RGe ISSN: 2177-3246

HETEROGENEIDADE DO SOLO E DISPONIBILIDADE DE RECURSOS EM CASTANHAIS AMAZÔNICOS: UMA ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE GRADIENTES DE FERTILIDADE EM RORAIMA

SOIL HETEROGENEITY AND RESOURCE AVAILABILITY IN AMAZONIAN BRAZIL NUT GROVES: A GEOSTATISTICAL ANALYSIS OF FERTILITY GRADIENTS IN RORAIMA

HETEROGENEIDAD DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE RECURSOS EN PLANTACIONES DE CASTAÑA DE BRASIL AMAZÓNICAS: UN ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS GRADIENTES DE FERTILIDAD EN RORAIMA

10.56238/revgeov17n6-076

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

Mirian Cristina Gomes Costa
Doutora em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Ciências do Solo
E-mail: mirian.costa@ufc.br

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

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

Karine Dias Batista
Doutora em Ciência do Solo
Instituição: Embrapa Roraima
E-mail: karine.batista@embrapa.br

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

RESUMO
A fertilidade do solo em florestas tropicais é caracterizada por elevada heterogeneidade espacial, resultante da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos. Em castanhais naturais da Amazônia, compreender a organização espacial dos atributos do solo é fundamental para interpretar os mecanismos que regulam a disponibilidade de recursos para *Bertholletia excelsa*. Este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma área de castanheira-da-amazônia localizada no estado de Roraima, utilizando ferramentas geoestatísticas. Foram analisados atributos relacionados à fertilidade e à estrutura do solo, incluindo fração argila, carbono, alumínio trocável, acidez potencial, capacidade de troca catiônica, fósforo disponível e densidade do solo. A estrutura espacial foi avaliada por meio da construção de variogramas experimentais e ajuste de modelos teóricos, sendo posteriormente aplicada a krigagem ordinária para interpolação espacial dos atributos selecionados. Os resultados indicaram que a maioria das variáveis apresentou dependência espacial detectável, com predominância do modelo variográfico esférico. A fração argila, o carbono do solo e o alumínio trocável apresentaram forte dependência espacial, enquanto fósforo disponível, densidade do solo e capacidade de troca catiônica exibiram dependência moderada. A interpolação espacial revelou a presença de mosaicos edáficos intra-área, evidenciando gradientes espaciais de fertilidade e textura do solo. Esses padrões sugerem que a disponibilidade de água e nutrientes pode variar significativamente em pequenas escalas espaciais, influenciando o funcionamento ecofisiológico da castanheira. A integração entre análises geoestatísticas e interpretação pedogeoquímica permitiu evidenciar como gradientes edáficos podem estruturar a disponibilidade de recursos no sistema solo-planta. Os resultados contribuem para ampliar a compreensão da dinâmica edáfica em castanhais amazônicos e fornecem subsídios científicos para estratégias de manejo sustentável e conservação de sistemas extrativistas baseados na castanheira-da-amazônia.

Palavras-chave: Geoestatística do Solo. Fertilidade Tropical. Variabilidade Espacial. *Bertholletia excelsa*. Amazônia.

ABSTRACT
Soil fertility in tropical forests is characterized by strong spatial heterogeneity resulting from the interaction of pedogenetic, hydrological, and biogeochemical processes. In Amazonian Brazil nut forests, understanding the spatial organization of soil properties is essential for interpreting the mechanisms regulating resource availability for *Bertholletia excelsa*. This study aimed to analyze the spatial variability of physical and chemical soil attributes in a Brazil nut forest located in the state of Roraima, northern Amazonia, using geostatistical approaches. Soil properties related to fertility and structure were evaluated, including clay fraction, soil carbon, exchangeable aluminum, potential acidity, cation exchange capacity, available phosphorus, and soil bulk density. Spatial structure was assessed through experimental variograms and the adjustment of theoretical models, followed by ordinary kriging to interpolate selected soil attributes. Most variables exhibited detectable spatial dependence, with the spherical model providing the best fit for the majority of variograms. Clay fraction, soil carbon, and exchangeable aluminum showed strong spatial dependence, whereas available phosphorus, soil bulk density, and cation exchange capacity displayed moderate spatial dependence. Kriging interpolation revealed the presence of intra-area edaphic mosaics, highlighting spatial gradients in soil fertility and texture. These patterns suggest that water and nutrient availability may vary significantly at relatively short spatial scales, potentially influencing the ecophysiological functioning of Brazil nut trees. The integration of geostatistical analysis with pedogeochemical interpretation allowed identification of how soil gradients structure resource availability within the soil–plant system. Overall, the results contribute to improving the understanding of soil dynamics in Amazonian Brazil nut forests and provide scientific support for sustainable management and conservation strategies of Brazil nut-based extractive systems.

Keywords: Soil Geostatistics. Tropical Soil Fertility. Spatial Variability. *Bertholletia excelsa*. Amazon Rainforest.

ISSN: 2177-3246

RESUMEN
La fertilidad del suelo en los bosques tropicales se caracteriza por una alta heterogeneidad espacial, resultado de la interacción entre procesos pedogenéticos, hidrológicos y biogeoquímicos. En los huertos naturales de castaña de Brasil en la Amazonía, comprender la organización espacial de los atributos del suelo es fundamental para interpretar los mecanismos que regulan la disponibilidad de recursos para *Bertholletia excelsa*. Este estudio tuvo como objetivo analizar la variabilidad espacial de los atributos físicos y químicos del suelo en un área de huerto de castaña de Brasil ubicada en el estado de Roraima, utilizando herramientas geoestadísticas. Se analizaron atributos relacionados con la fertilidad y la estructura del suelo, incluyendo fracción de arcilla, carbono, aluminio intercambiable, acidez potencial, capacidad de intercambio catiónico, fósforo disponible y densidad del suelo. La estructura espacial se evaluó mediante la construcción de variogramas experimentales y el ajuste de modelos teóricos, con kriging ordinario aplicado posteriormente para la interpolación espacial de los atributos seleccionados. Los resultados indicaron que la mayoría de las variables mostraron una dependencia espacial detectable, con predominio del modelo variográfico esférico. La fracción arcillosa, el carbono del suelo y el aluminio intercambiable mostraron una fuerte dependencia espacial, mientras que el fósforo disponible, la densidad del suelo y la capacidad de intercambio catiónico exhibieron una dependencia moderada. La interpolación espacial reveló la presencia de mosaicos edáficos intrarregionales, evidenciando gradientes espaciales de fertilidad y textura del suelo. Estos patrones sugieren que la disponibilidad de agua y nutrientes puede variar significativamente a pequeñas escalas espaciales, influyendo en el funcionamiento ecofisiológico del árbol de castaña de Brasil. La integración entre los análisis geoestadísticos y la interpretación pedogeoquímica permitió destacar cómo los gradientes edáficos pueden estructurar la disponibilidad de recursos en el sistema suelo-planta. Los resultados contribuyen a ampliar la comprensión de la dinámica edáfica en los bosques amazónicos de castaña de Brasil y brindan apoyo científico para estrategias de manejo y conservación sostenibles de sistemas extractivos basados en este árbol.

Palabras clave: Geoestadística del Suelo. Fertilidad Tropical. Variabilidad Espacial. *Bertholletia excelsa*. Amazonía.

1 INTRODUÇÃO

A floresta Amazônica representa o maior bioma tropical contínuo do planeta, desempenhando papel fundamental na regulação do clima global, na conservação da biodiversidade e na dinâmica biogeoquímica do carbono e dos nutrientes. Apesar da elevada biomassa e produtividade, grande parte dos solos amazônicos apresenta baixa fertilidade natural, elevada acidez e baixos teores de nutrientes disponíveis, características típicas de ambientes altamente intemperizados. Nesses sistemas, a produtividade vegetal depende fortemente da ciclagem biogeoquímica de nutrientes, da dinâmica da matéria orgânica e das propriedades físico-químicas do solo que regulam a retenção de água e a disponibilidade de cátions trocáveis (Quesada et al., 2011; Sullivan et al., 2017).

Do ponto de vista pedogeoquímico, os solos da Amazônia são predominantemente Latossolos e Argissolos, altamente intemperizados, nos quais a fertilidade está associada principalmente à fração argilosa e à matéria orgânica. A mineralogia dominada por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio confere elevada capacidade de adsorção de fósforo e baixa disponibilidade de bases trocáveis, impondo limitações ao desenvolvimento vegetal. Nessas condições, pequenas variações na textura, mineralogia e conteúdo de matéria orgânica podem resultar em diferenças significativas na capacidade de troca catiônica, na retenção hídrica e na disponibilidade de nutrientes (Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012; Quesada et al., 2011). Essa sensibilidade a variações locais torna a análise da heterogeneidade espacial dos atributos do solo fundamental para compreender a dinâmica da fertilidade em ecossistemas tropicais.

A heterogeneidade espacial dos atributos do solo constitui um dos principais fatores que estruturam a dinâmica ecológica das florestas tropicais. Processos como redistribuição de serapilheira, atividade radicular, microtopografia e fluxos hidrológicos superficiais promovem a formação de mosaicos edáficos complexos em escalas relativamente pequenas, resultando em gradientes espaciais de fertilidade e disponibilidade de recursos. Esses gradientes influenciam o crescimento das árvores, a produtividade florestal e os fluxos de carbono e nutrientes nos ecossistemas (Anderegg et al., 2018; Sullivan et al., 2017). Dessa forma, a identificação e quantificação da variabilidade espacial dos atributos do solo são essenciais para compreender como a heterogeneidade edáfica se traduz em padrões ecológicos observáveis.

Nesse contexto, a geoestatística tem se consolidado como uma abordagem robusta para investigar a estrutura espacial de atributos ambientais. A análise de variogramas permite quantificar a dependência espacial das variáveis, enquanto métodos de interpolação, como a krigagem, possibilitam a geração de superfícies contínuas de distribuição espacial a partir de dados pontuais (Webster & Oliver, 2007). Essas ferramentas têm sido amplamente aplicadas na análise da variabilidade do solo em diferentes sistemas, contribuindo para a identificação de gradientes ambientais e para a

compreensão de processos ecológicos. No entanto, sua aplicação em castanhais naturais da Amazônia ainda é limitada, representando uma lacuna importante no conhecimento científico.

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é uma espécie arbórea de elevada relevância ecológica e socioeconômica, ocorrendo predominantemente em florestas de terra firme. Trata-se de uma espécie emergente, que pode ultrapassar 50 m de altura, desempenhando papel estrutural na floresta e contribuindo significativamente para a biomassa e o funcionamento dos ecossistemas (ter Steege et al., 2013). Além disso, a castanheira sustenta um dos principais sistemas extrativistas da Amazônia, com ampla importância econômica regional e internacional (Scoles & Gribel, 2021).

O desempenho ecológico da castanheira está diretamente relacionado às condições edáficas locais. Estudos indicam que fatores como disponibilidade hídrica, fertilidade do solo e estrutura do dossel influenciam o crescimento, a sobrevivência e a produtividade da espécie. A ciclagem de nutrientes em castanhais naturais depende fortemente da decomposição da serapilheira e da atividade biológica do solo, processos que regulam a liberação e redistribuição de nutrientes no sistema solo-planta (Batista et al., 2018; Scoles & Gribel, 2021). Nesse contexto, a variabilidade espacial dos atributos do solo pode influenciar simultaneamente a disponibilidade de água e nutrientes, condicionando o funcionamento ecofisiológico da espécie.

Além disso, a composição química das castanhas, incluindo teores de micronutrientes como selênio, está associada às características geoquímicas dos solos, evidenciando a conexão entre propriedades edáficas e qualidade nutricional do produto (Silva Junior et al., 2017; Gomes et al., 2024). Dessa forma, a heterogeneidade do solo não apenas influencia a produtividade, mas também o valor nutricional e comercial da castanha, reforçando a importância de compreender sua organização espacial.

Apesar da relevância da espécie, ainda existem lacunas significativas no entendimento de como a variabilidade espacial do solo influencia o funcionamento de castanhais naturais. A maioria dos estudos concentra-se em aspectos ecológicos ou produtivos da espécie, enquanto abordagens integradas que considerem a pedogeoquímica e a estrutura espacial da fertilidade do solo ainda são escassas (Silva et al., 2021). Essa lacuna é particularmente evidente na Amazônia setentrional, onde os solos apresentam características pedogenéticas específicas e a sazonalidade climática difere de outras regiões da bacia (Quesada et al., 2010; Marengo, 2005).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma área de ocorrência natural de castanheira-da-amazônia no estado de Roraima, utilizando ferramentas geoestatísticas para identificar padrões de dependência espacial e gradientes edáficos. Parte-se da hipótese de que a fertilidade do solo em castanhais naturais se organiza em mosaicos espacialmente estruturados, resultantes da interação entre processos

pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos. Espera-se que atributos associados à pedogênese, como fração argila e carbono, apresentem maior continuidade espacial, enquanto atributos químicos mais dinâmicos, como fósforo, exibam maior variabilidade em escala local.

Os resultados deste estudo contribuem para ampliar a compreensão da organização espacial da fertilidade do solo em castanhais amazônicos e fornecem subsídios para o manejo sustentável, conservação e modelagem ecológica desses sistemas. A identificação de gradientes espaciais de fertilidade pode auxiliar na interpretação do funcionamento ecofisiológico da castanheira e no delineamento de estratégias de amostragem e gestão que considerem explicitamente a heterogeneidade edáfica (Silva et al., 2021; Pfutz et al., 2022).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

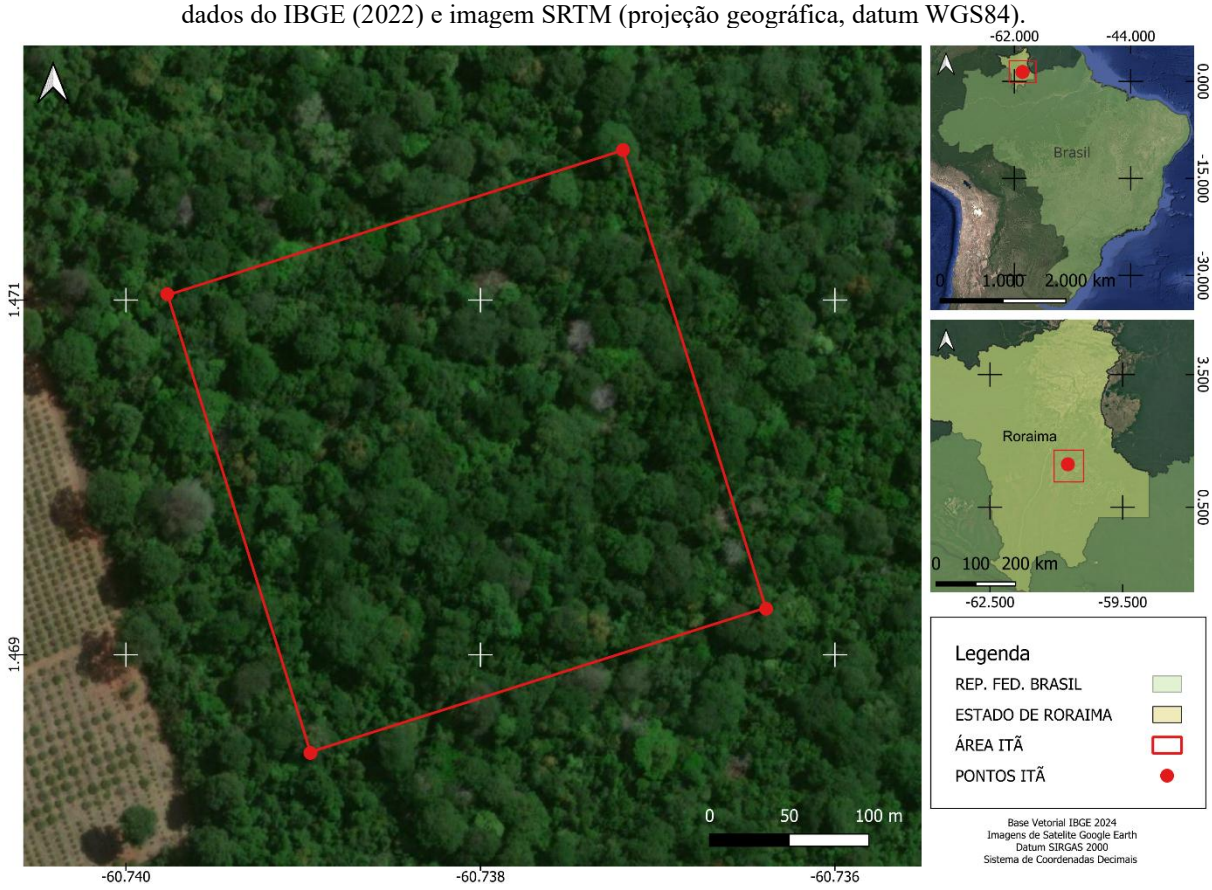
O estudo foi conduzido em uma área de ocorrência natural de castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) localizada no estado de Roraima, região norte da Amazônia brasileira. A área situa-se em ambiente de floresta de terra firme, caracterizado por dossel florestal fechado e presença de árvores emergentes, entre as quais se destaca a castanheira.

O clima regional é tropical úmido, com elevada precipitação anual e marcada sazonalidade pluviométrica, apresentando estação chuvosa predominante entre os meses de abril e setembro. As temperaturas médias anuais são elevadas e apresentam baixa variação ao longo do ano, características típicas de regiões equatoriais (Silva, 2018; Barni et al., 2020). A precipitação média anual na região situa-se entre 1.800 e 2.200 mm, com estação seca de curta duração (menos de três meses), fatores que influenciam diretamente os regimes hídrico e redox dos solos estudados, bem como a dinâmica de ciclagem de nutrientes (Silva et al., 2018; Villela & Proctor, 2006; Sanches et al., 2019).

Do ponto de vista pedológico, os solos da região são predominantemente altamente intemperizados, frequentemente classificados como Latossolos e Argissolos (Melo et al., 2006; Vale Junior et al., 2010). Esses solos apresentam elevada acidez, baixos teores de bases trocáveis e forte presença de óxidos de ferro e alumínio, fatores que influenciam a disponibilidade de nutrientes e a dinâmica da fertilidade do solo (Melo et al., 2006; Benedetti et al., 2011; Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012; Quesada et al., 2011). A geologia local é caracterizada por sedimentos da Formação Içá e rochas do Complexo Guianense, que contribuem para a formação de solos com textura variável e mineralogia dominada por caulinita e óxidos de ferro (Melo et al., 2006; Pereira, 2016).

A localização da área de estudo no contexto do estado de Roraima e da Amazônia brasileira é apresentada na Figura 1.

Figura 1 -- Localização geográfica da área de estudo no estado de Roraima, região norte da Amazônia brasileira. O mapa indica os limites estaduais, a área de estudo e os principais cursos d'água da região. Fonte: Autores, 2026, com base em dados do IBGE (2022) e imagem SRTM (projeção geográfica, datum WGS84).



Fonte: Autores, 2026.

2.2 AMOSTRAGEM DE 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 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 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 E Moyeed, 1998). Considerou-se tendência significativa quando os coeficientes da regressão apresentaram $p < 0,05$ e o coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 0,10. Nos casos em que a tendência foi detectada, optou-se pela modelagem com krigagem universal ou pela remoção da tendência por ajuste de superfície polinomial (Webster & Oliver, 2007).

2.5.2 Variograma experimental

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

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

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 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A caracterização dos atributos químicos e físicos do solo evidenciou variabilidade entre os pontos amostrados na área de estudo (Tabela 1).

Os coeficientes de variação apresentaram diferentes magnitudes entre os atributos analisados. O fósforo disponível e alguns micronutrientes apresentaram maiores valores de CV, enquanto a fração argila e a densidade do solo apresentaram menor dispersão relativa.

Os coeficientes de variação observados incluíram valores elevados para cálcio (160,4%), manganês (190,5%) e sódio (58,3%).

A saturação por alumínio apresentou valor médio de 67,97%, com variação entre 6,9% e 82,4%.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos atributos químicos e físicos do solo na área de castanheira-da-amazônia em Roraima. São apresentados número de observações (n), valores Mínimo e Máximo, Média, Mediana, Desvio Padrão (SD) e Coeficiente de Variação (CV).A classificação da variabilidade com base no CV segue os critérios de Warrick & Nielsen (1980): baixa (CV < 12%), moderada (12% ≤ CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%).

Atributo	n	Min	Max	Mean	Median	SD	CV
Al	59	0,21	1,36	0,92	0,95	0,22	23,66
H+Al	59	3,48	6,55	4,88	4,83	0,73	14,89
T (CTC pH7)	59	3,84	8,08	5,35	5,21	0,88	16,39
V%	59	4,24	35,08	8,41	7,17	5,01	59,53
m%	59	6,90	82,39	67,97	71,38	14,79	21,75
C	59	3,89	28,35	12,68	12,01	4,17	32,86
Argila	59	273,00	425,50	371,16	373,50	28,61	7,71
Densidade	51	1,35	1,58	1,49	1,49	0,06	4,13
P	59	2,86	8,17	4,53	4,52	0,99	21,72
Ca	59	0,03	1,82	0,16	0,09	0,25	160,36
Mg	59	0,10	0,92	0,21	0,18	0,14	69,23
K	59	17,00	56,00	32,05	31,00	8,49	26,50
Na	59	2,00	15,00	4,70	4,00	2,74	58,30
Fe	59	44,00	465,00	169,44	163,00	67,06	39,58
Mn	59	0,98	226,80	27,90	8,05	53,16	190,50
Cu	59	0,77	3,12	1,47	1,37	0,52	35,22
Se	60	222,95	867,91	643,43	723,89	182,23	28,32

Fonte: Autores, 2026.

3.2 ESTRUTURA DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise geoestatística indicou que a maioria dos atributos apresentou dependência espacial detectável, com ajuste predominante ao modelo variográfico esférico (Tabela 2).

Dos 10 atributos analisados: 6 apresentaram dependência forte; 4 apresentaram dependência moderada; e, 1 apresentou dependência fraca.

Tabela 2 -- Parâmetros dos modelos variográficos ajustados para atributos químicos e físicos do solo na área de castanheira-da-amazônia em Roraima. São apresentados o modelo ajustado, efeito pepita (C_0), componente estrutural (C_1), patamar (C_0+C_1), alcance (m), índice de dependência espacial (IDE %) e classe de dependência. O modelo esférico foi ajustado para todos os atributos. A classificação do IDE segue Cambardella et al. (1994): forte (≤ 25%), moderada (25-75%) e fraca (> 75%).

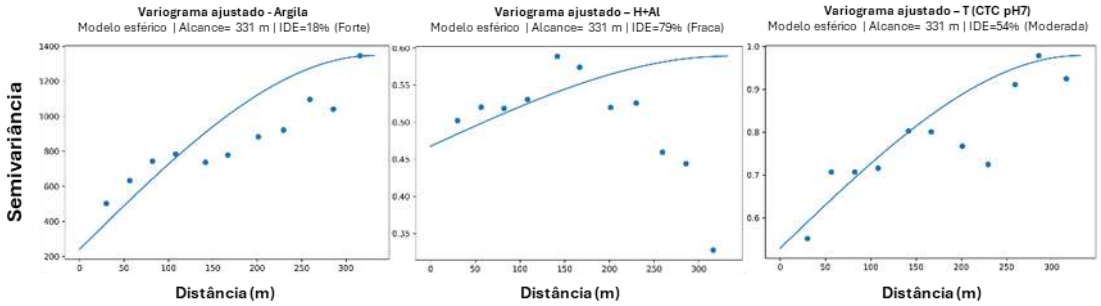
Atributo	Modelo	C0 (pepita)	C1 (estrut.)	Patamar (C0+C1)	Alcance (m)	IDE (%)	Classe IDE	n
Al	Spherical	0,0093	0,0655	0,0748	331,17	12,39	Forte	59
Argila	Spherical	241,3181	1105,1634	1346,4815	331,17	17,92	Forte	59
C	Spherical	3,412	27,4808	30,8927	331,17	11,04	Forte	59
Cu	Spherical	0,1051	0,2822	0,3872	331,17	27,13	Moderada	59
Densidade	Spherical	0,0022	0,0027	0,0049	311,9	45,18	Moderada	51
H+Al	Spherical	0,4676	0,1216	0,5891	331,17	79,37	Fraca	59
P	Spherical	0,763	0,3459	1,1089	331,17	68,81	Moderada	59
T (CTC pH7)	Spherical	0,5289	0,4496	0,9785	331,17	54,05	Moderada	59
V%	Spherical	0	69,7356	69,7356	331,17	0	Forte	59
m%	Spherical	0	487,3275	487,3275	331,17	0	Forte	59

Fonte: Autores, 2026.

A fração argila, o carbono do solo e o alumínio trocável apresentaram IDE de 12,4%, 17,9% e 11,0%, respectivamente. As saturações por bases (V%) e por alumínio (m%) apresentaram IDE igual a 0%. O fósforo disponível, a densidade do solo e a capacidade de troca catiônica potencial apresentaram IDE entre 45% e 69%. O cobre apresentou IDE de 27,1%. A acidez potencial (H+Al) apresentou dependência espacial fraca. Os alcances variográficos variaram entre aproximadamente 310 e 330 m.

A Figura 2 apresenta variogramas representativos para argila, H+Al e capacidade de troca catiônica potencial.

Figura 2. Variogramas experimentais e modelos ajustados para argila, acidez potencial (H+Al) e capacidade de troca catiônica potencial (T) na área de castanheira-da-amazônia em Ita2, Roraima. Cada painel apresenta a semivariância (γ) em função da distância (h). A linha tracejada horizontal indica o patamar do modelo ajustado. Os parâmetros dos modelos estão apresentados na Tabela 2.



Fonte: Autores, 2026.

3.3 TENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

O teste de tendência espacial indicou significância para alguns atributos (Tabela 3).

Foram observados valores de R^2 entre 0,10 e 0,32 para variáveis como: argila; alumínio trocável; carbono; e, cobre.

A densidade do solo não apresentou tendência significativa.

Os coeficientes βX e βY indicaram orientação predominante ao longo do eixo norte-sul.

Tabela 3 -- Resultados do teste de tendência espacial (drift) para atributos do solo na área de castanheira em Roraima. São apresentados os coeficientes de regressão associados às coordenadas espaciais (βX e βY), o coeficiente de determinação (R^2), o valor do teste F, o p-valor e a interpretação quanto à presença de tendência significativa ($p < 0,05$). Valores de $p < 0,05$ indicam tendência espacial significativa.

Atributo	n	βX	βY	R^2	F	p-valor	Tendência (p<0.05)
Al	59	0,0005	0,0012	0,2622	9,9522	0,0002	Sim
Argila	59	0,0347	0,1227	0,1402	4,5672	0,0145	Sim
C	59	-0,0154	-0,0025	0,1036	3,2359	0,0468	Sim
Cu	59	-0,0021	-0,0009	0,1431	4,6754	0,0133	Sim
Densidade	51	-0,0001	-0,0003	0,1046	2,8040	0,0705	Não
H+Al	59	-0,0008	0,0016	0,0446	1,3071	0,2787	Não
P	59	0,0006	-0,0002	0,0033	0,0926	0,9117	Não
T (CTC pH7)	59	-0,0020	-0,0002	0,0375	1,0899	0,3433	Não
V%	59	-0,0144	-0,0281	0,2788	10,8228	0,0001	Sim
m%	59	0,0464	0,0882	0,3188	13,1059	0,0000	Sim

Fonte: Autores, 2026.

3.4 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL POR KRIGAGEM

A interpolação espacial por krigagem ordinária foi realizada para atributos selecionados (Tabela 4).

Os mapas gerados evidenciaram variações espaciais para (Figura 3): fração argila; capacidade de troca catiônica; fósforo disponível.

A fração argila apresentou maior continuidade espacial. O fósforo disponível apresentou padrão mais heterogêneo.

A porção noroeste apresentou maiores teores de argila (> 400 g kg^{-1}), enquanto a porção sudeste apresentou menores valores (< 350 g kg^{-1}).

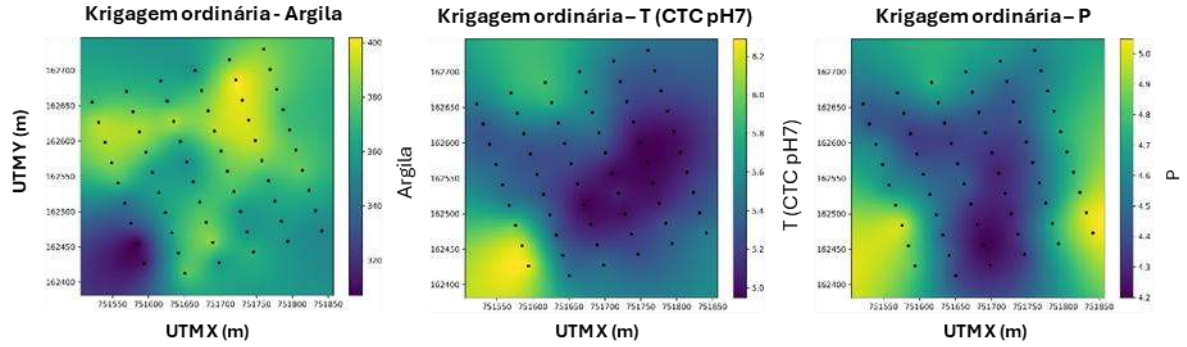
A variância de krigagem apresentou valores mais elevados nas bordas da área.

Tabela 4. Parâmetros dos modelos variográficos ajustados aos atributos químicos e físicos do solo na área de castanheira-da-amazônia localizada em Roraima. C0 = efeito pepita; C1 = componente estrutural; IDE = índice de dependência espacial. Os valores de IDE são apresentados em porcentagem para facilitar a comparação com a classificação de Cambardella et al. (1994).

Atributo	Modelo	Pepita (C0)	Estrutura (C1)	Patamar (C0+C1)	Alcance (m)	IDE (%)	Dependência espacial
Argila	Esférico	241,32	1105,16	1346,48	331	17,9	Forte
Al	Esférico	0,009	0,066	0,075	331	12,4	Forte
H+Al	Esférico	0,468	0,122	0,589	331	79,4	Fraca
T (CTC pH7)	Esférico	0,529	0,450	0,979	331	54,1	Moderada
V%	Esférico	0,000	69,736	69,736	331	0,0	Forte
m%	Esférico	0,000	487,327	487,327	331	0,0	Forte
C	Esférico	3,412	27,481	30,893	331	11,0	Forte
Densidade solo	Esférico	0,002	0,003	0,005	312	45,2	Moderada
P	Esférico	0,763	0,346	1,109	331	68,8	Moderada
Cu	Esférico	0,105	0,282	0,387	331	27,1	Moderada

Fonte: Autores, 2026.

Figura 3. Mapas de krigagem ordinária da fração argila, capacidade de troca catiônica potencial (T) e fósforo disponível na área de castanheira-da-amazônia localizada no estado de Roraima. A escala de cores representa os valores preditos para cada atributo, com tons mais quentes (vermelho/amarelo) indicando maiores concentrações e tons mais frios (azul/verde) indicando menores concentrações. Os pontos pretos representam as localizações amostrais. Observa-se maior continuidade espacial para a fração argila, com gradiente orientado NW-SE, enquanto T e P apresentam padrões mais heterogêneos, coerente com a classificação de dependência espacial apresentada na Tabela 2.



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 em Roraima:

1. Elevada estruturação espacial geral: A predominância de dependência forte (60% dos atributos) e a ausência de dependência fraca para a maioria das variáveis (exceto H+Al) indicam que a área de Roraima apresenta solos com elevada organização espacial, contrastando com padrões observados em outras regiões amazônicas (central e meridional), onde a micro-heterogeneidade é mais pronunciada.
2. Controle pedogenético dominante: Atributos associados à pedogênese (argila, Al, C, V%, m%) apresentaram forte dependência espacial e, em alguns casos, tendência significativa, indicando que processos de formação do solo atuam de forma estruturada na paisagem, gerando gradientes regionais detectáveis.
3. Escala consistente de variação: A notável uniformidade dos alcances (aproximadamente 330 m para a maioria dos atributos) sugere que os processos pedogenéticos e hidrológicos que controlam a distribuição espacial dos atributos operam em uma escala espacial consistente na área estudada, possivelmente associada à homogeneidade geomorfológica ou ao material de origem.
4. Compartimentalização funcional: Os mapas de krigagem revelaram a existência de compartimentos edáficos distintos, com zona noroeste apresentando maiores teores de argila, CTC e, consequentemente, maior capacidade potencial de retenção de água e nutrientes. Essa compartimentalização pode gerar microambientes diferenciados que influenciam o desempenho fisiológico das populações de castanheira.

5. Contrastes com outras regiões amazônicas: Em comparação com os resultados obtidos na Amazônia central (predomínio de dependência moderada) e meridional (dominância de micro-heterogeneidade), a área de Roraima destaca-se pela elevada estruturação espacial, sugerindo que fatores regionais (geologia, geomorfologia, clima) exercem forte controle sobre a organização dos atributos do solo em castanhais naturais.

Esses padrões têm implicações diretas para a compreensão da ecologia da castanheira na Amazônia setentrional, conforme discutido na seção seguinte.

4 DISCUSSÃO

4.1 ESTRUTURA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM CASTANHAIS AMAZÔNICOS

Os resultados evidenciam que a maioria dos atributos do solo apresentou estrutura de dependência espacial detectável, com predominância do modelo variográfico esférico, padrão amplamente reportado em estudos de solos tropicais e associado à atuação integrada de processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos em escalas espaciais intermediárias (Webster & Oliver, 2007; Dos Santos et al., 2023).

A elevada proporção de dependência espacial forte (60% dos atributos) observada neste estudo indica que a variabilidade edáfica na área de Roraima não ocorre de forma aleatória, mas é fortemente estruturada por controles pedogenéticos. Esse resultado contrasta com padrões descritos para outras regiões amazônicas, onde a dependência moderada ou fraca tende a predominar, sugerindo maior influência de processos locais e micro-heterogeneidade (Aquino et al., 2014; Oliveira et al., 2023).

A forte dependência espacial observada para atributos como fração argila, carbono do solo e alumínio trocável reforça a hipótese de controle estrutural associado à pedogênese, incluindo processos de intemperismo, redistribuição mineralógica e dinâmica da matéria orgânica (Batista et al., 2018). Esses atributos são classicamente considerados conservativos em ambientes tropicais altamente intemperizados, nos quais a mineralogia dominada por óxidos de Fe e Al exerce papel central na retenção de nutrientes e na organização da fertilidade do solo (Quesada et al., 2011).

Adicionalmente, a ocorrência de IDE igual a zero para V% e m% indica ausência de efeito pepita, sugerindo uma estrutura espacial altamente definida. Esse comportamento, considerado incomum em estudos de variabilidade do solo, indica forte coerência espacial e reforça a influência de fatores estruturais na organização desses atributos.

Em contraste, atributos como fósforo disponível, capacidade de troca catiônica e densidade do solo apresentaram dependência espacial moderada, refletindo a atuação simultânea de processos estruturais e dinâmicos. Em florestas tropicais, a redistribuição de nutrientes mediada pela serapilheira,

atividade radicular e microtopografia gera mosaicos edáficos complexos, com variabilidade em múltiplas escalas (Dos Santos et al., 2023; Batista et al., 2018).

A acidez potencial (H+Al), por sua vez, apresentou dependência fraca, indicando que parte significativa de sua variabilidade ocorre em escalas inferiores ao espaçamento amostral. Esse padrão sugere forte influência de microprocessos edáficos, como decomposição localizada de matéria orgânica e atividade microbiana (Doetterl et al., 2021; Baldrian et al., 2012).

Um dos achados mais relevantes deste estudo foi a notável uniformidade dos alcances variográficos (~330 m). Esse padrão sugere que os processos que estruturam a variabilidade do solo operam em uma escala espacial consistente, possivelmente associada à homogeneidade geomorfológica, ao material de origem ou à organização do sistema de drenagem local. Tal comportamento contrasta com a ampla variação de alcances reportada em outras regiões amazônicas (Aquino et al., 2014; Oliveira et al., 2023).

4.2 IMPLICAÇÕES DA HETEROGENEIDADE EDÁFICA PARA A ECOLOGIA DA CASTANHEIRA

A heterogeneidade espacial da fertilidade do solo identificada neste estudo possui implicações diretas para o funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia (Bertholletia excelsa). Em ambientes tropicais altamente intemperizados, a disponibilidade de recursos edáficos constitui um dos principais fatores limitantes ao crescimento e à produtividade das árvores (Quesada et al., 2010; Lloyd et al., 2015).

Os resultados demonstram que a fertilidade do solo não se distribui de forma homogênea, mas organiza-se em mosaicos edáficos intra-área, nos quais a disponibilidade de nutrientes e água pode variar significativamente em curtas distâncias. Esses mosaicos são resultantes da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos, incluindo redistribuição de serapilheira, atividade radicular e fluxos hídricos superficiais.

A compartimentalização espacial observada, especialmente a distinção entre a zona noroeste (maior teor de argila e CTC) e a zona sudeste (menores valores), sugere a existência de microambientes com diferentes capacidades de retenção hídrica e disponibilidade nutricional. Esse padrão é particularmente relevante para espécies emergentes como B. excelsa, que apresentam elevada demanda por recursos e dependem de extensos sistemas radiculares (Caetano Andrade et al., 2024; da Costa et al., 2022).

A associação entre textura do solo e capacidade de troca catiônica indica que áreas com maior teor de argila apresentam maior potencial de retenção de água e nutrientes, podendo atuar como zonas de maior estabilidade ecológica. Em contrapartida, áreas com menor teor de argila podem estar mais sujeitas a déficits hídricos e limitações nutricionais.

Além disso, a variabilidade espacial do fósforo disponível, com dependência moderada, indica a presença de microsítios de enriquecimento e empobrecimento nutricional, o que pode influenciar diretamente a produtividade da castanheira. O fósforo é reconhecidamente um dos principais fatores limitantes em solos tropicais (Quesada et al., 2011), e sua distribuição heterogênea pode resultar em respostas fisiológicas diferenciadas entre indivíduos.

A variabilidade de micronutrientes, especialmente selênio, também apresenta implicações relevantes, uma vez que sua concentração nos solos tem sido associada à qualidade nutricional das castanhas (Silva Junior et al., 2017; Gomes et al., 2024). Dessa forma, a heterogeneidade edáfica pode influenciar não apenas a produtividade, mas também o valor nutricional e comercial do produto.

4.3 ORGANIZAÇÃO ESPACIAL DA FERTILIDADE E CRESCIMENTO DE ÁRVORES TROPICAIS

A organização espacial da fertilidade do solo exerce influência direta sobre padrões de crescimento e dinâmica populacional de árvores tropicais. Em castanhais naturais, a disponibilidade heterogênea de recursos edáficos pode resultar em variações no crescimento radial, na produção de frutos e na sobrevivência de indivíduos (Staudhammer et al., 2021; da Costa et al., 2022).

Os resultados indicam que a escala de variação dos atributos do solo (~330 m) é compatível com a escala espacial de distribuição das árvores adultas em castanhais, sugerindo que os gradientes edáficos identificados podem atuar como fatores estruturantes da dinâmica populacional da espécie.

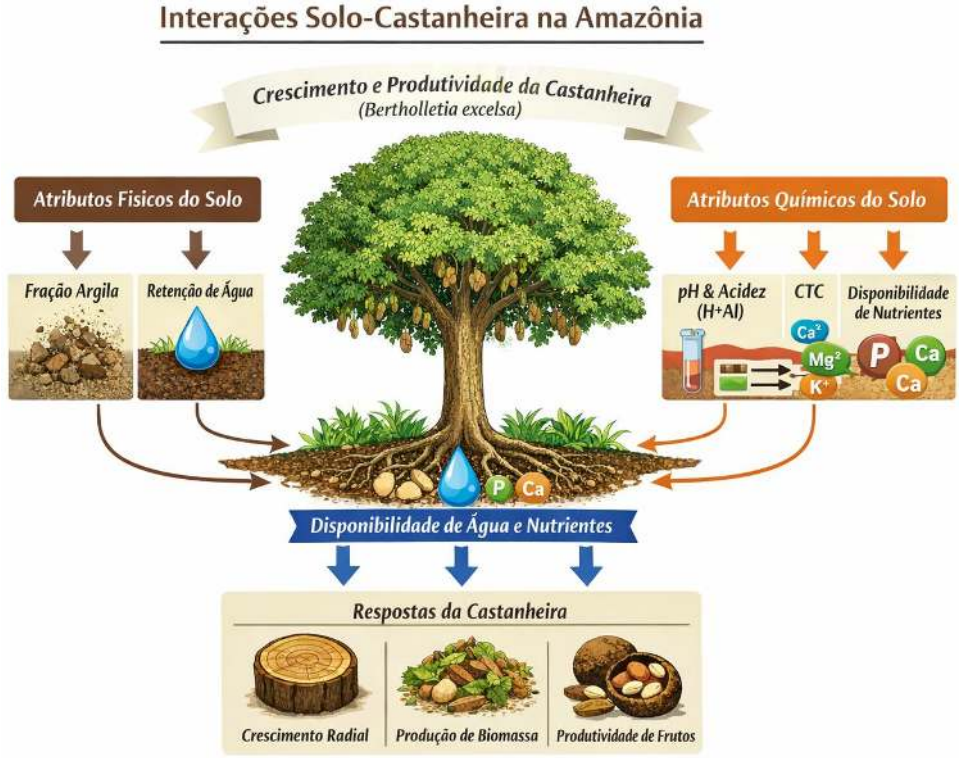
A presença de tendência espacial significativa para atributos como argila, carbono e alumínio trocável indica que parte da variabilidade do solo está associada a gradientes ambientais de média escala, possivelmente relacionados à topografia, hidrologia ou material de origem. Esses gradientes podem influenciar a distribuição espacial da castanheira e gerar padrões de crescimento diferenciados na paisagem.

A interação entre disponibilidade hídrica e fertilidade do solo é particularmente relevante nesse contexto. Em solos tropicais, a fração argilosa e a matéria orgânica atuam como principais reservatórios de água e nutrientes, influenciando diretamente o acesso radicular aos recursos edáficos (Stone et al., 2025; Costa et al., 2020).

Dessa forma, a heterogeneidade edáfica identificada pode resultar em microgradientes que modulam o desempenho fisiológico das árvores, influenciando processos como crescimento radial, acúmulo de biomassa e produção de frutos (Brienen et al., 2015; Schöngart et al., 2015).

A integração desses processos é sintetizada no modelo conceitual apresentado na Figura 4, que ilustra os mecanismos pelos quais a heterogeneidade edáfica estrutura a disponibilidade de recursos e influencia o desempenho ecofisiológico de Bertholletia excelsa.

Figura 4. Modelo conceitual ilustrando as interações entre atributos físicos e químicos do solo e suas implicações para o funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*). Gradientes espaciais de textura, acidez e capacidade de troca catiônica influenciam simultaneamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes no solo. Esses fatores modulam o acesso radicular a recursos edáficos e determinam respostas fisiológicas da espécie, incluindo crescimento radial, produção de biomassa e produtividade de frutos. O modelo sintetiza os principais mecanismos pelos quais a heterogeneidade edáfica pode estruturar o desempenho ecológico da castanheira em florestas tropicais amazônicas. 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 (setas mais espessas para atributos com dependência forte, setas mais finas para atributos com dependência moderada).



Fonte: Autores, 2026.

Gradientes de textura, acidez e capacidade de troca catiônica atuam como elementos estruturadores da disponibilidade simultânea de água e nutrientes no sistema solo-planta. Em solos tropicais altamente intemperizados, a fração argilosa e a matéria orgânica desempenham papel central na retenção hídrica e na adsorção de cátions trocáveis, influenciando diretamente a fertilidade do solo e a capacidade das raízes de acessar recursos essenciais (Stone et al., 2025; Costa et al, 2020). A forte dependência espacial da argila e do carbono em Roraima indica que esses atributos atuam como estruturadores primários do sistema edáfico, definindo a capacidade potencial de retenção de água e nutrientes em escala de centenas de metros.

Nesse contexto, a heterogeneidade edáfica identificada na área de estudo pode gerar mosaicos de disponibilidade de recursos que condicionam respostas fisiológicas da castanheira, incluindo crescimento radial, acúmulo de biomassa e produtividade de frutos. A organização espacial desses atributos sugere que o desempenho das árvores pode ser fortemente influenciado por microgradientes edáficos, reforçando a importância de considerar a estrutura espacial do solo na compreensão da dinâmica ecológica e produtiva de castanhais naturais na Amazônia (Staudhammer et al., 2021; Silva, 2022). A uniformidade dos alcances observada em Roraima simplifica o delineamento de estratos

amostrais para estudos futuros, uma vez que a escala de variação dos principais atributos é consistente (aproximadamente 330 m), permitindo o estabelecimento de parcelas ou transectos com espaçamento adequado para capturar a variabilidade relevante.

4.4 IMPLICAÇÕES PARA MANEJO E CONSERVAÇÃO DE CASTANHAIS

Os resultados reforçam a importância de incorporar a dimensão espacial da fertilidade do solo em estratégias de manejo e conservação de castanhais amazônicos. A elevada estruturação espacial observada em Roraima indica que a fertilidade do solo apresenta alto grau de previsibilidade espacial, permitindo a identificação de zonas com diferentes potenciais produtivos.

A utilização de técnicas geoestatísticas, como variogramas e krigagem, possibilita a geração de mapas contínuos da distribuição dos atributos do solo, os quais podem ser utilizados como ferramentas de suporte à tomada de decisão (Dos Santos et al., 2023).

Nesse contexto, a zona noroeste da área de estudo, caracterizada por maiores teores de argila e CTC, emerge como área prioritária para conservação, devido à sua maior capacidade de retenção de água e nutrientes. Essas áreas podem atuar como refúgios ecológicos, especialmente em cenários de intensificação de eventos climáticos extremos.

Por outro lado, áreas com menor fertilidade potencial podem demandar monitoramento mais intensivo ou estratégias de manejo adaptativo, visando garantir a sustentabilidade dos sistemas extrativistas.

A compreensão da escala de variabilidade (alcance variográfico) também possui implicações práticas, permitindo otimizar o delineamento amostral e melhorar a eficiência de programas de monitoramento ambiental.

4.5 INTEGRAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DO SOLO, DISPONIBILIDADE HÍDRICA E FUNCIONAMENTO FISIOLÓGICO DA CASTANHEIRA

A integração entre propriedades físicas e químicas do solo revela que a heterogeneidade edáfica atua como elemento estruturador da disponibilidade simultânea de água e nutrientes no sistema solo-planta.

Em solos altamente intemperizados, a fração argilosa e a matéria orgânica desempenham papel central na retenção hídrica e na adsorção de cátions trocáveis, influenciando diretamente a fertilidade do solo (Costa et al., 2020; Fujii et al., 2023).

Os gradientes espaciais de textura identificados neste estudo indicam que a capacidade de armazenamento de água no solo varia dentro da área, criando microambientes com diferentes níveis de disponibilidade hídrica (Anderegg et al., 2018; Turcios et al., 2016). Essa variabilidade pode ser

determinante para o desempenho fisiológico da castanheira, especialmente durante períodos de estresse hídrico.

A interação entre fertilidade e disponibilidade hídrica é particularmente relevante para espécies de grande porte, como Bertholletia excelsa, que apresentam elevada demanda por recursos e dependem de sistemas radiculares extensos para sua sustentação (Ivanov, 2011; Costa et al., 2017).

Nesse contexto, os mosaicos edáficos identificados podem gerar diferenças significativas no desempenho fisiológico das árvores, influenciando crescimento, produtividade e resiliência a estresses ambientais (Silva et al., 2021; Thomas et al., 2021).

A integração futura entre dados geoestatísticos e variáveis ecofisiológicas (como potencial hídrico foliar e crescimento radial) representa uma abordagem promissora para quantificar essas relações e avançar na compreensão dos mecanismos que conectam solo, planta e clima em ecossistemas tropicais.

4.6 NOVIDADE CIENTÍFICA

Os resultados deste estudo demonstram que a fertilidade do solo em castanhais amazônicos não é distribuída de forma homogênea, mas organizada em mosaicos edáficos espacialmente estruturados que emergem da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos (Costa et al., 2017; Melo et al., 2025). Ao integrar análises geoestatísticas com a interpretação pedogeoquímica do sistema solo-planta, este trabalho evidencia que gradientes espaciais de textura, acidez e capacidade de troca catiônica podem atuar como mecanismos estruturadores da disponibilidade simultânea de água e nutrientes para *Bertholletia excelsa* (Costa et al., 2017; Lopes, 2020). Essa abordagem permite avançar na compreensão de como a heterogeneidade edáfica influencia o funcionamento ecofisiológico e o crescimento de árvores emergentes na Amazônia. A principal contribuição científica deste estudo consiste em revelar que a Amazônia setentrional, representada pela área de Roraima, apresenta um padrão de organização espacial do solo distintamente diferente das demais regiões estudadas (central e meridional), caracterizado por: (i) elevada proporção de dependência forte; (ii) ausência de dependência fraca para a maioria dos atributos; (iii) notável uniformidade dos alcances variográficos; e (iv) forte controle pedogenético sobre a distribuição dos atributos (Lemos Filho et al., 2020).

A comparação inter-regional revela um gradiente de complexidade espacial na Amazônia:

- Amazônia setentrional (Roraima): elevada estruturação, dependência forte dominante, alcances uniformes (~330 m)
- Amazônia central (Amazonas): estrutura intermediária, predomínio de dependência moderada, alcances variáveis (30-800 m)
- Amazônia meridional (Mato Grosso): baixa estruturação, dominância de micro-heterogeneidade (87,5% de dependência fraca), alcances restritos (90-170 m)

Esse gradiente sugere que fatores regionais como geologia, geomorfologia, clima (especialmente sazonalidade hídrica) e histórico de perturbações atuam de forma diferenciada na estruturação espacial dos solos ao longo da bacia amazônica, com implicações diretas para a ecologia e o manejo da castanheira em cada região.

Assim, ao revelar a organização espacial da fertilidade do solo em castanhais naturais do norte da Amazônia, este estudo contribui para preencher uma lacuna importante na literatura sobre a interação entre propriedades do solo, disponibilidade de recursos e desempenho ecológico da castanheira-da-amazônia, fornecendo também bases científicas para estratégias de manejo e conservação desses sistemas florestais (Rodrigues, Batista & Pedrozo, 2015; Costa et al., 2017). A abordagem comparativa entre as três regiões permite avançar na compreensão de como a heterogeneidade edáfica em múltiplas escalas influencia a ecologia, a produtividade e a distribuição regional da castanheira, constituindo um arcabouço conceitual e metodológico para estudos futuros em outras regiões amazônicas e para outras espécies arbóreas de interesse ecológico e econômico (Staudhammer et al., 2021; Silva et al., 2021).

5 CONCLUSÕES

A análise geoestatística dos atributos físicos e químicos do solo em castanhal natural no estado de Roraima demonstrou que a fertilidade do solo apresenta estrutura espacial bem definida, com predominância de dependência espacial forte para atributos associados à pedogênese, como fração argila e carbono, e dependência moderada para variáveis diretamente relacionadas à fertilidade química, como fósforo disponível e capacidade de troca catiônica. Esse padrão indica a atuação integrada de processos de larga escala, relacionados à formação do solo, e de processos locais, associados à ciclagem biogeoquímica e à heterogeneidade ambiental.

A uniformidade dos alcances variográficos, em torno de 330 m para a maioria dos atributos, evidencia que os processos que controlam a variabilidade espacial do solo operam em uma escala consistente na área de estudo, refletindo forte controle pedogenético sobre a organização da fertilidade. Essa característica distingue a Amazônia setentrional de outras regiões da bacia, nas quais a variabilidade espacial tende a ser mais heterogênea e menos estruturada.

A interpolação por krigagem revelou a presença de mosaicos edáficos intra-área, indicando que a fertilidade do solo não se distribui de forma homogênea, mas em compartimentos espaciais com diferentes capacidades de retenção de água e nutrientes. Esses compartimentos, particularmente aqueles associados a maiores teores de argila e maior capacidade de troca catiônica, configuram ambientes potencialmente mais favoráveis ao desenvolvimento da castanheira-da-amazônia.

A integração entre atributos físicos e químicos do solo demonstra que gradientes espaciais de textura, acidez e capacidade de troca catiônica atuam como mecanismos estruturadores da

disponibilidade simultânea de água e nutrientes no sistema solo-planta. Dessa forma, a heterogeneidade edáfica pode influenciar diretamente o funcionamento ecofisiológico de *Bertholletia excelsa*, afetando processos como crescimento, acúmulo de biomassa e produtividade de frutos.

Em escala regional, os resultados evidenciam um gradiente de organização espacial da fertilidade do solo ao longo da Amazônia, no qual a região setentrional apresenta maior estruturação espacial, com predominância de dependência forte e alcances uniformes, em contraste com a Amazônia central e meridional. Esse padrão sugere que fatores como geologia, geomorfologia e regime climático exercem controle diferenciado sobre a organização dos atributos do solo na bacia amazônica.

Do ponto de vista aplicado, os resultados demonstram o potencial da geoestatística como ferramenta para compreender e mapear a variabilidade espacial da fertilidade do solo em castanhais naturais, fornecendo subsídios para o planejamento de amostragens, modelagem ecológica e estratégias de manejo e conservação. A incorporação da dimensão espacial da fertilidade do solo em estudos ecológicos e em práticas de manejo pode contribuir para aumentar a eficiência de sistemas extrativistas e para a conservação de populações naturais de castanheira.

Em síntese, este estudo demonstra que a fertilidade do solo em castanhais amazônicos é organizada em padrões espaciais estruturados e previsíveis, resultantes da interação entre processos pedogenéticos e biogeoquímicos, e que essa organização constitui um elemento fundamental para a compreensão da ecologia, da produtividade e da sustentabilidade de sistemas baseados em *Bertholletia excelsa* na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ-HERRERA, J. G.; JAIME-GUERRERO, M.; FERNÁNDEZ-PÉREZ, C. J. Spatial variability and geostatistical modeling of soil physical properties under *Eucalyptus globulus* plantations. Geomatics, v. 5, n. 3, 41, set. 2025. DOI: 10.3390/geomatics5030041.

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

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 2, p. 397-406, mar./abr. 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000200004.

BALDRIAN, P.; KOLAŘÍK, M.; ŠTURSOVÁ, M.; KOPECKÝ, J.; VALÁŠKOVÁ, V.; VĚTROVSKÝ, T. et al. Active and total microbial communities in forest soil are largely different and highly stratified during decomposition. The ISME Journal, v. 6, n. 2, p. 248-258, fev. 2012. DOI: 10.1038/ismej.2011.95.

BARBOSA, R. I. et al. Soil analysis data for forest islands dispersed on savannas of Roraima, northern Brazilian Amazonia. Mendeley Data, v. 3, 2019. DOI: 10.17632/gfw5ccbrsz.2.

Barni, P. E., Barbosa, R. I., Xaud, H. A. M., Xaud, M. R., & Fearnside, P. M. (2020). Precipitação no extremo norte da Amazônia: distribuição espacial no estado de Roraima, Brasil. *Sociedade & Natureza*, *32*, 420-436. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-52769.

BATISTA, A. H.; MELO, V. F.; BARBOSA, J. Z.; BARBEIRO, L.; GOMES, R.; DULTRA, M. T. M. Soil quality and reforestation of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) after laterite-type bauxite mining in the Brazilian Amazon forest. Ecological Engineering, v. 125, p. 111-118, dez. 2018. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.10.016.

BENEDETTI, U. G.; VALE JÚNIOR, J. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P. Gênese, química e mineralogia de solos derivados de sedimentos pliopleistocênicos e de rochas vulcânicas básicas em Roraima, Norte Amazônico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, n. 2, p. 299-312, mar./abr. 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200002.

BRIENEN, R. J. W.; PHILLIPS, O. L.; FELDPAUSCH, T. R.; GLOOR, E.; BAKER, T. R.; LLOYD, J. et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. Nature, v. 519, p. 344-348, mar. 2015. DOI: 10.1038/nature14283.

CAETANO ANDRADE, V. L.; CLEMENT, C. R.; HERRERA-RAMÍREZ, D. et al. Insights into growth, ring formation and maximum ages of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa*) using ^{14}C dating and tree-ring analysis. Radiocarbon, v. 66, n. 2, p. 306-325, abr. 2024. DOI: 10.1017/RDC.2024.39.

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

COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Soil attributes related with production of Brazil nut tree (Bertholletia excelsa). Floresta e Ambiente, v. 24, e20150042, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.004215.

DA COSTA, K. C. P.; CARVALHO GONÇALVES, J. F.; GONÇALVES, A. L. 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/s40725-022-00158-x.

DOETTERL, S.; ASIFIWE, R. K.; BAERT, G.; BAMBA, F.; BAUTERS, M.; BOECKX, P.; BUKOMBE, B.; CADISCH, G.; COOPER, M.; CIZUNGU, L. N.; HOYT, A.; KABASEKE, C.; KALBITZ, K.; KIDINDA, L.; MAIER, A.; MAINKA, M.; MAYROCK, J.; MUHINDO, D.; MUJINYA, B. B.; MUKOTANYI, S. M.; NABAHUNGU, L.; REICHENBACH, M.; REWALD, B.; SIX, J.; STEGMANN, A.; SUMMERAUER, L.; UNSELD, R.; VANLAUWE, B.; VAN OOST, K.; VERHEYEN, K.; VOGEL, C.; WILKEN, F.; FIENER, P. Organic matter cycling along geochemical, geomorphic, and disturbance gradients in forest and cropland of the African Tropics – project TropSOC database version 1.0. Earth System Science Data, v. 13, n. 9, p. 4133-4153, set. 2021. DOI: 10.5194/essd-13-4133-2021.

DOS SANTOS, C. R. C.; SOUSA, W. M.; SOUSA, G. G.; SOUZA, J. M. L.; OLIVEIRA, L. D. S.; OLIVEIRA, J. S.; SOUSA, D. M. M. Spatial variability of soil fertility under agroforestry system and native forest in eastern Amazonia, Brazil. Bioscience Journal, v. 39, e39015, 2023. DOI: 10.14393/BJ-v39n0a2023-62830.

FEITOSA, K. K. A.; VALE, J. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUSA, M. I. L.; NASCIMENTO, P. P. R. R. Relações solo-vegetação em "ilhas" florestais e savanas adjacentes, no nordeste de Roraima. Ciência Florestal, v. 26, n. 1, p. 135-146, jan./mar. 2016.

FERREIRA, M. D. C. C.; NETO, M. F. C.; MELO, A. C. G. R.; MONTERO, I. F.; CHAGAS, E. A.; FERRAZ, V. P. et al. Physical-chemical properties and chemical composition of Brazil nut oil, Bertholletia excelsa, from state of Roraima, Brazilian Amazon. Chemical Engineering Transactions, v. 75, p. 391-396, 2019. DOI: 10.3303/CET1975066.

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.

HOU, J.; FU, B. A new method for revealing spatial relationships between shrubs and soil resources in arid regions. CATENA, v. 183, 104187, dez. 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104187.

IVANOV, G. B. Influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de Bertholletia excelsa HBK. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

LEMOS FILHO, L. C. A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. Agropecuária Científica no Semiárido, v. 16, n. 4, p. 1-7, 2020. DOI: 10.18227/1982-8470ragro.v11i1.3413.

LLOYD, J.; DOMINGUES, T. F.; SCHRODT, F.; ISHIDA, F. Y.; FELDPAUSCH, T. R.; SAIZ, G.; QUESADA, C. A.; SCHWARZ, M.; TORELLO-RAVENTOS, M.; GILPIN, M.; MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; RATTER, J. A.; GRACE, J.; NARDOTO, G. B.; VEENENDAAL, E.; ARROYO, L.; VILLARROEL, D.; KILLEEN, T. J.; STEININGER, M.; PHILLIPS, O. L. Edaphic, structural and physiological contrasts across Amazon Basin forest–savanna ecotones suggest a role for potassium as a key modulator of tropical woody vegetation structure and function. Biogeosciences, v. 12, n. 21, p. 6529-6571, nov. 2015. DOI: 10.5194/bg-12-6529-2015.

LOPES, J. S. Ciclagem de nutrientes, características funcionais e crescimento de Bertholletia excelsa Bonpl. cultivada sob plantio puro submetido à calagem. 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2020.

MARENGO, J. A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin water budget. Climate Dynamics, v. 24, n. 1, p. 11-22, jan. 2005. DOI: 10.1007/s00382-004-0461-6.

MARTINS, K. G.; MARQUES, M. C.; SANTOS, E.; MARQUES, R. Effects of soil conditions on the diversity of tropical forests across a successional gradient. Forest Ecology and Management, v. 349, p. 4-11, ago. 2015. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.04.018.

MELO, V. F.; MATOS, C. H. L.; SCHAEFER, C. E. G.; UCHÔA, S. C. P.; MONTENEGRO, R. A.; IUIT, C. E. C. et al. Indigenous lands of Roraima and ecosystem services: pedology and land use, vegetation cover, total carbon stock, and water resources. Journal for Nature Conservation, v. 83, 127175, fev. 2025. DOI: 10.1016/j.jnc.2024.127175.

MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, L. E. F.; CHAGAS, A. C.; LEMOS JÚNIOR, J. B.; ANDRADE, R. P. Physical chemical and mineralogical characteristics of soils from the agricultural colony of Apiaú (Roraima, Amazonia), under different land uses and after burning. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, n. 6, p. 1039-1050, nov./dez. 2006.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C.; SANTOS, R. V.; ALMEIDA, R. G.; MARTINS, T. S.; SILVA, D. M. P. et al. Geostatistics and sample density of chemical attributes for soil under sugarcane and agroforestry in Humaitá-AM, Brazil. Journal of Sustainable Development, v. 16, n. 2, p. 79-91, 2023.

PAVANI-BIJU, B.; BORGES, J. G.; MARQUES, S.; TEODORO, A. C. Enhancing forest site classification in Northwest Portugal: a geostatistical approach employing cokriging. Sustainability, v. 16, n. 15, 6423, jul. 2024. DOI: 10.3390/su16156423.

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.

PEREIRA, L. F. Caracterização e reconstituição paleoambiental da formação Içá na Bacia do Rio Negro - AM. 2016. 155 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PFUTZ, I. F. P. Geostatistical modeling and remotely sensed data to improve dendrometric variables prediction in Tectona grandis L. f. stand. Kurú, v. 19, n. 45, p. 43-51, 2022. DOI: 10.18845/rfmk.v19i45.6327.

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.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; PATIÑO, S.; BAKER, T. R.; CZIMCZIK, C.; FYLLAS, N. M.; MARTINELLI, L.; NARDOTO, G. B.; SCHMERLER, J.; SANTOS, A. J. B.; HODNETT, M. G.; HERRERA, R.; LUIZÃO, F. J.; ARNETH, A.; LLOYD, G.; DEZZEO, N.; HILKE, I.; KUHLMANN, I.; RAESSLER, M.; BRAND, W. A.; GEILMANN, H.; MORAES FILHO, J. O.; CARVALHO, F. P.; ARAUJO FILHO, R. N.; CHAVES, J. E.; CRUZ JUNIOR, O. F.; PIMENTEL, T. P.; PAIVA, R. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. Biogeosciences, v. 7, n. 5, p. 1515-1541, maio 2010. DOI: 10.5194/bg-7-1515-2010.

RODRIGUES, L. S.; BATISTA, K. D.; PEDROZO, C. A. Correlações entre atributos químicos do solo e produção de castanheiras-do-brasil cultivadas em sistema agroflorestal em Roraima. In: SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA NO ESTADO DE RORAIMA, 10., 2015, Boa Vista. Resumos... Boa Vista: UERR, 2015. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1036447.

SANCHEZ, L.; MELO, V.; NUNES, T.; PORTALANZA, D.; DURIGON, A.; FARAH, S. Soil chemical indicators and nutrient cycling variations across sequential years of rice cultivation: a case study of floodplain conditions of the Amazon, Brazil. African Journal of Agricultural Research, v. 14, n. 32, p. 1499-1508, ago. 2019. DOI: 10.5897/AJAR2019.14215.

SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F.; WORBES, M.; PIEDADE, M. T. F. Age and growth patterns of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa Bonpl.) in Amazonia, Brazil. Biotropica, v. 47, n. 5, p. 550-558, set. 2015. DOI: 10.1111/btp.12243.

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. Growth and survival over ten years of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa) in Amazonian forest. Acta Amazonica, v. 51, n. 4, p. 313-321, out./dez. 2021. DOI: 10.1590/1809-4392202001462.

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

SILVA, C. S. et al. Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, Elaeis guineensis, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. Acta Amazonica, v. 48, n. 4, p. 280-289, out./dez. 2018. DOI: 10.1590/1809-4392201704423.

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, e0210001, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcs20210001.

SILVA, D. A. Caracterização temporal da temperatura do ar e sua relação com os elementos climáticos e eventos ENOS na cidade de Boa Vista – Roraima. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2018. Disponível em: http://repositorio.ufrr.br:8080/jspui/handle/prefix/196.

SILVA, D. M. S.; OLIVEIRA, S. S.; RIBEIRO, R. A. R.; COSTA, J. L. P.; REIS, J. S.; SALDANHA, E. C. M. Variabilidade espacial de alguns atributos químicos em áreas cultivadas com soja e arroz no estado de Roraima: contribuições da agricultura de precisão. Revista Agroecossistemas, v. 5, n. 2, p. 1-12, 2013.

SINGH, A. K.; SINGH, J. S. Plant community regulates soil multifunctionality in a tropical dry forest. Ecological Indicators, v. 95, n. Part 1, p. 953-963, dez. 2018. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.08.030.

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.

STONE, L. F.; CARVALHO, M. T. M.; SILVA, M. A. S.; CALIL, F. N.; SIQUEIRA, M. M. B.; MOURA, T. M. et al. Intrinsic soil properties shape water availability under changing land-use in contrasting soil textures. Soil Advances, v. 2, 100082, jun. 2025. DOI: 10.1016/j.soilad.2025.100082.

SULLIVAN, M. J.; TALBOT, J.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; QIE, L.; BEGNE, S. K. et al. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. Scientific Reports, v. 7, n. 1, 39102, jan. 2017. DOI: 10.1038/srep39102.

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.

TERRA, M. C. N. S.; SANTOS, R. M.; PRADO JÚNIOR, J. A. et al. Water availability drives gradients of tree diversity and structure. Journal of Plant Ecology, v. 11, n. 6, p. 803-814, nov. 2018. DOI: 10.1093/jpe/rty017.

THOMAS, E.; JANSEN, M.; CHIRIBOGA-ARROYO, F.; WADT, L. H. O.; CORVERA-GOMRINGER, R.; ATKINSON, R. J.; 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.

TURCIOS, M. M.; JARAMILLO, M. M.; VALE JÚNIOR, J. F.; FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Soil charcoal as long-term pyrogenic carbon storage in Amazonian seasonal forests. Global Change Biology, v. 22, n. 1, p. 190-197, jan. 2016. DOI: 10.1111/gcb.13049.

VALE JUNIOR, J. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). Solos sob savanas de Roraima: gênese, classificação e relações ambientais. Boa Vista: Gráfica Ioris, 2010. 219 p.

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.

VILLELA, D. M.; PROCTOR, J. Litterfall mass, chemistry, and nutrient retranslocation in a monodominant forest on Maracá Island, Roraima, Brazil. Biotropica, v. 31, n. 2, p. 198-211, jun. 1999. DOI: 10.1111/j.1744-7429.1999.tb00132.x.

VINHOTE, M. L. A. Conservação, manejo e segurança da castanha-do-brasil (Bertholletia excelsa): um segmento para o desenvolvimento sustentável da Amazônia. 2023. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023. Disponível em: https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/11153.

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.