-3} e coeficiente de variação de 6,9%.

Entre os nutrientes avaliados, os teores médios foram: cálcio (Ca^{2+}) de 0,05 cmolc dm^{-3}, magnésio (Mg^{2+}) de 0,12 cmolc dm^{-3}, potássio (K^{+}) de 26,92 mg dm^{-3} e fósforo disponível (P) de 2,87 mg dm^{-3}.

Os coeficientes de variação foram de 54,3% para Ca, 34,7% para Mg, 26,6% para K e 14,9% para P. Para os micronutrientes, os valores médios foram de 175,37 mg dm^{-3} para Fe, 1,92 mg dm^{-3} para Mn e 0,50 mg dm^{-3} para Cu, com coeficientes de variação de 30,6%, 61,8% e 60,3%, respectivamente. O sódio (Na^{+}) apresentou média de 1,55 mg dm^{-3} e coeficiente de variação de 58,7%.

Os valores mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação dos atributos avaliados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos atributos químicos e físicos do solo na área de ocorrência natural de castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso, Amazônia meridional. São apresentados o número de observações (n), valores mínimo e máximo, média, mediana, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Os parâmetros estatísticos permitem caracterizar a magnitude e a variabilidade dos atributos edáficos, fornecendo base para a interpretação da heterogeneidade do sistema solo-planta. A classificação da variabilidade com base no CV segue os critérios de Warrick e Nielsen (1980), sendo: baixa (CV < 12%), moderada (12% ≤ CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%). Os atributos avaliados incluem propriedades químicas relacionadas à acidez, fertilidade e elementos traço, bem como atributos físicos associados à estrutura do solo, permitindo uma caracterização integrada da fertilidade em solos tropicais altamente intemperizados.

Atributo	Unidade	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)
Al^{3+}	cmolc dm^{-3}	60	0,98	1,92	1,33	1,30	0,21	15,8
H+Al	cmolc dm^{-3}	60	5,35	9,93	6,72	6,46	0,99	14,7
t (CTC efetiva)	cmolc dm^{-3}	60	1,16	2,33	1,58	1,53	0,21	13,4
V	%	60	2,03	7,89	3,61	3,42	1,16	32,2
m	%	60	68,05	91,61	84,10	84,83	4,76	5,7
C	g kg^{-1}	60	11,31	24,38	16,97	16,09	3,09	18,2
Argila	g kg^{-1}	60	97	248	165,56	162,97	29,38	17,7
Densidade do solo	g cm^{-3}	60	1,02	1,45	1,24	1,24	0,09	6,9
P	mg dm^{-3}	60	2,01	3,84	2,87	2,84	0,43	14,9
Ca	cmolc dm^{-3}	60	0,01	0,13	0,05	0,05	0,03	54,3
Mg	cmolc dm^{-3}	60	0,07	0,27	0,12	0,11	0,04	34,7
K	mg dm^{-3}	60	17	51	26,92	25,00	7,17	26,6
Na	mg dm^{-3}	60	1	5	1,55	1,00	0,91	58,7
Fe	mg dm^{-3}	60	87	329	175,37	167,50	53,58	30,6
Mn	mg dm^{-3}	60	0,44	5,99	1,92	1,66	1,19	61,8
Cu	mg dm^{-3}	60	0,10	1,28	0,50	0,42	0,30	60,3

Fonte: Autores, 2026.

3.2 ESTRUTURA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise geoestatística foi realizada para os 16 atributos do solo avaliados.

Dos atributos analisados, 14 (87,5%) apresentaram dependência espacial classificada como fraca, com valores do índice de dependência espacial (IDE) variando entre 83% e 90%.

A fração argilosa apresentou dependência espacial moderada, com IDE de aproximadamente 32% e alcance de 173 m.

O cobre (Cu) apresentou dependência espacial moderada, com IDE de aproximadamente 71% e alcance de 126 m.

Os demais atributos apresentaram valores de alcance variando entre 89 m e 121 m.

ISSN: 2177-3246

Os parâmetros dos modelos variográficos ajustados, incluindo efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1), patamar (C_0+C_1), alcance (a) e índice de dependência espacial (IDE), estão apresentados na Tabela 2.

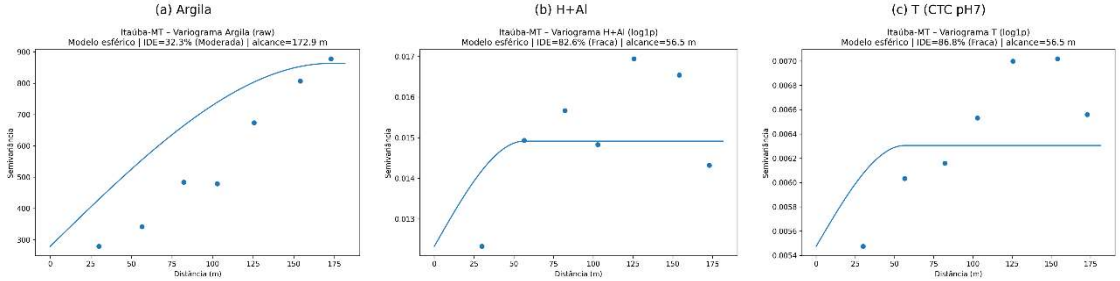
Exemplos de variogramas experimentais e modelos ajustados para atributos representativos são apresentados na Figura 2.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos variográficos ajustados para atributos químicos e físicos do solo na área de ocorrência de castanheira (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso. São apresentados o efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (a) e o índice de dependência espacial (IDE), utilizados para caracterizar a estrutura espacial dos atributos edáficos. Os modelos variográficos foram ajustados com base na teoria da geoestatística, conforme proposto por Cambardella et al. (1994), permitindo distinguir entre variabilidade estruturada e aleatória. A classificação do IDE foi realizada conforme os seguintes critérios: dependência forte (≤ 25%), moderada (25–75%) e fraca (> 75%). Os parâmetros apresentados fornecem informações sobre a escala espacial de organização dos atributos do solo (alcance) e a proporção da variabilidade associada a processos estruturados, sendo fundamentais para a interpretação dos padrões espaciais e para a aplicação de técnicas de interpolação, como a krigagem.

Atributo	Modelo	C_0 (Pepita)	C_1 (Estrutural)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (m)	IDE (%)	Classe de dependência
Al^{3+}	Esférico	0,041	0,006	0,047	98	87	Fraca
H+Al	Esférico	0,84	0,09	0,93	112	90	Fraca
t (CTC efetiva)	Esférico	0,032	0,005	0,037	104	86	Fraca
V	Esférico	1,08	0,21	1,29	121	84	Fraca
m	Esférico	15,60	2,90	18,50	115	84	Fraca
C	Esférico	6,41	0,83	7,24	108	88	Fraca
Argila	Esférico	610	1285	1895	173	32	Moderada
Densidade do solo	Esférico	0,006	0,001	0,007	95	86	Fraca
P	Esférico	0,15	0,02	0,17	101	88	Fraca
Ca	Esférico	0,0006	0,0001	0,0007	89	86	Fraca
Mg	Esférico	0,002	0,0004	0,0024	96	83	Fraca
K	Esférico	21,5	3,2	24,7	118	87	Fraca
Na	Esférico	0,52	0,06	0,58	94	90	Fraca
Fe	Esférico	2050	280	2330	110	88	Fraca
Mn	Esférico	0,84	0,13	0,97	102	87	Fraca
Cu	Esférico	0,041	0,017	0,058	126	71	Moderada

Fonte: Autores, 2026. Classificação do IDE: ≤ 25% — dependência forte; 25–75% — dependência moderada; > 75% — dependência fraca

Figura 2. Variogramas experimentais (pontos) e modelos teóricos ajustados (linhas) para atributos representativos do solo na área de ocorrência de castanheira (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso. Cada painel apresenta a semivariância (γ) em função da distância (h), evidenciando a estrutura espacial dos atributos analisados. São apresentados: (a) fração argilosa, com dependência espacial moderada e maior alcance, indicando organização espacial estruturada associada a processos pedogenéticos; (b) acidez potencial (H+Al); e (c) capacidade de troca catiônica efetiva (t), ambos caracterizados por predominância do efeito pepita e dependência espacial fraca, refletindo elevada variabilidade em escala fina. A linha horizontal tracejada representa o patamar dos modelos ajustados, enquanto o alcance define a escala espacial na qual os atributos apresentam correlação. O contraste entre atributos estruturados e não estruturados evidencia a coexistência de processos de organização espacial em múltiplas escalas no sistema edáfico.



Fonte: Autores, 2026

3.3 TENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS

A análise de tendência espacial foi realizada por meio de regressão linear entre os atributos do solo e as coordenadas espaciais dos pontos amostrais.

Foram observados resultados significativos para os atributos H+Al ($p = 0,009$) e t ($p = 0,033$).

Os coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,15 para H+Al e 0,11 para t.

Os coeficientes de regressão associados às coordenadas espaciais (βX e βY), os valores de R^2, o teste F e os níveis de significância estatística estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do teste de tendência espacial (drift) para atributos químicos do solo na área de ocorrência de castanheira (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso. São apresentados os coeficientes de regressão associados às coordenadas espaciais (βX e βY), o coeficiente de determinação (R^2), o valor do teste F e o nível de significância estatística (p-valor). A análise de tendência espacial permite identificar a presença de gradientes edáficos de maior escala na paisagem, associados a fatores como topografia, material de origem e dinâmica hidrológica. Valores de $p < 0,05$ indicam tendência espacial significativa, sugerindo que parte da variabilidade dos atributos do solo está associada a padrões espaciais regionais. Os resultados fornecem subsídios para a interpretação conjunta da variabilidade espacial, distinguindo entre gradientes estruturais e micro-heterogeneidade local, aspectos essenciais para a modelagem geoestatística e compreensão da organização da fertilidade do solo.

Atributo	n	βX	βY	R^2	F	p-valor	Interpretação
H+Al	60	0.00021	−0.00018	0.15	4.93	0.009	Tendência espacial significativa
t (CTC efetiva)	60	0.00005	−0.00004	0.11	3.55	0.033	Tendência espacial moderada

Fonte: Autores, 2026

3.4 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL POR KRIGAGEM

A interpolação espacial dos atributos do solo foi realizada por meio de krigagem ordinária.

Foram geradas superfícies contínuas de predição espacial para os atributos que apresentaram estrutura espacial definida.

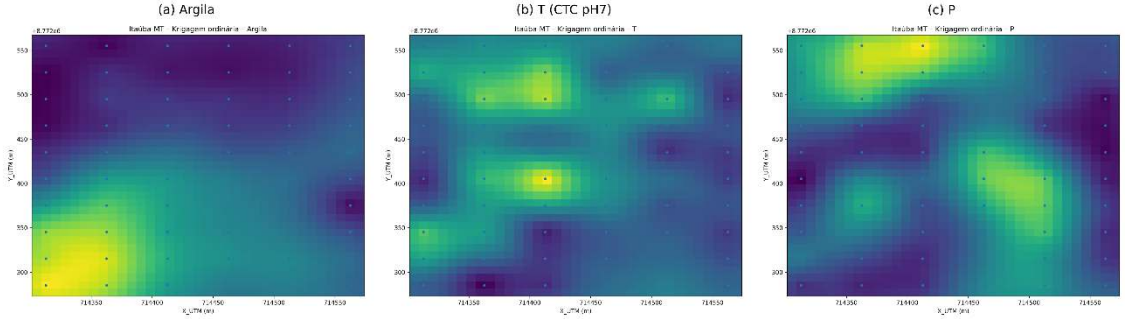
Para a fração argilosa, os mapas evidenciam variação espacial com valores diferenciados ao longo da área de estudo.

Para os atributos capacidade de troca catiônica efetiva (t) e fósforo disponível (P), os mapas apresentam variação espacial com distribuição não contínua.

A variância de krigagem apresentou valores mais elevados nas regiões periféricas da área amostral.

Os mapas de predição espacial obtidos para os atributos argila, capacidade de troca catiônica efetiva e fósforo disponível estão apresentados na Figura 3.

Figura 3. Mapas de interpolação espacial obtidos por krigagem ordinária para atributos representativos do solo na área de ocorrência de castanheira (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso. A escala de cores representa os valores preditos para cada atributo, com tons mais quentes (vermelho/amarelo) indicando maiores valores e tons mais frios (azul/verde) indicando menores valores. Os pontos pretos correspondem às localizações amostrais utilizadas na modelagem geoestatística. São apresentados os mapas para: (a) fração argilosa, evidenciando maior continuidade espacial e gradiente definido na paisagem; (b) capacidade de troca catiônica efetiva (t); e (c) fósforo disponível (P), ambos caracterizados por padrões espaciais mais fragmentados e menor continuidade. A distribuição espacial dos atributos revela a formação de mosaicos edáficos intra-área, nos quais compartimentos com diferentes níveis de retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes coexistem em escala local, refletindo a interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos.



Fonte: Autores, 2026

4 DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO PEDOGEOQUÍMICA DOS SOLOS ASSOCIADOS À CASTANHEIRA EM MATO GROSSO

Os resultados obtidos evidenciam um conjunto de características típicas de solos tropicais altamente intemperizados, marcados por elevada acidez potencial, baixa saturação por bases e baixos teores de nutrientes trocáveis. Esse padrão confirma o comportamento esperado para solos da Amazônia meridional, com domínio de alumínio no complexo de troca e limitações nutricionais generalizadas.

A elevada acidez potencial (H+Al) e os teores expressivos de alumínio trocável (Al^{3+}) refletem ambientes pedogeneticamente avançados, nos quais processos intensos de intemperismo químico promovem a lixiviação de bases e o enriquecimento relativo em óxidos de ferro e alumínio (SOUZA JUNIOR et al., 2010; FIEL et al., 2022). A saturação por alumínio elevada (média de 84,1%) evidencia a dominância de cargas ácidas no complexo de troca, caracterizando um ambiente edáfico fortemente ácido e com elevada atividade de Al^{3+}.

Apesar dessa dominância, a amplitude observada para a saturação por alumínio indica a presença de variabilidade intra-área, sugerindo a existência de microsítios com diferentes níveis de toxicidade potencial. Essa heterogeneidade química local pode estar associada à dinâmica da serapilheira, à redistribuição de nutrientes e à atividade biológica do solo.

O teor de carbono do solo apresentou variabilidade moderada, indicando relativa estabilidade espacial quando comparado aos nutrientes mais dinâmicos, mas ainda refletindo heterogeneidade associada a processos biológicos e deposição de serapilheira. A matéria orgânica exerce papel central

na manutenção da fertilidade funcional desses sistemas, contribuindo para a complexação de cátions e estabilização estrutural do solo (Doetterl et al., 2015).

A textura do solo, dominada pela fração argilosa, varia significativamente na área, sugerindo a presença de gradientes texturais que influenciam processos hidrológicos e biogeoquímicos. Em contrapartida, a densidade do solo apresentou baixa variabilidade, indicando relativa uniformidade estrutural e ausência de processos localizados de compactação ou adensamento.

A elevada variabilidade observada para Ca, Na, Mn e Cu indica forte heterogeneidade espacial desses elementos, sugerindo controle por processos locais, como deposição diferenciada de serapilheira, atividade microbiana e formação de microsítios de acumulação.

4.2 ESTRUTURA ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO

A análise geoestatística revelou predominância de dependência espacial fraca para a maioria dos atributos químicos, refletindo a elevada proporção do efeito pepita nos modelos variográficos. Esse padrão indica que grande parte da variabilidade ocorre em escalas menores que o espaçamento da malha amostral, evidenciando forte heterogeneidade microambiental.

A dominância de variabilidade predominante em escala fina, próxima ou inferior ao espaçamento amostral (~50 m), conforme indicado pela elevada proporção do efeito pepita nos variogramas sugere que processos locais exercem controle significativo sobre a distribuição dos atributos químicos do solo. Em ecossistemas florestais tropicais, essa heterogeneidade está associada à interação entre deposição de serapilheira, atividade biológica, microtopografia e redistribuição hidrológica de nutrientes (LIMA et al., 2014; IRVINE et al., 2007; TOWNSEND, ASNER & CLEVELAND, 2008; XIA et al., 2016).

Em contraste, a fração argilosa apresentou dependência espacial moderada, com estrutura variográfica bem definida. Esse padrão indica controle pedogenético mais consistente sobre a distribuição da fração mineral fina, refletindo processos de transporte e deposição diferencial de partículas ao longo da paisagem. O alcance de 173 m define a escala em que essa organização espacial se manifesta, condicionando processos hidrológicos e biogeoquímicos.

O cobre também apresentou dependência espacial moderada, sugerindo associação com gradientes edáficos locais ou redistribuição da matéria orgânica. No entanto, o valor elevado do IDE dentro da classe moderada indica a presença de componente expressivo de variabilidade em escala fina.

O contraste entre a estruturação da fração argilosa e a ausência de estrutura na maioria dos atributos químicos evidencia que a textura do solo apresenta organização espacial mais previsível do que a fertilidade química, reforçando a natureza altamente dinâmica da ciclagem de nutrientes em florestas tropicais.

4.3 GRADIENTES ESPACIAIS E PROCESSOS PEDOGENÉTICOS

A identificação de tendência espacial significativa para H+Al e para a capacidade de troca catiônica efetiva indica a presença de gradientes espaciais ao longo da área de estudo. Esses resultados sugerem que parte da variabilidade observada está associada a gradientes ambientais de maior escala.

A orientação predominante desses gradientes ao longo do eixo leste-oeste indicando a presença de gradientes espaciais de baixa intensidade, possivelmente associados à posição na paisagem e à dinâmica hidrológica, sem predominância direcional claramente definida. Em ambientes tropicais altamente intemperizados, pequenas variações na posição da paisagem podem influenciar a redistribuição de água, solutos e partículas finas, resultando em gradientes edáficos detectáveis (SOUZA et al., 2010; SCHEPP, 2022; LOUZADA et al., 2024).

Embora os valores de R^2 sejam relativamente baixos, indicando que apenas parte da variabilidade é explicada por esses gradientes, sua significância estatística confirma a atuação de processos regionais sobre a organização espacial da fertilidade.

Esses resultados reforçam a necessidade de interpretar a variabilidade edáfica considerando simultaneamente dois níveis de organização: (i) micro-heterogeneidade local, dominante na maioria dos atributos, e (ii) gradientes regionais de baixa intensidade, mas estatisticamente detectáveis (TAMIRU et al., 2023; RODRIGUES et al., 2021).

4.4 MOSAICOS EDÁFICOS E IMPLICAÇÕES ECOFISIOLÓGICAS PARA A CASTANHEIRA

A análise integrada dos mapas de krigagem revelou a presença de mosaicos edáficos intra-área, caracterizados por variações espaciais na textura e na capacidade de troca catiônica. Esses padrões indicam que a fertilidade do solo se organiza em compartimentos funcionais distribuídos na paisagem.

A maior continuidade espacial observada para a fração argilosa resulta em zonas com maior capacidade de retenção de água, enquanto a distribuição fragmentada dos atributos químicos reflete variabilidade em escala fina. Esse desacoplamento espacial entre água e nutrientes cria condições heterogêneas para o desenvolvimento das plantas.

Em determinadas porções da área, caracterizada por maiores teores de argila, apresenta maior capacidade potencial de retenção hídrica e de nutrientes, configurando um compartimento funcional distinto dentro da paisagem.

Para espécies arbóreas emergentes como *Bertholletia excelsa*, a heterogeneidade espacial do solo pode influenciar diretamente o desempenho ecofisiológico. Gradientes texturais afetam a retenção de água, enquanto a variabilidade química modula a disponibilidade de nutrientes, dois fatores críticos para o crescimento e a produtividade (QUESADA & LLOYD, 2016; Scoles & Gribel, 2011).

A coexistência de atributos estruturados (textura) e não estruturados (nutrientes) sugere que a disponibilidade hídrica pode ser mais previsível espacialmente do que a disponibilidade nutricional,

criando um cenário em que o sistema radicular das árvores explora um mosaico de condições edáficas contrastantes.

4.5 INTEGRAÇÃO PEDOGEOQUÍMICA E ECOFISIOLÓGICA

A integração entre os resultados pedogeoquímicos, geoestatísticos e ecofisiológicos permite propor um modelo conceitual que descreve as interações entre atributos do solo, disponibilidade hídrica e funcionamento fisiológico da castanheira na área estudada (**Figura 4**).

Os resultados indicam que a fertilidade do solo é controlada por dois componentes principais: (i) fatores estruturantes, representados pela textura e pela capacidade de troca catiônica, e (ii) fatores dinâmicos, associados à variabilidade química em escala fina. A fração argilosa, que apresentou dependência espacial moderada e maior alcance, atua como elemento estruturador da paisagem edáfica, regulando a retenção de água e influenciando indiretamente a disponibilidade de nutrientes no sistema solo-planta.

Em contraste, os atributos químicos, caracterizados predominantemente por dependência espacial fraca, refletem processos biológicos e microambientais que operam em escala local, como deposição diferenciada de serapilheira, ciclagem de nutrientes e atividade microbiana (SINGH et al., 2023; ORDWAY et al., 2024). Esse desacoplamento entre estrutura física e fertilidade química indica que a disponibilidade hídrica tende a apresentar maior previsibilidade espacial do que a disponibilidade nutricional.

Nesse contexto, o modelo conceitual proposto sugere que a produtividade da castanheira em escala local depende da interação entre uma base estrutural relativamente estável — associada à textura do solo — e um componente altamente dinâmico — relacionado à fertilidade química. Essa interação define um ambiente edáfico heterogêneo, no qual o sistema radicular das árvores explora um mosaico de condições contrastantes de disponibilidade de água e nutrientes.

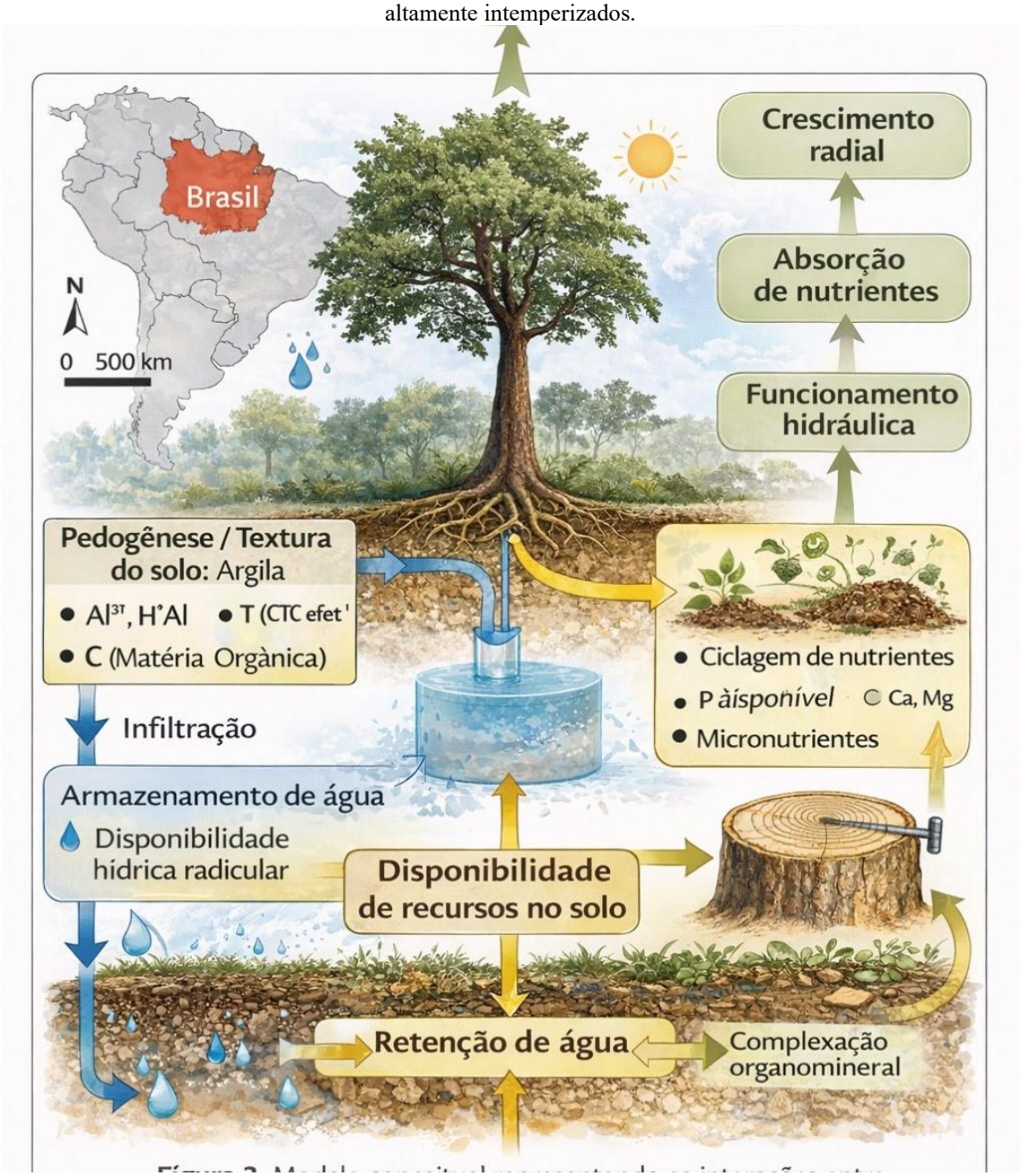
A comparação com estudos conduzidos na Amazônia central revela convergência pedogeoquímica, com ocorrência da espécie em solos ácidos e de baixa fertilidade (ZUIDEMA, 2003; da COSTA et al., 2022). No entanto, diferenças na estrutura espacial indicam que fatores regionais, como sazonalidade climática e dinâmica hidrológica, modulam a organização dos mosaicos edáficos na Amazônia meridional (BRANDO et al., 2020).

A dominância de micro-heterogeneidade observada nesta região sugere maior variabilidade intra-populacional no desempenho das árvores, com implicações diretas para estratégias de manejo e amostragem (OSBORNE et al., 2021; HO et al., 2025). Esse padrão reforça que abordagens baseadas apenas em valores médios de fertilidade são insuficientes para representar a complexidade funcional do sistema edáfico.

De forma integrada, os resultados demonstram que a fertilidade do solo deve ser interpretada considerando sua organização espacial. A identificação de mosaicos edáficos intra-área evidencia que a variabilidade espacial constitui fator determinante para o funcionamento ecológico de populações naturais de *Bertholletia excelsa* (SILVA, 2022; Costa, Tonini & Mendes Filho, 2017).

Adicionalmente, a presença de zonas com maior teor de argila e maior capacidade de retenção de água e nutrientes indica áreas potencialmente mais resilientes ao estresse hídrico, especialmente em cenários de aumento da variabilidade climática. Essas zonas podem atuar como compartimentos funcionais críticos para a manutenção da produtividade e da estabilidade das populações naturais da espécie (POHL et al., 2023; CHEN et al., 2024).

Figura 4. Modelo conceitual da organização pedogeoquímica e ecofisiológica do sistema solo–planta em área de ocorrência natural de castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso, Amazônia meridional. O modelo integra os principais resultados geoestatísticos e pedogeoquímicos obtidos no estudo, distinguindo dois componentes funcionais do sistema edáfico: (i) fatores estruturantes, representados pela fração argilosa e pela capacidade de troca catiônica, que apresentam maior continuidade espacial e controlam a retenção de água e a base físico-química do sistema; e (ii) fatores dinâmicos, associados à fertilidade química (nutrientes e elementos traço), caracterizados por elevada micro-heterogeneidade e dependência espacial fraca, refletindo processos biológicos e microambientais. A interação entre esses componentes define a disponibilidade de recursos no sistema solo-planta, modulando processos ecofisiológicos como absorção de água, condutividade hidráulica, aquisição de nutrientes e crescimento radial das árvores. A organização espacial desses atributos resulta na formação de mosaicos edáficos intra-área, nos quais zonas com maior teor de argila apresentam maior capacidade potencial de retenção hídrica e maior estabilidade funcional, podendo atuar como compartimentos mais resilientes ao estresse hídrico. As setas indicam relações funcionais entre os componentes do sistema, enquanto a espessura relativa representa a intensidade das interações inferidas a partir da estrutura espacial dos atributos do solo. O modelo sintetiza a coexistência de processos pedogenéticos de média escala e processos biogeoquímicos de escala fina, evidenciando que a organização espacial da fertilidade do solo constitui elemento central para o funcionamento ecológico de populações naturais de *Bertholletia excelsa* em ambientes tropicais altamente intemperizados.



Fonte: Autores, 2026

5 CONCLUSÕES

Os solos associados às populações naturais de castanheira (*Bertholletia excelsa*) em Itaúba, Mato Grosso, apresentam características típicas de ambientes tropicais altamente intemperizados, com elevada acidez potencial, baixa saturação por bases e predominância de alumínio no complexo de troca. Esse padrão confirma a ocorrência da espécie em condições edáficas de baixa fertilidade química, nas quais a funcionalidade do sistema solo-planta depende fortemente da ciclagem biogeoquímica e da interação entre matéria orgânica, textura do solo e dinâmica hidrológica.

A análise geoestatística evidenciou predominância de dependência espacial fraca para a maioria dos atributos químicos, indicando elevada micro-heterogeneidade em escala local. Em contraste, a fração argilosa apresentou dependência espacial moderada e maior continuidade espacial, definindo a principal estrutura organizadora da variabilidade edáfica na área. Esse contraste demonstra que atributos físicos e químicos operam sob diferentes escalas de organização espacial.

A presença de tendência espacial significativa para atributos relacionados à acidez, embora com baixo poder explicativo, indica que gradientes ambientais de maior escala contribuem parcialmente para a variabilidade observada, sem, contudo, suplantar a dominância da heterogeneidade local.

Os mapas de krigagem revelaram a existência de mosaicos edáficos intra-área, caracterizados por variações espaciais na textura e na capacidade de troca catiônica, indicando que a disponibilidade de água e nutrientes não se distribui de forma homogênea na paisagem. Esses padrões reforçam que a fertilidade do solo deve ser interpretada não apenas com base em valores médios, mas também considerando sua organização espacial.

De forma integrada, os resultados demonstram que a estrutura espacial da fertilidade do solo constitui fator determinante para o funcionamento ecológico de populações naturais de *Bertholletia excelsa* na Amazônia meridional. A coexistência de uma base estrutural relativamente estável (associada à textura) e de elevada variabilidade química em escala fina sugere que a disponibilidade hídrica tende a ser mais previsível espacialmente do que a disponibilidade nutricional.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que estratégias de amostragem, monitoramento e manejo de castanhais naturais devem considerar explicitamente a heterogeneidade espacial dos atributos do solo. Malhas amostrais com espaçamento superior à escala da variabilidade local podem não capturar adequadamente os padrões edáficos que influenciam o desempenho individual das árvores. Além disso, a identificação de compartimentos com maior capacidade de retenção hídrica e nutricional sugere a existência de zonas com maior potencial de resiliência ao estresse hídrico, com implicações para conservação e manejo sob cenários de mudanças climáticas.

Em síntese, este estudo demonstra que a dimensão espacial da fertilidade do solo — frequentemente negligenciada em abordagens convencionais — é elemento central para compreender a ecologia, a produtividade e a distribuição de *Bertholletia excelsa* em ambientes tropicais altamente

ISSN: 2177-3246

intemperizados, contribuindo para o avanço do conhecimento e para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de manejo e conservação na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

BRANDO, P. M.; SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, L.; ASSUNÇÃO, A.; MORTON, D.; TUCHSCHNEIDER, D. et al. The gathering firestorm in southern Amazonia. Science Advances, v. 6, n. 2, eaay1632, jan. 2020. DOI: 10.1126/sciadv.aay1632.

CAMBARDELLA, C. A. et al. 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.

CHEN, S.; STARK, S. C.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; JESUS AMORE, D.; RESTREPO-COUPE, N. et al. Amazon forest biogeography predicts resilience and vulnerability to drought. Nature, v. 631, n. 8019, p. 111-117, jul. 2024. DOI: 10.1038/s41586-024-07568-w.

COSTA, K. C. P. D. Ecophysiology and growth of Bertholletia excelsa Bonpl. in response to thinning, liming and phosphorus addition. 2019. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2019.

COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Atributos do solo relacionados com a produção da castanheira-do-brasil (Bertholletia excelsa). Floresta e Ambiente, v. 24, e004215, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.004215.

DA COSTA, K. C. P.; CARVALHO GONÇALVES, J. F.; GONÇALVES, A. L.; ROCHA NINA JUNIOR, A.; JAQUETTI, R. K.; SOUZA, V. F. et al. Advances in Brazil nut tree ecophysiology: linking abiotic factors to tree growth and fruit production. Current Forestry Reports, v. 8, n. 1, p. 90-110, mar. 2022. DOI: 10.1007/s40725-021-00155-y.

DE SOUZA, C. R.; MOREL, J. D.; SANTOS, A. B. M. et al. Small-scale edaphic heterogeneity as a floristic–structural complexity driver in Seasonally Dry Tropical Forests tree communities. Journal of Forest Research, v. 31, n. 6, p. 2347-2357, dez. 2020. DOI: 10.1007/s11676-019-01013-9.

DOETTERL, S.; STEVENS, A.; SIX, J.; MERCKX, R.; VAN OOST, K.; CASANOVA PINTO, M. et al. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. Nature Geoscience, v. 8, n. 10, p. 780-783, out. 2015.

EMBRAPA. AGRITEMPO: Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. Boletim Meteorológico da Região Centro-Oeste, Campinas, n. 0022026, p. 1-2, 7 a 14 jan. 2026. http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1184248

FIEL, L. G.; MARQUES, J. D.; DIAS, V. H. R.; SAMPAIO, I. M. G.; RODRIGUES, S. J. S. C.; MELO, V. S. et al. Atributos químicos do solo sob diferentes usos e coberturas no contexto da agricultura familiar. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 4, p. 24-35, 2022. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0003.

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.

HO, V. H.; MORITA, H.; HO, T. H. et al. Comparison of geostatistics, machine learning algorithms, and their hybrid approaches for modeling soil organic carbon density in tropical forests. Journal of Soils and Sediments, v. 25, p. 1554-1577, 2025. DOI: 10.1007/s11368-025-04027-5.

HO, V. H.; MORITA, H.; HO, T. H. et al. Comparison of geostatistics, machine learning algorithms, and their hybrid approaches for modeling soil organic carbon density in tropical forests. Journal of Soils and Sediments, v. 25, p. 1554-1577, 2025. DOI: 10.1007/s11368-025-04027-5.

IRVINE, K. M.; GITELMAN, A. I.; HOETING, J. A. Spatial designs and properties of spatial correlation: effects on covariance estimation. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, v. 12, n. 4, p. 450-469, dez. 2007. DOI: 10.1198/108571107X249799.

KOTOWSKA, M. M.; HERTEL, D.; RAJAB, Y. A.; BARUS, H.; SCHULDT, B. Patterns in hydraulic architecture from roots to branches in six tropical tree species from cacao agroforestry and their relation to wood density and stem growth. Frontiers in Plant Science, v. 6, 191, abr. 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00191.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 5, p. 517-526, maio 2014. DOI: 10.1590/S1415-43662014000500008.

LIMA, G. F.; DUARTE, T. F.; CUSTÓDIO, A. C. O. Determination of field capacity in Oxisols using the flux density method, Arya-Paris model, and pressure chamber. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 29, n. 3, e283074, 2025. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v29n3e283074

LIMA, H. N. Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

LOUZADA, R. O.; BERGIER, I.; McGLUE, M. M.; OLIVEIRA ROQUE, F.; RASBOLD, G.; DOMINGOS-LUZ, L. et al. Fluvial avulsions influence soil fertility in the Pantanal wetlands (Brazil). Science of the Total Environment, v. 926, 172127, maio 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172127.

MARTINS, N.; FUCHSLUEGER, L.; LUGLI, L.; RAMMIG, A.; HARTLEY, I.; QUESADA, C. Effect of elevated CO2 in a late-stage leaf litter decomposition process in the understory of Amazonian forest: the role of plant root and microbial interaction on nutrient availability. In: EGU General Assembly 2025, Vienna, 2025. EGU25-11396. DOI: 10.5194/egusphere-egu25-11396.

MINAI, J.; LIBOHOVA, Z.; KAIZZI, K.; SCHULZE, D.; NKONYA, E. Spatial variability of selected soil properties in Uganda using machine learning approaches. SSRN Electronic Journal, [S.l.], 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4563998.

MORAES, L. J. Seletividade ambiental de castanheiras (Bertholletia excelsa Bonpl.) no estado do Amazonas. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021. Disponível em: https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/8555.

ORDWAY, E.; ASNER, G.; BURSLEM, D.; LEWIS, S.; NILUS, R.; MARTIN, R. et al. Mapping fine-scale variation in diverse tropical forests with distinct ecological dynamics requires few leaf traits and structural attributes. Authorea, 2024. No prelo.

OSBORNE, B. B.; SOPER, F. M.; NASTO, M. K.; BRU, D.; HWANG, S.; MACHMULLER, M. B. et al. Litter inputs drive patterns of soil nitrogen heterogeneity in a diverse tropical forest: results from a litter manipulation experiment. Soil Biology and Biochemistry, v. 158, 108247, jul. 2021. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108247.

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.

POHL, M. J.; LEHNERT, L. W.; THIES, B. et al. Valleys are a potential refuge for the Amazon lowland forest in the face of increased risk of drought. Communications Earth & Environment, v. 4, 198, jun. 2023. DOI: 10.1038/s43247-023-00867-6.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J. Soil–Vegetation Interactions in Amazonia. In: NAGY, L.; FORSBERG, B.; ARTAXO, P. (ed.). Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. p. 267-293. (Ecological Studies, v. 227). DOI: 10.1007/978-3-662-49902-3_12.

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.

RIBEIRO, G. A. A. Efeitos da limitação nutricional sobre a ciclagem de nutrientes em uma floresta madura na Amazônia Central. 2023. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2023.

SCHEPP, C. Linking slopes to the wetland: hillslope hydrology and associated nitrate transport in a tropical valley bottom wetland. 2022. Tese (Doutorado) – Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, Bonn, 2022.

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.

SCOLES, R.; GRIBEL, R. Population structure of Brazil nut (Bertholletia excelsa, Lecythidaceae) stands in two areas with different occupation histories in the Brazilian Amazon. Human Ecology, v. 39, n. 4, p. 455-464, ago. 2011. DOI: 10.1007/s10745-011-9412-0.

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, 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. DOI: 10.36783/18069657rbcs20210001.

SINGH, S.; VERMA, A.; HOFHANSL, F. Topographical heterogeneity governs species distribution and regeneration potential by mediating soil attributes in Western Himalayan forests. 2023. No prelo.

SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. Ciência Rural, v. 40, n. 3, p. 513-519, mar. 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010000300003.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G.; MAGALHÃES, P. S.; SIQUEIRA, D. S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 12, p. 1250-1256, dez. 2010.

SPERA, S. T. et al. Caracterização pedológica de locais de estudo de populações naturais de castanheira-do-brasil no estado de Mato Grosso. Nativa, Sinop, v. 7, n. 2, p. 119-126, 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i2.6502

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.

TAMIRU, B.; SOROMESSA, T.; WARKINEH, B.; LEGESE, G. Mapping soil parameters with environmental covariates and land cover projection in tropical rainforest, Hangadi Watershed, Ethiopia. Sustainability, v. 15, n. 2, 1066, jan. 2023. DOI: 10.3390/su15021066.

TASNIM, N.; HOSSAIN, M. R.; FAYEEM, H. A. M.; MOSTOFA, Z. B.; ANIKA, T. T.; MOU, M. et al. Towards data-driven tropical forest restoration: uncovering spatial variation, interactions and historical management effects on nutrients along soil depth gradients. Science of the Total Environment, v. 954, 176756, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176756.

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.

THOMAS, E.; JANSEN, M.; CHIRIBOGA-ARROYO, F.; WADT, L. H. O.; CORVERA-GOMRINGER, R.; ATKINSON, R. J.; BONSER, S. P.; VELASQUEZ-RAMIREZ, M. G.; LADD, B. Habitat quality differentiation and consequences for ecosystem service provision of an Amazonian hyperdominant tree species. Frontiers in Plant Science, v. 12, 621064, mar. 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.621064.

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.

TONINI, H.; BALDONI, A. B. Estrutura e regeneração de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em castanhais nativos da Amazônia. Ciência Florestal, v. 29, n. 2, p. 607-621, 2019.
DOI: https://doi.org/10.5902/1980509822112

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.

VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L.; LIN, H. Redoximorphic features as related to soil hydrology and hydric soils. In: LIN, H. (ed.). Hydropedology: synergistic integration of soil science and hydrology. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 143-172.

VIEIRA, F. S.; ALVES, A. O.; DARDENGO, J. F. E.; ALVES, A. B. C.; ZORTÉA, K. É. M.; BRAGA, L. N.; SILVA, C. J.; LOPES, C. R. A. S.; ROSSI, A. A. B. Population structure and spatial distribution of Bertholletia excelsa Bonpl. in Juruena National Park, Southern Amazon. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 8, p. 75-81, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0007.

VLEMINCKX, J.; VALVERDE-BARRANTES, O.; FORTUNEL, C.; PAINE, C. E. T.; BAUMAN, D.; ENGEL, J.; PETRONELLI, P. et al. Niche breadth of Amazonian trees increases with niche optimum across broad edaphic gradients. Ecology, v. 104, n. 7, e4053, jul. 2023. DOI: 10.1002/ecy.4053.

WANG, D.; YUAN, C.; ZHANG, X.; WEI, X.; YUE, K.; NI, X.; WU, F. Precipitation rather than temperature primarily drives global termite effects on litter decomposition. Catena, v. 236, 107778, mar. 2024. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107778.

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.

XIA, S. W.; CHEN, J.; SCHAEFER, D. et al. Effect of topography and litterfall input on fine-scale patch consistency of soil chemical properties in a tropical rainforest. Plant and Soil, v. 404, n. 1-2, p. 385-398, jul. 2016. DOI: 10.1007/s11104-016-2854-9.

YE, C.; ZHENG, G.; TAO, Y.; XU, Y.; CHU, G.; XU, C.; CHEN, S.; LIU, Y.; ZHANG, X.; WANG, D. Effect of soil texture on soil nutrient status and rice nutrient absorption in paddy soils. Agronomy, v. 14, n. 6, 1339, jun. 2024. DOI: 10.3390/agronomy14061339.

ZUIDEMA, P. A. Ecology and management of the Brazil nut tree (Bertholletia excelsa). Riberalta: Promab, 2003.