RGe ISSN: 2177-3246

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DA FERTILIDADE DO SOLO EM CINCO ÁREAS COM OCORRÊNCIA DE CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA NO AMAZONAS

GEOSTATISTICAL MODELING OF SOIL FERTILITY IN FIVE AREAS WITH OCCURRENCE OF BRAZIL NUT TREES IN AMAZONAS

MODELIZACIÓN GEOESTADÍSTICA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN CINCO ÁREAS CON PRESENCIA DE CASTAÑOS DE BRASIL EN LA AMAZONÍA

10.56238/revgeov17n5-043

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

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

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

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

RESUMO
A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é uma espécie de elevada relevância ecológica e socioeconômica, cuja ocorrência está associada a solos altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural. Compreender a organização espacial dos atributos do solo em áreas naturais com ocorrência da espécie é fundamental para elucidar os controles edáficos sobre o desempenho ecofisiológico da espécie. Neste estudo, objetivou-se caracterizar a estrutura espacial dos atributos químicos e físicos do solo em cinco áreas naturais com ocorrência de castanheira-da-amazônia no estado do Amazonas, por meio de modelagem geoestatística e interpolação espacial por krigagem. Foram analisados atributos integradores da fertilidade, incluindo alumínio (Al^{3+}), acidez potencial

ISSN: 2177-3246

(H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC a pH 7), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), carbono, textura e densidade do solo. A dependência espacial foi avaliada por meio de variogramas e classificada com base no índice de dependência espacial (IDE). Observou-se predominância de dependência moderada na maioria das áreas, maior proporção de dependência forte em Anori e predominância de dependência fraca em Ceará/Manicoré, indicando diferentes níveis de organização espacial da fertilidade. Os mapas de krigagem evidenciaram a formação de mosaicos edáficos que condicionam a distribuição de água e nutrientes em escala intraárea. Esses padrões sugerem que a variabilidade espacial do solo influencia diretamente a disponibilidade de recursos, com implicações para o funcionamento ecofisiológico, o crescimento e a produtividade da espécie. Conclui-se que a heterogeneidade edáfica constitui componente funcional dos ecossistemas amazônicos, devendo ser considerada em estudos ecológicos e estratégias de manejo sustentável da castanheira.

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

ABSTRACT

The Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) is a species of high ecological and socioeconomic importance, typically associated with highly weathered and nutrient-poor tropical soils. Understanding the spatial organization of soil attributes in natural stands is essential to elucidate the edaphic controls on its ecophysiological performance. This study aimed to characterize the spatial structure of soil chemical and physical attributes in five natural areas with occurrence of Brazil nut trees in the Amazonas state, using geostatistical modeling and kriging interpolation. Key soil fertility indicators were analyzed, including exchangeable aluminum (Al^{3+}), potential acidity (H+Al), cation exchange capacity (CEC at pH 7), base saturation (V%), aluminum saturation (m%), soil carbon, texture, and bulk density. Spatial dependence was assessed using variograms and classified based on the spatial dependence index (SDI). A predominance of moderate spatial dependence was observed across most areas, with a higher proportion of strong dependence in Anori and weak dependence in Ceará/Manicoré, indicating distinct levels of spatial organization of soil fertility. Kriging maps revealed the presence of edaphic mosaics that control the distribution of water and nutrients at the intra-area scale. These patterns suggest that soil spatial variability directly influences resource availability, with implications for ecophysiological functioning, growth, and productivity of the species. We conclude that edaphic heterogeneity is a functional component of Amazonian ecosystems and should be explicitly considered in ecological studies and sustainable management strategies for Brazil nut stands.

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

RESUMEN

El árbol de nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) es una especie de gran relevancia ecológica y socioeconómica, cuya presencia se asocia a suelos altamente meteorizados de baja fertilidad natural. Comprender la organización espacial de los atributos del suelo en áreas naturales donde se encuentra la especie es fundamental para dilucidar los controles edáficos sobre el desempeño ecofisiológico de la especie. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar la estructura espacial de los atributos químicos y físicos del suelo en cinco áreas naturales donde se encuentra el árbol de nuez de Brasil en el estado de Amazonas, utilizando modelado geoestadístico e interpolación espacial por kriging. Se analizaron atributos de fertilidad integrales, incluyendo aluminio (Al^{3+}), acidez potencial (H+Al), capacidad de intercambio catiónico (CIC a pH 7), saturación de bases (V%), saturación de aluminio (m%), carbono, textura y densidad del suelo. La dependencia espacial se evaluó utilizando variogramas y se clasificó con base en el índice de dependencia espacial (IDE). Se observó una dependencia moderada en la mayoría de las áreas, con una mayor proporción de dependencia fuerte en Anori y un predominio de

ISSN: 2177-3246

dependencia débil en Ceará/Manicoré, lo que indica diferentes niveles de organización espacial de la fertilidad. Los mapas de Kriging mostraron la formación de mosaicos edáficos que condicionan la distribución de agua y nutrientes a escala intrarregional. Estos patrones sugieren que la variabilidad espacial del suelo influye directamente en la disponibilidad de recursos, con implicaciones para el funcionamiento ecofisiológico, el crecimiento y la productividad de las especies. Se concluye que la heterogeneidad edáfica constituye un componente funcional de los ecosistemas amazónicos y debe considerarse en estudios ecológicos y estrategias de manejo sostenible para el castaño de Brasil.

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

1 INTRODUÇÃO

A Região Amazônica, reconhecida por sua elevada biodiversidade e complexidade ecossistêmica, é dominada por solos geologicamente antigos e intensamente intemperizados. Apesar da exuberância da vegetação, esses solos são caracterizados por elevada acidez, baixa saturação por bases (V%) e altos teores de alumínio trocável (Al^{3+}), fatores que limitam a disponibilidade de nutrientes e condicionam o funcionamento dos ecossistemas tropicais (Qafoku, 2015; Marques et al., 2015).

Em ambientes tropicais, a fertilidade do solo apresenta forte dependência da dinâmica da matéria orgânica e da interação entre frações minerais e compostos orgânicos. A capacidade de troca catiônica e a retenção de nutrientes são frequentemente controladas por superfícies reativas associadas a óxidos de ferro e alumínio e à fração argilosa, além de complexos organominerais estáveis que regulam a disponibilidade de elementos essenciais para as plantas (Qafoku, 2015; Araujo, Zinn & Lal, 2017). Esses sistemas são dominados por cargas variáveis, nas quais a química de superfície exerce papel central na adsorção e liberação de nutrientes. Como consequência, a fertilidade não se distribui de forma homogênea, organizando-se em mosaicos espaciais condicionados por processos pedogenéticos, geomorfológicos e hidrológicos que atuam em diferentes escalas da paisagem.

Essa heterogeneidade dos atributos do solo possui implicações diretas para a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas florestais tropicais. Gradientes edáficos podem influenciar simultaneamente a disponibilidade de água, a dinâmica de nutrientes e a atividade microbiana, condicionando padrões de crescimento, regeneração e distribuição de espécies arbóreas (van Breugel et al., 2019; Boisseaux et al., 2025). Assim, compreender a organização espacial da fertilidade em florestas amazônicas representa um passo fundamental para interpretar processos ecológicos e biogeoquímicos que sustentam a produtividade desses ecossistemas.

Entre as espécies arbóreas emblemáticas da Amazônia destaca-se a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), espécie de grande porte e elevada importância ecológica, econômica e sociocultural. A castanheira constitui elemento estrutural relevante de muitas florestas amazônicas e sustenta uma das principais cadeias produtivas extrativistas da região, baseada na coleta de castanha-do-brasil (Peres et al., 2016; Guariguata et al., 2017).

Além disso, a espécie apresenta características ecofisiológicas que refletem forte dependência das condições edáficas e hidrológicas locais, incluindo elevada demanda hídrica, sistema radicular profundo e sensibilidade a variações na disponibilidade de nutrientes (Schimpl et al., 2019; Oliveira et al., 2024). Essas características tornam a espécie particularmente sensível à distribuição espacial dos recursos edáficos, uma vez que a disponibilidade de água e nutrientes em mosaicos no solo pode influenciar diretamente a arquitetura radicular, o status hídrico e a alocação de biomassa entre indivíduos ao longo da paisagem.

Estudos recentes têm demonstrado que fatores edáficos exercem influência significativa sobre o crescimento, a regeneração e a produtividade da castanheira-da-amazônia. Em particular, atributos relacionados à textura do solo, à disponibilidade de fósforo e à capacidade de troca catiônica podem modular a aquisição de recursos pelas plantas e influenciar processos fisiológicos associados ao balanço carbono–água (Schimpl et al., 2019; Corrêa et al., 2022).

Entretanto, grande parte desses estudos baseia-se em análises pontuais ou em comparações entre áreas, havendo ainda escassez de investigações que considerem explicitamente a estrutura espacial da fertilidade do solo em escala intraárea em ambientes naturais com ocorrência da espécie. Essa lacuna limita a compreensão de como a variação local de recursos edáficos influencia a dinâmica populacional, a variabilidade no crescimento individual e a resiliência da espécie a estresses sazonais e eventos climáticos extremos (Silva, 2022; de Souza et al., 2023).

A análise da variabilidade espacial do solo por meio de ferramentas geoestatísticas tem se consolidado como abordagem robusta para compreender padrões edáficos em diferentes ecossistemas. A geoestatística permite quantificar a dependência espacial dos atributos do solo, identificar escalas de organização do sistema solo-paisagem e gerar superfícies contínuas por meio de técnicas de interpolação, como a krigagem (Samuel-Rosa et al., 2015; de Caires et al., 2025). Essas abordagens possibilitam revelar mosaicos edáficos que frequentemente permanecem ocultos em análises convencionais baseadas apenas em estatísticas descritivas.

Apesar do avanço recente em técnicas de mapeamento digital do solo e análise espacial, a aplicação sistemática de abordagens geoestatísticas para investigar a estrutura espacial da fertilidade em áreas naturais de castanheira na Amazônia ainda permanece limitada. Essa lacuna é particularmente relevante porque a organização espacial dos atributos do solo pode influenciar diretamente a disponibilidade de recursos para as árvores, modulando processos ecofisiológicos, padrões de crescimento radial e dinâmica populacional da espécie (Scoles & Grubel, 2021; Costa et al., 2017).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar a estrutura espacial de atributos químicos e físicos do solo em cinco áreas naturais com ocorrência de castanheira-da-amazônia no estado do Amazonas, utilizando ferramentas geoestatísticas e interpolação espacial por krigagem. Especificamente, buscou-se: (i) quantificar a dependência espacial de atributos edáficos integradores da fertilidade; (ii) identificar padrões espaciais intra-área por meio de variogramas e mapas de krigagem; e (iii) avaliar como os padrões espaciais identificados podem influenciar processos ecofisiológicos chave, como a disponibilidade hídrica e a absorção de nutrientes, discutindo suas implicações para o crescimento e a produtividade da espécie.

Parte-se da hipótese de que a fertilidade do solo apresenta graus variáveis de organização espacial entre as cinco áreas, refletindo controles pedogenéticos e hidrológicos locais. Espera-se que áreas com maior continuidade espacial (dependência forte/moderada) apresentem maior

previsibilidade na distribuição de recursos, com implicações distintas para o funcionamento ecofisiológico da castanheira em comparação com áreas de alta micro-heterogeneidade (dependência fraca). Consequentemente, tais padrões podem modular o desempenho da espécie e contribuir para explicar variações locais de crescimento e produtividade.

Além de contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre a interação entre solo e vegetação em ecossistemas amazônicos, os resultados deste estudo possuem relevância prática para pesquisadores, gestores ambientais e comunidades extrativistas. A compreensão da variabilidade espacial da fertilidade pode auxiliar no planejamento de monitoramento ecológico, na identificação de áreas potencialmente mais favoráveis ao desenvolvimento da castanheira e no aprimoramento de estratégias de manejo sustentável de castanhais naturais.

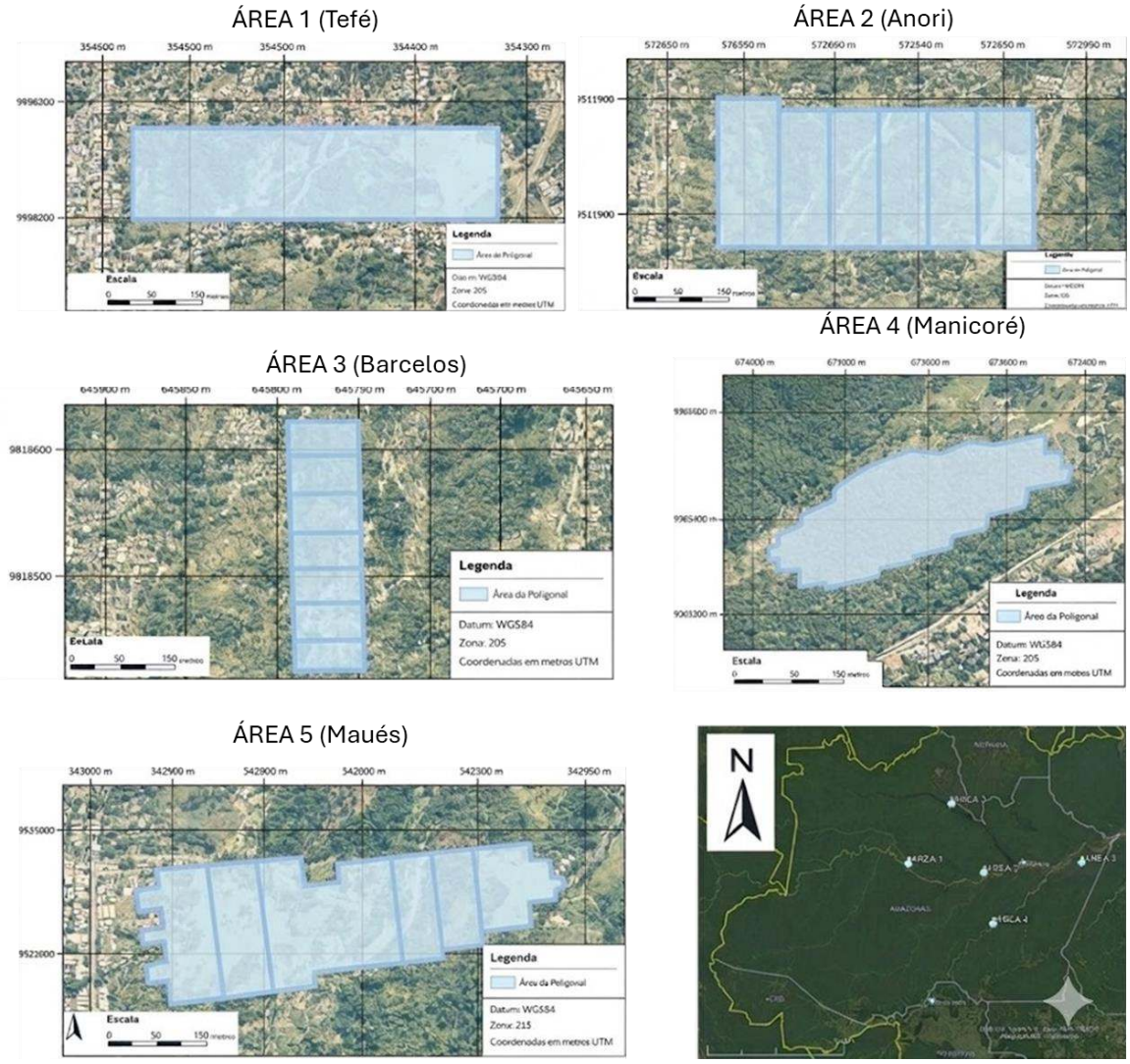
Ao integrar a geoestatística multivariada com a pedogeoquímica, este estudo oferece uma nova perspectiva sobre a heterogeneidade edáfica em castanhais nativos, fornecendo uma base espacialmente explícita para futuras investigações ecofisiológicas e para o manejo sustentável da espécie.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREAS DE ESTUDO

As cinco áreas avaliadas localizam-se nos municípios de Tefé, Anori (RDSPiagaçu-Purus), Barcelos (Resex Unini), Manicoré e Maués (FLONA Pau-Rosa), Amazonas, Brasil (Figura 1). Abrangem diferentes contextos geomorfológicos e hidrológicos associados à ocorrência natural da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.).

Figura 1 – Mapa de localização das cinco áreas de castanheiras-da-amazônia no estado do Amazonas, Brasil.



Fonte: Autores, 2026.

Os solos da região são altamente intemperizados, com predomínio de Latossolos e Argissolos (Mantovani & Bueno, 2024; Teixeira et al., 2010), caracterizados por baixa atividade da fração argilosa, elevada acidez e forte influência de óxidos de Fe e Al, condições típicas da Amazônia central (Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012; Quesada et al., 2011).

O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Am (tropical úmido) ou Af (tropical chuvoso), com precipitação média anual variando entre 2.200 mm e 2.800 mm e estação seca de curta duração (menos de três meses), características que influenciam diretamente os regimes hídrico e redox dos solos estudados (ALVARES et al., 2013).

2.2 DELINEAMENTO AMOSTRAL E ANÁLISES LABORATORIAIS

Em cada área foi estabelecida malha amostral georreferenciada em sistema UTM (zona 20S), com densidade suficiente para capturar a variabilidade espacial intraárea. A definição da malha

considerou recomendações para estudos geoestatísticos em ambientes tropicais, priorizando espaçamento inferior ao alcance esperado dos variogramas (Pyrcz & Deutsch, 2014).

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 número total de pontos amostrais por área foi: Tefé (n = 72), RDS Piagaçu/Anori (n = 68), Resex Unini/Barcelos (n = 65), Ceará/Manicoré (n = 60) e FLONA Pau-Rosa/Maués (n = 70).

Para os atributos químicos determinados e os calculados 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).

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR

Inicialmente foram realizadas análises descritivas (média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose). A normalidade foi avaliada por inspeção gráfica e coeficiente de assimetria. Quando |assimetria| > 1, aplicou-se transformação logarítmica (log1p) que é particularmente útil para acomodar valores zero, comuns em atributos como fósforo e micronutrientes em solos amazônicos, conforme recomendado para estabilização de variância em dados ambientais espacialmente estruturados (Webster & Oliver, 2007).

2.4 PROCEDIMENTOS GEOESTATÍSTICOS

2.4.1 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).

2.4.2 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.

2.4.3 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):

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

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

2.4.4 Validação cruzada

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

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

2.5 CONSOLIDAÇÃO COMPARATIVA INTER-ÁREAS

Para assegurar comparabilidade estrutural entre áreas, foram padronizados: Modelo teórico (esférico), Número de classes de distância, Critérios de transformação e Classificação do IDE.

A análise comparativa seguiu abordagem recomendada para estudos multissítio em solos tropicais, permitindo interpretação integrada dos padrões espaciais (Rossel et al., 2016; Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012). Embora os procedimentos tenham sido padronizados, a interpretação dos resultados considerou as particularidades de cada área, como escala da paisagem, heterogeneidade geomorfológica e densidade amostral, evitando comparações mecânicas e assegurando relevância ecológica às inferências.

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).

3 RESULTADOS

3.1 ESTRUTURA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO NAS CINCO ÁREAS COM CASTANHEIRA

A análise geoestatística revelou contrastes na organização espacial dos atributos edáficos entre as cinco áreas avaliadas (Tabela 1). Observou-se predominância de dependência espacial moderada em três áreas: Resex Unini/Barcelos (76% dos atributos analisados), FLONA Pau-Rosa/Maués (76%) e Tefé (59%). A RDS Piagaçu/Anori apresentou a maior proporção de dependência forte (41%). Ceará/Manicoré concentrou 75% dos atributos com dependência fraca.

Os alcances estimados variaram entre aproximadamente 30 m e 800 m. Áreas com maior proporção de dependência forte ou moderada apresentaram alcances médios superiores a 150 m, enquanto áreas com dependência fraca apresentaram alcances mais curtos ou variabilidade concentrada nas primeiras classes de distância.

A distribuição percentual das classes de dependência espacial entre as áreas é apresentada na Figura 2.

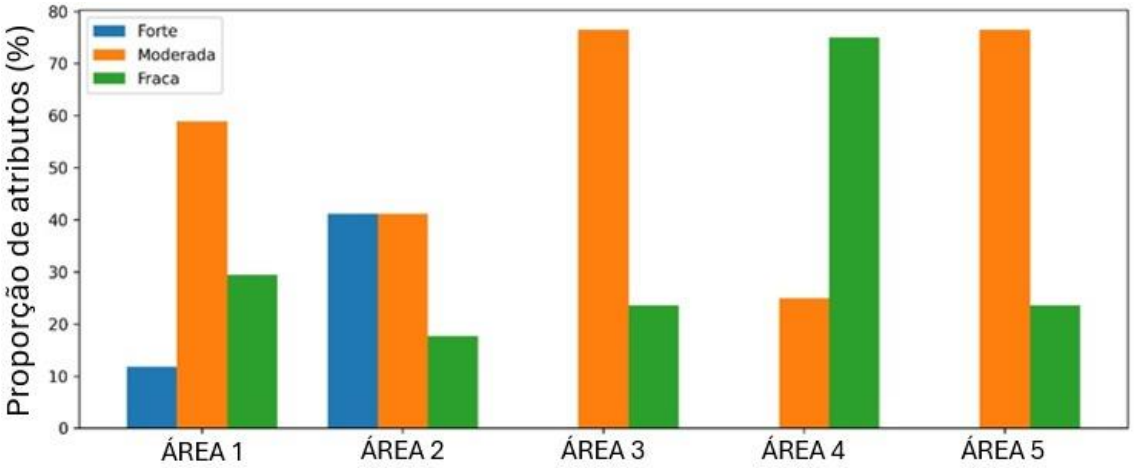
Tabela 1 – Índice de dependência espacial (IDE), classe de dependência e alcance (m) dos atributos edáficos selecionados nas cinco áreas com ocorrência de castanheira-da-amazônia no estado do Amazonas, obtidos a partir do ajuste dos modelos de variograma. Os valores de IDE e alcance foram obtidos por ajuste do modelo esférico com validação cruzada 5-fold. A transformação logarítmica (log1p) está indicada quando aplicada. A classificação da dependência segue Cambardella et al. (1994): forte (IDE ≤ 0,25), moderada (0,25 < IDE ≤ 0,75) e fraca (IDE > 0,75).

Atributos	ÁREA 1 Tefé	ÁREA 2 RDS Piagaçu/ Anori	ÁREA 3 Resex Unini/ Barcelos	ÁREA 4 Ceará/ Manicoré	ÁREA 5 FLONA Pau-Rosa/Maués
pH	—	0.41 (Moderada) 796 m	0.98 (Fraca) 30 m	0.94 (Fraca) 108 m	0.61 (Moderada) 173 m [log]
Al	0.14 (Forte) 733 m	0.22 (Forte) 269 m	0.46 (Moderada) 156 m	0.59 (Moderada) 108 m	0.62 (Moderada) 173 m [log]
H+Al	1.00 (Fraca) 125 m	0.16 (Forte) 278 m	0.76 (Fraca) 82 m	0.90 (Fraca) 108 m	0.61 (Moderada) 173 m [log]
T	1.00 (Fraca) 126m	0.19 (Forte) 365 m	0.53 (Moderada) 156 m	0.61 (Moderada) 108 m	0.62 (Moderada) 173 m [log]
V%	0.41 (Moderada) 809m	0.27 (Moderada) 96 m [log]	0.71 (Moderada) 183 m [log]	1.00 (Fraca) 30 m [log]	0.75 (Moderada) 173 m
m%	0.37 (Moderada) 795 m	0.75 (Moderada) 122 m [log]	0.58 (Moderada) 183 m [log]	1.00 (Fraca) 30 m [log]	0.60 (Moderada) 173 m [log]
C	1.00 (Fraca) 122 m [log]	0.46 (Moderada) 122 m [log]	0.57 (Moderada) 82 m	1.00 (Fraca) 30 m	0.63 (Moderada) 173 m [log]
Argila	0.04 (Forte) 46 m	0.08 (Forte) 812 m	0.34 (Moderada) 132 m	—	0.60 (Moderada) 173 m [log]
Densidade	0.43 (Moderada) 122 m	—	0.65 (Moderada) 57 m	0.96 (Fraca) 30 m	0.60 (Moderada) 173 m [log]

P	0.78 (Fraca) 122 m [log]	1.00 (Fraca) 122 m [log]	0.47 (Moderada) 132 m [log]	0.90 (Fraca) 82 m	0.69 (Moderada) 201 m
Ca	1.00 (Fraca) 121 m	1.00 (Fraca) 122 m [log]	0.57 (Moderada) 183 m [log]	1.00 (Fraca) 30 m [log]	0.87 (Fraca) 173 m
Mg	0.66 (Moderada) 121 m	0.48 (Moderada) 122 m [log]	1.00 (Fraca) 30 m [log]	1.00 (Fraca) 30 m	0.80 (Fraca) 173 m [log]
K	0.74 (Moderada) 99 m	0.09 (Forte) 812 m [log]	0.77 (Fraca) 183 m [log]	1.00 (Fraca) 30 m [log]	0.91 (Fraca) 201 m
Na	0.34 (Moderada) 809 m	0.14 (Forte) 812 m	0.73 (Moderada) 82 m [log]	0.71 (Moderada) 82 m [log]	0.75 (Moderada) 173 m [log]
Fe	0.56 (Moderada) 170 m	0.71 (Moderada) 30 m	0.64 (Moderada) 108 m	0.82 (Fraca) 108 m	0.60 (Moderada) 173 m [log]
Mn	0.51 (Moderada) 121 m	0.31 (Moderada) 57 m [log]	0.64 (Moderada) 108 m [log]	0.86 (Fraca) 57 m	0.90 (Fraca) 173 m [log]
Cu	0.47 (Moderada) 121 m [log]	0.83 (Fraca) 122 m [log]	0.50 (Moderada) 156 m	0.72 (Moderada) 156 m [log]	0.73 (Moderada) 173 m
Se	0.32 (Moderada) 809 m [log]	0.11 (Forte) 15 m	—	—	—

Fonte: Autores, 2026.

Figura 2 – Distribuição percentual das classes de dependência espacial (forte, moderada e fraca) dos atributos edáficos avaliados nas cinco áreas com ocorrência de castanheira-da-amazônia no estado do Amazonas.



Fonte: Autores, 2026.

3.2 ATRIBUTOS INTEGRADORES DA FERTILIDADE TROPICAL E PROPRIEDADES FÍSICAS

Entre os atributos integradores da fertilidade (Al, H+Al, T/CTC pH7, V%, m%, C, argila e densidade), verificou-se variação entre as áreas.

Em Tefé, a fração argila apresentou dependência espacial forte (IDE < 0,25), enquanto H+Al e T apresentaram IDE próximo de 1,0.

Na RDS Piagaçu/Anori, atributos como Al, H+Al e T apresentaram dependência forte (IDE entre 0,16 e 0,22), com alcances entre 270 m e 365 m.

Nas áreas Resex Unini/Barcelos e FLONA Pau-Rosa/Maués, predominou dependência moderada (IDE entre 0,4 e 0,7), com alcances entre 150 m e 180 m.

Em Ceará/Manicoré, a maioria desses atributos apresentou IDE superior a 0,75.

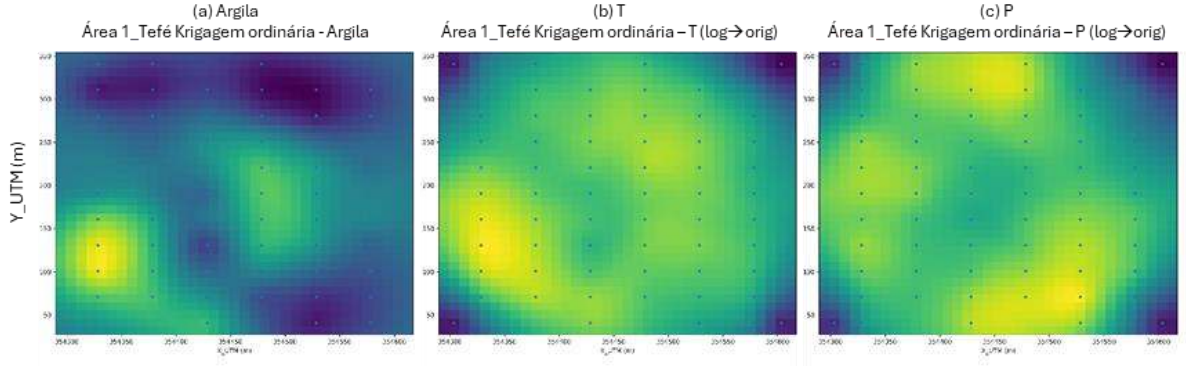
3.3 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL POR KRIGAGEM

Os mapas de krigagem ordinária evidenciaram variação na distribuição espacial dos atributos entre as áreas (Figuras 3 a 7).

Em áreas com maior proporção de dependência forte ou moderada, as superfícies krigadas apresentaram transições mais graduais. Em áreas com predominância de dependência fraca, observaram-se padrões menos contínuos.

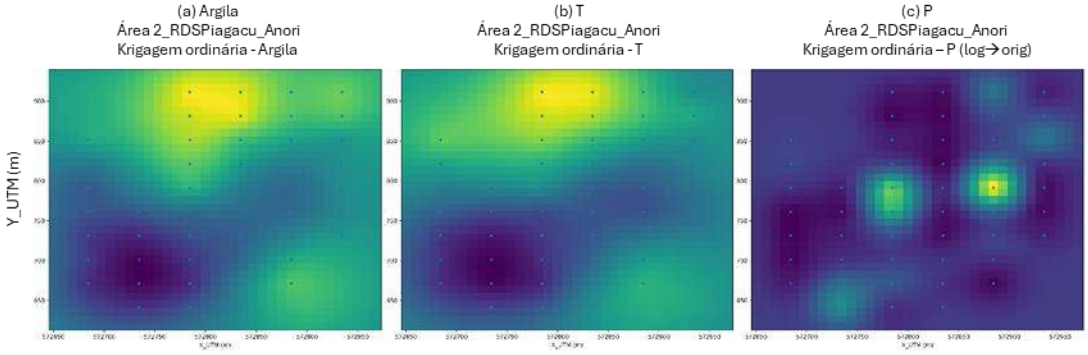
A variância de krigagem foi maior nas bordas da malha e em setores com menor densidade de pontos.

Figura 3 – Mapas de krigagem ordinária dos atributos edáficos selecionados na Área 1 (Tefé, Amazonas): (a) argila, (b) capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) e (c) fósforo disponível (P). As superfícies representam os valores estimados por interpolação geoestatística a partir do modelo de variograma ajustado, enquanto os pontos indicam as localizações amostrais. A escala de cores representa os valores preditos, permitindo visualizar gradientes espaciais e zonas de maior ou menor concentração de cada atributo.



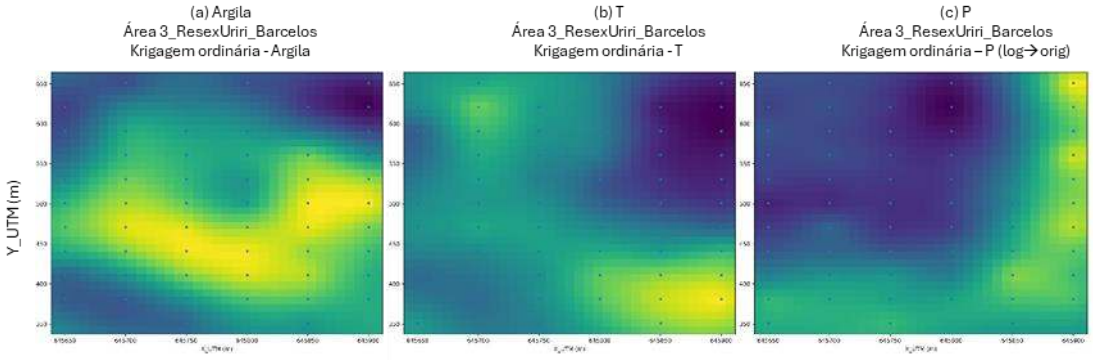
Fonte: Autores, 2026.

Figura 4 – Mapas de krigagem ordinária dos atributos edáficos selecionados na Área 2 (RDS Piagaçu/Anori, Amazonas): (a) argila, (b) capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) e (c) fósforo disponível (P). As superfícies representam os valores preditos na malha de interpolação, evidenciando a organização espacial da fertilidade na área estudada. Observa-se maior continuidade espacial, coerente com a alta proporção de dependência forte reportada na Tabela 1.



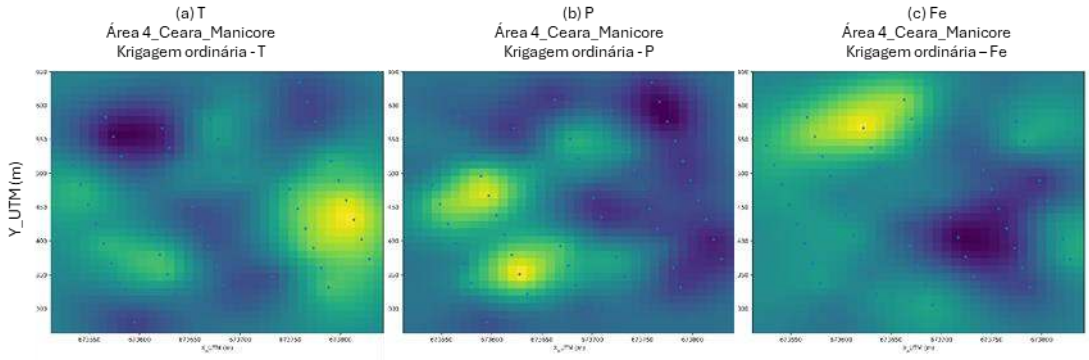
Fonte: Autores, 2026.

Figura 5 – Mapas de krigagem ordinária dos atributos edáficos selecionados na Área 3 (Resex Unini/Barcelos, Amazonas): (a) argila, (b) capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) e (c) fósforo disponível (P). Os mapas ilustram a heterogeneidade espacial intra-área associada à estrutura detectada nos variogramas experimentais. As transições são mais suaves que em áreas com dependência fraca, mas menos contínuas que em áreas com dependência forte.



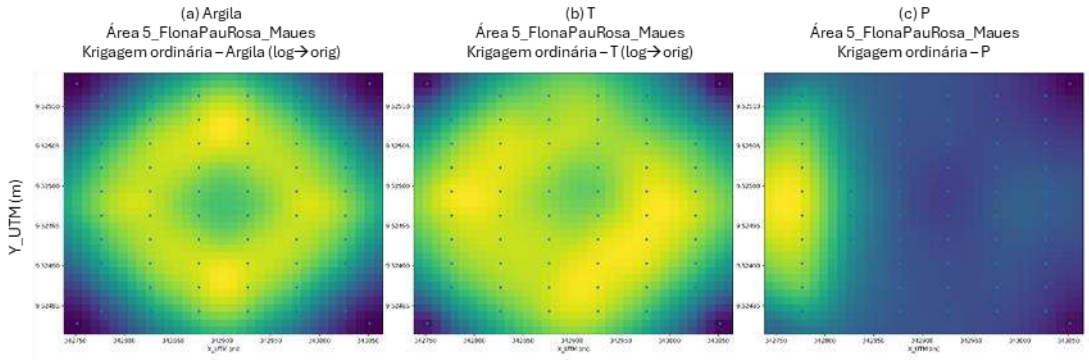
Fonte: Autores, 2026.

Figura 6 – Mapas de krigagem ordinária dos atributos edáficos selecionados na Área 4 (Ceará/Manicoré, Amazonas): (a) capacidade de troca catiônica a pH 7 (T), (b) fósforo disponível (P) e (c) ferro disponível (Fe). Os padrões espaciais evidenciam maior fragmentação associada à predominância de micro heterogeneidade na área. A substituição de argila por Fe reflete a necessidade de priorizar variáveis com melhor consistência amostral e relevância funcional, conforme critérios estabelecidos na metodologia.



Fonte: Autores, 2026.

Figura 7 – Mapas de krigagem ordinária dos atributos edáficos selecionados na Área 5 (FLONA Pau-Rosa/Maués, Amazonas): (a) argila, (b) capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) e (c) fósforo disponível (P). As superfícies interpoladas destacam gradientes espaciais de fertilidade consistentes com a estrutura geoestatística observada. A dependência moderada para esses atributos se reflete em padrões de transição gradual, mas com manchas locais bem delimitadas.



Fonte: Autores, 2026.

3.4 MACRONUTRIENTES, BASES TROCÁVEIS E SÓDIO

Os macronutrientes (P, Ca, Mg, K) e o Na apresentaram, predominantemente, dependência moderada nas áreas 2, 3 e 5, com IDE entre 0,3 e 0,7.

Em Tefé, P e K apresentaram dependência moderada.

Em Ceará/Manicoré, Ca, Mg e K apresentaram IDE ≥ 0,80.

Na RDS Piagaçu/Anori, diversos atributos apresentaram dependência forte ou moderada.

A transformação logarítmica (log1p) foi aplicada para P e, em alguns casos, Mg e K.

3.5 MICRONUTRIENTES E ELEMENTOS REDOX-DEPENDENTES

Os elementos Fe e Mn apresentaram dependência espacial predominantemente moderada nas áreas 2, 3 e 5 (IDE entre 0,5 e 0,7), com alcances entre 150 m e 200 m.

Em Ceará/Manicoré, Fe e Mn apresentaram dependência fraca (IDE > 0,80).

3.6 SÍNTESE COMPARATIVA E IMPLICAÇÕES ESPACIAIS

A comparação integrada (Tabela 1) evidencia três padrões distintos: RDS Piagaçu/Anori: maior proporção de dependência forte (41%); Resex Unini/Barcelos, FLONA Pau-Rosa/Maués e Tefé: predominância de dependência moderada (59–76%); Ceará/Manicoré: predominância de dependência fraca (75%).

4 DISCUSSÃO

4.1 GEOQUÍMICA DE SUPERFÍCIE E CONTROLE ESPACIAL DA FERTILIDADE EM SOLOS ALTAMENTE INTEMPERIZADOS

Os resultados evidenciam que a fertilidade do solo em áreas com ocorrência de castanheira-da-amazônia não se distribui de forma homogênea, mas apresenta padrões espaciais estruturados em diferentes escalas (Álvarez-Herrera et al., 2025; Nogiya et al., 2024). A variação observada na intensidade da dependência espacial entre as áreas indica que processos pedogenéticos, hidrológicos e biológicos atuam de maneira diferenciada na organização da heterogeneidade edáfica.

A predominância de dependência espacial moderada em três das cinco áreas sugere que a variabilidade dos atributos do solo é influenciada por controles estruturais do sistema solo–paisagem, tais como posição topográfica, redistribuição de matéria orgânica e dinâmica hídrica. Esse comportamento é consistente com solos tropicais altamente intemperizados, nos quais a fertilidade depende fortemente da interação entre frações minerais reativas (óxidos de Fe e Al) e matéria orgânica, resultando em gradientes espaciais detectáveis em escalas intermediárias (Chadwick & Asner, 2016; Guedes et al., 2016).

Por outro lado, a elevada proporção de dependência forte observada na área de RDS Piagaçu/Anori evidencia maior coerência espacial dos atributos do solo, indicando continuidade espacial consistente e maior previsibilidade na distribuição de recursos. Esse padrão sugere a atuação de controles pedoambientais relativamente uniformes, possivelmente associados à estabilidade

geomorfológica e à menor fragmentação hidrológica da paisagem (Solleiro-Rebolledo et al., 2023; Karahan & Ersahin, 2018).

Em contraste, a predominância de dependência fraca em Ceará/Manicoré indica que a variabilidade espacial está concentrada em escalas inferiores à malha amostral, caracterizando ambientes dominados por micro-heterogeneidade. Esse comportamento pode estar associado à atuação de processos locais, como deposição heterogênea de serapilheira, microtopografia e bioturbação, que operam em escalas muito finas e dificultam a formação de estruturas espaciais contínuas (Cambardella et al., 1994; Webster & Oliver, 2017).

Assim, os resultados demonstram que a organização espacial da fertilidade tropical reflete a interação entre processos estruturais de larga escala e microprocessos locais, configurando um gradiente de complexidade edáfica entre as áreas estudadas.

4.2 IMPLICAÇÕES DA INTERPOLAÇÃO ESPACIAL POR KRIGAGEM

A interpolação por krigagem permitiu traduzir a estrutura estatística detectada pelos variogramas em superfícies contínuas, evidenciando a existência de mosaicos edáficos intra-área (Hengl et al., 2018; Hoyos-Sanclemente et al., 2025). Esses mosaicos refletem compartimentos funcionais do solo, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia em escalas compatíveis com o funcionamento ecofisiológico das plantas.

Nas áreas com maior continuidade espacial, as superfícies krigadas apresentaram transições graduais, compatíveis com a atuação de controles pedoambientais em escalas intermediárias. Essa organização espacial indica maior coerência funcional do sistema solo–paisagem, na qual atributos como argila e CTC estruturam gradientes relativamente estáveis de retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes (Doetterl et al., 2018; Castrignanò et al., 2023).

Por outro lado, em áreas dominadas por dependência fraca, os padrões espaciais mostraram-se menos contínuos, refletindo micro-heterogeneidade e maior influência de processos locais. Nessas condições, a krigagem evidencia não apenas a fragmentação espacial dos atributos, mas também limitações associadas à escala amostral, indicando que parte da variabilidade não foi capturada pelo delineamento adotado (Chen et al., 2025; Dorau et al., 2024).

A variância de krigagem, mais elevada nas bordas da malha e em áreas com menor densidade amostral, reforça a importância do desenho amostral para a robustez das inferências espaciais. Esse padrão é amplamente reconhecido em estudos de mapeamento digital do solo, nos quais a incerteza espacial constitui componente intrínseco da interpretação ambiental (Chen et al., 2024; Li et al., 2016).

Do ponto de vista funcional, os mapas indicam que a fertilidade não atua de forma uniforme sobre as populações de castanheira, mas estrutura compartimentos espaciais com diferentes condições

de disponibilidade de recursos, influenciando diretamente a absorção radicular, a dinâmica hídrica e o desempenho fisiológico da espécie.

4.2.1 Área 1 — Tefé

A área de Tefé apresentou organização espacial relevante para parte dos atributos integradores, permitindo mapear gradientes edáficos em escala intra-área por krigagem. Do ponto de vista funcional, a combinação de textura (argila) e proxies de capacidade tampão (CTC) define um arcabouço físico-químico que condiciona simultaneamente retenção de água e disponibilidade de nutrientes; isso é particularmente importante para espécies arbóreas que mantêm elevada demanda hídrica e dependem de estabilidade do suprimento durante a estação menos chuvosa. A literatura recente demonstra que *B. excelsa* responde ao estresse hídrico com alterações em trocas gasosas e traços funcionais, incluindo ajustes na condutância estomática e no balanço carbono-água, indicando que diferenças edáficas podem modular a intensidade dessas respostas. (Schimpl et al., 2019). A dependência forte da argila (IDE = 0,04) e os alcances expressivos de alguns atributos (ex: V% com 809 m) sugerem que, em Tefé, os gradientes texturais em larga escala podem ser mais determinantes para a disponibilidade hídrica do que a variabilidade química fina, o que merece investigação em estudos futuros que correlacionem atributos do solo com métricas fisiológicas (Oliveira et al., 2024; Boisseaux et al., 2025).

4.2.2 Área 2 — RDS Piagaçu/Anori

Na RDS Piagaçu/Anori, a maior coerência espacial observada previamente (maior proporção de dependência forte) torna os mapas krigados especialmente úteis para identificar zonas edáficas com transições graduais e, portanto, maior previsibilidade funcional na distribuição espacial dos recursos edáficos disponíveis às árvores. Em termos ecofisiológicos, ambientes com melhor continuidade espacial de atributos relacionados a CTC e disponibilidade de P tendem a oferecer condições mais estáveis para aquisição nutricional e suporte metabólico, o que é coerente com evidências de que limitações por P e manejo nutricional afetam crescimento e traços fisiológicos em *B. excelsa* (Corrêa et al., 2022) A dependência forte observada para K (IDE = 0,09) e Na (IDE = 0,14) nessa área é particularmente notável, indicando que mesmo elementos com ciclagem biológica intensa podem apresentar organização espacial consistente quando as condições pedoambientais são favoráveis.

4.2.3 Área 3 — Resex Unini/Barcelos

A Resex Unini/Barcelos, com predominância de dependência moderada, sugere atuação conjunta de controles estruturais em escala intermediária e variabilidade local. Mapas de krigagem, nesse contexto, funcionam como síntese operacional para discutir mosaicos edáficos e formular hipóteses sobre variabilidade interindividual de crescimento. Evidências recentes em

dendrocronologia e interpretação de anéis de crescimento de *B. excelsa* reforçam a necessidade de contextualizar o incremento radial em relação a condições ambientais e de sítio, incluindo heterogeneidade do solo e variação sazonal (Caetano Andrade et al., 2024). Os alcances observados para atributos como CTC (156 m) e P (132 m) nessa área sugerem que a escala de variação edáfica é compatível com a distância média entre árvores adultas em castanhais naturais, indicando que indivíduos próximos podem estar sujeitos a condições edáficas similares, enquanto árvores mais distantes exploram compartimentos funcionais distintos.

4.2.4 Área 4 — Ceará/Manicoré

Em Ceará/Manicoré, a predominância de dependência fraca (efeito pepita dominante) indica que a variabilidade se concentra em distâncias menores que o espaçamento amostral, não sendo possível modelar sua estrutura com o desenho amostral utilizando escalas muito finas, reduzindo o ganho interpretativo de superfícies suavizadas para certos atributos e exigindo cautela na leitura cartográfica. Ainda assim, a krigagem é valiosa para explicitar onde a incerteza tende a aumentar e para orientar redesenho amostral (por exemplo, densificação direcionada por incerteza). Abordagens de amostragem guiadas por incerteza são recomendadas para melhorar mapas de solos e reduzir erros preditivos em ambientes heterogêneos (Stumpf et al., 2017). A alta proporção de dependência fraca (75% dos atributos) sugere que, nessa área, estudos futuros devem adotar malhas amostrais mais densas (espaçamento < 30 m) para capturar a estrutura espacial subjacente e permitir modelagem mais robusta.

4.2.5 Área 5 — FLONA Pau-Rosa/Maués

Na FLONA Pau-Rosa/Maués, a dependência moderada para atributos-chave sustenta o uso de mapas krigados como base para interpretação espacial e potencial estratificação de ambientes. Em perspectiva ecofisiológica, a interação entre fertilidade (especialmente P) e sazonalidade hídrica pode modular metabolismo e crescimento, com evidências experimentais indicando que intervenções nutricionais podem alterar respostas sazonais de *B. excelsa* e atenuar estresse durante períodos mais secos. Assim, os mapas constituem suporte para hipóteses sobre zonas de maior potencial de crescimento/produtividade e para desenho de monitoramentos ecofisiológico (Oliveira et al., 2024). A consistência dos alcances (173 m para a maioria dos atributos) sugere uma escala de variação relativamente uniforme nessa área, facilitando o delineamento de estratos amostrais para estudos futuros que busquem relacionar atributos do solo com métricas de crescimento e produção de frutos.

4.3 TEORES DE CARBONO, MATÉRIA ORGÂNICA E ESTABILIDADE ESTRUTURAL

O carbono do solo desempenha papel central na determinação da fertilidade em ambientes altamente intemperizados, onde as cargas permanentes da fração mineral são limitadas. Nesses

sistemas, a estabilidade da matéria orgânica está associada à formação de complexos organominerais com óxidos de Fe e Al, controlando a retenção e a disponibilidade de nutrientes (Kirsten et al., 2021; Fang et al., 2019).

A variabilidade espacial do carbono observada entre as áreas reflete diferenças na dinâmica de deposição e decomposição da serapilheira, bem como na textura e na drenagem. Em áreas com maior continuidade espacial, a distribuição do carbono tende a reforçar a estabilidade da CTC e da saturação por bases, contribuindo para a manutenção de gradientes edáficos funcionalmente estruturados. Em contraste, em ambientes dominados por micro-heterogeneidade, a redistribuição localizada de resíduos orgânicos pode intensificar o efeito pepita e reduzir a detectabilidade da estrutura espacial (Santos et al., 2025; Oliveira et al., 2018).

A dependência moderada do carbono em várias áreas indica que, apesar de sua natureza dinâmica, a matéria orgânica atua como elemento integrador da fertilidade em escalas de dezenas a centenas de metros (Tiruneh et al., 2025).

Além disso, o regime hidrológico sazonal da Amazônia exerce forte influência sobre a mineralização do carbono e a mobilização de nutrientes, sugerindo que a estrutura espacial observada representa a integração de processos biogeoquímicos dinâmicos ao longo do tempo (Abril et al., 2014).

4.4 REGIME HIDROLÓGICO, REDOX E DISTRIBUIÇÃO DE FE E MN

A distribuição espacial de Fe e Mn está associada à dinâmica redox do solo, a qual, em ambientes tropicais, pode ser influenciada por variações na drenagem, na microtopografia e na saturação hídrica temporária. A alternância entre condições mais úmidas e mais aeradas pode promover ciclos de redução e oxidação, resultando na mobilização e redistribuição desses elementos ao longo da paisagem (Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012).

A dependência espacial moderada desses elementos em várias áreas sugere que processos redox, quando presentes, operam em escalas intermediárias, possivelmente associadas a variações microtopográficas ou a diferenças locais na dinâmica hídrica do solo. Pequenas diferenças altimétricas podem gerar contrastes na disponibilidade de oxigênio, influenciando a solubilidade e a redistribuição de Fe e Mn (Fritsch et al., 2009; Satiro et al., 2021).

Em Ceará/Manicoré, a predominância de dependência fraca sugere maior fragmentação espacial ou atuação de processos em escala muito fina, possivelmente associados à heterogeneidade da drenagem, à redistribuição localizada de matéria orgânica ou à atividade biológica do solo (Muvengwi & Witkowski, 2020).

Dessa forma, embora os resultados indiquem padrões compatíveis com controle redox, a ausência de medições diretas de saturação hídrica ou potencial redox sugere que tais processos devem

ser interpretados como hipóteses plausíveis, a serem testadas em estudos futuros com abordagem hidropedológica integrada.

4.5 IMPLICAÇÕES ECOFISIOLÓGICAS PARA A CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA

A castanheira-da-amazônia (Bertholletia excelsa) apresenta elevada adaptação a solos ácidos e pobres em bases, porém seu desempenho fisiológico é sensível à disponibilidade espacial de recursos edáficos (Abril et al., 2014; Costa et al., 2017).

A heterogeneidade espacial de Al^{3+} e H+Al implica que o sistema radicular está submetido a microambientes com diferentes níveis de acidez e toxicidade potencial, o que pode influenciar a absorção de Ca e Mg e a eficiência do uso de nutrientes. Embora a espécie tolere condições de acidez elevada, a distribuição espacial desses atributos pode modular padrões de crescimento em escala local (Lopes, 2020; de Souza et al., 2023).

A distribuição espacial do fósforo, elemento limitante clássico em solos tropicais, é particularmente relevante. A dependência moderada observada na maioria das áreas indica a existência de zonas com maior disponibilidade desse nutriente, capazes de influenciar processos fisiológicos relacionados à fotossíntese, produção de biomassa e formação de frutos (Reed et al., 2010; Ferreira et al., 2016; Silva et al., 2021; Guerreiro et al., 2017).

Além disso, a distribuição de Fe e Mn pode afetar processos metabólicos e respostas ao estresse, incluindo mecanismos antioxidantes e ajuste osmótico, especialmente em ambientes sujeitos a variações na disponibilidade hídrica (Ortega Rodriguez et al., 2023; Botelho et al., 2019).

A heterogeneidade edáfica também pode influenciar o recrutamento de plântulas e a dinâmica populacional da espécie, uma vez que diferentes microsítios oferecem condições contrastantes para estabelecimento e crescimento (John et al., 2007; Bentos et al., 2013; Xia et al., 2019).

4.6 INTEGRAÇÃO SOLO-PLANTA-PAISAGEM

Os resultados reforçam que a distribuição da castanheira não ocorre em um ambiente edaficamente uniforme, mas sim em sistemas solo–paisagem com heterogeneidade espacial estruturada. A interação entre geoquímica de superfície, dinâmica do carbono e regime hidrológico determina padrões de fertilidade que operam em múltiplas escalas e condicionam a disponibilidade de recursos ao longo do perfil do solo (Matschullat et al., 2020; Nagy et al., 2016; Grimaldi et al., 2014)

Essa variabilidade espacial tem implicações diretas para: (i) o desenho amostral em estudos ecofisiológicos; (ii) a modelagem espacial da produtividade; (iii) estratégias de manejo e conservação; e (iv) a compreensão da resiliência da espécie frente a alterações climáticas e hidrológicas.

A abordagem geoestatística adotada permitiu não apenas quantificar a estrutura espacial, mas também gerar produtos cartográficos (mapas de krigagem) que sintetizam a heterogeneidade edáfica

de forma operacional para aplicação em campo. Esses mapas podem ser utilizados para zoneamento de áreas de manejo, identificação de sítios prioritários para conservação e delineamento de experimentos que incorporem explicitamente a variabilidade espacial como fator experimental (Guerreiro et al., 2017; Silva et al., 2021; Redek et al., 2025).

Assim, a integração entre geoestatística e ecofisiologia fornece base robusta para investigar como a heterogeneidade edáfica influencia o funcionamento hidráulico, a eficiência do uso de nutrientes e a adaptação da castanheira em diferentes contextos amazônicos. Estudos futuros que combinem a abordagem aqui apresentada com medições ecofisiológicas in situ (potencial hídrico, trocas gasosas, status nutricional) e análises dendrocronológicas poderão estabelecer relações causais entre a estrutura espacial do solo e o desempenho da espécie (Pacheco et al., 2020; Fleischer et al., 2019; da Costa et al., 2022; Anjos et al., 2024).

4.7 HETEROGENEIDADE EDÁFICA, ESTRESSE HÍDRICO E FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DA CASTANHEIRA

A organização espacial dos atributos edáficos observada nas cinco áreas possui implicações diretas sobre o funcionamento hidráulico da castanheira-da-amazônia (Bertholletia excelsa). Em ambientes altamente intemperizados, a disponibilidade de água no solo é fortemente condicionada por atributos como textura, densidade e estrutura, que regulam a retenção hídrica e a condutividade hidráulica (Silva et al., 2021; da Costa et al., 2022).

Áreas com maior coerência espacial da argila e da densidade tendem a apresentar padrões mais previsíveis de armazenamento e redistribuição de água no perfil, enquanto ambientes dominados por micro-heterogeneidade podem gerar mosaicos de disponibilidade hídrica em escalas finas. Essa configuração pode induzir gradientes locais de potencial hídrico do solo, afetando diretamente o fluxo de água no continuum solo–planta–atmosfera (Oliveira et al., 2024; de Souza et al., 2023).

A dependência forte da argila em Tefé (IDE = 0,04) e Anori (IDE = 0,08) sugere que, nessas áreas, a textura atua como estruturador primário da retenção hídrica, criando zonas contrastantes de armazenamento de água que podem ser mapeadas e correlacionadas com o status hídrico das árvores (Quesada et al., 2012; Guerreiro et al., 2017; Silva et al., 2021).

Estudos recentes demonstram que espécies arbóreas amazônicas exibem elevada sensibilidade ao déficit hídrico sazonal, com redução da condutância estomática, do potencial hídrico foliar e da taxa fotossintética durante períodos secos mais intensos (Rowland et al., 2015; Restrepo-Coupe et al., 2017). A castanheira, embora adaptada a solos ácidos, depende da manutenção de fluxo hidráulico eficiente para sustentar copas amplas e elevada biomassa.

Nesse contexto, a heterogeneidade edáfica pode influenciar simultaneamente: a profundidade efetiva de exploração radicular, a resistência hidráulica do solo, a vulnerabilidade à cavitação xilemática e a capacidade de ajuste osmótico (Brum et al., 2019).

Em áreas com dependência espacial forte ou moderada e alcances superiores a 150 m, é plausível supor maior estabilidade hidráulica do ambiente edáfico. Em contraste, ambientes com predominância de dependência fraca podem apresentar variações abruptas na retenção de água, intensificando o estresse hídrico sazonal (Fang et al., 2017).

A variância de krigagem pode, portanto, ser interpretada não apenas como medida de incerteza estatística, mas como um indicador indireto da heterogeneidade funcional do ambiente, com potenciais implicações para a distribuição espacial do estresse hídrico em escala intra-área (Guerreiro et al., 2017; Silva et al., 2021).

4.8 INTERAÇÕES ENTRE ACIDEZ, ALUMÍNIO E FISIOLOGIA RADICULAR

A elevada concentração de Al^{3+} trocável em solos amazônicos representa potencial fator limitante para o crescimento radicular. Contudo, Bertholletia excelsa ocorre naturalmente sob condições de acidez elevada, sugerindo a presença de mecanismos de tolerância fisiológica (Costa et al., 2017; Spera et al., 2020).

A variabilidade espacial de Al e H+Al observada neste estudo implica que o sistema radicular da castanheira está submetido a microambientes contrastantes em termos de toxicidade potencial. A tolerância ao Al pode envolver mecanismos como exclusão radicular, complexação orgânica na rizosfera ou compartimentalização interna, conforme descrito para espécies adaptadas a solos ácidos tropicais (Brunner & Sperisen, 2013; Kochian et al., 2015).

A dependência forte de Al em Tefé (IDE = 0,14) e Anori (IDE = 0,22) indica que o gradiente de toxicidade potencial é espacialmente estruturado, com zonas de menor e maior concentração que podem ser exploradas diferencialmente pelo sistema radicular.

A interação entre Al^{3+} e cátions básicos, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+}, é particularmente relevante, uma vez que o alumínio pode comprometer a integridade das membranas celulares, afetar a atividade de transportadores e reduzir a eficiência de absorção de nutrientes. Dessa forma, a organização espacial desses atributos pode modular o crescimento radicular, a absorção hídrica e o desempenho fisiológico de espécies arbóreas de grande porte (Schimpl et al., 2019; Oliveira et al., 2024).

Estudos futuros que integrem mapeamento radicular com os mapas de krigagem aqui gerados poderão elucidar se a castanheira apresenta estratégias de evasão (evitando zonas de alto Al) ou de tolerância funcional, explorando ambientes quimicamente heterogêneos ao longo da paisagem.

4.9 CONEXÕES COM CRESCIMENTO RADIAL E PRODUTIVIDADE

O crescimento radial da castanheira, frequentemente avaliado por dendrocronologia, está associado a variáveis climáticas (precipitação, temperatura) e à disponibilidade edáfica de água e nutrientes. Estudos indicam que espécies amazônicas exibem redução de incremento radial durante eventos de seca mais intensos, especialmente quando o déficit hídrico coincide com limitação nutricional (Brienen et al., 2015; Schöngart et al., 2017).

A heterogeneidade espacial da fertilidade detectada neste estudo sugere que o crescimento radial pode variar intra-área em função de gradientes locais de disponibilidade de fósforo, saturação por bases, conteúdo de carbono associado à atividade microbiana e condições redox relacionadas à drenagem do solo (Schaap et al., 2024; Silva, 2022).

Áreas com maior coerência espacial tendem a proporcionar ambiente nutricional mais homogêneo, possivelmente refletindo maior uniformidade no incremento radial entre indivíduos. Por outro lado, ambientes com forte micro-heterogeneidade podem gerar maior variabilidade interindividual, com árvores explorando nichos edáficos diferenciados e apresentando respostas de crescimento mais contrastantes (Vleminckx et al., 2023; Eck et al., 2023).

A dependência moderada de P na maioria das áreas (IDE entre 0,47 e 0,78) sugere que a disponibilidade desse nutriente crítico varia em escalas compatíveis com a distância entre árvores adultas, criando um mosaico de sítios com maior e menor potencial de crescimento. Esse padrão pode ser espacialmente explicitado por meio dos mapas de krigagem e posteriormente correlacionado com séries dendrocronológicas (Kohler et al., 2019; Sheppard, Casals & Gutierrez, 2001; Brienen et al., 2016).

A produtividade de frutos da castanheira, altamente dependente da manutenção de balanço hídrico positivo e adequada disponibilidade nutricional, pode também responder a essa organização espacial. Gradientes locais de P e Ca, por exemplo, podem afetar a formação de flores e o desenvolvimento de sementes, enquanto variações na disponibilidade hídrica influenciam diretamente o enchimento de frutos (Staudhammer et al., 2021; de Oliveira et al., 2024).

A identificação de zonas com maior disponibilidade de P e maior capacidade de troca catiônica nos mapas de krigagem (ex: áreas em vermelho nas Figuras 3 a 7) fornece hipóteses testáveis para estudos futuros que busquem correlacionar atributos do solo com produção de frutos em parcelas permanentes, integrando abordagens geoestatísticas e ecofisiológicas.

Esses resultados reforçam a hipótese de que a organização espacial da fertilidade modula diretamente o desempenho ecofisiológico da espécie em escala intra-área.

4.10 INTEGRAÇÃO SOLO–HIDROLOGIA–CLIMA SOB CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Projeções recentes indicam intensificação da variabilidade climática na Amazônia, com aumento da frequência de eventos de seca severa. Em tal contexto, a heterogeneidade espacial do solo assume papel crítico na modulação da resiliência das espécies arbóreas (Esquivel-Muelbert et al., 2019).

Áreas com maior continuidade espacial de atributos físicos e químicos tendem a apresentar resposta mais estável ao estresse hídrico, uma vez que promovem maior previsibilidade na retenção e disponibilidade de água e nutrientes ao longo do perfil do solo. Em contraste, ambientes edaficamente fragmentados podem amplificar respostas fisiológicas extremas, devido à maior variabilidade local na disponibilidade de recursos (Levine et al., 2016; Chen et al., 2024b).

A integração entre geoestatística e ecofisiologia permite identificar áreas potencialmente mais vulneráveis, fornecendo subsídios para conservação e manejo sustentável (Fisher et al., 2018). Os mapas de krigagem gerados neste estudo, combinados com a variância de krigagem como medida de incerteza, constituem ferramentas úteis para o delineamento de estratégias de monitoramento de longo prazo, permitindo direcionar esforços amostrais para zonas de maior heterogeneidade ou maior vulnerabilidade potencial.

A hierarquização das áreas quanto ao grau de organização espacial (Anori > Tefé ≈ Barcelos ≈ Maués > Manicoré) fornece um gradiente de complexidade edáfica que pode ser explorado em estudos futuros sobre resiliência climática. Espera-se que áreas com maior continuidade espacial (ex: Anori) apresentem respostas mais previsíveis ao estresse hídrico, enquanto áreas com elevada micro-heterogeneidade (ex: Manicoré) possam exibir maior variabilidade interindividual, com indivíduos localizados em microsítios favoráveis mantendo crescimento mesmo em anos secos (McMichael et al., 2023; Elias et al., 2018).

Esses padrões reforçam que a resposta da castanheira às mudanças climáticas deve ser interpretada à luz da organização espacial do sistema solo–água–nutriente.

4.11 MODELO CONCEITUAL DE INTEGRAÇÃO SOLO–ÁGUA–NUTRIENTE–CRESCIMENTO RADIAL

A Figura 8 apresenta um modelo conceitual integrando heterogeneidade edáfica, dinâmica hídrica, disponibilidade nutricional e respostas fisiológicas da castanheira-da-amazônia. O modelo parte do pressuposto de que a organização espacial dos atributos químicos e físicos do solo regula simultaneamente a disponibilidade de água e nutrientes, modulando o funcionamento hidráulico e o crescimento radial da espécie.

Os resultados deste estudo permitem propor um modelo conceitual no qual a fertilidade do solo em ambientes amazônicos é organizada espacialmente pela interação entre processos pedogenéticos, dinâmica do carbono e regime hidrológico. Em solos altamente intemperizados, esses processos atuam de forma integrada, controlando a formação e estabilização da matéria orgânica, a dinâmica de cargas variáveis associadas a óxidos de Fe e Al e a redistribuição de nutrientes ao longo da paisagem (Chadwick & Asner, 2016; Doetterl et al., 2018; Kirsten et al., 2021).

Essa organização resulta na formação de mosaicos edáficos, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia em diferentes escalas espaciais, refletindo a atuação conjunta de fatores como microtopografia, drenagem, deposição de serapilheira e atividade biológica do solo (Cambardella et al., 1994; Webster & Oliver, 2017; Hengl et al., 2018). Esses mosaicos não representam apenas padrões espaciais descritivos, mas compartimentos funcionais que condicionam o funcionamento do sistema solo–planta.

Nesse contexto, a variabilidade espacial do solo influencia diretamente o funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia, modulando processos como absorção radicular, fluxo de água no continuum solo–planta–atmosfera e eficiência do uso de nutrientes. A interação entre atributos como textura, carbono, CTC e acidez determina gradientes locais de disponibilidade de recursos, que podem afetar o crescimento, a produtividade e a dinâmica populacional da espécie (Quesada et al., 2012; Silva et al., 2021; da Costa et al., 2022).

A abordagem geoestatística adotada neste estudo permitiu capturar essa estrutura espacial e traduzi-la em representações quantitativas por meio de variogramas e mapas de krigagem. Esses produtos integram variabilidade espacial e inferência estatística, permitindo não apenas descrever padrões, mas também identificar zonas funcionalmente distintas dentro das áreas estudadas (Hengl et al., 2018; Castrignanò et al., 2023).

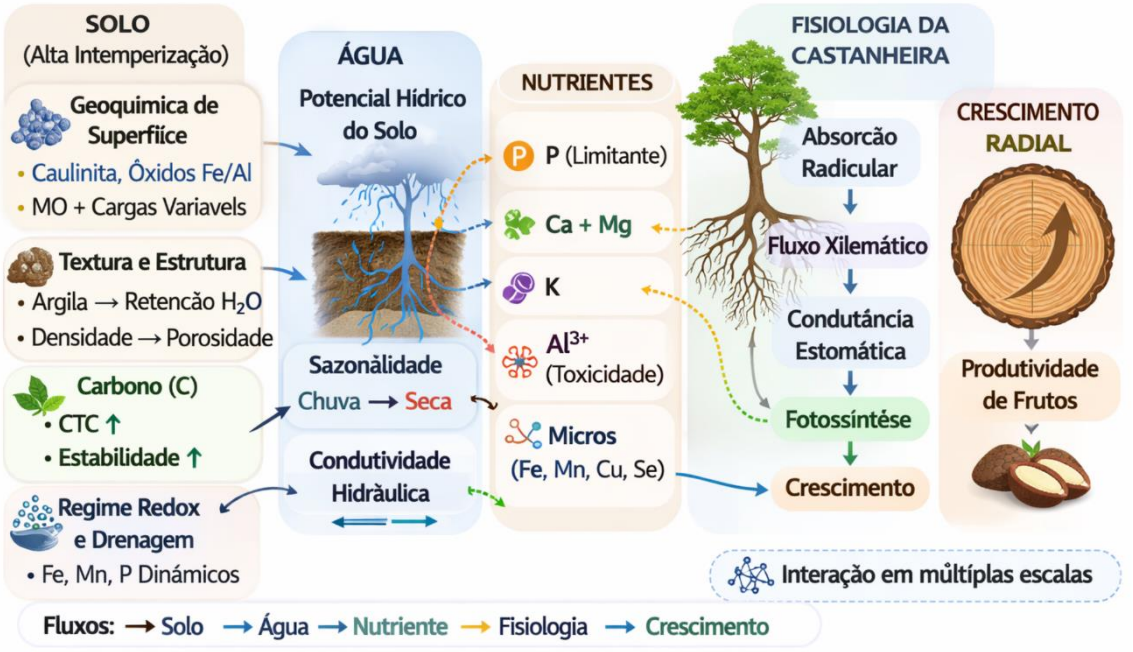
Do ponto de vista ecológico, os resultados indicam que a resposta da castanheira à variabilidade ambiental deve ser interpretada à luz dessa heterogeneidade edáfica, uma vez que indivíduos estabelecidos em diferentes microsítios podem apresentar respostas fisiológicas contrastantes frente a variações climáticas, especialmente sob condições de estresse hídrico (Fisher et al., 2018; Esquivel-Muelbert et al., 2019; McMichael et al., 2023).

Do ponto de vista aplicado, esse modelo conceitual reforça que estratégias de manejo e conservação não devem assumir homogeneidade edáfica em escala de paisagem. A incorporação da variabilidade espacial do solo em práticas de manejo pode contribuir para maior eficiência na conservação de populações naturais, no planejamento de áreas de uso e na definição de zonas prioritárias para monitoramento ecológico (Guerreiro et al., 2017; Silva et al., 2021).

Assim, a integração entre geoestatística, pedogeoquímica e ecofisiologia constitui uma abordagem robusta para compreender o funcionamento de ecossistemas florestais tropicais,

evidenciando que a heterogeneidade edáfica não é apenas uma característica do sistema, mas um componente funcional que regula processos ecológicos em múltiplas escalas.

Figura 8 – Modelo conceitual integrando heterogeneidade edáfica, dinâmica hídrica do solo, disponibilidade nutricional e crescimento radial da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*). O modelo ilustra como gradientes espaciais de textura, fertilidade e regime hídrico podem modular simultaneamente o funcionamento hidráulico e o desempenho fisiológico da espécie. As setas indicam relações causais hipotéticas, e os retângulos representam componentes mensuráveis do sistema. A intensidade da dependência espacial (IDE) atua como modulador da previsibilidade das relações, com áreas de dependência forte apresentando maior coerência espacial nas respostas funcionais.



Fonte: Autores, 2026.

5 CONCLUSÕES

A análise geoestatística evidenciou que os atributos químicos e físicos do solo em áreas com ocorrência de castanheira-da-amazônia apresentam diferentes níveis de dependência espacial, refletindo a atuação integrada de processos pedogenéticos, hidrológicos e biológicos na organização da heterogeneidade edáfica.

A predominância de dependência moderada na maioria das áreas indica que a fertilidade do solo é estruturada por controles do sistema solo–paisagem em escalas intermediárias, enquanto a ocorrência de dependência forte, como observado em Anori, revela maior coerência espacial e previsibilidade na distribuição de recursos. Em contraste, áreas com predominância de dependência fraca, como Ceará/Manicoré, apresentam variabilidade concentrada em escalas finas, associada à micro-heterogeneidade edáfica.

A interpolação por krigagem permitiu representar essa estrutura espacial, evidenciando a formação de mosaicos edáficos que condicionam a distribuição de água e nutrientes dentro das áreas estudadas. Esses mosaicos representam compartimentos funcionais do solo, com implicações diretas para o funcionamento ecofisiológico da castanheira.

ISSN: 2177-3246

A variabilidade espacial de atributos como fósforo, carbono, acidez e textura indica que indivíduos da espécie estão sujeitos a condições contrastantes de disponibilidade de recursos, o que pode influenciar o crescimento, a produtividade e a dinâmica populacional. A interação entre fertilidade e regime hídrico reforça que o desempenho da espécie depende da organização espacial do sistema solo–água–nutriente.

Os resultados demonstram que a heterogeneidade edáfica constitui um componente funcional dos ecossistemas florestais amazônicos, influenciando processos ecofisiológicos e respostas ao ambiente. Nesse contexto, a incorporação da variabilidade espacial do solo em estudos ecológicos e estratégias de manejo é fundamental para uma compreensão mais realista do funcionamento desses sistemas.

Por fim, a integração entre geoestatística, pedogeoquímica e ecofisiologia mostrou-se uma abordagem robusta para investigar a relação entre solo, planta e ambiente, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estudos futuros que integrem padrões espaciais do solo com crescimento, produtividade e resposta da castanheira a variações climáticas.

Esses resultados reforçam que a heterogeneidade edáfica deve ser considerada um componente central na modelagem ecológica e no manejo de florestas tropicais.

REFERÊNCIAS

ABDELRAHMAN, M. A. E. et al. Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. Sustainability, v. 13, n. 1, 194, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13010194

ABRIL, G. et al. Amazon River carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands. Nature, v. 505, p. 395-398, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature12797

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, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/geomatics5030041

ANJOS, L. J. S. et al. Brazil nut journey under future climate change in Amazon. PLoS ONE, v. 19, n. 11, e0312308, 2024. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312308

ARAUJO, M. A.; ZINN, Y. L.; LAL, R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. Geoderma, v. 300, p. 1-10, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.006

BATISTA, A. P. B.; SCOLFORO, H.F.; MELLO, J.M. et al. Spatial association of fruit yield of *Bertholletia excelsa* Bonpl. trees in eastern Amazon. Forest Ecology and Management, v. 441, p. 99-105, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.043

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

BITTENCOURT, P. R.; OLIVEIRA, R.S.; COSTA, A.C.L. da, et al. Amazonia trees have limited capacity to acclimate plant hydraulic properties in response to long-term drought. Global Change Biology, v. 26, n. 6, p. 3569-3584, 2020. DOI: 10.1111/gcb.15040

BOISSEAUX, M.; NEMETSCHEK, D.; BARALOTO, C.; et al. Shifting trait coordination along a soil-moisture-nutrient gradient in tropical forests. Functional Ecology, v. 39, n. 1, p. 21-37, 2025. DOI: 10.1111/1365-2435.14679

BOTELHO, S. D. C. C.; BALDONI, A.B.; TONINI, H.; et al. Fruits, seeds and oil of Brazil nuts produced in Mato Grosso state. Floresta e Ambiente, v. 26, n. 2, e20170660, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/2179-8087.066017

BRIENEN, R. J.; PHILLIPS, O.L.; FELDPAUSCH, T.R.; et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. Nature, v. 519, n. 7543, p. 344-348, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/nature14283

BRIENEN, R. J.; SCHÖNGART, J.; ZUIDEMA, P. A. Tree rings in the tropics: insights into the ecology and climate sensitivity of tropical trees. In: GOLDSTEIN, G.; SANTIAGO, L. S. (ed.). Tropical tree physiology: adaptations and responses in a changing environment. Cham: Springer, 2016. p. 439-461.

BROUSSEAU, L.; BONAL, D.; CIGNA, J.; SCVOTTI, I. Highly local environmental variability promotes intrapopulation divergence of quantitative traits: an example from tropical rain forest trees. Annals of Botany, v. 112, n. 6, p. 1169-1179, 2013. DOI: https://doi.org/10.1093/aob/mct176

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

BRUNNER, I.; SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. Frontiers in Plant Science, v. 4, 172, 2013. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00172

BURAS, A.; SPYT, B.; JANECKA, K.; et al. Divergent growth of Norway spruce on Babia Góra Mountain in the western Carpathians. Dendrochronologia, v. 50, p. 33-43, 2018.

CAETANO ANDRADE, V. L.; CLEMENT, C.R.; HERRERA-RAMIREZ, 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, 2024. DOI: https://doi.org/10.1017/RDC.2024.39

CAMBARDELLA, C. A.; MOOMAN, T.B.; NOVAK, J.M et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, v. 58, p. 1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x

CASTRIGNANÒ, A.; HEYDARI, L.; BAYAT, H. Scale-Dependent Field Partition Based on Water Retention Functional Data. Land, v. 12, n. 5, 1106, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/land12051106

CHADWICK, K. D.; ASNER, G. P. Tropical soil nutrient distributions determined by biotic and hillslope processes. Biogeochemistry, v. 127, n. 2, p. 273-289, 2016. DOI: 10.1007/s10533-015-0179-z

CHEN, Q.; RICHER-de-FORGES, A.; CHEN, S. et al. Uncertainty in Digital Soil Mapping at broad-scale: A review. In: EGU GENERAL ASSEMBLY, 2024, Vienna. Anais [...]. 2024. DOI: 10.5194/egusphere-egu24-6005

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

CHEN, Z., CAI, Y.; PAN, C. et al. Spatial Heterogeneity of Soil Respiration and Its Relationship with the Spatial Distribution of the Forest Ecosystem at the Fine Scale. Forests, v. 16, n. 4, 678, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/f16040678

COELHO-SILVA, D. et al. Hydraulic and structural traits of trees across light gradients in the Amazon secondary forest. Tree Physiology, v. 44, n. 12, tpae146, 2024.

CORRÊA, V. et al. The role of phosphate fertilization on physiological responses of young *Bertholletia excelsa* plants grown in a P-deficient Amazon Ferralsol. Plants, v. 11, n. 21, 2955, 2022.

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: https://doi.org/10.1590/2179-8087.004215

CUSACK, D. F. et al. Tradeoffs and Synergies in Tropical Forest Root Traits and Dynamics for Nutrient and Water Acquisition: Field and Modeling Advances. Frontiers in Forests and Global Change, v. 4, 704469, 2021. DOI: 10.3389/ffgc.2021.704469

DA COSTA, K. C. P. 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, 2022.

DE CAIRES, S. A. et al. Advancing soil mapping and management using geostatistics and integrated machine learning and remote sensing techniques: a synoptic review. Discover Soil, v. 2, 53, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s44378-025-00082-z

DE OLIVEIRA, S. S. et al. *Bertholletia excelsa* saplings respond to seasonal precipitation variations by changing metabolism when fertilized with NPK in different planting systems. Forest Ecology and Management, v. 572, 122325, 2024.

DE SOUZA, A. S. et al. Understanding the effects of topoedaphic characteristics on site quality in a *Bertholletia excelsa* Bonpl. plantation in Amazonas. New Forests, v. 54, n. 3, p. 439-465, 2023.

DIGGLE, P. J.; TAWN, J. A.; MOYEED, R. A. Model-based geostatistics. Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics, v. 47, n. 3, p. 299-350, 1998. DOI: https://doi.org/10.1111/1467-9876.00113

DOETTERL, S. et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. Earth-Science Reviews, v. 154, p. 102-122, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.005

DORAU, K. et al. Soil redox maps: assessment of small field-scale redox zonation by Mn and Fe oxide-coated IRIS films. Journal of Soils and Sediments, v. 24, p. 1206-1219, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11368-023-03705-6

DUARTE, S. D. J. et al. Kriging versus cokriging and collokated cokriging for soil physical-hydraulic attributes and their influence on soybean growth. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 64, e21200201, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200201

ECK, J. L.; HERNÁNDEZ HASSAN, L.; COMITA, L. S. Intraspecific plant–soil feedback in four tropical tree species is inconsistent in a field experiment. American Journal of Botany, v. 111, n. 12, e16331, 2024. DOI: 10.1002/ajb2.16331

eCYCLE. Bioturbação: o que é sua importância ambiental. eCycle Portal, 2024. Disponível em: https://www.ecycle.com.br/bioturbacao/

ELIAS, F. et al. Idiosyncratic soil-tree species associations and their relationships with drought in a monodominant Amazon forest. Acta Oecologica, v. 91, p. 127-136, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.07.004

ESQUIVEL-MUELBERT, A. et al. Compositional response of Amazon forests to climate change. Global Change Biology, v. 25, n. 1, p. 39-56, 2019. DOI: 10.1111/gcb.14413

FANG, K. et al. Al/Fe mineral controls on soil organic carbon stock across Tibetan alpine grasslands. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 124, p. 247-259, 2019. DOI: https://doi.org/10.1029/2018JG004782

FANG, Y. et al. Influence of landscape heterogeneity on water available to tropical forests in an Amazonian catchment and implications for modeling drought response. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 122, p. 8410-8426, 2017. DOI: 10.1002/2017JD027066

FERREIRA, M. J. et al. Clonal variation in photosynthesis, foliar nutrient concentrations, and photosynthetic nutrient use efficiency in a Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plantation. Forest Science, v. 62, n. 3, p. 323-332, 2016.

FISHER, R. A. et al. Vegetation demographics in Earth System Models: A review of progress and priorities. Global Change Biology, v. 24, n. 1, p. 35-54, 2018.

FRITSCH, E. et al. Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. European Journal of Soil Science, v. 53, n. 2, p. 203-217, 2002.

FUCHSLUEGER, L. et al. Going deeper underground – unravelling microbial activity and carbon cycling in deep soils in the Central Amazon. In: EGU GENERAL ASSEMBLY, 2026, Vienna.Anais [...]. 2026. DOI: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-21795

GRIMALDI, M. et al. Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. Landscape Ecology, v. 29, n. 2, p. 311-328, 2014. DOI: 10.1007/s10980-013-9981-y

GROSSIORD, C. et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit. New Phytologist, v. 226, n. 6, p. 1550-1566, 2020. DOI: 10.1111/nph.16485

GUARIGUATA, M. R. et al. Revisiting the 'cornerstone of Amazonian conservation': a socioecological assessment of Brazil nut exploitation. Biodiversity and Conservation, v. 26, p. 2007-2027, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s10531-017-1355-3

GUEDES, R. S. et al. Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. Soil and Tillage Research, v. 162, p. 46-54, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.018

GUERREIRO, Q. L. D. M., OLIVEIRA JUNIOR, R.C.; SANTOS, G. R. et al. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. Afr. J. Agric. Res. Vol. 12(4), pp. 237-250, 26 January, 2017. DOI: 10.5897/AJAR2016.11766

HALL, S. J.; SILVER, W. L. Iron oxidation stimulates organic matter decomposition in humid tropical forest soils. Global Change Biology, v. 19, n. 9, p. 2804-2813, 2013.

HART, A. T.; MERLIN, M.; WILEY, E.; LANDHÄUSSER, S. M. Splitting the Difference: Heterogeneous Soil Moisture Availability Affects Aboveground and Belowground Reserve and Mass Allocation in Trembling Aspen. rontiers in Plant Science, v. 12, 654159, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.654159

HENGL, T. et al. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. PeerJ, v. 6, e5518, 2018. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.5518

HOYOS-SANCLEMENTE, A.; MENJIVAR-FLORES, J. C.; RUEDA-SAA, G. Soil organic carbon in agricultural soils of an inter-Andean valley in Colombia: understanding the effects of environmental and geographic variables. Environmental Monitoring and Assessment, v. 197, n. 6, 697, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-025-14123-1

JOHN, R. et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 104, n. 3, p. 864-869, 2007. DOI: 10.1073/pnas.0604666104

KARAHAN, G.; ERŞAHIN, S. Geostatistics in characterizing spatial variability of forest ecosystems. Eurasian Journal of Forest Science, v. 6, n. 1, p. 9-22, 2018.

KIRSTEN, M. et al. Iron oxides and aluminous clays selectively control soil carbon storage and stability in the humid tropics. Scientific Reports, v. 11, n. 1, 5076, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-84777-7

KOCHIAN, L. V. et al. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. Annual Review of Plant Biology, v. 66, p. 571-598, 2015. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114822

KOHLER, M. et al. Using tree rings to reconstruct changes in soil P availability–Results from forest fertilization trials. Dendrochronologia, v. 54, p. 11-19, 2019.

LEVINE, N. M. et al. Ecosystem heterogeneity determines the ecological resilience of the Amazon to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 113, n. 3, p. 793-797, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1511344112

LI, Y. et al. Supplemental sampling for digital soil mapping based on prediction uncertainty from both the feature domain and the spatial domain. Geoderma, v. 284, p. 73-84, 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.08.013

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, v. 42, n. 3, p. 421-428, 1978. DOI: 10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

LOPES, J. S. Ciclagem de nutrientes, características funcionais e crescimento de *Bertholletia excelsa* Bonpl. cultivada sob plantio puro submetido à calagem. 2020. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2020.

MABAGALA, F. S. On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. Saudi Journal of Biological Sciences, v. 29, n. 5, p. 3635-3641, 2022.

MANTOVANI, J. R.; BUENO, G. T. Mapping of planation surfaces in the north-central Amazonia. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 25, n. 4, 2024. DOI: https://doi.org/10.20502/rbg.v25i4.2554

MARQUES, J. D. D. O. et al. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, p. 232-242, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20150142

MATSCHULLAT, J. et al. What influences upland soil chemistry in the Amazon basin, Brazil? Major, minor and trace elements in the upper rhizosphere. Journal of Geochemical Exploration, v. 211, 106433, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106433

McMICHAEL, C. N. et al. Past human-induced ecological legacies as a driver of modern Amazonian resilience. People and Nature, v. 5, n. 5, p. 1415-1429, 2023. DOI: 10.1002/pan3.10510

MILLALEO, R. et al. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010. DOI: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008

MUVENGWI, J.; WITKOWSKI, E. T. F. Cascading effects of termite mounds in African savannas. New Zealand Journal of Botany, v. 58, n. 3, p. 167-193, 2020. DOI: https://doi.org/10.1080/0028825X.2020.1767162

NAGY, L.; FORSBERG, B. R.; ARTAXO, P. (ed.). Interactions between biosphere, atmosphere and human land use in the Amazon basin. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. v. 227.

NOGIYA, M. et al. Spatial variability of soil variables using geostatistical approaches in the hot arid region of India. Environmental Earth Sciences, v. 83, 432, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-024-11737-5

NUSSBAUM, M. et al. Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. Soil, v. 4, n. 1, p. 1-22, 2018. DOI: https://doi.org/10.5194/soil-4-1-2018

OLIVEIRA, I. A. de et al. Carbon stock variability and aggregate stability in soils of Amazon, Brazil. Australian Journal of Crop Science, v. 12, n. 6, p. 922-930, 2018. DOI: https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.06.pne961

OLIVEIRA, S. S. et al. *Bertholletia excelsa* saplings respond to seasonal precipitation variations by changing metabolism when fertilized with NPK in different planting systems. Forest Ecology and Management, v. 572, 122325, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122325

ORTEGA RODRIGUEZ, D. R. et al. Does climate change alter the nutrient trends of *Cedrela fissilis* Vell. trees in the southern Brazilian Amazon? Ecological Processes, v. 12, 58, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s13717-023-00472-7

PACHECO, A. et al. Growth, wood anatomy and stable isotopes show species-specific couplings in three Mexican conifers inhabiting drought-prone areas. Science of the Total Environment, v. 698, 134055, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134055

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

PERES, C. A. et al. Dispersal limitation induces long-term biomass collapse in overhunted Amazonian forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 113, n. 4, p. 892-897, 2016. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.151652511

PÉREZ-IZQUIERDO, L. et al. Tree genotype and seasonal effects on soil properties and biogeochemical functioning in Mediterranean pine forests. European Journal of Soil Science, v. 69, n. 6, p. 1087-1097, 2018. DOI: 10.1111/ejss.12712

PIIKKI, K. et al. Perspectives on validation in digital soil mapping of continuous attributes—A review. Soil Use and Management, v. 37, n. 1, p. 7-21, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12694

PYRCZ, M. J.; DEUTSCH, C. V. Geostatistical reservoir modeling. Oxford: Oxford University Press, 2014.

QAFOKU, N. P. Climate-change effects on soils: accelerating weathering and soil fertility decline. Advances in Agronomy, v. 134, p. 1-32, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2014.12.002

QUESADA, C. A. et al. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. Biogeosciences, v. 8, n. 6, p. 1415-1440, 2011. DOI: 10.5194/bg-8-1415-2011

QUESADA, C. A. et al. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. Biogeosciences, v. 9, n. 6, p. 2203-2246, 2012. DOI: 10.5194/bg-9-2203-2012

REDEK, D. et al. Can knowledge of the spatial field trend improve phenotypic prediction accuracy through informed choice of experimental design? Euphytica, v. 221, 155, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10681-025-03608-2

REED, S. C. et al. Phosphorus cycling in tropical forests growing on highly weathered soils. In: BÜNEMANN, E. et al. (ed.). Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. p. 339-369.

RESTREPO-COUPE, N. et al. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. Agricultural and Forest Meteorology, v. 182, p. 128-144, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.031

ROSSEL, R. V. et al. A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Reviews, v. 155, p. 198-230, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012

ROWLAND, L. et al. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. Nature, v. 528, n. 7580, p. 119-122, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/nature15539

SAMUEL-ROSA, A. et al. Do more detailed environmental covariates deliver more accurate soil maps? Geoderma, v. 243, p. 214-227, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.017

SANTOS, L. A. C. et al. Spatial variability of soil organic carbon in native forest and agroforestry system in central Brazilian Amazonia. Brazilian Journal of Biology, v. 85, e297784, 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/1519-6984.297784

SATIRO, J. N. et al. Micronutrients in amazonian dark earths and adjacent soils. Mendeley Data, v. 1, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115072

SCHAAP, K. J. et al. Intra-annual dynamics of soil and microbial C, N, and P pools in a Central Amazon Terra Firme forest. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 187, n. 6, p. 725-736, 2024. DOI: 10.1002/jpln.202300107

SCHIMPL, F. C.; FERREIRA, M. J.; JAQUETTI, R. K. et al. Physiological responses of young *Bertholletia excelsa* plants to drought stress and subsequent rewatering. Flora, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.02.001

SCHÖNGART, J. et al. Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. In: AMOROSO, M. et al. (ed.). Dendroecology. Cham: Springer, 2017. p. 3-35. (Ecological Studies, v. 231). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3

SCOLES, R.; GRIBEL, R. Growth and survival over ten years of Brazil-nut trees planted in three anthropogenic habitats in northern Amazonia. Acta Amazonica, v. 51, p. 20-29, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4392202001462

SHARMA, P. et al. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. Journal of Botany, v. 2012, n. 1, 217037, 2012. DOI: 10.1155/2012/217037

SHEPPARD, P. R.; CASALS, P.; GUTIÉRREZ, E. Relationships between ring-width variation and soil nutrient availability at the tree scale. Tree-Ring Research, v. 57, n. 1, p. 105-113, 2001.

SILVA, C. S. D. et al. Soil classes and properties explain the occurrence and fruit production of Brazil nut. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 45, e0200188, 2021. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210001

SILVA, Camila Santos da. 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.

SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. et al. Interaction of geomorphic processes and long-term human impact in the soil evolution: A study case in the tropical area at Veracruz, Mexico. Catena, v. 227, 107072, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107072

SPERA, Silvio Tulio et al. Characterizing edaphoclimatic variables in sites hosting natural Brazil nut tree populations in Mato Grosso state. Nativa, v. 8, n. 3, 2020. DOI: https://doi.org/10.31413/nativa.v8i3.9438

STAUDHAMMER, C. L. 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, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-81948-4

STUMPF, F. et al. Uncertainty-guided sampling to improve digital soil maps. Catena, v. 153, p. 30–40, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.033

TEIXEIRA, P. C. et al. (ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TEIXEIRA, W. G. et al. Solos do Estado do Amazonas. In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (ed.). Geodiversidade do estado do Amazonas. Manaus: CPRM, 2010. cap. 6, p. 71-86.

TIRUNEH, G. A. et al. Modeling soil organic carbon in the Brazilian amazon with geostatistical and machine learning techniques. Trees, Forests and People, 101150, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tfp.2026.101150

VAN BREUGEL, M. et al. Soil nutrients and dispersal limitation shape compositional variation in secondary tropical forests across multiple scales. Journal of Ecology, v. 107, n. 2, p. 566-581, 2019. DOI: 10.1111/1365-2745.13126

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.

VLEMINCKX, J. et al. Niche breadth of Amazonian trees increases with niche optimum across broad edaphic gradients. Ecology, v. 104, n. 7, e4053, 2023. DOI: 10.1002/ecy.4053

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for environmental scientists. 3. ed. Chichester: Wiley, 2015.

XIA, S. W. et al. Fine scale heterogeneity of soil properties causes seedling spatial niche separation in a tropical rainforest. Plant and Soil, v. 438, p. 435–445, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-019-04027-8