

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - ICIAG
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - PPGAGRO

LUDMILLA FERNANDA ARANTES MELO

**UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA E ESPACIAL DA OCORRÊNCIA E
DISTRIBUIÇÃO DE POPULAÇÕES DE *Calophyllum brasiliense* Cambess. E
Platymiscium ulei Harms NO MÉDIO SOLIMÕES, AMAZONAS**

UBERLÂNDIA - MG
2026

LUDMILLA FERNANDA ARANTES MELO

Uma perspectiva histórica e espacial da ocorrência e distribuição de populações de *Calophyllum brasiliense* Cambess. e *Platymiscium ulei* Harms no Médio Solimões, Amazonas

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutora”.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Denise Garcia de Santana

UBERLÂNDIA - MG
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M528p
2026

Melo, Ludmilla Fernanda Arantes, 1988-

Uma perspectiva histórica e espacial da ocorrência e distribuição de populações de *Calophyllum brasiliense* Cambess. e *Platymiscium ulei* Harms no Médio Solimões, Amazonas [recurso eletrônico] / Ludmilla Fernanda Arantes Melo. -- 2026.

Orientadora: Denise Garcia de Santana.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.11012>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Santana, Denise Garcia de, 1967-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 015/2026, PPGAGRO				
Data:	Sete de agosto de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	14:15	Hora de encerramento:	17:50
Matrícula do Discente:	12223AGR002				
Nome do Discente:	Ludmilla Fernanda Arantes Melo				
Título do Trabalho:	UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA E ESPACIAL DA OCORRÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE POPULAÇÕES DE <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. E <i>Platymiscium ulei</i> Harms NO MÉDIO SOLIMÕES, AMAZONAS				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Ednaldo Carvalho Guimarães - UFU; Gabriella de Freitas Alves - UFU; Darlene Gris- Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá; Leandro da Silva Almeida - IFTM; Denise Garcia de Santana - UFU orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dra. Denise Garcia de Santana, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir a senhora presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Essa tese possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? (x) SIM NÃO ()

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Denise Garcia de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2026, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ednaldo Carvalho Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2026, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriella de Freitas Alves, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2026, às 12:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro da Silva Almeida, Usuário Externo**, em 14/08/2026, às 18:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **DARLENE GRIS, Usuário Externo**, em 18/08/2026, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7564318** e o código CRC **E97B7839**.

Àqueles que me ensinaram o que é amor e família:

Cornélia Arantes, Geraldo Proto e Anilson Rodrigues (in-memoriam).

À minha mãe Cristina Proto pelo apoio e ensinamentos.

Às minhas irmãs Marília e Fabíola pelo cuidado e carinho.

Meu companheiro Gabriel Jeronimo, pela paciência e parceria.

Aos meus filhos Kaleb, Heitor e Louis por me dar força, amor e alegria. Ao João

Pedro e Francisco pelo carinho e felicidade que trouxeram.

Aos meus sobrinhos que são como filhos.

DEDICO.

“A terra cansa. É burrice suicida pensar o desenvolvimento sem integrar os direitos da terra.”

Ailton Krenak

LISTA DE FIGURAS

METODOLOGIA COMPARTILHADA

Figura 1 - Indivíduos das populações 1, 2 e 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess. (JAC1, JAC2 e JAC3); Indivíduos das populações 1 e 2 de *Platymiscium ulei* Harms (MAC1, MAC2), no Médio Solimões no estado do Amazonas23

CAPÍTULO I

Figura 1 - População 1: delimitação da área (6.72 ha), malha de 53 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 115 indivíduos56

Figura 2 - População 2: delimitação da área (18 ha), malha de 110 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 57 indivíduos57

Figura 3 - População 3: delimitação da área (6.84 ha), malha de 50 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 82 indivíduos58

CAPÍTULO II

Figura 1 - População 1: delimitação da área (3.88 ha), malha de 27 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 37 indivíduos121

Figura 2 - População 2: delimitação da área (1.76 ha), malha de 16 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 22 indivíduos	122
---	-----

CAPÍTULO III

Figura 1 - Indivíduos da população 1 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess., sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave.....	168
---	-----

Figura 2 - Indivíduos da população 2 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess., sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave.....	169
---	-----

Figura 3 - Indivíduos da população 3 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess., sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave	171
--	-----

Figura 4 - Indivíduos da população 1 de <i>Platymiscium ulei</i> Harms, sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave	172
---	-----

APÊNDICE A

Figura 1 - Análise de variabilidade espacial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. da população 1 (JAC1) — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada	192
--	-----

Figura 2 - Análise de variabilidade espacial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. da população 2 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada	198
---	-----

Figura 3 - Análise de variabilidade espacial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. da população 3 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada.....	204
--	-----

Figura 4 - Análise de variabilidade espacial de <i>Platymiscium ulei</i> Harms da população 1 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada	210
--	-----

Figura 5 - Análise de variabilidade espacial de <i>Platymiscium ulei</i> Harms da população 2 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada	216
--	-----

APÊNDICE B

Figura 1 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. e dos fatores ambientais na população 1, Médio Solimões-AM	222
---	-----

Figura 2 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.e dos fatores ambientais na população 2, Médio Solimões-AM	226
--	-----

Figura 3 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. e dos fatores ambientais na população 3, Médio Solimões-AM	230
---	-----

Figura 4 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de <i>Platymiscium ulei</i> Harms e dos fatores ambientais na população 1, Médio Solimões-AM	234
--	-----

Figura 5 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de <i>Platymiscium ulei</i> Harms e dos fatores ambientais na população 2, Médio Solimões-AM	238
--	-----

APÊNDICE C

Figura 1 - Análise de variabilidade Fatorial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. da população 1 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada	242
--	-----

Figura 2 - Análise de variabilidade Fatorial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. da população 2 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada	243
--	-----

Figura 3 - Análise de variabilidade Fatorial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. da população 3 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada	243
--	-----

Figura 4 - Análise de variabilidade Fatorial de <i>Platymiscium ulei</i> Harms da população 1 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada	244
---	-----

LISTA DE TABELAS

METODOLOGIA COMPARTILHADA

Tabela 1 - Modelos teóricos de semivariogramas utilizados	29
---	----

CAPÍTULO I

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 1 de Jacareúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023.....	60
---	----

Tabela 2 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 1 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	62
---	----

Tabela 3 - Grau de Dependência Espacial (GD) e interpolador escolhido para os atributos da população 1 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	63
---	----

Tabela 4 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 1 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	64
--	----

Tabela 5 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método <i>varimax</i>) para os atributos edáficos da população 1 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	64
---	----

Tabela 6 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 1 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador	65
Tabela 7 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 2 de Jacareúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023	68
Tabela 8 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 2 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	71
Tabela 9 - Grau de Dependência Espacial (GD) e interpolador escolhido para os atributos da população 2 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	71
Tabela 10 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 2 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	73
Tabela 11 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método <i>varimax</i>) para os atributos edáficos da população 2 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	73
Tabela 12 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 2 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador.....	73
Tabela 13 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 3 de Jacareúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023.....	74

Tabela 14 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 3 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	77
---	----

Tabela 15. Grau de Dependência Espacial (GD) e interpolador escolhido para os atributos da população 3 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	77
---	----

Tabela 16 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 3 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	78
--	----

Tabela 17 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método <i>varimax</i>) para os atributos edáficos da população 3 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	78
---	----

Tabela 18 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 3 de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador.....	79
---	----

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 1 de Macacaúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023	124
--	-----

Tabela 2 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 1 de <i>Platymiscium ulei</i> Harms.....	126
--	-----

Tabela 3 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 1 de <i>Platymiscium ulei</i> Harms.....	127
---	-----

Tabela 4 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método *varimax*) para os atributos edáficos da população 1 de *Platymiscium ulei* Harms.....127

Tabela 5 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 1 de *Platymiscium ulei* Harms: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador128

Tabela 6 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 2 de Macacaúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2026130

Tabela 7 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 2 de *Platymiscium ulei* Harms.....132

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO GERAL	17
2 METODOLOGIA COMPARTILHADA	21
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO HISTÓRICO	21
2.1.1. Variável Resposta e Conjunto de Dados	24
2.2 PRINCÍPIOS GERAIS DE AMOSTRAGEM E COLETA DE DADOS	25
2.3. ABORDAGEM ANALÍTICA: MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS E MULTIVARIADOS	27
2.3.1. Análise Exploratória e Estatística Univariada	27
2.3.2. Análise da Dependência Espacial - Semivariograma e Modelagem	28
2.3.3. Interpolação Espacial	31
2.3.4. Análises Multivariadas - Análise Fatorial	32
REFERÊNCIAS	35
CAPÍTULO I - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E RELAÇÕES AMBIENTAIS DE <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. NO MÉDIO SOLIMÕES	47
RESUMO	48
ABSTRACT	49
1 INTRODUÇÃO	50
2 MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1. DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS TRÊS POPULAÇÕES AMOSTRADAS	55
2.2. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GERAIS	58
3 RESULTADOS PARCIAIS	59
3.1. ANÁLISE DA POPULAÇÃO 1	59
3.2. ANÁLISE DA POPULAÇÃO 2	66
3.3. ANÁLISE DA POPULAÇÃO JAC3	74
4 DISCUSSÃO	81
4.1. O PADRÃO UNIVERSAL DE AGREGAÇÃO E SUA BASE ESPACIAL	81
4.2. RESPOSTAS DISTINTAS A GRADIENTES AMBIENTAIS HETEROGÊNEOS	82
4.3. IMPLICAÇÕES PARA O MANEJO E CONSERVAÇÃO	96
5 CONCLUSÕES PARCIAIS	99
REFERÊNCIA	102
CAPÍTULO II - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E RELAÇÕES AMBIENTAIS DE <i>Platymiscium ulei</i> Harms. NO MÉDIO SOLIMÕES	112
RESUMO	113

ABSTRACT	114
1 INTRODUÇÃO	115
2 MATERIAL E MÉTODOS APLICADOS	120
2.1. DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS DUAS POPULAÇÕES AMOSTRADAS	120
2.3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GERAIS	122
3 RESULTADOS PARCIAIS	123
3.1. ANÁLISE DA POPULAÇÃO 1	123
3.2. ANÁLISE DA POPULAÇÃO 2	128
4 DISCUSSÃO	133
4.1. BAIXA DENSIDADE E PADRÕES ESPACIAIS CONTRASTANTES: LEGADO DA EXPLORAÇÃO E EFEITO DE FUNDO ALLEE	133
4.2. O SOLO COMO FILTRO DETERMINANTE: DO EIXO PRIMÁRIO DE FERTILIDADE/ACIDEZ À ALEATORIEDADE GENERALIZADA	136
4.3. IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO: DA PROTEÇÃO PASSIVA AO MANEJO ATIVO DIFERENCIADO	140
4.4. SÍNTESE ECOLÓGICA: DUAS POPULAÇÕES, UM MESMO ALERTA	142
5 CONCLUSÕES PARCIAIS	144
REFERÊNCIAS	147
CAPÍTULO III - ANÁLISE COMPARATIVA E SÍNTESE INTEGRADA DA DISTRIBUIÇÃO DE <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. E <i>Platymiscium ulei</i> Harms.: UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA E GEOESTATÍSTICA	154
RESUMO	155
ABSTRACT	156
1 INTRODUÇÃO	157
2 METODOLOGIA DE SÍNTESE	160
2.1. ANÁLISE COMPARATIVA DE PADRÕES ESPACIAIS E ESTRUTURA GEOESTATÍSTICA	160
2.2. ANÁLISE COMPARATIVA DOS DRIVERS AMBIENTAIS E RELAÇÕES SOLO-ESPÉCIE	161
2.3. SÍNTESE HISTÓRICO-ECOLÓGICA INTEGRADA	163
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO INTEGRADA	164
3.1 COMPARAÇÃO DOS PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL	164
3.2 COMPARAÇÃO DOS DRIVERS AMBIENTAIS	166
3.3 SÍNTESE HISTÓRICO-ECOLÓGICA E IMPLICAÇÕES PARA A DINÂMICA FLORESTAL	173
4. CONCLUSÕES GERAIS	175
REFERÊNCIAS	179
APÊNDICE A - Análise de variabilidade espacial	182
APÊNDICE B - Interpolação e distribuição espacial das variáveis	212

APÊNDICE C - Análise da variabilidade Fatorial**232**

RESUMO

MELO, Ludmilla F.A. **UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA E GEOESTATÍSTICA DA OCORRÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE POPULAÇÕES DE *Calophyllum brasiliense* E *Platymiscium ulei* Harms NO MÉDIO SOLIMÕES, AMAZONAS.** 2026. 251f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia¹.

A exploração madeireira histórica no Médio Solimões reduziu drasticamente as populações de *Calophyllum brasiliense* (Jacareúba) e *Platymiscium ulei* (Macacaúba), tornando urgente a compreensão de seus arranjos espaciais atuais para subsidiar o manejo e a conservação. Este estudo investigou a ocorrência e a estrutura de três populações de Jacareúba (JAC1, JAC2, JAC3) e duas de Macacaúba (MAC1, MAC2) na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, correlacionando-as com atributos físico-químicos do solo coletados em campo entre 2023 e 2025 (com determinações analíticas concluídas em 2026). A metodologia integrou ferramentas geoestatísticas (variografia, krigagem ordinária, validação cruzada) e análise multivariada (Análise Fatorial Exploratória) aplicadas a 313 espécimes arbóreos georreferenciados e 259 amostras edáficas. Os resultados revelaram trajetórias pós-perturbação contrastantes. *C. brasiliense* manteve, em seus núcleos, arranjo agregado com dependência espacial moderada e alcances práticos entre 274 m e 288 m, demonstrando resiliência e capacidade de recuperação autônoma. Em contrapartida, *P. ulei* apresentou, em ambos os remanescentes, padrão independente com Efeito Pepita Puro, caracterizando colapso demográfico severo associado a um possível efeito Allee. Na MAC1, a espécie restringiu-se a um gradiente bipolar de fertilidade/acidez (pH, V, H+Al) igualmente aleatório, enquanto na MAC2 a matriz abiótica revelou-se caótica, inviabilizando a Análise Fatorial (KMO = 0.17). Conclui-se que a mesma pressão histórica gerou respostas dinâmicas distintas conforme a vulnerabilidade intrínseca de cada táxon. A proteção passiva é suficiente para a regeneração da Jacareúba, ao passo que a Macacaúba exige intervenções ativas de enriquecimento e manejo silvicultural diferenciado.

Palavras-Chave: Arranjo populacional; Variografia. Várzea amazônica; Filtros edáficos; Resiliência florestal; Silvicultura tropical.

¹ Orientadora: Denise Garcia de Santana

ABSTRACT

MELO, Ludmilla F.A. **A HISTORICAL AND GEOSTATISTICAL PERSPECTIVE ON THE OCCURRENCE AND DISTRIBUTION OF POPULATIONS OF *Calophyllum brasiliense* AND *Platymiscium ulei* Harms IN THE MIDDLE SOLIMÕES REGION, AMAZONAS.** 2026. 251f. Tese (Doctorate's degree in Agronomy) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia².

Historical logging in the Middle Solimões region drastically reduced populations of *Calophyllum brasiliense* (Jacareúba) and *Platymiscium ulei* (Macacaúba), creating an urgent need to understand their current spatial arrangements to support management and conservation efforts. This study investigated the occurrence and structure of three Jacareúba populations (JAC1, JAC2, JAC3) and two Macacaúba populations (MAC1, MAC2) in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, correlating them with soil physicochemical attributes collected in the field between 2023 and 2025 (with analytical determinations completed in 2026). The methodology integrated geostatistical tools (variography, ordinary kriging, cross-validation) and multivariate analysis (Exploratory Factor Analysis) applied to 313 georeferenced tree specimens and 259 soil samples. Results revealed contrasting post-disturbance trajectories. *C. brasiliense* maintained, across its clusters, an aggregated spatial pattern with moderate spatial dependence and practical ranges between 274 m and 288 m, demonstrating resilience and autonomous recovery capacity. In contrast, *P. ulei* exhibited an independent pattern with Pure Nugget Effect in both remaining populations, characterizing severe demographic collapse associated with a potential Allee effect. In MAC1, the species was restricted to an equally random bipolar fertility/acidity gradient (pH, V, H+Al), whereas in MAC2 the abiotic matrix proved chaotic, precluding Factor Analysis (KMO = 0.17). It is concluded that the same historical pressure produced distinct dynamic responses according to the intrinsic vulnerability of each taxon. Passive protection is sufficient for Jacareúba regeneration, whereas Macacaúba requires active enrichment interventions and differentiated silvicultural management.

Keywords: Population arrangement; Variography; Amazonian floodplain; Edaphic filters; Forest resilience; Tropical silviculture.

² Advisor: Denise Garcia de Santana

1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas de várzea amazônicas, inundadas predominantemente de forma sazonal por rios de água branca ricos em sedimentos, são ecossistemas fundamentais para a região (Guindani, 2023; Pereira *Et Al.*, 2018; Schöngart; Junk, 2020; Tourinho; Santos; Coutinho, 2025). Sua composição florística e sua estrutura compõem um mosaico dinâmico, rigidamente moldado pelo pulso de inundação, incluindo sua duração, altura, sazonalidade e previsibilidade (Alvarenga *et al.*, 2017; Jardim, 2019; Baia; Jardim; Ferreira, 2025). Nesse gradiente, a várzea baixa (inundada) e a várzea alta (intermediária) destacam-se como habitats predominantes, cujo estabelecimento e regeneração das espécies estão intrinsecamente vinculados ao regime hídrico (Junk *et al.*, 2020; Liesenfeld *et al.*, 2022; Souza, 2022).

A principal diferença entre várzea baixa e várzea alta está na frequência e duração da inundação, o que condiciona diretamente topografia, solo e vegetação: a várzea baixa permanece alagada por longos períodos (meses), com lâmina d'água mais profunda (3-7 m), solos tipicamente mais arenosos e vegetação adaptada a submersão prolongada (Gonçalves, 2024; Rodrigues Júnior, 2019); a várzea alta, ocupa entre 10 e 15% das áreas de várzea, apresenta inundações mais breves, menos de 50 dias por ano, lâminas mais rasas (inferiores a 3 m), solos geralmente mais férteis e uma floresta densa com árvores de maior porte, assemelhando-se mais às condições das terras firmes (Furtado *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2024; Matos, 2019; Pereira, 2018; Souza, 2022).

Este ambiente, contudo, tem suportado intensa pressão antrópica (Bonfim, 2017; Gonçalves, 2024; Pinto, 2024; Dos Santos *et al.*, 2017). Historicamente, as florestas inundáveis forneceram de 60 a 90% da madeira extraída na bacia amazônica, atividade economicamente favorecida pela facilidade de transporte

(Barros; Uhl, 1995; Homma, 2011; Lucas *et al.*, 2024; Oliveira, 2005; Silva Filho, 2024; Rede Simex, 2022), além de outros fatores, ou sua combinação, incluindo demandas econômicas, mercado interno e externo, infraestrutura deficiente, baixa fiscalização e questões fundiárias (Erdmann, 2019; Lentini *et al.*, 2021; Sabogal *et al.*, 2006).

No Médio Solimões, antes da criação da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) em 1996, a exploração madeireira era atividade econômica central das populações ribeirinhas (De Medeiros, 2018; Paiva *et al.*, 2024). Espécies de alto valor, como a Jacareúba (*Calophyllum brasiliense* Cambess.) e a Macacaúba (*Platymiscium ulei* Harms), foram alvo de grande exploração, esgotando seus estoques naturais sem o conhecimento prévio de suas taxas de crescimento e regeneração (Braga; Cangussu; Furquim, 2022; Lameira, 2023; Nascimento *et al.*, 2017; Oliveira; Devide; Abdo, 2022; Dos Santos; Muller Filho, 2024; Neto; Araújo; Louzada, 2024).

Como consequência, a ocorrência atual dessas espécies na RDSM é baixa, fato que motivou acordos locais de proteção (Marinho, 2008; Rosa, 2008; Abreu, 2018; Silva, 2021). No entanto, quase três décadas após o estabelecimento dessas medidas, a recuperação populacional parece limitada (Carvalho, 2025; RDSM, 2014; Coelho *et al.*, 2025; Rodrigues *et al.*, 2023). Relatos de comunidades e expedições de campo indicam uma regeneração insuficiente, com poucos (ou nenhum) indivíduos jovens sendo avistados (Lelis, 2017; RDSM, 2025). Esta situação sugere que o legado da exploração passada pode não ser o único fator restritivo. Alterações no regime hidrológico, como inundações mais duradouras e frequentes, e potenciais mudanças na tolerância fisiológica de diásporos e plântulas à submersão emergem

como hipóteses adicionais que podem estar comprometendo o recrutamento³ (Barreto *et al.*, 2022; Junk *et al.*, 2016; Parolin *et al.*, 2013; Parolin *et al.*, 2016).

A compreensão da distribuição espacial atual dessas populações e dos fatores que a condicionam é, portanto, um desafio ecológico complexo (Martins *et al.*, 2021; Pellissier *et al.*, 2013). Em ecologia vegetal, os padrões de distribuição frequentemente exibem dependência espacial, onde indivíduos ou atributos ambientais próximos são mais similares do que aqueles distantes, resultando comumente em padrões agregados (Bahar *et al.*, 2021; Fortin; Dale, 2005; Legendre, 1993; Siebert *et al.*, 2019). Em várzeas, essa dependência é potencializada pela dinâmica de deposição de sedimentos e pelo gradiente de inundação, que criam uma forte estruturação espacial tanto na vegetação quanto nas propriedades do solo (Assis *et al.*, 2015; Ferreira; Stohlgren, 1999; Hauser *et al.*, 2022; Luna-Nole *et al.*, 2021; Wittmann *et al.*, 2004). Métodos estatísticos clássicos, que assumem independência entre as amostras, são inadequados para capturar essa complexidade, podendo levar a inferências errôneas (Bellier *et al.*, 2022; Dormann *et al.*, 2007; Martins *et al.*, 2023).

Neste contexto, a geoestatística surge como a ferramenta analítica ideal (Monteiro; Bhering, 2019; Santana *et al.*, 2021). Ela permite quantificar a dependência espacial através do semivariograma, modelar sua estrutura e, por meio da krigagem, interpolar superfícies contínuas que mapeiam a variabilidade de atributos (Goovaerts, 2018; Oliveira *et al.*, 2022). A sobreposição desses mapas de densidade de indivíduos e de variáveis ambientais oferece uma poderosa visualização das relações espaciais subjacentes (COSTA *et al.*, 2020; Zimback; Vettorazzi, 2015).

³Recrutamento: processo pelo qual as sementes (diásporos) germinam, estabelecem-se como plântulas e sobrevivem para se tornarem plantas jovens, ingressando efetivamente na população adulta.

Assim, este estudo se fundamenta na premissa de que uma compreensão robusta da distribuição de *C. brasiliense* e *P. ulei* exige uma abordagem que integre a análise geoestatística dos padrões atuais (Monteiro; Bhering, 2019; Santana *et al.*, 2021) a uma perspectiva histórica do uso do território (Barros; Uhl, 1995; Rosa, 2008) e das mudanças ecológicas. Diante do exposto, e considerando a escassez de estudos que articulem essas dimensões para espécies madeireiras de várzea (Parolin *et al.*, 2013), esta tese tem como objetivo geral analisar, sob uma perspectiva histórica e geoestatística integrada, a ocorrência e distribuição de populações de *C. brasiliense* e *P. ulei* no Médio Solimões, Amazonas.

A presente tese adota uma estrutura organizada em três capítulos centrais, concebidos de forma integrada. Após esta introdução e a apresentação da metodologia comum, o Capítulo 1 focará na análise da distribuição e dos condicionantes ambientais de *C. brasiliense*. De modo análogo, o Capítulo 2 investigará esses mesmos aspectos para *P. ulei*. Converging para uma visão sistêmica, o Capítulo 3 realizará uma análise comparativa entre as espécies, contextualizando os padrões identificados com o histórico de uso e as dinâmicas da várzea, para propor diretrizes de manejo.

2 METODOLOGIA COMPARTILHADA

Para atingir o objetivo geral, delineou-se uma sequência metodológica integrada que avança da caracterização básica à síntese contextualizada, seguindo a lógica consagrada no campo da ecologia espacial por Fortin e Dale (2005) e Zimback e Vettorazzi (2015). Primeiramente, buscou-se caracterizar a estrutura e a distribuição espacial de cada população por meio de estatística descritiva e análise exploratória de dados, estabelecendo um diagnóstico quantitativo inicial.

Em seguida, o estudo avançou para a modelagem da dependência espacial inerente à densidade de indivíduos, utilizando semivariogramas para quantificar essa estrutura conforme os preceitos de Monteiro e Bhering (2019), aplicando-se subsequentemente a krigagem para gerar superfícies de interpolação que mapeiem visualmente os padrões de distribuição com base no arcabouço de Goovaerts (2018). Paralelamente, procedeu-se à identificação e à análise das correlações entre a ocorrência das espécies e os atributos físico-químicos do solo, empregando-se técnicas de análise multivariada para decifrar as associações espécie-ambiente sob as diretrizes de Ter Braak e Šmilauer (2012).

Por fim, integrando todos os eixos precedentes, objetivou-se sintetizar os padrões espaciais e ambientais identificados, contextualizando-os criticamente com o histórico de uso da terra e as dinâmicas ecológicas do ecossistema de várzea, permitindo inferir os principais fatores condicionantes da distribuição atual das populações para propor subsídios concretos voltados ao manejo florestal sustentável e à conservação.

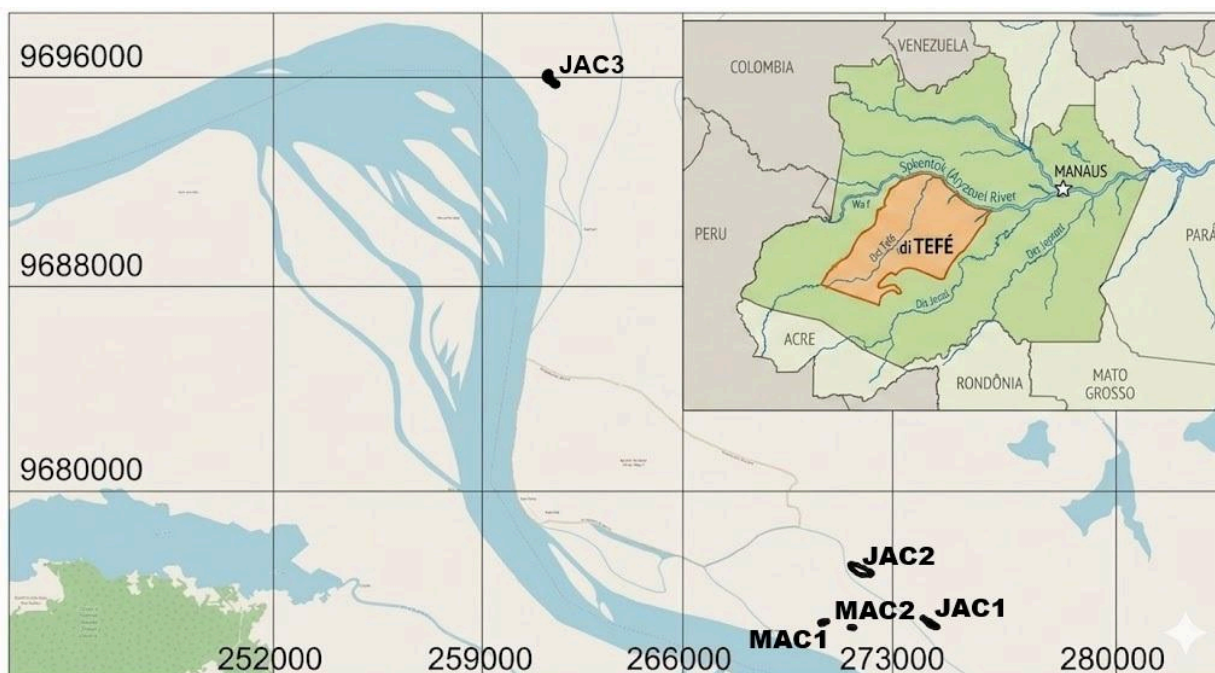
2.1 Caracterização da área de estudo e contexto histórico

A área de estudo está situada na região do Médio Solimões, no município de Tefé, Amazonas conforme mostrado na Figura 1, sob as coordenadas geográficas aproximadas de 3°21'14"S e 64°42'39"O, apresentando altitude média de 75 metros

e posicionando-se como um ponto central de conexão fluvial e de biodiversidade amazônica. O setor caracteriza-se por solos típicos de várzea, predominantemente classificados como Gleissolos e Neossolos Flúvicos desenvolvidos a partir de sedimentos aluvionares recentes, conforme os critérios taxonômicos estabelecidos por Santos *et al.* (2018).

Essas classes de solo apresentam-se geralmente mal drenadas, com elevada saturação hídrica sazonal, textura variável de arenosa a argilosa e marcante estratificação dos horizontes, refletindo diretamente a dinâmica de deposição dos rios de água branca do sistema Solimões descrita por Furquim *et al.* (2021) e Latrubesse *et al.* (2020). Adicionalmente, a fertilidade natural mostra-se moderada a alta, exibindo teores significativos de matéria orgânica e de nutrientes oriundos do aporte sedimentar contínuo proveniente da cordilheira dos Andes, a qual atua como a principal fonte geológica de enriquecimento da várzea sob o modelo conceitual de Peixoto *et al.* (2022), Torres *et al.* (2017) e Vuille *et al.* (2018). Essa configuração biogeoquímica é mantida pelos processos de movimentação de massa e erosão nas encostas montanhosas, os quais liberam minerais essenciais transportados pela rede hidrográfica até a bacia aluvial, em consonância com os mecanismos mapeados por Hörmann e Dech (2021) e Latorre *et al.* (2023)

Figura 1 - Populações de Indivíduos de *Calophyllum brasiliense* Cambess. - JAC1, JAC2 e JAC3; população de indivíduos de *Platymiscium ulei* Harms - MAC1 e MAC2, no Médio Solimões no estado do Amazonas



Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis (2024).

A seleção e delimitação das populações consideraram acessibilidade, relatos históricos de ocorrência pela comunidade e a representatividade de diferentes condições topográficas dentro do gradiente de várzea, principal fator estruturador da vegetação nessas áreas (Wittmann *et al.*, 2004). O posicionamento espacial dos indivíduos permitiu delimitar um polígono de malha irregular. Essa área delimitada serviu como base para a amostragem aleatória de solo de cada população.

O relevo das áreas é acentuadamente heterogêneo, típico das várzeas de igapó, com elevações que formam microdepressões e canais de drenagem interconectados (Latrubesse *et al.*, 2020). Esta topografia complexa, somada ao longo período de alagamento sazonal, que pode exceder 6 meses em trechos mais baixos, impôs desafios logísticos significativos. O acesso a certos quadrantes foi

limitado por se tratarem de fundos de baixios permanentemente alagados ou com declividade acentuada. Essa limitação resultou em malhas irregulares, demandando adaptações no desenho amostral conforme as diretrizes metodológicas recomendadas por Sutherland (2006). A coleta de solo nessas condições foi particularmente desafiadora, feita no período da seca, sendo priorizados pontos em áreas acessíveis que, contudo, buscavam representar a variabilidade ambiental interna de cada população.

2.1.1. Variável Resposta e Conjunto de Dados

O núcleo analítico deste capítulo estrutura-se em torno de dois conjuntos de dados integrados espacialmente: um referente à ocorrência da espécie e outro aos atributos ambientais do solo. A variável resposta, central para todas as análises geoestatísticas e multivariadas, foi definida como a densidade de indivíduos de *C. brasiliense* por unidade amostral. Esta densidade foi calculada para cada um dos quadrantes que compõem as malhas irregulares das cinco populações, resultando em uma variável discreta que expressa o número de indivíduos por 0.16 hectare.

Para cada quadrante, os valores das variáveis edáficas foram atribuídos mediante interpolação espacial, Krigagem ou IDW, conforme a dependência espacial de cada atributo a partir dos pontos de coleta mais próximos, criando assim uma camada de dados contínua e espacialmente explícita. As variáveis edáficas consideradas são: pH em água, teores de potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio trocável (Al), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions efetiva (t), soma de bases (SB), Saturação por Bases (V), Saturação por alumínio (m), teor de matéria orgânica (MO) e composição granulométrica (Argila, Areia e Silte). A Altitude de cada quadrante, um proxy fundamental para a duração e altura da inundação em ecossistemas de várzea (JUNK et al., 2011), foi extraída de

um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir dos pontos topográficos coletados em campo.

A decisão de manter os valores discrepantes (*outliers*) identificados nas análises físico-químicas do solo ao longo do desenvolvimento desta pesquisa foi fundamentada em uma avaliação criteriosa de sua plausibilidade técnica e ecológica. Considerou-se que, em áreas florestais sob dinâmica aluvial, valores extremos de atributos edáficos refletem a legítima heterogeneidade ambiental em microescala, e não erros de amostragem ou analíticos. Ademais, a análise manual das amostragens revelaram que os *outliers* de diferentes variáveis não estavam georreferenciados de forma sobreposta nos mesmos pontos de amostragem, o que descartou a hipótese de contaminações pontuais generalizadas que pudessem invalidar parcelas do banco de dados. Portanto, esses valores atípicos foram preservados nas matrizes definitivas por representarem manchas naturais de fertilidade ou acúmulo diferencial de frações granulométricas e matéria orgânica, mantendo a integridade da variabilidade real do ecossistema para os modelos geoestatísticos subsequentes.

2.2 Princípios Gerais de Amostragem e Coleta de Dados

Dentro da área delimitada para estudo, utilizou-se GPS portátil, relacionando as coordenadas geográficas em UTM aos indivíduos e aos pontos de coleta de solo para posterior análise físico-química. Contabilizou-se com 313 indivíduos e 259 coletas de solo no total, para cinco populações.

Os polígonos foram subdivididos em quadrantes de 40 x 40 m, correspondentes a 0.16 ha por unidade, esta abordagem, ao padronizar a medida de ocorrência em uma unidade de área fixa, é fundamental para investigar padrões espaciais e correlações ambientais em uma escala comparável (DORMANN *et al.*, 2007). Contudo, os quadrantes localizados na borda do polígono apresentam áreas

inferiores ou irregulares, uma vez que foram truncados pelo limite perimetral da área de estudo. Essa é uma abordagem padronizada para estudos de ecologia espacial de populações arbóreas (Fortin; Dale, 2005; Legendre; Legendre, 2012).

É crucial ressaltar que, dentro dos limites espaciais definidos para cada população, todos os indivíduos da espécie foram marcados, configurando um censo integral. A variável resposta fundamental foi a densidade de indivíduos por quadrante (n° de ind./0.16 ha).

O conjunto de dados ambientais foi constituído pelas variáveis físico-químicas do solo coletadas nos pontos georreferenciados, foram determinadas a partir de amostras simples deformadas, coletadas na profundidade de 0-20 cm, considerada a camada superficial mais representativa da dinâmica de nutrientes e das condições edáficas para o estabelecimento de plântulas (Teixeira *et al.*, 2017).

Após acondicionamento em embalagens impermeáveis e devidamente vedadas, as amostras foram enviadas para análise ao laboratório SAFRAR - Análises Agrícolas (Uberlândia-MG). As determinações seguiram a metodologia padrão estabelecida para análises de rotina da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017): os teores de fósforo (P) e potássio (K) foram extraídos com solução de Mehlich-1; o pH foi determinado em água; a acidez potencial (H+Al) foi quantificada com solução tampão SMP; os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio trocável (Al) foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; e a soma de bases (SB) foi calculada pela expressão $SB = Ca + Mg + K$ (em cmolc dm⁻³). A umidade do solo não foi determinada, uma vez que as amostras foram coletadas em condições de saturação hídrica do ambiente.

As coletas foram realizadas no segundo semestre de 2023 para as três populações de Jacareúba e para a população 1 de Macacaúba; no segundo semestre de 2025 para a segunda população de Macacaúba.

2.3. Abordagem Analítica: Métodos Geoestatísticos e Multivariados

A análise dos dados seguiu uma sequência lógica, partindo da exploração univariada e da verificação de pressupostos, passando pela modelagem da estrutura espacial, até a análise integrada das relações multivariadas. Na Análise Fatorial Exploratória é possível identificar a correlação entre as variáveis e agrupá-las em fatores comuns. Todo o processamento analítico foi realizado no ambiente R, versão 4.3.3 (R Core Team, 2024), complementado pelo software QGIS, versão 3.34.4 (QGIS, 2024), para a espacialização e produção cartográfica final.

2.3.1. Análise Exploratória e Estatística Univariada

A etapa inicial consistiu na análise exploratória univariada de todas as variáveis, densidade de indivíduos por quadrante, altitude e os atributos físico-químicos do solo (pH, P, K, Ca, Mg, Al, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, H+Al, m, t, SB, V, MO, argila, areia e silte). Foram calculadas estatísticas descritivas (média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação) e avaliadas a assimetria e a curtose, conforme a abordagem consolidada para a caracterização de dados ambientais (Mangiafico, 2016; Morrison, 2013). A normalidade das distribuições foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1951), utilizando o pacote *nortest* cuja aplicação e interpretação em contextos ecológicos foram seguidas conforme orientações recentes (Razali; Wah, 2011). Gráficos de histograma, dispersão e boxplot foram gerados para uma inspeção visual do comportamento dos dados, prática fundamental para a análise exploratória de dados (Tukey, 1977; Wickham; Grolemund, 2017).

Paralelamente, realizou-se uma análise exploratória espacial para verificar a presença de tendências direcionais (*drift*) nos dados, seguindo o arcabouço estabelecido para a análise de dados espaciais em ecologia (Fortin; Dale, 2005; Zuur; Ieno, 2016). Foram gerados gráficos de dispersão dos valores das variáveis em função das coordenadas leste (X) e norte (Y), a fim de identificar gradientes

espaciais que deveriam ser considerados nas etapas subsequentes de modelagem geoestatística (Bivand *et al.*, 2021; Webster; Oliver, 2007). Esta etapa diagnóstica foi fundamental para embasar decisões sobre a necessidade de transformação de dados, remoção de *outliers* ou ajuste de tendências antes da análise da dependência espacial propriamente dita.

2.3.2. Análise da Dependência Espacial - Semivariograma e Modelagem

A quantificação e modelagem da dependência espacial foram conduzidas através da análise variográfica seguindo o eixo metodológico consolidado para dados geoestatísticos (Bivand *et al.*, 2021; Gräler *et al.*, 2016). Para cada variável calculou-se o semivariograma experimental, já para as que demonstraram estruturação espacial na etapa exploratória calculou-se o semivariograma teórico.

Inicialmente, a semivariância foi estimada pelo estimador clássico de Matheron (1963). Para conjuntos de dados com distribuição assimétrica ou presença de valores extremos (*outliers*), o estimador clássico pode sofrer distorções. Para mitigar essa sensibilidade e validar a estabilidade da estrutura espacial identificada, utilizou-se o estimador robusto de Cressie e Hawkins (1980), o Modulus, para validação da estabilidade da estrutura espacial identificada conforme recomendação ao lidar com sensibilidade do estimador clássico (Lark; Bishop, 2019; Oliver; Webster, 2014).

O ajuste de um modelo teórico, esférico, exponencial ou gaussiano, ao semivariograma experimental foi realizado com base na análise visual conjugada com critérios de validação quantitativa, observando-se o ajuste satisfatório do modelo (R^2 variog), tabela 1. Para o modelo exponencial, na tabela 1, a equação inserida gera o alcance prático, no programa R o ajuste é feito sem o valor 3, gerando o alcance teórico.

A validação cruzada (*cross-validation*) foi o método empregado para selecionar o modelo final e seus parâmetros (efeito pepita, patamar e alcance) sendo considerada o procedimento padrão para avaliação de modelos de krigagem (Piloyan; Tempfli, 2017; Zhang *et al.*, 2023).

O modelo considerado adequado foi aquele que, na validação cruzada, apresentou simultaneamente: menor erro quadrático médio (RMSE xvalid) possível, indicando menor desvio geral entre valores observados e estimados; e um coeficiente de determinação (R^2 xvalid), mais próximo de 1, demonstrando alta capacidade do modelo em explicar a variabilidade espacial dos dados (Bernardi *et al.*, 2020; Diggle; Ribeiro, 2007). Nesta técnica, cada ponto amostral é removido iterativamente do conjunto, e seu valor é estimado a partir dos pontos vizinhos com base no modelo de semivariograma teórico em teste, (modelo candidato). Esse processo permite avaliar o desempenho dos parâmetros ajustados antes da Interpolação final.

Tabela 1 - Modelos teóricos de semivariogramas utilizados

MODELO	EQUAÇÃO	PARÂMETRO
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C_1[1.5(h/a) - 0.5(h/a)^3]$, se $h \leq a$; $\gamma(h) = C_0 + C_1$, se $h > a$	C_0 : Efeito pepita; C_1 : Contribuição; a : Alcance
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h/a)]$	C_0 : Efeito pepita; C_1 : Contribuição; a : Alcance prático
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h^2/a^2)]$	C_0 : Efeito pepita; C_1 : Contribuição; a : Alcance prático

Nota: $\gamma(h)$ é a semivariância para uma distância h ; C_0 é o efeito pepita (variabilidade não estruturada); C_0+C_1 é o patamar (*sill*); a é o alcance (*range*).

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram conduzidas utilizando-se o programa R versão 4.3.3 (Angel Food Cake, 2024; R CORE TEAM, 2024). A normalidade por Kolmogorov-Smirnov foi testada através do pacote nortest (Gross; Ligges, 2022), na análise fatorial aplicou-se o psych (Revelle, 2024). Para os

coeficientes de assimetria (Cs) obteve-se pelo moments (Komsta; Novomestky, 2022). As análises geoestatísticas foram verificadas pelo geoR (Ribeiro Jr; Diggle, 2023), sp (Bivand *et al.*, 2021), gstat (Gräler *et al.*, 2016) e spatstat (Baddeley *et al.*, 2015).

Havendo o ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais e posterior validação cruzada a fim de selecionar o modelo final e avaliar a sua acurácia preditiva, para as variáveis que demonstraram dependência espacial significativa, os mapas temáticos foram gerados por meio da Krigagem Ordinária, utilizando o modelo validado. Para as variáveis que não apresentaram estrutura espacial dependente, os mapas foram interpolados pelo fator de ponderação 2 do método do Inverso da Distância Ponderada (IDW).

Para melhor qualidade na plotagem das imagens com georreferenciamento, utilizou-se o programa QGis versão 3.34.4 (QGIS Development Team, 2024). O ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais foi realizado por meio de uma abordagem híbrida que combinou os algoritmos de ajuste automático com uma validação 'a sentimento' (*by eye*) (Lark, 2019; Webster; Oliver, 2007), na qual o analista, com base na experiência e na inspeção visual da distribuição espacial dos dados, avalia a aceitação física e estatística do modelo ajustado, garantindo que ele represente adequadamente a continuidade espacial do fenômeno estudado. Obteve-se como produto final, a produção dos mapas de interpolação por Krigagem e Inverso da Distância Ponderada (IDW).

O grau de dependência espacial foi classificado conforme Cambardella *et al.* (1994), que categoriza a dependência com base na razão entre o efeito pepita e o patamar. Este processo determinou, de forma específica para cada atributo, o interpolador mais adequado para gerar as superfícies contínuas de distribuição: a krigagem ordinária foi aplicada a variáveis com dependência espacial fraca a forte, enquanto a interpolação por distância inversa ponderada (IDW) foi utilizada para

aquelas com efeito pepita puro, seguindo a prática recomendada quando a estrutura espacial é insuficiente para justificar a krigagem (Bivand *et al.*, 2021; Robertson, 2008).

2.3.3. Interpolação Espacial

Com os modelos teóricos validados na etapa de variografia, procedeu-se à interpolação espacial para gerar superfícies contínuas que estimam a densidade de indivíduos e os atributos do solo em locais não amostrados. O método eleito foi a krigagem ordinária, um interpolador geoestatístico ótimo e não-tendencioso que incorpora explicitamente a estrutura de dependência espacial modelada pelo semivariograma sendo amplamente recomendado para predição espacial em ciências ambientais (Bivand *et al.*, 2021; Monteiro; Bhering, 2019).

A implementação analítica adotou uma estratégia em dois estágios para conjugar rigor estatístico e excelência cartográfica (Gräler *et al.*, 2016): os cálculos geoestatísticos foram executados no ambiente R utilizando os pacotes gstat (Gräler *et al.*, 2016) e sp (Pebesma; Bivand, 2023), enquanto a composição final dos mapas temáticos foi realizada no software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS, versão 3.34.4 (QGIS Development Team, 2024).

Esta divisão de tarefas otimizou os resultados, pois o R garantiu o controle preciso dos algoritmos e a reprodutibilidade dos procedimentos, e o QGIS permitiu um refinamento visual avançado, com criação de legendas intuitivas, classificação personalizada de intervalos e aplicação de recursos gráficos como transparências e relevo sombreado (*hillshade*) (Santos, 2022).

Além disso, a plataforma SIG possibilitou a integração multicamada dos mapas interpolados com bases de referência (imagens de satélite, hidrografia,

limites das populações), contextualizando espacialmente os padrões ecológicos para uma interpretação mais robusta (Longley *et al.*, 2021). Por fim, o QGIS forneceu ferramentas profissionais para a geração de *layouts* cartográficos completos e prontos para publicação, atendendo aos padrões acadêmicos de comunicação visual (Slocum *et al.*, 2023). Para variáveis que não apresentaram dependência espacial significativa, o fator de ponderação 2 do método do Inverso da Distância Ponderada (IDW) também foi aplicada na interpolação dentro do QGIS para fins comparativos (Bivand *et al.*, 2021).

2.3.4. Análises Multivariadas - Análise Fatorial

Para investigar as relações entre a ocorrência das espécies (densidade de indivíduos) e o conjunto de variáveis ambientais (atributos do solo e altitude), aplicou-se a Análise Fatorial (AF) por Componentes Principais, com rotação ortogonal do tipo *varimax*. O objetivo foi reduzir a dimensionalidade dos dados edáficos, identificando um conjunto menor de fatores latentes (combinações lineares das variáveis originais) que explicam a maior parte da covariância observada (HAIR *et al.*, 2019).

A adequação dos dados à AF foi avaliada mediante a Matriz de Correlação de Pearson (mantendo-se correlações $|r| \geq 0.3$), o Teste de Esfericidade de Bartlett (que testa a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade) e a Medida de Adequação da Amostragem de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que deve ser superior a 0.5 para que a análise seja considerada apropriada (Kassambara, 2021; Watson, 2017).

O número de fatores retidos para interpretação seguiu o critério de Kaiser, considerando apenas aqueles com autovalor (*eigenvalue*) superior a 1 (Kaiser, 1960). A comunalidade de cada variável (proporção de sua variância explicada pelos fatores comuns) foi examinada, e variáveis com comunalidade inicial inferior a 0.5

foram reavaliadas e, se necessário, excluídas em interações subsequentes para refinamento do modelo (Costello; Osborne, 2019). As cargas fatoriais (correlações entre as variáveis originais e cada fator) foram interpretadas para nomear os fatores de acordo com os atributos ambientais que mais contribuem para sua variação (ex.: "Fator 1 - Fertilidade e saturação de bases"; "Fator 2 - Acidez e Teor de matéria orgânica") (Fabrigar; Wegener, 2021). A análise fatorial foi conduzida utilizando o pacote psych do R (Revelle, 2024).

Esta abordagem multivariada permitiu sintetizar os complexos gradientes edáficos em fatores interpretáveis, que foram posteriormente correlacionados com os padrões espaciais das espécies, tanto graficamente (sobreposição de mapas) quanto estatisticamente.

A seleção e a exclusão prévia de variáveis seguiram um protocolo rigoroso para garantir a estabilidade e a robustez dos modelos finais em cada área. Primeiramente, isolaram-se as variáveis que não atenderam aos pressupostos de normalidade na escala de medição original, conforme recomendado para estruturas de AFE (Zuur *et al.*, 2010). Em seguida, adotou-se o critério de eliminação sucessiva de atributos que manifestaram comunalidade inicial baixa ($< 0,50$) na primeira extração de fatores. Esse é um protocolo estabelecido para refinar a solução fatorial e eliminar ruídos que não compartilham variância comum na matriz (Costello; Osborne, 2019; Hair *et al.*, 2019). Essa filtragem criteriosa garantiu o ajuste de modelos finais altamente robustos e interpretáveis para as áreas estudadas, cujos indicadores de adequação amostral e cargas fatoriais estão discriminados nas tabelas de resultados dos próximos capítulos. A correlação entre a densidade de indivíduos e os escores destes fatores foi então avaliada, fornecendo uma síntese interpretativa das principais associações espécie-ambiente.

Todos os mapas temáticos finais, de densidade interpolada da espécie e dos atributos ambientais, foram compostos e finalizados no ambiente QGIS (QGIS

Development Team, 2024) seguindo princípios de design cartográfico para comunicação científica efetiva (Slocum *et al.*, 2023), onde foi possível sobrepor as camadas, aplicar simbologia avançada e produzir os *layouts* cartográficos para análise integrada e apresentação clara dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. L. **Predição do tamanho de clareira em área de várzea sob regime de manejo florestal**: estudo de caso na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. 2018. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6797>. Acesso em: 10 ago. 2026.
- ALVARENGA, G. C. **Dinâmica espacial da assembleia de mamíferos de médio e grande portes em ambientes de várzea e terra firme na Amazônia central**. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017. Disponível em: https://ppbio.inpa.gov.br/sites/default/files/Alvarenga_G_C_Dissertacao_2017.pdf. Acesso em: 10 ago. 2026
- ASSIS, R. L. de *et al.* Patterns of tree diversity and composition in Amazonian floodplain paleo-várzea forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 26, n. 2, p. 312-322, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jvs.12229>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jvs.12229> . Acesso em: 10 ago. 2026.
- BADDELEY, A.; RUBACK, E.; TURNER, R. **Spatial Point Patterns**: methodology and applications with R. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19708> . Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b19708> . Acesso em: 17 ago. 2026.
- BAHAR, N. H. A. *et al.* Spatial patterns and drivers of tree diversity and community assembly in a tropical forest. **Biotropica**, v. 53, n. 2, p. 483-495, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17447429>. Acesso em: 17 ago. 2026.
- BAIA, L. L. F.; JARDIM, M. A. G.; FERREIRA, L. V. Comparação florística e estrutural de ambientes inundados e não inundados em duas Unidades de Conservação na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 01, p. 369-404, 2025. Disponível em: <https://repositorio.museu-goeldi.br/handle/mgoeldi/2843>. Acesso em: 17 ago. 2026.
- BARRETO, C. G. *et al.* Amplificação de extremos hidrológicos na Bacia Amazônica. In: PAINEL CIENTÍFICO PARA A AMAZÔNIA. **Relatório de Avaliação da Amazônia 2021**. Nova Iorque: Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (SDSN), 2022. cap. 21. Disponível em: <https://www.sp-amazon.org/br/publications>. Acesso em: 10 ago. 2026.

BARROS, A. C.; UHL, C. A evolução da exploração madeireira na Amazônia Oriental. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Ciências Naturais, Belém, v. 1, n. 1, p. 103-127, 1995. Disponível em: https://boletimcn.museu-goeldi.br/bcnaturais/pt_BR. Acesso em: 10 ago.2026.

BELLIER, E. *et al.* The misuse of statistical tools in ecology: the case of spatial autocorrelation. **Ecography**, v. 2022, e06013, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecog.06013>. Acesso em: 17 ago. 2026.

BERNARDI, A. C. C. *et al.* **Digital Soil Mapping And Geostatistics For Precision Agriculture**. In: Precision Agriculture for Sustainability. Burleigh Dodds Science Publishing, 2020. p. 75–102. DOI: 10.19103/AS.2020.0074.05. Disponível em: <https://shop.bdspublishing.com/store/bds/detail/workgroup/3-190-84511>. Acesso em: 20 ago. 2026.

BIVAND, R. S.; PEBESMA, E. J.; GÓMEZ-RUBIO, V. **Applied spatial data analysis with R**. 2. ed. New York: Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-1-4614-7618-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4) . Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51997702_Applied_Spatial_Data_Analysis_With_R . Acesso em: 10 ago. 2026.

BOMFIM, E. O. **Indicadores biogeoquímica de qualidade ambiental da Várzea Lago Grande do Curuaí, Amazônia brasileira**. 2017. 152 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/24483> . Acesso em: 10 ago. 2026.

BRAGA, L. V.; CANGUSSU, D.; FURQUIM, L. P. Instrumentos de promoção das políticas para povos indígenas isolados e de recente contato: os Tupi no arco do desmatamento. **Revista Brasileira de Linguística Antropológica**, v. 14, n. 1, p. 15-60, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/ling/article/view/46430> Acesso em: 17 ago. 2026.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. 1039 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 10 ago. 2026.

COELHO, M. C. B. *et al.* Variação espacial da produtividade de *Calophyllum brasiliense*: implicações para o manejo florestal. **Revista Delos**, v. 18, n. 69, p. e5747, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/5747> . Acesso em: 17 ago. 2026.

COSTA, A. C. S. *et al.* Integração de análise geoestatística e sensoriamento remoto para mapeamento da adequabilidade ambiental. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 8, n. 1, p. 021-037, 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/10300>. Acesso em: 17 ago. 2026.

COSTELLO, A. B.; OSBORNE, J. W. Best practices in exploratory factor analysis: four recommendations for getting the most from your analysis. **Practical Assessment, Research & Evaluation**, v. 10, n. 7, p. 1-9, 2005. Disponível em: <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/id/1650/> . Acesso em: 10 ago. 2026.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. **Model-based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 232 p. (Springer Series in Statistics). DOI: 10.1007/978-0-387-48536-2. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-48536-2>. Acesso em: 17 ago. 2026.

DORMANN, C. F. *et al.* **Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review**. **Ecography**, v. 30, n. 5, p. 609-628, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x> . Acesso em: 10 ago. 2026.

ERDMANN, A. A. **Fatores que influenciam a dinâmica florestal após exploração de madeira na Amazônia brasileira**. 2019. 194 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-02092019-095634/pt-br.html>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FABRIGAR, L. R.; WEGENER, D. T. **Exploratory factor analysis**. New York: Oxford University Press, 2012. Disponível em: <https://global.oup.com/academic/product/exploratory-factor-analysis-9780199734177> . Acesso em: 17 ago. 2026.

FERREIRA, L. V.; STOHLGREN, T. J. Effects of river level fluctuation on plant species richness, diversity, and distribution in a floodplain forest in central Amazonia. **Oecologia**, v. 120, n. 4, p. 582-587, 1999. DOI: [10.1007/s004420050893](https://doi.org/10.1007/s004420050893) . Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004420050893>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FORTIN, M. J.; DALE, M. R. T. **Spatial analysis: a guide for ecologists**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: [10.1017/CBO9780511542039](https://doi.org/10.1017/CBO9780511542039) . Disponível

em:

<https://www.cambridge.org/core/books/spatial-analysis/7E24BBFA121C16F08AC8E9F7AC3BA6A0>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FURQUIM, S. A. C. *et al.* Pedogenesis in a Pleistocene fluvial system of the Northern Pantanal – Brazil. **Geoderma**, v. 255-256, p. 58-69, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611500143X>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FURTADO, S. S. *et al.* Parâmetros morfológicos em matrizes de *Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera* D. C. em agroecossistemas de várzea no município de Cametá-PA. In: SOUSA, C. S.; LIMA, F. S.; SABIONI, S. C. (org.). **Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável**. Guarujá: Editora Científica Digital, 2021. v. 3, cap. 20, p. 264-277. DOI: 10.37885/210203032. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/210203032> Acesso em: 17 ago. 2026.

GOMES, K. M. A. *et al.* Estrutura e distribuição espacial de *Licania macrophylla* em ecossistema de várzea no estuário amazônico. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 9, n. 1, p. 9-16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5380/biofix.v9i1.93838>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/biofix/article/view/93838>. Acesso em: 17 ago. 2026.

GONÇALVES, V. V. C. **Impactos socioambientais em áreas de várzea: transformações na paisagem pela perda de floresta na Amazônia Central**. 2024. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/10705>. Acesso em: 10 ago. 2026.

GOOVAERTS, P. Spatial interpolation. In: HUANG, B. (ed.). **Comprehensive Geographic Information Systems**. Oxford: Elsevier, 2018. v. 1, p. 481–508. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124095489095981>. Acesso em: 17 ago. 2026.

GRÄLER, B.; PEBESMA, E.; HEUVELINK, G. Spatio-temporal interpolation using gstat. **The R Journal**, v. 8, n. 1, p. 204-218, 2016. DOI: 10.32614/RJ-2016-014. Disponível em: <https://journal.r-project.org/articles/RJ-2016-014/> Acesso em: 17 ago. 2026.

GROSS, J.; LIGGES, U. **Nortest**: tests for normality. R package version 1.0-4. 2015. Disponível em: <https://pbil.univ-lyon1.fr/CRAN/web/packages/nortest/nortest.pdf> Acesso em: 17 ago.

GUINDANI, A. N. **Efeitos do alagamento sazonal em assembleias de formigas (Hymenoptera: Formicidae) nas florestas de terra-firme, igapó e várzea na Amazônia Central.** 2023. 38 f. Dissertação (Mestrado em Zoologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9573>. Acesso em: 10 ago. 2026.

HAIR, J. F. *et al.* **Multivariate data analysis.** 8. ed. Andover: Cengage Learning EMEA, 2019. Disponível em: <https://au.cengage.com/c/multivariate-data-analysis-8e-hair-babin-anderson-black/9781473756540/>. Acesso em: 17 ago. 2026.

HAUSER, M. W. *et al.* Geomorphology influences soil and tree structure in Amazonian floodplain ecosystems. **Geomorphology**, v. 414, p. 108396, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108396>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X22002896>. Acesso em: 17 ago. 2026.

HOMMA, A. K. O. Madeira na Amazônia: extração, manejo ou reflorestamento? **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 7, n. 13, p. 147-161, 2011. Disponível em: <https://www.basa.com.br/revista/index.php/amazoniacienciadesenvolvimento/article/view/180>. Acesso em: 10 ago. 2026.

HÖRMANN, G. *et al.* The role of Andean mountain uplift in the diversification of Amazonian flora and fauna – a review. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, p. 103456, 2021. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103456. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598112100223X>. Acesso em: 20 ago. 2026.

JARDIM, L. W. L. **A influência de eventos hidrológicos extremos sobre a diversidade florística em quintais agroflorestais: estudo de caso na Terra Nova - Careiro da Várzea-AM.** 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7527>. Acesso em: 10 ago. 2026.

FLORES JÚNIOR, R. **Parametrização de algoritmos empíricos e algoritmo quasi-analítico QAA para estimativa de clorofila-a em lagos da várzea do rio Amazonas.** 2019. 129 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3SUQ3U2>. Acesso em: 10 ago. 2026.

JUNK, W. J. *et al.* A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0190-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13157-011-0190-7>. Acesso em: 20 ago. 2026.

JUNK, W. J. *et al.* Áreas alagáveis: definições e características ecológicas gerais. In: JUNK, W. J. *et al.* (org.). **Várzeas Amazônicas: desafios para um manejo sustentável**. Manaus: Editora do INPA, 2020. v. 1, p. 18-35. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346020481_Varzeas_Amazonicas. Acesso em: 10 ago. 2026.

KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141-151, 1960. DOI: 10.1177/001316446002000116. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001316446002000116>. Acesso em: 20 ago. 2026

KASSAMBARA, A. **Practical guide to principal component methods in R: PCA, M(CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra**. [S. l.]: STHDA, 2017. Disponível em: https://www.datanovia.com/en/wp-content/uploads/dn-tutorials/book-preview/pca_preview.pdf . Acesso em: 26 jul. 2025.

KOMSTA, L.; NOVOMESTKY, F. **Moments**: moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests. R package version 0.14.1. 2015. DOI: 10.32614/CRAN.package.moments. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=moments>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LAMEIRA, M. K. S. **Análise da estrutura horizontal e composição de uma floresta tropical como subsídio à ampliação do seu potencial produtivo para o manejo florestal**. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9602>. Acesso em: 10 ago. 2026.

LARK, R. M.; BISHOP, T. F. A. Scale- and location-dependent correlations of soil strength: the role of the range of influence in agricultural soil. **Geoderma**, v. 337, p. 1134-1146, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198706002480> . Acesso em: 17 ago. 2026.

LATORRE, D. *et al.* Andean sediment flux to the Amazon floodplain: modern rates and holocene variations. **Global and Planetary Change**, v. 225, p. 104127, 2023. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104127. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092181812300092X>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LATRUBESSE, E. M. *et al.* Geomorphology of the Amazon basin and its rivers: a review. In: SHRODER, J. F. (ed.). **Treatise on Geomorphology**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2022. v. 8, p. 228-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00096-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128182345000967>. Acesso em: 17 ago. 2026.

LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? **Ecology**, v. 74, n. 6, p. 1659-1673, 1993. DOI: 10.2307/1939924. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1939924>. Acesso em: 20 ago. 2026

LELIS, A. **Instituto Mamirauá acompanha recuperação em áreas de manejo florestal**. Tefé: Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, 2017. Disponível em: <https://mamiraua.org.br/noticias/instituto-mamiraua-acompanha-recuperacao-em-areas-de-manejo-florestal/>. Acesso em: 10 ago. 2026.

LENTINI, M. *et al.* Amazonas, o gigante florestal brasileiro: desafios e oportunidades para o uso e a conservação das florestas naturais de produção. **Boletim Timberflow**, Piracicaba, n. 5, set. 2021. DOI: [10.13140/RG.2.2.21906.32968](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21906.32968) Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354784742_Amazonas_o_gigante_florestal_brasileiro_desafios_e_oportunidades_para_o_uso_e_a_conservacao_das_florestas_naturais_de_producao. Acesso em: 20 ago. 2026.

LIESENFELD, M. V. A. *et al.* **Ciências ambientais na Amazônia**. Rio Branco: Stricto Sensu Editora, 2022. DOI: 10.35170/ss.ed.9786586283761. Disponível em: <https://sseditora.com.br/ebooks/ciencias-ambientais-na-amazonia/>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LONGLEY, P. A. *et al.* **Geographic Information Science & Systems**. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2021. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Geographic_Information_Science_and_Systems.html?id=C_EwBgAAQBAJ. Acesso em: 18 ago. 2026.

LUCAS, A. C. C. *et al.* **Projeto de banco de dados de serviços de engenharia para o Estado do Pará**. 2024. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2024. Disponível em:

<https://bdm.ufpa.br/items/02835e96-f2f5-41d7-a2a1-2f372770bd11>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LUNA-NOLE, C. D. *et al.* Soil and topographic drivers of tree community assembly in central Amazonian floodplain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 500, p. 119619, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119619>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811272100685X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MANGIAFICO, S. S. **Summary and analysis of extension program evaluation in R**, version 1.24.8, revised 2026. New Brunswick: Rutgers Cooperative Extension, 2016. Disponível em: <https://rcompanion.org/handbook/>. Acesso em: 17 maio 2025.

MARINHO, T. A. S. **Distribuição e estrutura da população de quatro espécies madeireiras em uma floresta sazonalmente alagável na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Amazônia Central**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Botânica) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2008. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/4096>. . Acesso em: 18 ago. 2026.

MARTINS, K. G. *et al.* Incorporating spatial autocorrelation in species distribution models: a review of methods and applications in ecology. **Ecological Modelling**, v. 475, p. 110301, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438002200277X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MARTINS, V. F. *et al.* Integrating remote sensing and spatially explicit models to assess habitat suitability for plant communities in a tropical urban landscape. **Ecological Informatics**, v. 66, p. 101455, 2021. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101455. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157495412100236X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MASSEY, F. J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951. DOI: 10.1080/01621459.1951.10500769. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1951.10500769>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MATOS, J. A. Aspectos geomorfológicos das “terras-caídas” em ambiente de várzea no Careiro da Várzea-AM. **Revista GeoUECE**, v. 8, n. 15, p. 78-88, 2019. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/GeoUECE/article/view/2148>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MEDEIROS, M. S. de. **Condições de vida e de saúde no contexto de uma unidade de conservação ambiental de uso sustentável na Amazônia Brasileira**. 2018. 257 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Aggeu Magalhães, Fundação Oswaldo Cruz, Recife, 2018. Disponível em:

<https://arca.fiocruz.br/items/90d81a0c-3740-4e41-84a9-76d752592069>. Acesso em: 10 ago. 2026.

MONTEIRO, M. C.; BHERING, S. B. Geoestatística aplicada à ecologia e ciências ambientais: conceitos e fundamentos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 488-502, 2019. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/238711> Acesso em: 18 ago. 2026.

MORRISON, D. A. **A framework for ecological data analysis**. Chicago: University of Chicago Press, 2013. Disponível em:

<https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/F/bo14521098.html>. Acesso em: 18 ago. 2026.

NASCIMENTO, K. A. O. *et al.* **Condições térmicas ambientais relacionadas à exploração florestal na Amazônia Central**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/352375165_Environmental_Thermal_Conditions_Related_to_Performance_Dynamics_and_Safety_of_Logging_in_the_Brazilian_Amazon. Acesso em: 18 ago. 2026.

NETO, R. N. C.; ARAÚJO, N. J. S.; LOUZADA, C. O. A geoecologia da paisagem do rio Tarauacá (curso inferior) no aspecto socioeconômico, Envira-AM. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 46, p. 224-244, 2024. Disponível em:

<https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/10492>. Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A stepwise approach for analysing the regional scale spatial variability of soil. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 6, p. 842-854, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.12191>. Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVEIRA, I. A. *et al.* Krigagem ordinária e seus parâmetros na análise da variabilidade espacial de atributos do solo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 9, n. 3, p. e7083, 2022. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/agrineo>. Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVEIRA, L. C. **Efeito da exploração da madeira e de diferentes intensidades de desbastes sobre a dinâmica da vegetação de uma área de 136ha na Floresta Nacional do Tapajós**. 2005. 183 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. Disponível em:

<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/4825>. Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVEIRA, L. F. S.; DEVIDE, A. C. P.; ABDO, M. T. V. N. Produção de ramos e cascas de guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess.) no desbaste de árvores juvenis. **Revista Intellectus**, v. 67, n. 1, p. 227-233, 2022. Disponível em: <https://revistaintellectus.com.br/index.php/intellectus/article/view/1000>. Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1039734>. Acesso em: 18 ago. 2026.

PAIVA, L. T. *et al.* **O princípio da solidariedade intergeracional e o acesso à água potável: o caso das comunidades ribeirinhas da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá**. 2024. Dissertação (Mestrado em Direito Ambiental) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2024. Disponível em: <https://pos.uea.edu.br/direitoambiental/categoria.php?area=TIT>. Acesso em: 18 ago. 2026.

PAROLIN, P. *et al.* A falta de dados e a urgência da conservação das áreas úmidas (várzeas) da Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 139-146, 2013. OI: 10.1590/S0044-59672013000200001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/yz549YY8ZgHY6JpDSmZ9ypp/> . Acesso em: 10 ago. 2026.

PAROLIN, P. *et al.* Tolerance to submergence in herbaceous and woody species of the Amazonian floodplains. **AoB Plants**, v. 8, p. plw034, 2016. Disponível em: <https://academic.oup.com/aobpla/article/doi/10.1093/aobpla/plw034/201015> . Acesso em: 10 ago. 2026.

PEBESMA, E.; BIVAND, R. **Spatial Data Science: with applications in R**. London: Chapman and Hall/CRC, 2023. DOI: 10.1201/9780429459016. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780429459016/spatial-data-science-edzer-pebesma-roger-bivand>. Acesso em: 18 ago. 2026.

PEIXOTO, R. B. *et al.* Sources and transport of nutrients in the Brazilian Amazon Basin. **Water Research**, v. 226, p. 119182, 2022. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119182 Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313542200889X> . Acesso em: 18 ago. 2026.

PELLISSIER, L. *et al.* The roles of environment, space, and phylogeny in determining functional dispersion of rodents (Rodentia) in the Hengduan Mountains, China.

Ecology and Evolution, v. 3, n. 11, p. 3794-3807, 2013. DOI:

<https://doi.org/10.1002/ece3.3613>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ece3.3613>. Acesso em: 18 ago. 2026.

PEREIRA, L. C. C. *et al.* **Variação na composição de espécies arbóreas das florestas alagadas ao longo do Rio Branco, Roraima**. 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufrr.br:8080/jspui/handle/prefix/482>. Acesso em: 18 ago. 2026. [1]

PILOYAN, A.; TEMPFLI, K. Comparison of ordinary kriging and regression kriging models for spatial prediction of some soil properties (case study: Kaleybar Region, East Azerbaijan, Iran). **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, p. 2735-2748, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s13762-017-1372-y>. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-017-1372-y>. Acesso em: 10 ago. 2026.

PINTO, M. C. **Análise espaço-temporal do sistema fluvial Solimões-Amazonas: alterações hidrogeomorfológicas e a geodiversidade no Médio Rio Amazonas**. 2024. 167 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/10435>. Acesso em: 18 ago. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 24 jul. 2025.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011. DOI: 10.1.1.431.144. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/267205556_Power_Comparisons_of_Shapiro-Wilk_Kolmogorov-Smirnov_Lilliefors_and_Anderson-Darling_Tests. Acesso em: 20 ago. 2026.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/> . Acesso em: 20 ago. 2025.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ. **Plano de Gestão**: Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá – RDSM: v. 2 – Planejamento. 3. ed. rev. e ampl. Tefé, AM: IDSM, 2014. Disponível em: https://documentacao.socioambiental.org/ato_normativo/UC/2505_20170131_163418.pdf. Acesso em: 18 ago. 2026.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ. **Projetos de restauração ecológica**: mais de 25.000 hectares de floresta. Tefé: IDSM, 10 nov. 2025. Disponível em: <https://mamiraua.org.br/noticias/projetos-de-restauracao-ecologica-mais-de-25-000-hectares-de-floresta/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

REVELLE, W. **Psych**: procedures for psychological, psychometric, and personality research. R package version 2.4.3. [S. l.]: CRAN, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=psych>. Acesso em: 26 jul. 2025.

RIBEIRO JR, P. J.; DIGGLE, P. J. **geoR**: analysis of geostatistical data. R package version 1.9-5. [S. l.]: CRAN, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>. Acesso em: 26 jul. 2025.

RODRIGUES, J. C. W. *et al.* A importância da produção de mudas de essências florestais na região amazônica: uma revisão sistemática. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 10-24, 2023. DOI: 10.31072/rcf.v14i1.1144. Disponível em: <https://revista.unifaema.edu.br/index.php/revista-unifaema/article/view/1144>. Acesso em: 20 ago. 2026.

ROSA, M. F. **Análise histórica do uso dos recursos madeireiros na várzea do Médio Solimões, Amazônia Central**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3638> . Acesso em: 18 ago. 2026.

ROSA, S. A. **Modelos de crescimento de quatro espécies madeireiras de floresta de várzea da Amazônia Central por meio de métodos dendrocronológicos**. 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Botânica) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sejana-Rosa>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SABOGAL, C. *et al.* **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira:** restrições e oportunidades: relatório síntese. Belém, PA: CIFOR, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/376134>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTANA, J. A. S. *et al.* Uso de técnicas geoestatísticas para análise da distribuição espacial da vegetação em áreas de preservação permanente. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3492-3506, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/250785>. Acesso em: 10 ago. 2026.

SANTOS, C. M. dos. **Cartografia temática com QGIS:** técnicas e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. Disponível em: <https://www.ofitexto.com.br/livro/cartografia-tematica-com-qgis/>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTOS, G. R. V. dos; MÜLLER FILHO, A. Caracterização da madeira comercializada em seis municípios do Amazonas. Revista do Instituto Florestal, v. 36, p. 1-12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24278/rif.2024.36e938> Acesso em: 18 ago. 2026. Disponível em: <https://rif.emnuvens.com.br/revista/article/view/938>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTOS, T. O. dos *et al.* The impacts of deforestation and burning on the anthropogenic climate of the Brazilian Amazon: a review. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 11, n. 2, p. 157-182, 2017. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rga/article/view/4581> . Acesso em: 18 ago. 2026.

SCHÖNGART, J.; JUNK, W. J. Clima e hidrologia nas várzeas da Amazônia Central. In: JUNK, W. J. *et al.* (org.). **Várzeas Amazônicas:** desafios para um manejo sustentável. Manaus: Editora do INPA, 2020. v. 1, p. 44-65. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346020481_Varzeas_Amazonicas. Acesso em: 18 ago. 2026.

SLOCUM, T. A. *et al.* **Thematic cartography and geovisualization**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003150527. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003150527/thematic-cartogr>

[aphy-geovisualization-terry-slocum-robert-mcmaster-fritz-kessler-hu-huaiyu-wang](#). Acesso em: 20 ago. 2026.

SIEBERT, F. *et al.* The role of spatial autocorrelation in plant community assembly: insights from a tropical forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 30, n. 1, p. 123-132, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jvs.12712>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SILVA FILHO, E. C. e. Impactos ambientais na Bacia Hidrográfica Amazônica. In: SILVA, J. I. A. O.; RAMALHO, Â. M. C.; SOUZA, C. M. M. (org.). **Clima, Recursos Hídricos e Planejamento**. Campina Grande: Editora UFCG, 2024. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/42340>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SILVA, F. M. **Reservas de desenvolvimento sustentável como resposta ao desequilíbrio ecológico**. 2021. 30 f. Monografia (Técnico em Biotecnologia) – Etec Prof. Carmelino Corrêa Júnior, Centro Paula Souza, Franca, 2021. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/9916/1/TCC-3-%20Fernando%20Marc%20elino.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SILVA NETO, J. C. A. da; ALEIXO, N. C. R. Apropriação da natureza e processos erosivos na região do Médio Solimões – AM. **Revista GeoUECE**, v. 3, n. 4, p. 151-176, 2021. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/GeoUECE/article/view/6989> . Acesso em: 14 set. 2024.

SOUZA, D. A. T. de. **Impactos das mudanças climáticas sobre a distribuição de espécies arbóreas da várzea na Amazônia Central**. 2022. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2022. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/38201>. Acesso em: 18 ago. 2026.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 27 abr. 2025.

TER BRAAK, C. J. F.; SMILAUER, P. **Canoco reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.0)**. Ithaca: Microcomputer Power, 2012. Disponível em: <https://www.canoco5.com>. Acesso em: 18 ago. 2026.

DAVIDSON, E. A. *et al.* The Amazon Basin in transition. **Nature**, v. 481, p. 321-328, 2012. DOI: 10.1038/nature10717. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature10717>. Acesso em: 18 ago. 2026.

TOURINHO, M. M.; SANTOS, S. R. M. dos; COUTINHO, R. M. V. Várzeas da Amazônia: ensaio para uma travessia epistemológica. **Revista Gestão e Conhecimento**, v. 19, n. 1, p. e393, 2025. DOI: 10.55908/RGCV19N1-005. Disponível em: <https://rgc.emnuvens.com.br/rgc/article/view/393>. Acesso em: 18 ago. 2026.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977. Disponível em: https://archive.org/details/exploratorydataa0000tuke_7616. Acesso em: 18 ago. 2026.

REDE SIMEX. **A evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 a 2020 e as oportunidades para seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década**. Belém, PA: Imazon, 2022. Disponível em: <https://imazon.org.br/livros/a-evolucao-do-setor-madeireiro-na-amazonia-entre-1980-a-2020-e-as-oportunidades-para-seu-desenvolvimento-inclusivo-e-sustentavel-na-proxima-decada>. Acesso em: 18 ago. 2026.

VUILLE, M. *et al.* Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – impacts, uncertainties and challenges ahead. **Earth-Science Reviews**, v. 176, p. 195-213, 2018. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.09.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001282521730303X>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WATSON, J. C. Establishing evidence for internal structure using exploratory factor analysis. **Measurement and Evaluation in Counseling and Development**, v. 50, n. 4, p. 232-238, 2017. DOI: 10.1080/07481756.2017.1336931. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07481756.2017.1336931>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. DOI: 10.1002/9780470517277. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470517277>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WICKHAM, H.; GROLEMUND, G. **R for Data Science**: import, tidy, transform, visualize, and model data. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. Disponível em: <https://r4ds.had.co.nz>. Acesso em: 17 maio 2025.

WITTMANN, F.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 196, n. 1, p. 199-212, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.02.060. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112704001948>. Acesso em: 20 ago. 2026.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**. Botucatu: FEPAF, 2015. Disponível em: http://www.fepaf.com.br/editora/arquivos_download/analise_espacial.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

ZHANG, J. *et al.* A comparative study of cross-validation techniques for spatial data: a case study of soil organic carbon mapping. **Geoderma**, v. 369, p. 115124, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670612030143X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N. A protocol for conducting and presenting results of regression-type analyses. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 7, n. 6, p. 636-645, 2016. DOI: 10.1111/2041-210X.12577. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.12577>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CAPÍTULO I

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E RELAÇÕES AMBIENTAIS DE *Calophyllum brasiliense* Cambess. NO MÉDIO SOLIMÕES

RESUMO

Este capítulo investigou os padrões de distribuição espacial e as relações ambientais de populações remanescentes de *Calophyllum brasiliense* (Jacareúba) no Médio Solimões, Amazonas. Foram estudadas três populações (JAC1, JAC2, JAC3) em áreas de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, integrando análises estatísticas descritivas, geoestatística (variografia, krigagem, validação cruzada) e multivariada (Análise Fatorial Exploratória) aplicadas a indivíduos georreferenciados (254) e amostras físico-químicas de solo (178). Os resultados demonstraram um padrão universal de distribuição agregada em todas as populações, confirmado por semivariogramas com dependência espacial moderada e alcances práticos estreitamente sintonizados, variando entre 274 e 288 m, independente das oscilações de densidade demográfica. Contudo, evidenciou-se uma marcante descontinuidade espacial na matriz abiótica, onde a esmagadora maioria dos atributos químicos, físicos e eixos fatoriais latentes exibiu Efeito Pepita Puro (EPP), caracterizando o ambiente edáfico como um mosaico estocástico. Essa quebra de dependência espacial foi atribuída à dinâmica hidrodinâmica e sedimentar de alta energia, típica de diques marginais (restingas) e planícies aluviais. Os valores discrepantes (outliers) de nutrientes e frações granulométricas foram integralmente mantidos devido à sua autêntica plausibilidade biogeoquímica, representando "ilhas de fertilidade" cruciais em microescala. A avaliação rigorosa por validação cruzada barrou o uso forçado da krigagem ordinária para modelos preditivamente frágeis (como acidez potencial e manganês na JAC2), direcionando o emprego do interpolador determinístico Inverse Distance Weighting (IDW) para salvaguardar a acurácia cartográfica. A modelagem revelou estratégias e associações ecológicas específicas por área: na JAC1, o desacoplamento entre a espécie e os eixos principais edáficos sugere a forte influência de clareiras estocásticas ou do legado histórico de exploração; na JAC2, observou-se uma estrita sincronia de escala espacial entre a densidade da espécie (~274 m) e o gradiente validado de Saturação por Bases (V: ~278 m), além da emergência de um único fator multivariado estruturado associado ao boro; na JAC3, que ocupa a topografia mais plana e o cenário edáfico mais fragmentado, constatou-se uma estratégia de seleção hierárquica de habitat, na qual o contínuo espacial de pH (alcance de 129 m) atua como um filtro ambiental primário de macroescala, definindo as zonas de adequação fisiológica onde a espécie se estabelece probabilisticamente. Conclui-se que as populações de *C. brasiliense* persistem de forma resiliente através de núcleos agregados estruturados, utilizando sinalizadores edáficos contínuos de fundo para navegar na extrema imprevisibilidade local das planícies de inundação amazônicas.

Palavras-chave: Arranjo populacional; Variografia; Várzea amazônica; Filtros edáficos; Resiliência florestal; Silvicultura tropical.

ABSTRACT

Historical logging in the Middle Solimões region drastically reduced populations of *Calophyllum brasiliense* (Jacareúba) and *Platymiscium ulei* (Macacaúba), creating an urgent need to understand their current spatial arrangements to support management and conservation efforts. This study investigated the occurrence and structure of three Jacareúba populations (JAC1, JAC2, JAC3) and two Macacaúba populations (MAC1, MAC2) in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, correlating them with soil physicochemical attributes collected in the field between 2023 and 2025 (with analytical determinations completed in 2026). The methodology integrated geostatistical tools (variography, ordinary kriging, cross-validation) and multivariate analysis (Exploratory Factor Analysis) applied to 313 georeferenced tree specimens and 259 soil samples. Results revealed contrasting post-disturbance trajectories. *C. brasiliense* maintained, across its clusters, an aggregated spatial pattern with moderate spatial dependence and practical ranges between 274 m and 288 m, demonstrating resilience and autonomous recovery capacity. In contrast, *P. ulei* exhibited an independent pattern with Pure Nugget Effect in both remaining populations, characterizing severe demographic collapse associated with a potential Allee effect. In MAC1, the species was restricted to an equally random bipolar fertility/acidity gradient (pH, V, H+Al), whereas in MAC2 the abiotic matrix proved chaotic, precluding Factor Analysis (KMO = 0.17). It is concluded that the same historical pressure produced distinct dynamic responses according to the intrinsic vulnerability of each taxon. Passive protection is sufficient for Jacareúba regeneration, whereas Macacaúba requires active enrichment interventions and differentiated silvicultural management.

Keywords: Population arrangement; Variography; Amazonian floodplain; Edaphic filters; Forest resilience; Tropical silviculture.

1 INTRODUÇÃO

Calophyllum brasiliense Cambess., popularmente conhecida como Jacareúba, guanandi ou landi, é uma espécie arbórea emblemática das florestas tropicais das Américas, com distribuição que se estende do México ao sul do Brasil (Carvalho, 2003; Fernández *et al.*, 2021; Lorenzi, 2009). Na Amazônia, destaca-se como um dos componentes mais valorizados das florestas de várzea, onde desempenha papel ecológico fundamental na estruturação desses ecossistemas periodicamente inundados (Fonseca *et al.*, 2019; Parolin *et al.*, 2013; Wittmann *et al.*, 2010). Sua madeira, de cor amarelada a esverdeada, de alta densidade e notável resistência natural à deterioração, foi durante décadas um dos pilares da economia madeireira regional, especialmente nas margens dos rios de água branca, como o Solimões (Ayres *et al.*, 2006; Barros; Uhl, 1995; Kittredge, 1964).

A espécie em foco, *C. brasiliense* Cambess., posiciona-se taxonomicamente no reino Plantae, divisão Magnoliophyta, classe Magnoliopsida, ordem Malpighiales e família Clusiaceae, Guttiferae, em sistemas mais antigos (APG IV, 2016; Flora Do Brasil, 2020). Esta árvore perenifólia, destaca-se não apenas por seu valor madeireiro histórico (Ayres, 2006; Barros; Uhl, 1995), mas por um conjunto de atributos biotecnológicos (Fernández *et al.*, 2021; Husain *et al.*, 2018) e ecológicos (Parolin *et al.*, 2013; Wittmann *et al.*, 2010) que a configuram como uma espécie-chave para estudos de manejo e conservação (Fonseca *et al.*, 2019). Do ponto de vista técnico-científico, sua madeira é classificada como pesada, densidade entre 0.75 e 0.90 g/cm³, de grão irregular e textura média, com notória durabilidade natural devido à presença de resinas e compostos secundários (Longo; Lima, 2018; Lorenzi, 2009). Fitoquimicamente, é reconhecida como fonte de uma complexa mistura de metabólitos bioativos, com destaque para os triterpenos e biflavonoides do grupo das calanolídeas, os quais conferem propriedades farmacológicas

significativas, incluindo atividade antiviral, anti-inflamatória e antitumoral (Fernández *et al.*, 2021; Husain *et al.*, 2018).

Ecologicamente, sua adaptação a solos hidromórficos e a tolerância ao alagamento periódico, atributos mediados por adaptações morfofisiológicas como lenticelas hipertrofiadas e aerênquima no sistema radicular, fazem de *C. brasiliense* um componente estrutural fundamental das florestas de várzea, influenciando a ciclagem de nutrientes e oferecendo recursos para a fauna (Ferreira, 2000; Parolin *et al.*, 2013). Portanto, a compreensão detalhada de sua ecologia e distribuição, como proposta neste capítulo, é essencial para conciliar o potencial de uso sustentável dessa valiosa espécie com a urgente necessidade de conservação de seus remanescentes populacionais na Amazônia.

A exploração da Jacareúba no Médio Solimões intensificou-se ao longo do século XX, impulsionada pela demanda por madeiras duráveis para construção civil, naval e mobiliária (Ayres, 2006; Rosa, 2008). Relatos históricos e o conhecimento tradicional das comunidades ribeirinhas da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSD) atestam que, nas décadas de 1970 e 1980, a espécie foi alvo de corte seletivo intenso, frequentemente sem critérios técnicos de manejo (Abreu, 2018; Ramos, 2020). Esta superexploração, somada à sua lenta taxa de crescimento (Longhi, 1997; Wadsworth, 1997) e a possíveis limitações naturais de regeneração em várzeas (Ferreira, 2000; Parolin, 2002), resultou em um drástico declínio de suas populações, esgotando estoques naturais (Ayres, 2006; Barros; Uhl, 1995) e levando-a a um status de relativa raridade na paisagem atual (Abreu, 2018; Parolin *et al.*, 2013). A criação da RDSD em 1996 e a subsequente implementação de acordos de proteção representaram um marco para a conservação da espécie (Isaac *et al.*, 2009; Queiroz, 2005), mas o sucesso dessas medidas em termos de recuperação populacional permanece uma incógnita (Coelho *et al.*, 2025; Marinho, 2008; Rodrigues *et al.*, 2023).

Ecologicamente, *C. brasiliense* apresenta adaptações notáveis ao regime de pulsos de inundação, como lenticelas hipertrofiadas no caule e formação de aerênquima que facilitam a troca gasosa durante os períodos de alagamento (Ferreira, 2000; Maia *et al.*, 2020; Parolin, 2002). No entanto, sua regeneração é considerada crítica, com estabelecimento de plântulas dependente de clareiras naturais (Poorter, 2001; Schöngart, 2003) e sujeito à intensa herbivoria por invertebrados e pequenos vertebrados (Terborgh, 2012) e à competição intra e interespecífica por luz, nutrientes e espaço (Ferreira, 2000; Nascimento *et al.*, 2016). A espécie demonstra preferência por solos mais férteis e bem drenados, frequentemente associados a áreas de várzea alta, onde o período de inundação é mais curto (Assis *et al.*, 2015; Wittmann *et al.*, 2004). Este nicho ecológico específico (Ferreira, 2000) a torna particularmente sensível a alterações no regime hidrológico e na integridade do habitat (Barreto *et al.*, 2022; Hauser *et al.*, 2022).

Dada esta conjunção de valor econômico histórico (Ayres, 2006; Kittredge, 1964), pressão antrópica passada (Barros; UHL, 1995; Rosa, 2008) e vulnerabilidade ecológica (Hauser *et al.*, 2022; Parolin *et al.*, 2013), investigar o estado atual das populações remanescentes de *C. brasiliense* na região do Médio Solimões torna-se imperativo. É necessário ir além dos relatos qualitativos e observações não sistemáticas (Laurance *et al.*, 2012) e quantificar precisamente como esses indivíduos sobreviventes estão distribuídos no espaço (Fortin; Dale, 2005), que fatores ambientais locais (principalmente edáficos) estão correlacionados com sua ocorrência (John *et al.*, 2007; Luna-Nole *et al.*, 2021) e que grau de estruturação espacial suas populações apresentam após décadas de perturbação e proteção (Chazdon, 2008; Coelho *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2023). A compreensão desses padrões é a base para se avaliar a eficácia das medidas de conservação, diagnosticar a capacidade de auto recuperação da espécie e gerar conhecimento fundamental para o planejamento de estratégias ativas de manejo e restauração.

No contexto do Médio Solimões, *C. brasiliense* transcende seu valor madeireiro histórico para assumir um papel ecológico estrutural (Parolin *et al.*, 2013; Wittmann *et al.*, 2010) e um significado real para as comunidades locais (Abreu, 2018; Ayres, 2006). Ambientalmente, a adaptação desta espécie às condições de hidroperíodo da várzea, incluindo mecanismos de tolerância à inundação, como a formação de pneumatóforos, a torna uma espécie engenheira do ecossistema, contribuindo para a estabilização das margens, a ciclagem de nutrientes e a criação de microhabitats (Ferreira, 2000; Parolin *et al.*, 2013). Ecologicamente, constitui um recurso alimentar-chave para a fauna ictio e ornitológica durante os períodos de cheia, quando seus frutos e sementes são amplamente consumidos, atuando como uma espécie nodal, indispensável na teia trófica aquático-terrestre (Goulding, 1980; Haugasen; Peres, 2005). Observa-se que para as populações ribeirinhas, a Jacareúba mantém uma importância multifuncional: além de sua madeira resistente ainda ser preferencial para usos específicos na carpintaria e construção de canoas, sua casca e outros tecidos são empregados na medicina tradicional, e sua presença na paisagem está intrinsecamente ligada à memória e à identidade cultural das comunidades da Reserva Mamirauá (Abreu, 2018; Ayres, 2006). Portanto, sua conservação é imperativa não apenas para a manutenção da integridade funcional das florestas de várzea, mas também para a sustentabilidade socioeconômica e cultural da região.

Logo, este capítulo tem como objetivo analisar a distribuição espacial e a estrutura de dependência espacial de populações remanescentes de *C. brasiliense* no Médio Solimões, e identificar suas relações com atributos físico-químicos do solo. Através de uma abordagem geoestatística, busca-se responder a questões-chave: As populações apresentam padrão agregado, indicando possível regeneração em núcleos? Qual a intensidade e o alcance da dependência espacial da sua densidade? Quais variáveis edáficas estão mais fortemente associadas à sua ocorrência? As respostas fornecerão um diagnóstico espacialmente explícito,

essencial para transformar o histórico de exploração em um futuro de conservação baseada em evidências para a Jacareúba.

2 MATERIAL E MÉTODOS

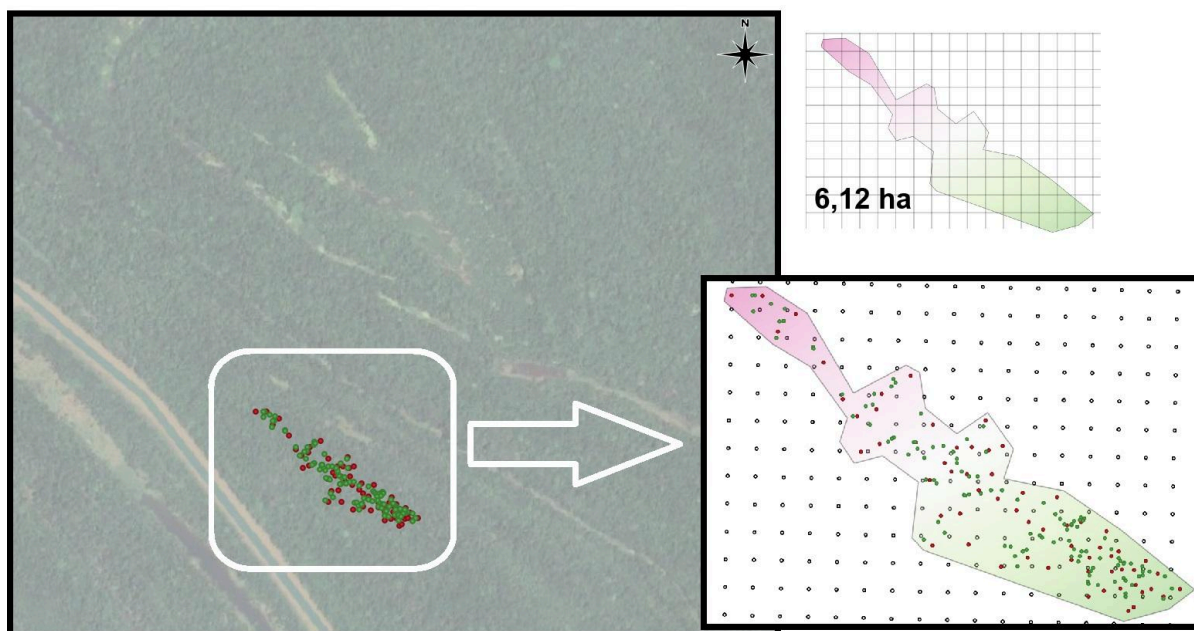
Para as informações referentes à área de pesquisa, à identificação de cada população de Jacareúba e também os atributos do solo, vide o item “2 Metodologia Compartilhada” e seus subitens (2.1, 2.2 e 2.3) deste documento.

2.1. Delimitação e Caracterização das três populações amostradas

Foram estudadas três populações naturais remanescentes de *C. brasiliense*, cada população foi georreferenciada e delimitada em campo conforme descrito no item “2 Metodologia Compartilhada” e seu subitem 2.2 deste documento, resultando em áreas totais e estruturas amostrais distintas. A população 1 com 6.72 ha foi subdividida em 53 quadrantes, onde foram registrados 115 indivíduos, além de coletadas 65 amostras de solo (Figura 1). A população 2, a mais extensa com 18 ha, foi amostrada em 110 quadrantes, contendo 57 indivíduos e 59 pontos de coleta de solo (Figura 2). Por fim, a população 3 com 6.84 ha foi organizada em 50 quadrantes, registrando-se 82 indivíduos e 54 coletas de solo (Figura 3).

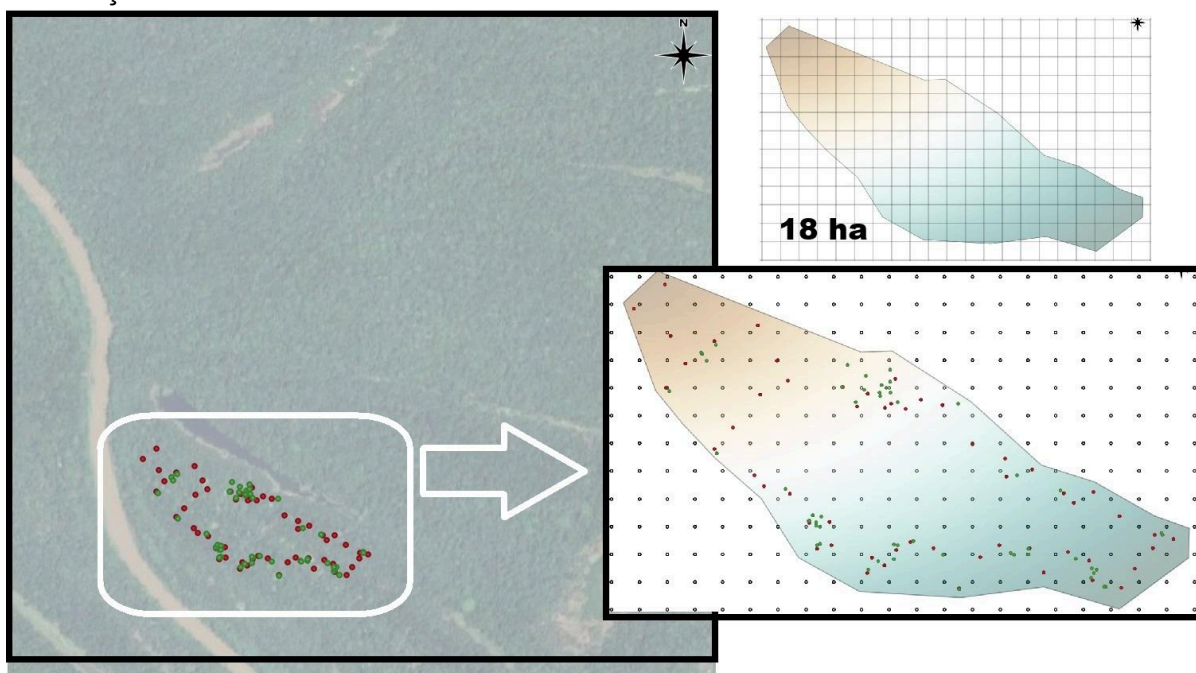
A densidade de indivíduos por quadrante é quantificada para cada uma das 213 unidades amostrais ($53 + 110 + 50$) que compõem o conjunto das três populações.

Figura 1 - População 1: delimitação da área (6.72 ha), malha de 53 quadrantes (40x40m) e distribuição espacial dos 115 indivíduos



Nota: Pontos verdes: Indivíduos; Pontos vermelhos: Coleta de solo.
Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis (2024).

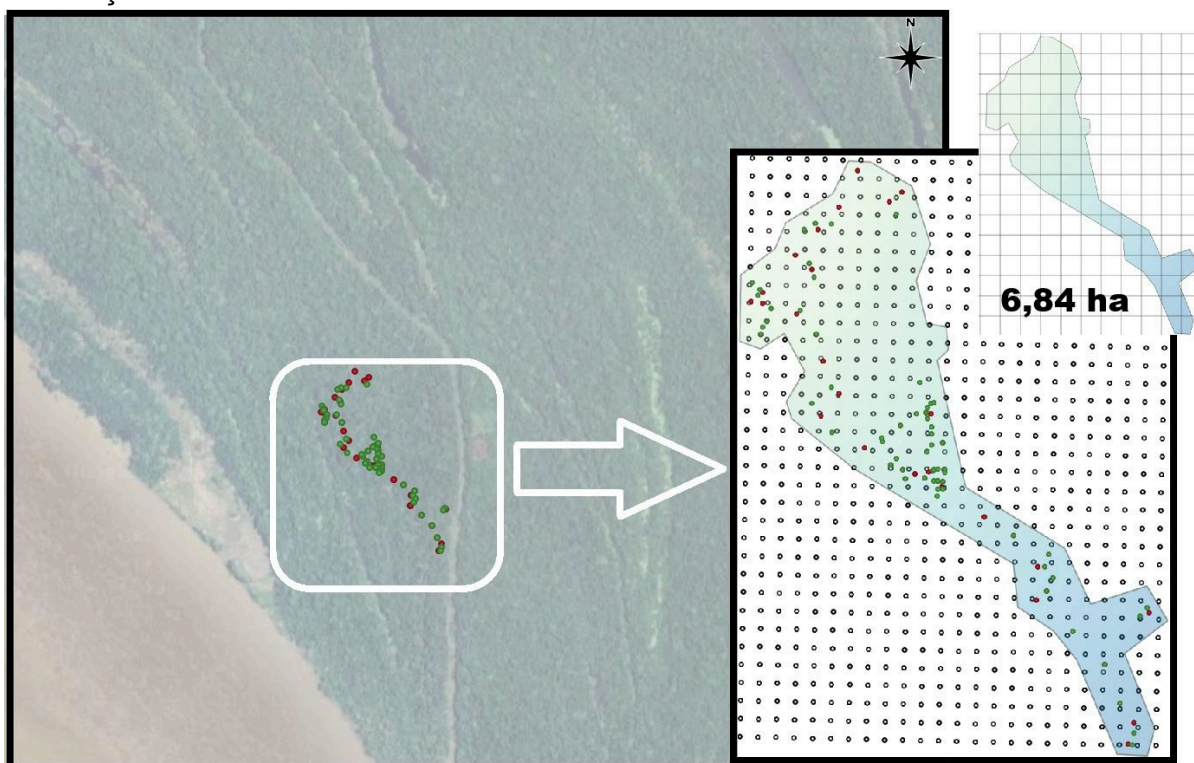
Figura 2 - População 2: delimitação da área (18 ha), malha de 110 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 57 indivíduos



Nota: Pontos verdes: Indivíduos; Pontos vermelhos: Coleta de solo.

Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis (2024).

Figura 3 - População 3: delimitação da área (6.84 ha), malha de 50 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 82 indivíduos



Nota: Pontos verdes: Indivíduos; Pontos vermelhos: Coleta de solo.

Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis (2024).

2.2. Aplicação dos Métodos Gerais

Os dados das populações de *C. brasiliense*, compostos pela matriz integrada de densidade de indivíduos e variáveis ambientais descrita na seção anterior, foram submetidos à sequência de métodos geoestatísticos e multivariados estabelecida na abordagem analítica geral (Seção 2.2 e 2.3 da Metodologia Compartilhada).

3 RESULTADOS PARCIAIS

3.1. Análise da População 1

A análise descritiva da população 1 de *C. brasiliense*, revelou um padrão de distribuição agregado, com média de 2.13 indivíduos por quadrante, porém com alta variabilidade espacial ($CV = 92.49\%$), conforme observado na tabela 1. A presença de valores mínimo (0) e máximo (8) em quadrantes distintos, aliada a um coeficiente de assimetria positivo ($C_s = 1.32$), confirma a concentração dos indivíduos em agrupamentos específicos, deixando extensas áreas sem nenhum registro.

A área de estudo apresenta topografia acentuada, caracterizada por um gradiente altimétrico substancial, com elevações que variam de 10.88 m a 75.74 m acima do nível do mar.

Quanto aos atributos edáficos, os solos apresentaram caráter ácido, com pH em água variando de 4.75 a 5.50 (média = 5.15), essa acidez química pode ser considerada de moderada a alta para ecossistemas de várzea. Com teores médios de soma de bases (SB) de $15.76 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e saturação por bases (V%) de 72.14%. Destaca-se a ampla variação no teor de fósforo (P), que variou de 6.60 a 28.60 mg dm^{-3} ($CV = 38.99\%$), e a presença de valores discrepantes (*outliers*) para potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S) e ferro (Fe) indicando manchas locais com maior concentração desses nutrientes. A matéria orgânica (MO) também apresentou alta variabilidade (1.48% a 4.99%, $CV = 32.92\%$) e seis valores atípicos, sugerindo uma distribuição irregular do material orgânico no solo.

A textura do solo é predominantemente argilosa, com teor médio de argila de 672.66 g kg^{-1} e baixa variação ($CV = 7.90\%$), enquanto a areia apresentou ampla variação (10 a 230 g kg^{-1} , $CV = 47.27\%$), refletindo a dinâmica de deposição seletiva de sedimentos de diferentes frações ao longo do gradiente topográfico. A tabela 1 sumariza estas estatísticas, fornecendo o quadro quantitativo inicial que norteará as

análises geoestatísticas e multivariadas subsequentes, visando decifrar a estrutura espacial destas relações.

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 1 de Jacareúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023

JAC1	Min	Max	$\bar{x}$	s^2	S	Cs	CV%	Outlier
Jacareúba	0	8	2.13	3.89	1.97	1.32	92,49	5
NI								
Altitude	10.88	75.74	53.71	49.47	7.03	-0.63	13.09	-
m								
pH	4.75	5.50	5.15	0.02	0.16	-0.20	3.11	-
água								
K	150.00	196.00	170.86	76.03	8.72	0.44	5.10	1
mg dm ⁻³								
P	6.60	28.60	13.08	26.01	5.10	1.09	38.99	1
mg dm ⁻³								
Ca	8.83	17.95	12.40	3.08	1.75	0.40	14.11	1
cmolc dm ⁻³								
Mg	2.01	3.90	2.93	0.17	0.41	0.14	13.99	-
cmolc dm ⁻³								
Al	0	0.62	0.21	0.03	0.16	0.69	76.19	-
cmolc dm ⁻³								
S	2.23	53.81	25.62	0.57	10.84	0.57	42.31	1
mg dm ⁻³								
B	0.19	0.36	0.27	0.16	0.04	0.16	14.81	-
mg dm ⁻³								
Cu	2.95	8.38	5.77	1.54	1.24	0.21	21.49	-
mg dm ⁻³								
Fe	91.64	334.82	189.55	46.24	2138.21	0.81	1128.05	3
mg dm ⁻³								
Mn	4.47	37.44	19.05	51.95	7.21	0.26	37.85	-
mg dm ⁻³								
Zn	0.42	3.39	1.70	0.55	0.74	0.34	43.53	

mg dm ⁻³								
H+Al	4.08	8.34	5.91	0.96	0.98	0.25	16.58	-
cmolc dm ⁻³								
m	0	4.35	1.37	1.23	1.11	0.83	81.02	-
%								
t	17.67	25.05	21.67	2.47	1.57	-0.13	7.25	-
cmolc dm ⁻³								
SB	11.84	20.80	15.76	3.40	1.85	0.28	11.74	-
cmolc dm ⁻³								
V	61.00	83.00	72.14	23.61	4.86	-0.08	6.74	-
%								
MO	1.48	4.99	2.43	0.64	0.80	1.41	32.92	6
%								
Argila	570.00	790.00	672.66	2822.99	53.13	0.04	7.90	-
g kg ⁻¹								
Areia	10.00	230.00	115.31	2971.33	54.51	0.20	47.27	-
g kg ⁻¹								
Silte	140.00	260.00	212.00	359.30	18.96	-0.89	8.94	1
mg dm ⁻³								

Nota: min: mínimo; max: máximo; $\bar{x}$: média; s^2 : variância; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria. NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca de cátions efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Observa-se teores médios de soma de bases (SB) de 15.76 cmolc dm⁻³ e saturação por bases (V) de 72.14. Destaca-se a ampla variação no teor de fósforo (P), que variou de 6.60 a 28.60 mg dm⁻³ (CV = 38.99%), e a presença de valores discrepantes (*outliers*) para potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S) e ferro (Fe), indicando manchas locais com maior concentração desses nutrientes.

A matéria orgânica (MO) também apresentou alta variabilidade (1.48% a 4.99%, CV = 32.92%) e seis valores atípicos, sugerindo uma distribuição irregular do material orgânico no solo.

Com base na análise do semivariograma, a estratégia de interpolação espacial foi definida para cada variável (Tabelas 2 e 3 e Figura 1 do Apêndice A). Apenas três atributos apresentaram dependência espacial suficientemente forte e modelável para justificar o uso da krigagem ordinária: a Altitude, com grau de dependência forte (GD=0.22), e os teores de magnésio (Mg) e cobre (Cu), ambos com dependência espacial moderada (GD=0.33 e 0.36, respectivamente).

Tabela 2 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

JAC1	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A	RMSE xvalid	R ² xvalid
Altitude	0.96	GAU	210	19.65	91.13	207.02	6.55	0.22
m								
pH	0.86	GAU	180	0.02	0.03	161.31	0.17	0
água								
Ca	0.97	GAU	160	2.62	3.71	116.28	1.75	0.02
cmolc dm ⁻³								
Mg	0.98	ESF	180	0.07	0.21	132.61	0.38	0.13
cmolc dm ⁻³								
Cu	0.74	ESF	320	0.57	1.58	84.79	1.08	0.24
mg dm ⁻³								
H+Al	0.86	GAU	200	0.91	1.07	193.04	1.01	0
cmolc dm ⁻³								
t	EPP	ESF	135	2.79	3.91	121.84	1.86	0
cmolc dm ⁻³								
V	0.98	GAU	175	21.71	25.59	134.76	4.99	0
%								

Nota: R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima; C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio da Validação Cruzada; R² Val.: Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada; EPP:

Efeito Pepita Puro; GAU: Gaussiano; ESF: Esférico; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Para todas as demais variáveis, incluindo a própria densidade de Jacareúba (NI), a maioria dos nutrientes (K, P, Ca, S, B, Fe, Mn, Zn), os atributos de acidez (pH, H+Al, m, t), a fertilidade (SB, V), a matéria orgânica (MO) e a textura do solo (Argila, Areia, Silte), foi detectado um Efeito Pepita Puro (EPP) ou dependência espacial classificada como fraca. Indicando que a variabilidade desses atributos, é predominantemente aleatória.

Tabela 3 - Grau de Dependência Espacial (GD) e interpolador escolhido para os atributos da população 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

JAC1	GD		Interpolador		GD		Interpolador
Altitude	0.22	Forte	KRIG	Mg	0.33	Moderada	KRIG
m				cmolc dm ⁻³			
Cu	0.36	Moderada	KRIG				
mg dm ⁻³							

Nota: GD: Grau de Dependência); IDW: Interpolação por Distância Inversa Ponderada; KRIG: Krigagem Ordinária; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A Análise Fatorial Exploratória (AFE) aplicada aos atributos do solo da população 1 sintetizou a complexidade edáfica em três fatores latentes que, em conjunto, explicam 79% da variância total dos dados originais. As variáveis Altitude, K, P, Al, S, Fe, m, MO e Silte, não atenderam aos pressupostos de normalidade na escala da medição. Adicionalmente, aplicando-se o critério de exclusão por

subcomunalidade (< 0.50), as variáveis Ca e Mg também foram removidas por não compartilharem variância comum suficiente na primeira extração.

Tabela 4 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*	Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*
pH	0.93	0.84	Zn	0.64	0.61
Ca	0.42	-	H+Al	0.54	0.69
Mg	0.12	-	V	0.58	0.74
B	0.88	0.84	Argila	0.53	0.53
Cu	0.71	0.59	Areia	0.53	0.52
Mn	0.72	0.77			

Nota: A 1ª Extração: análise fatorial inicial incluindo todos os atributos observados; 2ª Extração: modelo final; Ca: cálcio; Mg: magnésio; B: boro; Cu: cobre; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; V: saturação por bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Observa-se na tabela 5, que FAT1 foi responsável por 38% da variância dos dados edáficos e apresenta cargas fatoriais positivas elevadas para o pH (0.93), Saturação por Bases - V (0.94) e boro - B (0.62), acompanhadas por uma carga negativa expressiva para a acidez potencial - H+Al (-0.93). Os escores do FAT1 exibiram distribuição simétrica ($C_s = 0.03$) e assinatura geoestatística de Efeito Pepita Puro (EPP), indicando ausência de estrutura espacial autocorrelacionada detectável, conforme tabela 6.

Tabela 5 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método *varimax*) para os atributos edáficos da população 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

Atributo	FAT1	FAT2	FAT3
pH	0.93	-0.02	0.08
B	0.62	-0.11	0.11
Cu	0.25	-0.06	0.81
Mn	-0.01	0.28	0.71
Zn	0.14	-0.03	0.89

H+Al	-0.93	-0.07	-0.11
V	0.94	0.11	0.13
Argila	-0.02	-0.97	-0.07
Areia	-0.01	0.98	0.06

Nota: FAT1 (Fertilidade/Acidez); FAT2 (Textura); FAT3 (Micronutrientes); B: boro; Cu: cobre; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; V: saturação por bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O Fator 2 respondeu por 23% da variância dos dados edáficos e foi dominado por cargas fatoriais opostas para Areia (0.98) e Argila (-0.97), discriminando os extremos texturais da área. O FAT2 exibiu distribuição simétrica ($C_s = 0.16$) e assinatura de Efeito Pepita Puro (EPP), indicando ausência de autocorrelação espacial na escala amostrada. Por sua vez, o FAT3 explicou 18% da variância total, sendo definido por altas cargas positivas para zinco (0.89), cobre (0.81) e manganês (0.71). Diferentemente dos eixos anteriores, o FAT3 apresentou dependência espacial moderada ($GD = 0.47$), sendo modelado por um semivariograma exponencial com alcance prático de 262 metros (Tabela 6).

Tabela 6 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador

FAT1	Min	Max	Cs			
	-1.9814	1.9765	0.03			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
		EPP	-	-	-	-
V, pH, H+Al,B	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD		Interpolador	
	-	-	Independente		IDW	

FAT2	Min	Max	Cs			
	-1.7663	2.1855	0.16			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
		EPP	-	-	-	-

Areia, argila	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD	Interpolador
	-	-	Independente	IDW

FAT3	Min	Max	Cs			
	-1.82254	2.11918	0.14			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
	0.91	EXP	340	0.54	1.16	262.01
Zn, Cu, Mn	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD		Interpolador	
	0.83	-	0.47	Moderada	KRIGAGEM	

Nota: Min: mínimo; Max máximo; Cs: coeficiente de assimetria; R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima, C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE xvalid: raiz do erro quadrático; R² xvalid: coeficiente de determinação da validação cruzada; GD: grau de dependência espacial; EPP: Efeito Pepita Puro; EXP: Exponencial; IDW: Distância Inversa Ponderada; KRIGAGEM: Krigagem Ordinária; V: saturação por bases; H+Al: acidez potencial; B: boro; Zn: zinco; Cu: cobre; Mn: manganês.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A síntese da AFE da população 1 aponta, portanto, para um ambiente edáfico estruturado em três eixos independentes: um gradiente químico (fertilidade/acidez), um gradiente físico (textura) e um gradiente de micronutrientes. Enquanto os dois primeiros se manifestam como um mosaico irregular em microescala, a distribuição dos micronutrientes (FAT3) apresenta uma organização espacial previsível. A relação entre estes fatores ambientais e o padrão agregado da densidade de *C. brasiliense*, será explorada a seguir, visando a tentativa de identificar quais desses gradientes estão de fato condicionando a ocorrência da espécie nesta população.

3.2. Análise da População 2

Conforme apresentado através da tabela 7, a população 2 de *C. brasiliense* apresentou condição demográfica distinta, caracterizada por densidade média

notavelmente baixa de 0.48 indivíduos por quadrante, valor inferior ao registrado para a população 1 (2.13). Este padrão de baixa densidade é acompanhado por uma distribuição espacial fortemente agregada, conforme atestado pelo elevado coeficiente de assimetria positiva ($C_s = 2.99$) e pela presença de quatro valores discrepantes (*outliers*). A ocorrência variou de 0 a 6 indivíduos por unidade amostral, configurando um cenário de pequenos agrupamentos isolados em meio a extensas áreas sem registros.

Quanto ao ambiente edáfico, o solo dessa população mantém o caráter ácido típico das várzeas, com pH em água variando de 4.79 a 5.39 (média = 5.15). A fertilidade química, avaliada pelos teores médios de soma de bases ($SB = 13.28 \text{ cmolc dm}^{-3}$) e Saturação por Bases ($V = 68.87\%$), pode ser classificada como moderada para os padrões de ecossistemas de várzea amazônica. Destaca-se, contudo, a elevada e heterogênea disponibilidade de fósforo ($P = 31.9 \text{ mg dm}^{-3}$; $CV = 30\%$), nutriente frequentemente limitante nestes ambientes.

A análise granulométrica do solo na área revelou teores médios de areia de 184.5 g kg^{-1} e argila de 623.5 g kg^{-1} , com coeficientes de variação de 65% e 15%, respectivamente.

Na população 2, a altitude variou entre 42,11 m e 59,22 m, apresentando média de 54,28 m e o menor Coeficiente de Variação ($CV = 5,66\%$), o que reflete uma variabilidade topográfica menos acentuada em comparação à população 1. A matéria orgânica ($MO = 2.45\%$) também exhibe distribuição assimétrica ($C_s = 1.24$) e a presença de dois *outliers*.

A população 2 é marcada por uma combinação de baixa densidade populacional, forte agregação espacial e um ambiente edáfico heterogêneo e mais argiloso. Esta configuração inicial sugere que os potenciais fatores condicionantes da distribuição da espécie nesta área podem diferir dos observados na população 1,

possivelmente envolvendo uma interação mais complexa com gradientes específicos de fertilidade e textura que emergem do mosaico ambiental geral.

Tabela 7- Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 2 de Jacareúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023

JAC2	Min	Max	$\bar{x}$	s^2	S	Cs	CV%	Outlier
Jacareúba	0	6	0.48	1.12	1.06	2.99	220.83	4
NI								
Altitude	42.11	59.22	54.28	9.43	3.07	-0.92	5.66	2
m								
pH	4.79	5.39	5.15	0.02	0.15	-0.62	2.91	-
água								
K	134	197	161.3	203.4	14.26	0.44	8.84	-
mg dm ⁻³								
P	17.9	61.80	31.9	94.52	9.72	0.70	30.47	-
mg dm ⁻³								
Ca	6.76	13.58	10.37	3.30	1.82	-0.31	17.55	-
cmolc dm ⁻³								
Mg	1.58	3.85	2.50	0.26	0.51	0.65	20.40	1
cmolc dm ⁻³								
Al	0.04	0.62	0.18	0.02	0.14	1.37	77.78	5
cmolc dm ⁻³								
S	9.36	63.62	23.78	145.58	12.06	1.85	50.71	4
mg dm ⁻³								
B	0.17	0.50	0.31	0.005	0.07	0.27	22.58	-
mg dm ⁻³								
Cu	2.83	10.15	6.60	2.88	1.70	0.14	25.76	-
mg dm ⁻³								
Fe	110.2	403.8	235.9	5871.69	76.63	0.18	32.48	-
mg dm ⁻³								
Mn	4.1	54.59	15.58	90.44	9.51	2.08	61.04	3
mg dm ⁻³								
Zn	0.73	6.07	2.37	1.36	1.17	0.78	49.37	-
mg dm ⁻³								

H+Al	4.73	8.34	5.85	0.73	0.85	1.02	14.53	1
cmolc dm ⁻³								
m	0.27	4.79	1.47	1.45	1.20	1.38	81.63	6
%								
t	15.04	21.88	19.13	3.37	1.20	-0,58	6.27	-
cmolc dm ⁻³								
SB	8.73	16.55	13.28	4.06	2.02	-0.43	15.21	-
cmolc dm ⁻³								
V	56	76	68.87	25.55	5.05	-0.63	7.33	-
%								
MO	1.36	5.13	2.45	0.62	0.79	1.24	32.24	2
%								
Argila	420	760	623.5	9045.25	95.11	-0.49	15.25	-
g kg ⁻¹								
Areia	40	450	184.5	14188.22	119.11	0.70	64.56	-
g kg ⁻¹								
Silte	120	250	192	927.41	30.45	-0.51	15.86	-
mg dm ⁻³								

Nota: min: mínimo; max: máximo; $\bar{x}$: média; s^2 : variância; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria. NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca de cátions efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A estrutura dos atributos químicos e físicos do solo na área revelou uma distribuição com marcante presença de valores discrepantes (*outliers*) concentrados em variáveis específicas de acidez e dinâmica de micronutrientes. Registraram-se valores atípicos para a saturação por alumínio ($m = 6$), alumínio trocável ($Al = 5$), enxofre ($S = 4$), manganês ($Mn = 3$) e matéria orgânica ($MO = 2$), além de ocorrências isoladas para magnésio ($Mg = 1$) e acidez potencial ($H+Al = 1$).

A análise variográfica da população 2 revelou uma dinâmica espacial matizada, onde a simples detecção de um semivariograma não se mostrou critério suficiente para a escolha do interpolador, destacando a importância crucial da validação cruzada. O resultado central é a confirmação de uma dependência espacial moderada (Grau de Dependência - GD = 0.64) na densidade de *C. brasiliense*. Este padrão, modelado por um semivariograma esférico com alcance prático de 274 m e R^2 do semivariograma de 0.83, valida estatisticamente a forte agregação observada, posicionando os agrupamentos de indivíduos como núcleos espacialmente autocorrelacionados, cuja escala (~274 m) sugere a atuação de processos ecológicos específicos.

Paralelamente, o ambiente edáfico caracteriza-se por uma predominância de aleatoriedade espacial. A ampla maioria dos atributos químicos e físicos apresentou Efeito Pepita Puro (EPP) (Tabelas 8 e 9 e Figura 2 do Apêndice A).

A análise, contudo, identificou três atributos que superaram o EPP e traçaram semivariogramas: acidez potencial (H+Al), manganês (Mn) e Saturação por Bases (V). Para H+Al e Mn, os modelos gaussianos, apesar de exibirem R^2 do semivariograma de 0.60 e 0.84, respectivamente, falharam no teste preditivo, apresentando erro quadrático médio (RMSE xvalid) elevado e coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2 xvalid) próximo de zero (Tabela 8 e Figura 2 do Apêndice A).

Dentre todos, apenas a Saturação por Bases (V) apresentou uma estrutura espacial plenamente válida. Com GD moderado (0.66), alto R^2 do semivariograma (0.96) e, fundamentalmente, desempenho aceitável na validação cruzada. É significativo que, em meio a um ambiente edáfico predominantemente caótico, V tenha emergido como um gradiente estruturado de longo alcance (279 m).

O alcance prático obtido no semivariograma para a densidade de indivíduos de *C. brasiliense* foi de ~274 metros, valor similar ao alcance registrado para o gradiente de Saturação por Bases (V), que apresentou 278.53 m, indicando uma proximidade dimensional na escala espacial de estruturação de ambas as variáveis, conforme apresentado nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 2 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

JAC2	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A	RMSE xvalid	R ² xvalid
Jacareúba	0.83	ESF	300	0.82	1.29	273.65	1.05	0.2
NI								
Mg	0.68	ESF	410	0.10	0.28	98.57	0.5	0.02
cmolc dm ⁻³								
Mn	0.84	GAU	340	57.19	75.55	329.71	8.15	0
mg dm ⁻³								
H+Al	0.60	GAU	507	0.61	0.85	505.18	0.84	0.03
cmolc dm ⁻³								
V	0.96	GAU	300	21.04	31.95	278.53	5.19	0.09
%								

Nota: R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima; C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio da Validação Cruzada; R² Val.: Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada; EPP: Efeito Pepita Puro; GAU: Gaussiano; ESF: Esférico; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Elaborado pela autora, (2024).

Tabela 9 - Grau de Dependência Espacial (GD) e interpolador escolhido para os atributos da população 2 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

JAC2	GD		Interpolador		GD		Interpolador
Jacareúba	0.64	Moderada	KRIG	V	0.66	Moderada	KRIG
NI				%			

Nota: GD: Grau de Dependência; IDW: Interpolação por Distância Inversa Ponderada; KRIG: Krigagem Ordinária; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Observa-se o padrão de estruturação ambiental para a população 2. Na primeira extração, que considerou o conjunto inicial de atributos, apenas três variáveis apresentaram comunalidades superiores ao limiar crítico de 0.50: o fósforo (P) apresentou comunalidade de 0.93, seguido pelo boro (B) com 0.78 e pelo cobre (Cu) com 0.68. Em contrapartida, as variáveis tradicionalmente associadas à fertilidade geral e a capacidade de troca catiônica, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e soma de bases (SB) exibiram comunalidades baixas, registrando 0.40, 0.15 e 0.40, respectivamente.

A análise integrada indicou que o modelo fatorial final, refinado a partir dos critérios de exclusão, resultou em um único fator (FAT1) responsável por 60% da variância total dos dados edáficos (Tabelas 10, 11 e 12). Este fator apresentou carga fatorial de 0.94 para o boro (B) na matriz rotacionada. Apesar das comunalidades aceitáveis de fósforo (P: 0.77) e cobre (Cu: 0.58), suas cargas fatoriais, foram de -0.14 e 0.29, respectivamente, situando-se abaixo do valor absoluto mínimo significativo de ≥ 0.50 .

Na análise geoestatística, o fator 1 apresentou Grau de Dependência espacial (GD) de 0.77, classificado como dependência espacial fraca. Um modelo gaussiano foi ajustado ao semivariograma experimental (R^2 variog = 0.49) com alcance prático de 315.43 metros, registrando elevado valor de efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C) e coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2 xvalid = 0.16). A interpolação do fator foi executada por krigagem ordinária (Figura 2 do Apêndice B).

Tabela 10 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 2 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*	Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*
P	0.93	0.77	B	0.78	0.58
Ca	0.40	-	Cu	0.68	0.58
Mg	0.15	-	SB	0.40	-

Nota: A 1ª Extração: análise fatorial inicial incluindo todos os atributos observados; 2ª Extração: modelo final; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; B: boro; Cu: cobre; SB: soma de bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Tabela 11 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método *varimax*) para os atributos edáficos da população 2 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

Atributo	FAT1
B	0.94
P	-0.14
Cu	0.29

Nota: FAT1 (boro); B: boro; P: fósforo; Cu: cobre.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise da dependência espacial de FAT1, associado ao teor de boro na segunda população, registrou Grau de Dependência espacial (GD) de 0.77, com ajuste de um modelo gaussiano ao semivariograma experimental. O modelo apresentou alcance prático de 315.43 metros e coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2 xvalid = 0.16). Diante da presença dessa estrutura de fundo, a modelagem foi executada por meio do interpolador de Krigagem Ordinária.

Tabela 12 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 2 de *Calophyllum brasiliense* Cambess.: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador

FAT1	Min	Max	Cs			
	-1.83556	2.68518	0.29			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
	0.49	GAU	345	0.80	1.04	315.43

B	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD		Interpolador
	0.9	0.16	0.77	Fraca	KRIGAGEM

Nota: Min: mínimo; Max máximo; Cs: coeficiente de assimetria; R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima, Co: Efeito Pepita; Co+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE xvalid: raiz do erro quadrático; R² xvalid: coeficiente de determinação da validação cruzada; GD: grau de dependência espacial; GAU: Gaussiano; KRIGAGEM: Krigagem Ordinária; B: boro.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.3. Análise da População JAC3

A população 3 de *C. brasiliense* apresenta densidade de indivíduos intermediária (1.82 ind./quadrante) em relação às populações 1 e 2, com um coeficiente de assimetria positivo acentuado (Cs = 1.37). A ocorrência variou de 0 a 8 indivíduos por quadrante, com a presença de um *outlier*. A topografia é a mais homogênea entre as populações, com altitudes entre 45.81 m e 56.89 m (média = 52.66 m) e a menor variabilidade relativa (CV = 4.73%), sugerindo um terreno mais plano e uniforme, conforme apresentado na tabela 13.

Os solos são ácidos, apresentando pH médio de 5.10. A soma de bases (SB) registrou 13.22 cmolc dm⁻³ e a Saturação por Bases (V) foi de 66.93%. Destaca-se uma variabilidade excepcionalmente alta no teor de potássio (K) variando de 45 a 188 mg dm⁻³ (CV = 23.06%) e a presença de dois *outliers*.

Foram registrados outliers para os atributos cobre (Cu: 3 pontos), zinco (Zn: 3 pontos), matéria orgânica (MO: 5 pontos), alumínio trocável (Al: 1 ponto), ferro (Fe: 2 pontos), enxofre (S: 2 pontos), manganês (Mn: 1 ponto) e fósforo (P: 1 ponto). Na composição textural do solo, observou-se a presença de 1 outlier para a fração areia, 1 outlier para a argila e 2 outliers para a fração silte.

Tabela 13 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 3 de Jacareúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023

JAC3	Min	Max	$\bar{x}$	s^2	S	Cs	CV%	Outlier
Jacareúba	0	8	1.82	4.51	2.12	1.37	116.48	1
NI								
Altitude	45.81	56.89	52.66	6.20	2.49	-0.37	4.73	-
m								
pH	4.75	5.45	5.10	0.03	0.17	-0.24	3.33	-
água								
K	45	188	137.10	999.64	31.62	-0.79	23.06	2
mg dm ⁻³								
P	4.8	28.40	11.44	16.79	4.10	1.25	35.84	1
mg dm ⁻³								
Ca	4.92	14.22	10.30	6.33	2.52	-0.38	24.47	-
cmolc dm ⁻³								
Mg	0.95	4.01	2.57	0.49	0.70	0.31	27.24	-
cmolc dm ⁻³								
Al	0.04	0.82	0.28	0.04	0.21	0.92	75.00	1
cmolc dm ⁻³								
S	10.50	68.70	28.15	131.70	11.48	0.84	40.78	2
mg dm ⁻³								
B	0.19	0.45	0.29	0.003	0.06	0.50	20.69	-
mg dm ⁻³								
Cu	3.28	12.82	5.14	3.43	1.85	2.32	35.99	3
mg dm ⁻³								
Fe	123.3	359.8	189.9	2549.58	50.49	1.11	26.59	2
mg dm ⁻³								
Mn	7.17	26.42	14.52	20.61	4.54	0.73	31.27	1
mg dm ⁻³								
Zn	0.53	6.78	1.92	1.37	1.17	1.96	60.94	3
mg dm ⁻³								
H+Al	4.53	8.60	6.19	1.00	1.00	0.57	16.16	-
cmolc dm ⁻³								
m	0.26	6.65	2.20	2.90	1.70	0.81	77.27	-

%								
t								
cmolc dm ⁻³	12.35	26.18	19.41	9.04	3.01	-0.26	15.51	-
SB								
cmolc dm ⁻³	6.7	17.93	13.22	9.22	3.04	-0.39	23.00	-
V								
%	51	78	66.93	51.59	7.18	-0.47	10.73	-
MO								
%	1.3	5.58	2.68	0.99	0.99	1.24	36.94	5
Argila								
g kg ⁻¹	320	740	607.45	5537.85	74.42	-1.00	12.25	1
Areia								
g kg ⁻¹	60	570	205.82	7906.26	88.92	1.37	43.20	1
Silte								
mg dm ⁻³	110	250	186.7	659.46	25.68	-0.56	13.75	2

Nota: min: mínimo; max: máximo; $\bar{x}$: média; s^2 : variância; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca de cátions efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise variográfica dessa população mostrou que a densidade de *C. brasiliense* (NI) caracterizou-se por um semivariograma exponencial (EXP) com alcance prático de 288.46 m e um grau de dependência espacial moderado, $GD = 0.59$; $R^2 \text{ variog} = 0.82$; $R^2 \text{ xvalid} = 0.12$, (Tabela 14 e Figura 3 do Apêndice A).

Conforme sintetizado nas tabelas 14 e 15, em relação aos atributos ambientais, duas variáveis edáficas exibiram dependência espacial estruturada: o pH em água, que registrou dependência moderada ($GD = 0.58$), ajustando-se ao modelo esférico (ESF) com alcance prático de 129.20 m ($R^2 \text{ variog} = 0.83$; $R^2 \text{ xvalid} = 0.12$), e a acidez potencial (H+Al). O atributo H+Al apresentou ajuste ao modelo

gaussiano (GAU) com alcance prático de 168.45 m e coeficiente de determinação do semivariograma de 0.86 ($R^2_{\text{variog}} = 0.86$), registrando erro quadrático médio de validação cruzada (RMSE) de 1.07 e R^2_{xvalid} de 0.04.

A esmagadora maioria dos atributos edáficos, Altitude, K, P, Ca, Mg, Al, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, m, t, SB, V, MO e as frações granulométricas de areia, argila e silte, apresentaram Efeito Pepita Puro (EPP).

Tabela 14 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

JAC3	R^2 variog	Model	Dist. Max	C_0	C_0+C	A	RMSE xvalid	R^2 xvalid
Jacareúba	0.82	EXP	290	3.35	5.65	288.46	1.98	0.12
NI								
pH	0.83	ESF	320	0.018	0.031	129.2	0.17	0.12
água								
H+Al	0.86	GAU	200	0.78	1.14	168.45	1.07	0.04
cmolc dm ⁻³								

Nota: R^2 variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima; C_0 : Efeito Pepita; C_0+C : Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio da Validação Cruzada; R^2 Val.: Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada; EPP: Efeito Pepita Puro; GAU: Gaussiano; ESF: Esférico; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Tabela 15 - Grau de Dependência Espacial (GD) e interpolador escolhido para os atributos da população 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

JAC3	GD		Interpolador		GD		Interpolador
Jacareúba	0.59	Moderada	KRIG	pH	0.58	Moderada	KRIG
NI				água			

Nota: GD: Grau de Dependência; IDW: Interpolação por Distância Inversa Ponderada; KRIG: Krigagem Ordinária; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial;

m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A Análise Fatorial para a população 3 revelou uma estrutura ambiental bidimensional. Na primeira extração houve a exclusão da variável Altitude (0.48) e fósforo (0.50) que não atenderam ao pressuposto de normalidade, restando sete atributos que compuseram o modelo final, como apresentado nas tabelas 16 e 17. Os atributos foram agrupados em dois fatores que, em conjunto, explicam uma parcela significativa da variância total, o primeiro explica 53% e acumuladamente com o segundo fator 67% (Tabela 17).

O FAT1 emerge como um eixo de fertilidade química e retenção de cátions, definido por cargas fatoriais muito altas e positivas para cálcio (Ca: 0.91), soma de bases (SB: 0.92) e capacidade de troca de cátions Efetiva (t: 0.90). O potássio (K: 0.61) e o teor de Argila (0.73) também contribuem substancialmente.

O FAT2 é predominantemente um eixo de enxofre (S), com uma carga fatorial muito alta (0.82), recebendo uma contribuição secundária do boro (B: 0.59). Observa-se que este fator é praticamente independente do primeiro (cargas cruzadas próximas de zero).

Tabela 16 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*	Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*
Altitude	0.48	-	B	0.59	0.59
K	0.77	0.87	t	0.88	0.88
P	0.50	-	SB	0.71	0.70
Ca	0.76	0.76	Argila	0.90	0.96
S	0.64	0.75			

Nota: A 1ª Extração: análise fatorial inicial incluindo todos os atributos observados; 2ª Extração: modelo final; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; S: enxofre; B: boro; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Tabela 17 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método *varimax*) para os atributos edáficos da população 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess

Atributo	FAT1	FAT2
K	0.61	0.07
Ca	0.91	-0.32
S	0.01	0.82
B	-0.14	0.59
t	0.90	-0.27
SB	0.92	-0.31
Argila	0.73	0.07

Nota: FAT1 (Fertilidade catiônica); FAT2 (enxofre e boro); K: potássio; Ca: cálcio; S: enxofre; B: boro; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise da dependência espacial dos fatores edáficos extraídos da população 3 revela uma conclusão fundamental e coerente com o padrão geral desta população: ambos os fatores, apesar de sintetizarem importantes gradientes químicos, não apresentam dependência espacial, exibindo Efeito Pepita Puro (EPP).

O fator 1, que representa o eixo integrado de fertilidade catiônica (Ca, SB, t), teor de potássio (K) e argila, apresentou coeficiente de assimetria $C_s = -0.67$. O FAT2, que agrupa os teores de enxofre (S) e boro (B), registrou coeficiente de assimetria positiva de $C_s = 0.66$.

Para a modelagem e interpolação espacial, os escores de ambos os fatores foram tratados utilizando-se o método IDW (Interpolação por Distância Inversa Ponderada). Em contrapartida, a densidade da espécie (NI), que apresentou dependência espacial moderada com alcance prático de 288.46 metros, e o pH do

solo, com alcance prático de 129.20 metros, foram interpolados via Krigagem Ordinária.

Tabela 18 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess.: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador

FAT1	Min	Max	Cs			
	-3.0800	1.5133	-0.67			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
	-	EPP	-	-	-	-
SB, Ca, CTC, K, Argila	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD		Interpolador	
	-	-	Independente		IDW	

FAT2	Min	Max	Cs			
	-1.86148	3.28829	0.66			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
	-	EPP	-	-	-	-
S, B	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD		Interpolador	
	-	-	Independente		IDW	

Nota: Min: mínimo; Max máximo; Cs: coeficiente de assimetria; R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima, C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE xvalid: raiz do erro quadrático; R² xvalid: coeficiente de determinação da validação cruzada; GD: grau de dependência espacial; IDW: Interpolação por Distância Inversa Ponderada; EPP: Efeito Pepita Puro; SB: soma de bases; Ca: cálcio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; K: potássio; S: enxofre; B: boro.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

4 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados para as três populações de *Calophyllum brasiliense* no Médio Solimões delineiam um quadro complexo, porém coerente, sobre os fatores que moldam a distribuição espacial desta espécie em ambientes de várzea após décadas de exploração histórica e proteção (Laurance *et al.*, 2011; Parolin *et al.*, 2013). A análise integrada da estatística descritiva, geoestatística e multivariada permite avançar além da mera descrição de padrões, propondo interpretações ecológicas para a persistência e a agregação destas populações remanescentes (Chazdon, 2008; Fortin; Dale, 2005). Essa abordagem multifacetada é essencial em ecossistemas dinâmicos como as várzeas, onde a distribuição das espécies resulta da interação entre legado histórico, heterogeneidade ambiental atual e processos ecológicos contemporâneos (Ter Braak; Smilauer, 2012). A geoestatística, em particular, forneceu a base quantitativa para distinguir entre agregação espacial real e variabilidade aleatória, enquanto a análise multivariada revelou a estrutura subjacente dos gradientes edáficos, possibilitando uma discussão ecologicamente fundamentada sobre os mecanismos de persistência da espécie (Monteiro; Bhering, 2019).

4.1. O padrão universal de agregação e sua base espacial

Um dos achados mais sólidos deste estudo é a confirmação, de que as populações de Jacareúba apresentam distribuição espacial agregada com dependência espacial moderada para as populações 2 e 3, e alcances similares entre 274 e 288 m.

A primeira população registra uma densidade média de 2.13 indivíduos, a terceira população alcança 1.82 indivíduos, com ambas atingindo picos locais de até 8 indivíduos por quadrante. Em contrapartida, a segunda população diverge significativamente por apresentar uma densidade média extremamente baixa, de

apenas 0.48 indivíduo, com valor máximo local de 6 indivíduos. A presença de valores mínimos (0) e máximo (até 8) confirma a concentração demográfica em agrupamento, deixando extensas áreas sem nenhum registro de indivíduo. Este não é um padrão trivial; sugere que a ocorrência da espécie não é aleatória, mas influenciada por fatores ambientais que criam microhabitats favoráveis. Esse fenômeno é comum em espécies de dossel em florestas tropicais (Condit *et al.*, 2000; Hubbell, 1979).

Em ecologia vegetal, a agregação pode surgir de limitações de dispersão, de interações bióticas positivas (ex.: facilitação) ou de respostas a recursos ambientais igualmente agregados (Condit *et al.*, 2000). Considerando o histórico de superexploração, é plausível que os atuais agrupamentos representem refúgios ou núcleos de regeneração a partir de poucos indivíduos sobreviventes ou rebrotas, cuja dispersão é naturalmente limitada em várzeas (Chazdon, 2008). A consistência do alcance espacial (~280 m) entre populações tão distintas em densidade e ambiente sugere um "raio de influência" característico da espécie nesta paisagem (Levin, 1992), possivelmente relacionado à dispersão de sementes por hidrocoria ou zoocoria (Levin, 1992), ou ao alcance de sistemas radiculares clonais que permitem a propagação vegetativa em ambientes com estresse hídrico periódico (Parolin *et al.*, 2016). A manutenção deste padrão estrutural em diferentes contextos ambientais reforça que a agregação é uma propriedade emergente da biologia da espécie e/ou de processos ecológicos recorrentes na paisagem, e não um mero artefato amostral ou resposta idiossincrática a condições físicas locais (Fortin; Dale, 2005).

4.2. Respostas distintas a gradientes ambientais heterogêneos

Apesar do padrão comum de agregação, as populações de *Calophyllum brasiliense* revelaram respostas diferenciadas aos gradientes edáficos, refletindo a notável heterogeneidade ambiental das várzeas (Hauser *et al.*, 2022; Latrubesse *et al.*, 2020).

Os mapas preditivos gerados para as três áreas (Figuras 01, 02 e 03 do Apêndice B) transcendem a mera interpolação visual; eles materializam graficamente os limites espaciais dos filtros ambientais que interagem com a regeneração e o agrupamento de *C. brasiliense*. Ao associar as estimativas à variância do erro, o método confere robustez ecológica a esta discussão ao demonstrar que as zonas de transição física na população 1, o fluxo latente de boro na população 2 e a distribuição do pH na população 3 não são artefatos matemáticos, mas sim feições estruturadas reais que guiam a distribuição espacial e a persistência populacional da Jacareúba no Médio Solimões.

Os resultados cartográficos confirmam as teses de Wiens (1989) e Hauser *et al.* (2022) de que o ambiente se comporta de forma mista: o gradiente topográfico e determinados atributos estruturados mantêm padrões contínuos, ao passo que a matriz edáfica se consolida como um mosaico descontínuo em microescala. O cenário observado nesta pesquisa subsidia a hipótese de que a *C. brasiliense* está associada a uma seleção hierárquica de microhabitats específicos e localizados para manter sua ocorrência agregada. Conforme discutido por Hubbell (1979) e Condit *et al.* (2000), estratégias dessa natureza configuram-se como mecanismos vitais para a persistência de espécies florestais tropicais face à estocasticidade de ambientes dinâmicos.

Conforme preconizado por Junk *et al.* (2011) e Assis *et al.* (2015), a elevação microtopográfica modula diretamente a dinâmica do pulso de inundação. Essa premissa ecológica explica por que a marcante heterogeneidade topográfica observada no Médio Solimões funcionou como um dos principais filtros ambientais estruturadores para a espécie nesta pesquisa. No entanto, as análises espaciais integradas das três populações de *C. brasiliense* revelam que a influência desse gradiente hidrológico se manifesta de forma localmente diferenciada.

Enquanto na primeira população a altitude exibiu uma forte estruturação espacial ($GD = 0.22$) sob modelo Gaussiano, com amplitude altimétrica entre 10.88 e 75.74 metros (média de 49.47 metros; CV de 13.09%), nas populações 2 e 3 predominou o Efeito Pepita Puro (EPP) para este atributo, cujas altitudes médias situaram-se em 54.28 metros (amplitude de 42.11 a 59.22 metros; CV de 5.66%) e 52.66 metros (amplitude de 45.81 a 56.89 metros; CV de 4.73%), respectivamente, indicam que o relevo é plano e extremamente homogêneo, nessas áreas sem inclinação definida.

Esse contraste indica que, embora o pulso de inundação seja um princípio ecológico universal nesses ecossistemas, a persistência e o padrão agregado de *C. brasiliense* conseguem se sobrepor tanto a gradientes altimétricos contínuos quanto a topografias mais homogêneas e espacialmente aleatórias. As condições microtopográficas atuam como o principal condicionante físico da dinâmica hídrica, afetando a retenção da lâmina d'água e o tempo de inundação.

No âmbito químico, o complexo de acidez exerce um controle fisiológico determinante sobre a espécie. O pH em água mantém-se em faixas moderadamente ácidas e homogêneas nas três áreas, com médias de 5.15 na primeira população, 5.15 na segunda e 5.10 na terceira. Contudo, a forma como esse atributo se distribui no espaço difere: enquanto o pH exibe comportamento estocástico com Efeito Pepita Puro nas duas primeiras populações, na terceira população ele se constitui como a única variável do solo com dependência espacial contínua e validada por modelo esférico, apresentando alcance de 129 metros e grau de dependência de 0.58. Nessa terceira área, o pH funciona como um indicador de fundo, onde a espécie seleciona as faixas favoráveis dentro do terreno para estabelecer seus agrupamentos. Por sua vez, a acidez potencial cresce progressivamente entre as áreas, registrando médias de $3.39 \text{ cmolc dm}^{-3}$ na primeira população, 5.85 cmolc

dm^{-3} na segunda e $6.19 \text{ cmolc dm}^{-3}$ na terceira, oscilando com descontinuidade espacial devido à dinâmica heterogênea de deposição de sedimentos.

A fertilidade química e a capacidade de troca catiônica apresentam respostas diretas sobre a estrutura da vegetação, onde a primeira população exibe a maior fertilidade média, com soma de bases de $15.76 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e saturação por bases de 72.14%, seguida pela segunda população, com soma de bases de $13.28 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e saturação por bases de 68.87%, e pela terceira população, com soma de bases de $13.22 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e saturação por bases de 66.93%. Embora a saturação por bases seja aleatória nas populações 1 e 3, na segunda população esse atributo emerge como a única variável química espacialmente estruturada e validada por krigagem, apresentando alcance de 278.5 metros e grau de dependência de 0.66. Há uma marcante equivalência entre o alcance desse gradiente de fertilidade (278.5 metros) e o alcance da densidade populacional (274 metros) na segunda população, comprovando que a disponibilidade de bases delimita diretamente a extensão dos núcleos da planta.

Além disso, os teores de fósforo revelam variações extremas, registrando médias de 13.08 mg dm^{-3} na primeira área e 11.44 mg dm^{-3} na terceira, mas alcançando uma média de 31.90 mg dm^{-3} e valor máximo de 61.80 mg dm^{-3} na segunda área. Esses valores elevados constituem ilhas de fertilidade pontuais criadas pelo aprisionamento local de sedimentos finos e matéria orgânica nas depressões.

A matriz granulométrica dos solos habitados pela Jacareúba é predominantemente argilosa, com teores médios de argila de 672.66 g kg^{-1} na primeira população, 623.50 g kg^{-1} na segunda e 607.45 g kg^{-1} na terceira. A fração areia apresenta teor médio de 115.31 g kg^{-1} na primeira área, aumentando para 184.50 g kg^{-1} na segunda e atingindo 205.82 g kg^{-1} na terceira, onde registra máxima pontual de 570 g kg^{-1} . Em todas as populações, tanto a argila quanto a areia

apresentaram Efeito Pepita Puro. Essa descontinuidade espacial reflete a alta energia dos processos de sedimentação aluvial nas várzeas, demonstrando que a plasticidade ecológica da espécie permite a colonização de diferentes texturas locais, desde que as exigências químicas mínimas sejam atendidas.

Na população 1, a espécie co-ocorre com um ambiente edáfico estruturado sob um modelo da AFE altamente robusto, que reduziu as variáveis originais a três fatores latentes capazes de explicar 79% da variância total dos dados. O primeiro desses eixos (FAT1) responde por 38% dessa variância e revela um gradiente bipolar marcante, opondo solos de pH elevado e maior fertilidade, com altas cargas positivas para pH (0.93) e saturação por bases (0.94), as microrregiões mais ácidas e com forte carga negativa para a acidez potencial (-0.93).

Essa estruturação edáfica reflete um padrão considerado fundamental para a compartimentação de comunidades vegetais tropicais, em consonância com as evidências apontadas por John *et al.* (2007) e Sollins (1998). No entanto, a manifestação do FAT1 sob a assinatura geoestatística de Efeito Pepita Puro (EPP) indica que esse gradiente de fertilidade e acidez varia de forma estocástica e sem continuidade espacial na escala amostrada. Esse comportamento sugere a atuação de fatores pedogenéticos em microescala, conforme o modelo conceitual proposto por Cambardella *et al.* (1994).

Essa mesma desestruturação espacial foi observada nesta pesquisa para o FAT2 (23% da variância), um eixo de caráter textural que contrapõe Areia (0.98) e Argila (-0.97). Essa configuração explicita que o controle físico sobre a retenção de água e nutrientes na área ocorre por meio de uma variação textural não estruturada na escala de amostragem, contrapondo-se à estabilidade espacial frequentemente descrita na literatura clássica (Brady; Weil, 2016). Os dados indicam que esse comportamento espacial caótico é condicionado pelo dinamismo de deposição sedimentar localizada, avulsões de canais e microtopografia estocástica, processos

que caracterizam de forma marcante a evolução de sistemas aluviais ativos (Latrubesse *et al.*, 2020; Nanson; Culkeen, 2018).

Em contrapartida, o FAT3 (18% da variância), que agrupa os micronutrientes catiônicos (Cu, Zn e Mn), desviou-se desse padrão de aleatoriedade ao manifestar uma dependência espacial moderada ($GD = 0.47$) sob modelo exponencial e alcance prático de 262 m. Essa estruturação indica que a disponibilidade desses micronutrientes organiza-se na paisagem em manchas ou gradientes contínuos, refletindo interações biogeoquímicas complexas associadas ao pH, potencial redox e ao teor de carbono, conforme amplamente documentado na literatura (Kabata-Pendias, 2011; Sposito, 2008).

Na várzea estudada, esse padrão espacialmente contínuo está possivelmente atrelado a processos bióticos e sedimentares de deposição seletiva de frações finas de matéria orgânica com memória espacial, a exemplo da deposição diferencial de serapilheira e da colonização histórica por bancos de macrófitas aquáticas tolerantes ao pulso de inundação (Agostinho *et al.*, 2015; Meyer *et al.*, 2021), hipótese corroborada pelo comportamento de modelagens similares em ambientes aluviais (Furquim *et al.*, 2021).

A desconexão entre a estrutura edáfica principal (FAT1 e FAT2) e o padrão biótico reforça a interpretação de que a agregação da Jacareúba na população 1 não está simplesmente alinhada a gradientes químicos e físicos de larga escala, mas sim a fatores mais localizados, históricos ou estocásticos. Infere-se, portanto, que mesmo em áreas com eixos edáficos estruturalmente bem definidos pela multivariada, a distribuição real da espécie na área de estudo é mais fortemente direcionada por legados de perturbação antrópica, limitação de dispersão ou micro condições físicas não capturadas pela malha amostral de solo.

Na segunda população, a espécie mantém um padrão espacial mais nítido em meio a um caos edáfico generalizado, caracterizado por Efeito Pepita Puro (EPP) para a ampla maioria das variáveis edáficas analisadas. Essa quebra generalizada de dependência espacial constitui uma assinatura de aleatoriedade descrita em ecossistemas fragmentados (Hauser *et al.*, 2022; Jankowski *et al.*, 2022), a qual pode ser atribuída à dinâmica de deposição sedimentar mais energética e irregular típica de sistemas ripários ativos (Latrubesse *et al.*, 2020).

Nesta área, tal processo está intrinsecamente associado à maior proporção de frações granulométricas grosseiras e à deposição em diques marginais (restingas). Essa dinâmica geomorfológica justifica a cota altimétrica específica onde a população 2 está estabelecida, ocupando setores micro topográficos de restinga alta com altitude média de 54.28 metros, os quais funcionam como barreiras físicas primárias à força dos pulsos sazonais de inundação.

Refletindo essa severa aleatoriedade ambiental, os modelos de semivariogramas obtidos para a acidez potencial (H+Al) e manganês (Mn) falharam no teste de validação cruzada. Esse resultado demonstra na prática o princípio geoestatístico de que a existência de uma estrutura matemática inicial no semivariograma não confere, necessariamente, robustez preditiva.

Em contrapartida, na análise multivariada para a população 2, detectou-se a emergência de um único fator dominante estruturado, associado ao boro (FAT1). Os dados sugerem que a concentração da variabilidade compartilhada nesse único micronutriente decorre da dinâmica biogeoquímica característica de diques marginais de várzea alta. Nesse tipo de ambiente, o boro atua como um elemento de mobilidade moderada e altamente suscetível à lixiviação pelas flutuações sazonais do lençol freático, tendo sua disponibilidade local modulada por processos estocásticos de ciclagem e deposição de frações granulométricas mais grosseiras, em consonância com os mecanismos descritos por Kabata-Pendias (2011).

Para um melhor entendimento acerca do boro, levanta-se a divergência espacial entre o boro isolado (univariado) e o primeiro Fator (FAT1) ocorre porque eles representam grandezas matematicamente distintas: enquanto a análise univariada do Boro utiliza os valores originais medidos da variável, o FAT1 é baseado no escore fatorial, que é uma combinação linear padronizada de todas as variáveis originais, ajustada pela variância compartilhada e ponderada pela rotação (*Varimax*). O boro apresentou um Efeito Pepita Puro (EPP) na univariada porque sua variabilidade individual pontual em pequena escala continha um nível de ruído/erro amostral superior à dependência espacial detectável isoladamente; porém, ao ser filtrado pelo algoritmo multivariado, o escore do FAT1 reteve a estrutura espacial de covariância do conjunto de dados, permitindo a identificação de dependência espacial na interpolação do fator.

Para a interpretação técnica, a Krigagem do FAT1 reflete um padrão de fertilidade/comportamento biogeoquímico multifatorial do solo dominado pela carga do boro, e não a concentração pontual exata de Boro no solo. Portanto, o mapa de boro isolado mostra a limitação de predição espacial individual do elemento (ausência de continuidade espacial contínua isolada, representada pelo EPP), enquanto o mapa do FAT1 evidencia a continuidade espacial de um gradiente ambiental subjacente capturado pela combinação das variáveis no escore. Essa diferença é metodologicamente esperada na transição de abordagens univariadas para multivariadas e justifica o uso da Análise Fatorial para filtrar ruídos individuais e extrair padrões espaciais latentes na paisagem.

A assinatura do boro sugere que a espécie pode estar utilizando esse micronutriente específico e limitante como sinalizador para o seu estabelecimento, conforme mecanismos de sinalização nutricional discutidos por Sharma e Kumar (2021) e Wright *et al.* (2021). Adicionalmente, na abordagem geoestatística univariada, o gradiente validado de Saturação por Bases (V) revelou uma

concordância quase milimétrica de escala espacial (~278 m) com o alcance da densidade da espécie (~274 m).

Essa configuração final consolida uma hipótese ecológica focalizada nesta pesquisa: a distribuição agregada de *C. brasiliense* na população 2 não responde ao mosaico aleatório da maioria dos nutrientes, nem mesmo aos gradientes preditivamente frágeis de acidez e micronutrientes. Em vez disso, ela encontra um correlato espacial consistente no gradiente estruturado de fertilidade geral (V), posicionando-o como um potencial filtro ambiental em macroescala capaz de explicar a extensão e a persistência dos núcleos agregados nesta população, hipótese que encontra eco no modelo teórico de Keddy (1992). A correlação espacial entre os agrupamentos e as manchas de maior teor de boro merece investigação futura, pois apontaria para uma especialização nutricional inesperada.

Nesse cenário, a espécie responderia de forma direcionada a um micronutriente particular mesmo quando a maioria dos recursos edáficos se apresenta como ruído espacial, contrapondo-se aos modelos tradicionais de partição de nicho (Harms *et al.*, 2001; Seidler; Plotkin, 2006). Esta hipótese de especialização requer validação futura através de análises de correlação espacial que considerem a autocorrelação inerente aos dados (Dormann *et al.*, 2007); contudo, se confirmada, revelará uma adaptação ecológica notável a condições de extrema heterogeneidade ambiental e geomorfológica.

Os parâmetros demográficos e edáficos obtidos para a população 3 mostraram um cenário ecológico de persistência sob incertezas ambientais. Embora os dados de campo indiquem que a área ocupa a topografia mais plana e homogênea entre os sítios estudados, com altitude média de 52.66 m, o ambiente químico subjacente manifesta-se como o mosaico mais extremo e imprevisível do estudo.

Constatou-se uma fertilidade geral marcadamente mais baixa ($SB = 13.22 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $V = 66,93\%$), combinada a uma profusão massiva de valores discrepantes (*outliers*) e coeficientes de variação acentuados para macronutrientes (K), micronutrientes (Zn, Cu, Fe, Mn) e frações texturais.

Esse comportamento confuso do ambiente abiótico foi estatisticamente corroborado pela análise geoestatística univariada e multivariada. A esmagadora maioria dos atributos individuais, bem como os dois eixos integrados da análise fatorial, o eixo de fertilidade catiônica e textura (FAT1) e o eixo associado a condições redox e umidade (FAT2), manifestaram Efeito Pepita Puro (EPP).

Essa desconexão generalizada entre a covariância química e a estrutura espacial indica que os processos ecológicos e biogeoquímicos que governam a retenção de cátions e a dinâmica do enxofre operam de forma estritamente localizada na área de amostragem. Essa dinâmica edáfica faz com que quadrantes adjacentes não compartilhem continuidade em sua fertilidade, configurando um padrão pontilhado na paisagem que valida empiricamente as premissas estruturais de heterogeneidade propostas por Wiens (1989), além dos modelos de dependência local discutidos por Ter Braak e Šmilauer (2012).

A ocorrência de EPP em variáveis com modelos variográficos iniciais geometricamente ajustados, como a acidez potencial ($H+Al$), evidencia que estruturas matemáticas desprovidas de suporte preditivo na validação cruzada constituem ruídos locais inflacionados.

Os resultados univariados da espécie revelam que, mesmo diante do ruído generalizado do solo, a densidade de *C. brasiliense* mantém um comportamento estruturado, caracterizado por uma autocorrelação espacial estável, dependência moderada e alcance prático consolidado. Sob a perspectiva ecológica desta tese, esse descasamento explícito entre a organização biótica e a estocasticidade abiótica

comprova que a agregação de longo alcance da Jacareúba independe dos gradientes latentes de fertilidade catiônica (FAT1) ou de enxofre (FAT2).

Embora o alinhamento direto entre plantas e eixos edáficos macro amostrados seja frequentemente sugerido em ecossistemas tropicais (Legendre; Legendre, 2012), a quebra desse padrão na terceira população ampara a formulação de uma hipótese hierárquica de seleção de habitat. Portanto, a distribuição populacional da espécie na área responde a mecanismos que operam em múltiplas escalas, um princípio de partição que encontra fundamentação teórica nos modelos de filtros de Keddy (2001).

Ainda na população 3, os resultados demonstraram que o gradiente contínuo de pH do solo consistiu no único atributo edáfico autocorrelacionado a média distância, apresentando alcance prático de 129 m. Diante disso, propõe-se que este fator atua como o filtro ambiental primário em macroescala, sinalizando as faixas de adequação fisiológica e zoneamento de fundo para a espécie, em alinhamento ao modelo edáfico de John *et al.* (2007).

Uma vez estabelecido esse mapa amplo de acidez, a sobrevivência, o recrutamento e o adensamento dos agrupamentos em escala fina passam a ser secundariamente filtrados pela intersecção fortuita e probabilística com os 'oásis' edáficos e as manchas estocásticas de nutrientes, como os picos de potássio e micronutrientes, distribuídos aleatoriamente na matriz. Essa dinâmica valida localmente as premissas de Harms *et al.* (2001) e Levin (1992) sobre a atuação multidimensional de fatores ecológicos.

A estratégia bidimensional permite que *C. brasiliense* navegue na imprevisibilidade das planícies de inundação amazônica, comportando-se como um especialista de microescala ancorado em um sinalizador abiótico de fundo

especialmente estável, expandindo as observações ecológicas de Parolin *et al.* (2016).

Concisamente, a integração dos atributos edáficos por meio da Análise Fatorial Exploratória sintetiza a resposta da espécie aos grandes eixos ambientais.

Na primeira população, a extração fatorial retém três fatores que explicam 79% da variância total: o primeiro fator, associado ao pH e à saturação por bases, responde por 38%; o segundo, associado à areia e argila, por 23%; e o terceiro, associado aos micronutrientes zinco, cobre e manganês, por 18%. Nessa área, apenas o terceiro fator apresenta estruturação espacial exponencial com alcance de 262 metros.

Na segunda população, o primeiro fator explica 60% da variância total, sendo fortemente correlacionado ao boro, com carga de 0.94, e apresentando modelo Gaussiano com alcance de 315.4 metros.

Na terceira população, o primeiro fator explica 53% da variância, associado ao cálcio, soma de bases, capacidade de troca catiônica, potássio e argila, e o segundo fator explica 14%, associado ao enxofre e boro, totalizando 67% da variância, embora ambos os fatores exibam Efeito Pepita Puro. Esses resultados confirmam uma filtragem de habitat em múltiplas escalas, na qual a árvore responde de forma flexível aos gradientes abióticos contínuos e coloniza com sucesso arranjos estocásticos governados pela dinâmica local de clareiras e regeneração natural.

A eficiência da Análise Fatorial em sintetizar a complexidade edáfica das três populações ficou evidente nos elevados índices de variância total explicada pelos modelos fatoriais finais obtidos. Do ponto de vista ecológico, esses percentuais indicam que os eixos latentes extraídos conseguem capturar a quase totalidade das forças direcionadoras abióticas que operam no Médio Solimões, fornecendo

respaldo empírico local às estruturas multivariadas discutidas por Hair *et al.* (2019) e Legendre e Legendre (2012).

O fato de a complexidade original de 21 variáveis edáficas ter sido reduzida a apenas três dimensões interpretáveis em cada área demonstra que a heterogeneidade das várzeas, embora severa, responde a macroprocessos ordenados de acidez, fertilidade e dinâmica textural (Furquim *et al.*, 2021; Hauser *et al.*, 2022). Essa forte capacidade preditiva da AFE valida os eixos fatoriais construídos nesta tese como representações legítimas dos filtros ambientais da paisagem, fornecendo uma base matematicamente sólida para interpretar as estratégias ecológicas e os nichos de regeneração ocupados por *C. brasiliense*, dialogando de forma direta com os preceitos de John *et al.* (2007) e Ter Braak e Šmilauer (2012).

Esta interpretação reconcilia a estrutura espacial da espécie com a aparente aleatoriedade do ambiente, demonstrando na prática de campo como processos ecológicos podem operar em escalas distintas. Infere-se que um filtro primário de larga escala (pH) define as áreas potencialmente habitáveis, enquanto filtros secundários de microescala (disponibilidade estocástica de nutrientes) determinam a localização exata dos estabelecimentos, amparando-se nos pressupostos teóricos de Levin (1992) e Wright *et al.* (2021).

A profusão de valores discrepantes (*outliers*) de fósforo, potássio e matéria orgânica, observada de forma recorrente nos inventários das três populações de Jacareúba, reflete a quebra da continuidade edáfica gerada pela hidrodinâmica fluvial do Médio Solimões. Nesse sistema aluvial, a microtopografia e o fluxo hídrico interagem na escala de metros, regulando a velocidade de vazão e o tempo de permanência da lâmina d'água (Latrubesse *et al.*, 2020). Consequentemente, setores de baixios e microdepressões funcionam como zonas de descompressão hidráulica que aprisionam estocasticamente detritos orgânicos flutuantes e frações

minerais finas, resultando em uma deposição diferenciada de sedimentos e serapilheira (Batjes; Dijkshoorn, 1999; Meyer *et al.*, 2021).

Os dados indicam que esse dinamismo deposicional dita a assinatura geoestatística de Efeito Pepita Puro (EPP) generalizado na matriz química das três áreas estudadas, transformando essas planícies de inundação em um mosaico incerto onde 'ilhas de fertilidade' e focos de restrição química coexistem a curtíssimas distâncias, eliminando a previsibilidade espacial dos recursos em larga escala, conforme o cenário macro descrito por Hauser *et al.* (2022).

Sob a perspectiva da ecologia vegetal, preservar a variabilidade extrema (*outliers*) mostrou-se imperativo nesta pesquisa para interpretar de forma fidedigna os mecanismos de filtragem ambiental e estabelecimento de *C. brasiliense*, indo ao encontro do referencial teórico de Keddy (1992).

Para as populações avaliadas, que persistem em condições de baixa densidade ou em fases de recuperação pós-exploração seletiva, propõe-se que a dispersão de diásporos e o sucesso adaptativo no recrutamento de plântulas tornam-se criticamente dependentes da ocupação probabilística desses microsítios preferenciais gerados pelos *outliers*.

Infere-se, portanto, que um microhabitat favorável para *C. brasiliense* no Médio Solimões não corresponde a um amplo gradiente ambiental contínuo, mas sim a pontos discretos e restritos do mosaico de várzea onde se encontram, simultaneamente, condições ótimas e pontuais de pH, disponibilidade de nutrientes, textura e drenagem. Esta conclusão posiciona a espécie investigada firmemente dentro do paradigma ecológico clássico que explica a distribuição agregada de árvores tropicais pela associação à heterogeneidade ambiental em microescala, expandindo os horizontes das teses de Hubbell (1979) e Condit *et al.* (2000).

Sob a perspectiva de partição espacial, os resultados confirmam que a sobrevivência e o recrutamento da Jacareúba revelam-se bem sucedidos apenas em nichos de regeneração muito específicos e espacialmente limitados (Harms *et al.*, 2001), consolidando a premissa autoral de que a variabilidade extrema e pontual do solo atua como o filtro seletivo final que dita a persistência da espécie frente à imprevisibilidade do bioma aluvial.

4.3. Implicações para o manejo e conservação

Os resultados gerados trazem implicações diretas para a formulação de estratégias de manejo e restauração florestal em ecossistemas aluviais.

Primeiramente, os dados censitários confirmam que as populações remanescentes de *Calophyllum brasiliense* mantêm uma estrutura naturalmente agregada. Sob a perspectiva de exploração florestal e conservação, essa constatação exige que o planejamento de unidades de manejo sustentável e de colheita evite a fragmentação desses núcleos funcionais, sob o risco de comprometer irremediavelmente a viabilidade demográfica e genética das populações a longo prazo, em linha com os alertas clássicos de fragmentação de paisagens tropicais (Laurance *et al.*, 2002).

Em segundo lugar, a extrema heterogeneidade edáfica documentada, com destaque para os mosaicos estocásticos identificados nas populações 2 e 3, serve como um alerta técnico de que intervenções de enriquecimento ou reflorestamento não podem pressupor uniformidade ambiental, premissa corroborada pelas discussões de restrição de habitat de Bowler *et al.* (2020) e Jankowski *et al.* (2022).

Infere-se, portanto, que o sucesso do plantio de mudas da Jacareúba dependerá do mapeamento prévio de microhabitats adequados. Na área de estudo, esses sítios foram claramente delimitados pela modelagem bidimensional: na

população 2, devem visar o gradiente estruturado de Saturação por Bases (V) e as manchas de boro; na população 3, devem se alinhar estritamente ao contínuo espacial de pH, que atua como filtro macroespacial de fundo. Essa abordagem espacialmente explícita otimiza a aplicação de recursos e eleva as taxas de sobrevivência ao ancorar o manejo das reais exigências edáficas que a espécie manifesta em campo (Holl; Branchioni, 2020).

Os resultados obtidos sugerem que processos ecológicos auto-organizativos essenciais, a exemplo da dispersão limitada e de mecanismos de facilitação, continuam operantes na várzea, salvaguardando um potencial intrínseco de auto-recuperação mesmo após décadas sob o impacto da exploração madeireira histórica. Diante disso, o desafio central para a conservação e o manejo adaptativo reside na proteção rigorosa desses núcleos agregados remanescentes. Torna-se imperativo decifrar os sinalizadores ambientais específicos que sustentam essa persistência em cada compartimento ripário, integrando as ações de manejo de forma tão heterogênea e maleável quanto a própria complexidade física e biótica da paisagem (Holl; Branchioni, 2020).

Em conclusão, este capítulo demonstra que a distribuição contemporânea de *C. brasiliense* no Médio Solimões constitui o produto legível de uma intrincada trajetória geo-histórica, em que o legado da perturbação antrópica se sobrepõe e interage com a heterogeneidade abiótica e geomorfologia natural das várzeas. A modelagem geoestatística, ao isolar e quantificar a estrutura de dependência da espécie, transcendeu o diagnóstico descritivo, consolidando-se como um guia científico para ações de conservação fundamentadas na lógica ecológica da paisagem.

A abordagem espacialmente explícita viabiliza a tradução de padrões numéricos abstratos em diretrizes de campo perfeitamente aplicáveis: na proteção física dos agrupamentos ativos, na seleção precisa de microsítios para restauração

ecológica e na execução de um manejo adaptativo que respeite a variabilidade ambiental singular e a história particular de cada população investigada.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com base nas análises geoestatísticas, multivariadas e descritivas realizadas para as três populações de *C. brasiliense* no Médio Solimões, extraem-se as seguintes conclusões parciais, que cumprem integralmente os objetivos específicos propostos para este capítulo.

Confirmou-se que as populações remanescentes de *C. brasiliense* apresentam, de forma unívoca, um padrão de distribuição espacial agregado. Esse comportamento populacional foi quantificado por elevados coeficientes de assimetria positiva e, fundamentalmente, pela presença de dependência espacial moderada modelada via semivariogramas, com alcances práticos estreitamente sintonizados entre 274 e 288 metros. A estabilidade dessa estrutura, independentemente das oscilações na densidade demográfica média, como a severa redução observada na população 2, demonstra que a formação de núcleos agregados constitui uma propriedade ecológica estável e um mecanismo de persistência essencial face às pressões ambientais e ao histórico de exploração madeireira na várzea amazônica.

Evidenciou-se uma marcante dissociação entre a organização espacial da espécie e a da matriz abiótica que a circunda. Enquanto a densidade de indivíduos manteve uma estrutura espacial contínua e autocorrelacionada em dois dos três sítios, a esmagadora maioria das variáveis físico-químicas do solo (atributos químicos, frações texturais e matéria orgânica) exibiu Efeito Pepita Puro (EPP) generalizado nas populações. Essa quebra de dependência espacial caracteriza o ambiente edáfico como um mosaico estocástico em microescala.

Conclui-se, portanto, que a agregação da espécie não representa um reflexo passivo de gradientes edáficos contínuos de larga escala, mas sim o produto de processos ecológicos ativos ou de respostas a fatores muito específicos e pontuais.

A análise espacial revelou que cada população estabelece uma assinatura de modelagem única com a heterogeneidade ambiental:

Na população 1: Onde o solo apresentou uma organização química e textural mais definida pelos eixos fatoriais, a distribuição da espécie mostrou-se espacialmente desacoplada da matriz edáfica, indicando que sua ocorrência é governada por fatores históricos de perturbação antrópica ou por dinâmicas de clareiras estocásticas.

Na população 2: Em meio ao caos edáfico generalizado, a espécie manteve sua estrutura agregada ancorada em uma estrita sincronia de escala espacial (~274 m) com o gradiente estruturado de Saturação por Bases (~278 m) e com o fator multivariado dominante associado ao boro, sugerindo uma potencial especialização ou sensibilidade a este micronutriente limitante.

Na população 3: Constatou-se uma estratégia de seleção hierárquica de habitat, na qual o contínuo espacial de pH do solo, único atributo estruturado, com alcance de 129 m, atua como um filtro ambiental primário de macroescala, definindo as zonas de adequação fisiológica de fundo onde os indivíduos se estabelecem probabilisticamente.

As modelagens conjuntas demonstraram que a heterogeneidade da várzea se manifesta por diferentes vias matemáticas, seja como fatores latentes desestruturados (primeiro e segundo fator da população 3), como um gradiente suave de fundo (fator 1 da população 2) ou como picos isolados de fertilidade expressos por *outliers* com autêntica plausibilidade biogeoquímica.

Do ponto de vista do manejo e da restauração florestal, essa constatação invalida a busca por um único "fator-chave" edáfico para explicar a distribuição de *C. brasiliense* em escala regional. A espécie manifesta alta plasticidade ecológica e respostas locais específicas, o que exige que qualquer intervenção silvicultural de

enriquecimento ou plantio abandone premissas de uniformidade e baseie-se em diagnósticos espaciais tridimensionais restritos a cada população.

Em suma, as populações de *C. brasiliense* persistem na paisagem do Médio Solimões como um conjunto de núcleos estruturados, inseridos em uma matriz ambiental marcadamente imprevisível. A conservação integral dos *outliers* no modelo analítico definitivo mostrou-se uma decisão metodológica crucial, pois o cruzamento espacial georreferenciado provou que essas flutuações extremas correspondem a "ilhas de fertilidade" reais criadas pela dinâmica hidrodinâmica fluvial, e não a erros de laboratório.

Esses achados fornecem a base factual, os parâmetros quantitativos de alcance e a validação metodológica essenciais para a análise comparativa integrada que será realizada no Capítulo 3 desta tese, no qual esses padrões serão sintetizados entre as espécies para a proposição de diretrizes de manejo contextualizadas para o bioma.

REFERÊNCIA

- ABREU, J. C. de. **Memórias e saberes das comunidades tradicionais sobre a exploração madeireira histórica na várzea do Médio Solimões, Amazonas**. 2018. 145 f. Dissertação (Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia) – Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6612>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- ALLAS, T. A.; GOTELLI, N. J. Measuring abundance and density. *In*: FOX, G. A.; NEGRETE-YANKELEVICH, S.; SOSA, V. J. (ed.). **Ecological Statistics: contemporary theory and application**. Oxford: Oxford University Press, 2017. cap. 3, p. 45-68. isponível em: https://www.researchgate.net/publication/273384210_Measuring_abundance_and_density. Acesso em: 10 ago. 2026.
- ALMEIDA, L. S. **Geoestatística isolada e integrada à análise fatorial exploratória para a caracterização espacial dos fatores inerentes à ocorrência do pequizeiro – anão (*Caryocar brasiliense* subsp. *intermedium* (Wittm.) Prance & M. F. Silva *Caryocaraceae*)**. 2021. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34092>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- ALVES, G. F. **Índices de dispersão e geoestatística: uma análise sobre dependência espacial e fatores relativos à restrita distribuição de *Paepalanthus chiquitensis* Herzog nos campos rupestres**. 2021. 98 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/31511>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 181, n. 1, p. 1-20, 2016. DOI: 10.1111/boj.12385. Disponível em: <https://academic.oup.com/botlinnean/article/181/1/1/2416499>. Acesso em: 20 ago. 2026.
- ASSIS, R. L. de *et al.* Patterns of tree diversity and composition in Amazonian floodplain paleo-várzea forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 26, n. 2, p. 312-322, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jvs.12229>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jvs.12229> . Acesso em: 10 ago. 2026.

AYRES, J. M.; AYRES, C. História do desenvolvimento da atividade madeireira na várzea: a vila e a floresta. In: AYRES, J. M. **As matas de várzea do Mamirauá**. 2. ed. Belém: Sociedade Civil Mamirauá, 2006. p. 45-60. Disponível em: https://mamiraua.org.br/tipos_de_publicacoes/livros/. Acesso em: 20 fev. 2025.

BARTLETT, M. S. A note on the multiplying factors for various χ^2 approximations. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 16, n. 2, p. 296-298, 1954. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1954.tb00174.x. Disponível em: <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2517-6161.1954.tb00174.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

BARRETO, C. G. *et al.* Amplificação de extremos hidrológicos na Bacia Amazônica. In: PAINEL CIENTÍFICO PARA A AMAZÔNIA. **Relatório de Avaliação da Amazônia 2021**. Nova Iorque: Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (SDSN), 2022. cap. 21. Disponível em: <https://www.sp-amazon.org/br/publications>. Acesso em: 10 ago. 2026.

BARROS, A. C.; UHL, C. A evolução da exploração madeireira na Amazônia Oriental. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais**, Belém, v. 1, n. 1, p. 103-127, 1995. Disponível em: https://boletimcn.museu-goeldi.br/bcnaturais/pt_BR. Acesso em: 10 ago. 2026.

BATJES, N. H.; DIJKSHOORN, J. A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. **Geoderma**, v. 89, n. 3-4, p. 273-286, 1999. DOI: 10.1016/S0016-7061(98)00086-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670619800086X>. Acesso em: 20 ago. 2026.

BELLIER, E. *et al.* Testing environmental and genetic effects in the presence of spatial autocorrelation. **Ecography**, v. 37, n. 4, p. 781-792, 2014. DOI: 10.1111/ecog.00566. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecog.00566>. Acesso em: 20 ago. 2026.

BISHOP, T. F. A.; LARK, R. M. **The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale**. *Geoderma*, v. 134, n. 1-2, p. 193-206, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706106001145>. Acesso em: 18 ago. 2026.

BIVAND, R. S.; PEBESMA, E. J.; GÓMEZ-RUBIO, V. **Applied spatial data analysis with R**. 2. ed. New York: Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-1-4614-7618-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51997702_Applied_Spatial_Data_Analysis_With_R. Acesso em: 10 ago. 2026.

BOWLER, D. E. *et al.* Mapping human pressures on biodiversity across the planet uncovers anthropogenic threat complexes. **People and Nature**, v. 2, n. 2, p. 380-394, 2020. DOI: 10.1002/pan3.10071. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pan3.10071>. Acesso em: 20 ago. 2026.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 15. ed. Harlow: Pearson, 2016. Disponível em: https://dn790000.ca.archive.org/0/items/CUbiodiversity102127/CUbiodiversity102127_bw.pdf. Acesso em: 18 ago. 2026.

BROWER, J. E.; ZAR, J. H.; VON ENDE, C. N. **Field and laboratory methods for general ecology**. 4. ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1998. Disponível em: <https://fcen.uncuyo.edu.ar/upload/broweretal19871a-c.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2026.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x . Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CARVALHO, P. E. R. Guanandi: *Calophyllum brasiliense*. In: _____. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1, p. 485-494. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1140130/1/Especies-Arboreas-Brasileiras-vol-1-Guanandi.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

CHAZDON, R. L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1458-1460, 2008. DOI: 10.1126/science.1155365. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1155365>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CHAZDON, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, v. 2, n. 5, p. e1501639, 2016. DOI: 10.1126/sciadv.1501639. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1501639>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CLARK, P. J.; EVANS, F. C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. **Ecology**, v. 35, n. 4, p. 445-453, 1954. DOI: 10.2307/1931034. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1931034>. Acesso em: 20 ago. 2026.

COELHO, S. D. *et al.* Legacies of past logging haunt current structure and composition of an Amazonian floodplain forest after 25 years of protection. **Journal of Applied Ecology**, v. 62, n. 2, p. 341-355, 2025. DOI: 10.1111/1365-2664.14815. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.14815>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CONDIT, R. *et al.* Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, v. 288, n. 5470, p. 1414-1418, 2000. DOI: 10.1126/science.288.5470.1414. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.288.5470.1414>. Acesso em: 20 ago. 2026.

COSTELLO, A. B.; OSBORNE, J. W. Best practices in exploratory factor analysis: four recommendations for getting the most from your analysis. **Practical Assessment, Research & Evaluation**, v. 10, n. 7, p. 1-9, 2005. Disponível em: <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/id/1650/>. Acesso em: 10 ago. 2026.

DORMANN, C. F. *et al.* Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. **Ecography**, v. 30, n. 5, p. 609-628, 2007. DOI: 10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x>. Acesso em: 20 ago. 2026

DUTRA, M. D. S. **Geoestatística aplicada a caracterização da distribuição espacial de espécies arbóreas em floresta ombrófila mista**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8731/DUTRA%2C%20MARIA%20DANIELE%20DOS%20SANTOS.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2026.

FABRIGAR, L. R.; WEGENER, D. T. **Exploratory factor analysis**. New York: Oxford University Press, 2012. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Exploratory_Factor_Analysis.html?id=DSppAgAAQBAJ. Acesso em: 18 ago. 2026.

FERNÁNDEZ, J. *et al.* Calophyllum brasiliense: a review of its phytochemistry and pharmacology. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 278, p. 114269, 2021. Disponível em: [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037887412100492X). Acesso em: 18 ago. 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037887412100492X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

FERREIRA, C. S. **Tolerância à inundação em espécies arbóreas da várzea da Amazônia Central**: aspectos ecofisiológicos e morfológicos. 2000. 165 f. Tese (Doutorado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2000. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/16650>. Acesso em: 20 fev. 2025.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. **Calophyllum brasiliense Cambess.** Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB6923>. Acesso em: 20 fev. 2025.

FONSECA, M. G. *et al.* Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931-2946, 2019. DOI: 10.1111/gcb.14709. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.14709>. Acesso em: 20 ago. 2026.

FORTIN, M. J.; DALE, M. R. T. **Spatial analysis**: a guide for ecologists. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: [10.1017/CBO9780511542039](https://doi.org/10.1017/CBO9780511542039). Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/spatial-analysis/7E24BBFA121C16F08AC8E9F7AC3BA6A0>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FURQUIM, S. A. C. *et al.* Pedogenesis in a Pleistocene fluvial system of the Northern Pantanal – Brazil. **Geoderma**, v. 255-256, p. 58-69, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611500143X>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FURQUIM, S. A. C. *et al.* Pedogenesis and soil classification of an alluvial plain in the Brazilian Pantanal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 813-823, 2010. Disponível em: scielo.br. Acesso em: 18 ago. 2026. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wMpxsRrmv9BChJsnRjV439Q/>. Acesso em: 18 ago. 2026.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **A primer of ecological statistics**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2012. Disponível em: <https://global.oup.com/academic/product/a-primer-of-ecological-statistics-9781605350646>. Acesso em: 18 ago. 2026.

GOULDING, M. **The fishes and the forest**: explorations in Amazonian natural history. Berkeley: University of California Press, 1980. Disponível em: https://books.google.com/books/about/The_Fishes_and_the_Forest.html?hl=pt-BR&id=krlsP5RbFx0C. Acesso em: 18 ago. 2026.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. Disponível em: <https://global.oup.com/academic/product/geostatistics-for-natural-resources-evaluation-n-9780195115383>. Acesso em: 18 ago. 2026.

GOOVAERTS, P. Spatial interpolation. *In*: HUANG, B. (ed.). **Comprehensive Geographic Information Systems**. Oxford: Elsevier, 2018. v. 1, p. 481-508. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/comprehensive-geographic-information-systems/huang/978-0-12-804660-9>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HAIR, J. F. *et al.* **Multivariate data analysis**. 8. ed. Andover: Cengage Learning EMEA, 2019. Disponível em: <https://au.cengage.com/c/multivariate-data-analysis-8e-hair-babin-anderson-black/9781473756540/>. Acesso em: 17 ago. 2026.

HARMS, K. E.; CONDIT, R.; HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B. Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. **Journal of Ecology**, v. 89, n. 6, p. 947-959, 2001. DOI: 10.1046/j.0022-0477.2001.00615.x. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.0022-0477.2001.00615.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

HAUGASEN, T.; PERES, C. A. Mammal assemblage structure in Amazonian flooded and unflooded forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 21, n. 2, p. 133-145, 2005. DOI: 10.1017/S026646740400207X. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-tropical-ecology/article/abs/mammal-assemblage-structure-in-amazonian-flooded-and-unflooded-forests/E143FE101BA5CA9AC99745DA30026AC6>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HAUSER, M. W. *et al.* Geomorphology influences soil and tree structure in Amazonian floodplain ecosystems. **Geomorphology**, v. 414, p. 108396, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X2200276X>. Acesso em: 17 ago. 2026.

HOLL, K. D.; BRANCALION, P. H. S. Restoration of tropical forest ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 51, p. 541-566, 2020. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-ecolsys-011720-111400>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HUBBELL, S. P. Tree dispersion, abundance, and diversity in a tropical dry forest. **Science**, v. 203, n. 4387, p. 1299-1309, 1979. DOI: 10.1126/science.203.4387.1299.

Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.203.4387.1299>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HUSAIN, I. *et al.* Phytochemical and pharmacological profile of Calophyllum genus. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 8, n. 9, p. 423-438, 2018.

Disponível em:

<https://www.apjtb.org/article.asp?issn=2221-1691;year=2018;volume=8;issue=9;spage=423;epage=438;aulast=Husain>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HUTCHINSON, G. E. Concluding remarks. **Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology**, v. 22, p. 415-427, 1957. DOI: 10.1101/SQB.1957.022.01.039.

Disponível em: <https://symposium.cshlp.org/content/22/415>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ISAAC, V. J. *et al.* Conflitos no uso dos recursos pesqueiros em áreas de proteção integral e sustentável na Amazônia Central. In: IRVING, M. A. (org.). **Conflitos Sociais em Áreas Protegidas no Brasil**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009. p. 115-138. ISBN 978-85-7617-171-3.

JANKOWSKI, K. *et al.* Integrating scale and complexity in vegetation ecology: from patterns to processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 37, n. 8, p. 660-672, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016953472200100X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

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. Disponível em:

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0604666104>. Acesso em: 18 ago. 2026.

JUNK, W. J. *et al.* A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0190-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13157-011-0190-7>. Acesso em: 18 ago. 2026

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 55-90. DOI: 10.1201/b10158. Disponível em:

<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b10158/trace-elements-soils-plants-alina-kabata-pendias>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KAISER, H. F. An index of factorial simplicity. **Psychometrika**, v. 39, n. 1, p. 31-36, 1974. DOI: 10.1007/BF02291575. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02291575>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KEDDY, P. A. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 2, p. 157-164, 1992. DOI: 10.2307/3235676. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/3235676>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KEDDY, P. A. **Competition**. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2001. DOI: 10.1007/978-94-010-0694-1. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-010-0694-1>. Acesso em: 18 ago. 2026

KITTREDGE, J. C. **Relatório sobre possibilidades de produção de madeira na várzea da Amazônia**. Belém: FAO/SUDAM, 1964. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LATRUBESSE, E. M. et al. Geomorphology of the Amazon basin and its rivers: a review. In: SHRODER, J. F. (ed.). **Treatise on Geomorphology**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2022. v. 8, p. 228-264. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128182345000724>. Acesso em: 17 ago. 2026.

LAURANCE, W. F. *et al.* Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas. **Nature**, v. 489, n. 7415, p. 290-294, 2012. DOI: 10.1038/nature11318. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11318>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LAURANCE, W. F. *et al.* Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. **Conservation Biology**, v. 16, n. 3, p. 605-618, 2002. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2002.01025.x. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1523-1739.2002.01025.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LAURANCE, W. F. *et al.* The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biological Conservation**, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011. DOI: 10.1016/j.biocon.2010.09.021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000632071000389X>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? **Ecology**, v. 74, n. 6, p. 1659-1673, 1993. DOI: 10.2307/1939924. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1939924>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/numerical-ecology/legendre/978-0-444-53868-0>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LEVIN, S. A. The problem of pattern and scale in ecology. **Ecology**, v. 73, n. 6, p. 1943-1967, 1992. DOI: 10.2307/1941447 . Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1941447>. Acesso em: 20 ago. 2026.

LI, J.; HEUVELINK, G. B. M. A generic framework for spatial cross-validation. **Spatial Statistics**, v. 31, p. 100358, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221167531930030X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LONGO, R. M.; LIMA, J. S. S. de. Propriedades tecnológicas da madeira de espécies amazônicas: uma revisão. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1325-1339, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/9gBvS9c9Yk3v6XqX/>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LONGHI, S. J. **Agrupamento e análise de gradiente de espécies florestais na Floresta Nacional de Tapajós, Amazônia Oriental**. 1997. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/24681>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2009. v. 1, p. 230. Disponível em: <https://www.plantarum.com.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LUNA-NOLE, C. D. *et al.* Soil and topographic drivers of tree community assembly in central Amazonian floodplain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 500, p. 119619, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119619>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811272100685X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MAIA, L. A. *et al.* Morpho-physiological adjustments of Amazonian tree species to flooding: implications for forest management and conservation. **Flora**, v. 262, p. 151518, 2020. DOI: 10.1016/j.flora.2019.151518. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036725301930438X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MARINHO, T. A. S. **Dinâmica populacional de espécies madeireiras exploradas na várzea da RDS Mamirauá**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2008. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S. A.; STAFFORD, S. G. **Multivariate statistics for wildlife and ecology research**. New York: Springer, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-1288-1>. Acesso em: 18 ago. 2026

MEYER, V.; SAATCHI, S.; FERRO, I. *et al.* Spatial heterogeneity of soil organic carbon in Amazonian wetlands linked to local topography and inundation dynamics. **Biogeosciences**, v. 18, n. 6, p. 2001-2020, 2021. DOI: 10.5194/bg-18-2001-2021. Disponível em: copernicus.org. Acesso em: 18 ago. 2026. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/18/2001/2021/>. Acesso em: 18 ago. 2026

MONTEIRO, M. C.; BHERING, S. B. Geoestatística aplicada à ecologia e ciências ambientais: conceitos e fundamentos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 488-502, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/238711> Acesso em: 18 ago. 2026.

NASCIMENTO, H. E. M. *et al.* Demography of a non-pioneer tree species (*Manilkara huberi*) under contrasting forest management in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 30-40, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811271630538X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1039734>. Acesso em: 18 ago. 2026.

PAROLIN, P. *et al.* Tolerance to submergence in herbaceous and woody species of the Amazonian floodplains. **AoB Plants**, v. 8, p. plw034, 2016. Disponível em: <https://academic.oup.com/aobpla/article/doi/10.1093/aobpla/plw034/201015> . Acesso em: 10 ago. 2026.

PAROLIN, P. *et al.* A falta de dados e a urgência da conservação das áreas úmidas (várzeas) da Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 139-146, 2013. Ol: 10.1590/S0044-59672013000200001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/yz549YY8ZgHY6JpDSmZ9ypp/> . Acesso em: 10 ago. 2026.

PAROLIN, P. Life history and environment of *Cecropia latiloba* in Amazonian floodplains. **Revista de Biologia Tropical**, v. 50, n. 2, p. 531-545, 2002. Disponível em:

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442002000200013. Acesso em: 18 ago. 2026.

PEIXOTO, R. B. *et al.* Sources and transport of nutrients in the Brazilian Amazon Basin. **Water Research**, v. 226, p. 119182, 2022. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119182 Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313542200889X> . Acesso em: 18 ago. 2026.

POORTER, L. *et al.* Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time. **Nature Ecology & Evolution**, v. 3, n. 4, p. 428-434, 2019. DOI: 10.1038/s41559-019-0825-z. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41559-019-0825-z>. Acesso em: 18 ago. 2026.

POORTER, L. Light-dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species. **Functional Ecology**, v. 15, n. 1, p. 113-123, 2001. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2001.00488.x. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2435.2001.00488.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 24 jul. 2025.

QUEIROZ, H. L. A Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 183-203, 2005. DOI: 10.1590/S0103-40142005000200011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eav/a/jXjS6XF39zJffSymp6N3Mzb/>. Acesso em: 20 ago. 2026.

RAMOS, M. I. M. *et al.* Historical ecology of floodplain forests in the Central Amazon: implications for conservation. **Ethnobiology and Conservation**, v. 9, p. 1-18, 2020. DOI: 10.15451/ec2020-04-9.14-1-18. Disponível em: <https://www.ethnobiococonserv.com/index.php/ebc/article/view/364>. Acesso em: 20 ago. 2026.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for the environmental sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 2008. Disponível em: gammadesign.com. Acesso em: 18 ago. 2026.

RODRIGUES, J. V. *et al.* Avaliação da efetividade de acordos de manejo comunitário para a conservação de espécies arbóreas na Amazônia. **Biotemas**, v. 36, n. 3, p. 45-58, 2023. Disponível em: [ufsc.br](https://periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/92841). Acesso em: 18 ago. 2026. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/92841>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ROSA, M. F. **Análise histórica do uso dos recursos madeireiros na várzea do Médio Solimões, Amazônia Central**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3638> . Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTANA, R. A. **Avaliação de técnicas geoestatísticas no inventário de povoados de *Tectona grandis* L.f.** 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011. Disponível em: <https://locus.ufv.br/bitstreams/a47e8c8e-f1df-4fc5-9bd9-e90a5cd275e5/download>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SCHÖNGART, J. **Demografia e manejo de árvores em florestas de várzea na Amazônia Central: o exemplo da espécie madeireira *Maquira coriacea* (Karsten) C.C. Berg**. 2003. 177 f. Tese (Doutorado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2003. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/13297>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SEIDLER, T. G.; PLOTKIN, J. B. Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees. **PLOS Biology**, v. 4, n. 11, p. e344, 2006. DOI: 10.1371/journal.pbio.0040344. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.0040344>. Acesso em: 20 ago. 2026.

SILVA, A. B. *et al.* Slow recovery of timber species in Amazonian floodplain forests under community-based conservation. **Forest Ecology and Management**, v. 531, p. 120789, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811272300045X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SHARMA, S. P.; KUMAR, V. Boron in soils and plants: an overview. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 1-14, 2021. DOI: 10.5958/0974-0228.2021.00034.4. Disponível em: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:jisss&type=home>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SLOCUM, T. A. *et al.* **Thematic cartography and geovisualization**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003150527. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003150527/thematic-cartography-geovisualization-terry-slocum-robert-mcmaster-fritz-kessler-hu-huaiyu-wang>. Acesso em: 20 ago. 2026.

SUTHERLAND, W. J. **Ecological census techniques**: a handbook. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/ecological-census-techniques/1FEE9847ADC E3DFDC4E091DC7D57B36E>. Acesso em: 18 ago. 2026.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 27 abr. 2025. .

TER BRAAK, C. J. F.; SMILAUER, P. **Canoco reference manual and user's guide**: software for ordination (version 5.0). Ithaca: Microcomputer Power, 2012. 496 p. Disponível em: <https://www.canoco5.com>. Acesso em: 18 ago. 2026.

TERBORGH, J. Enemies maintain hyperdiverse tropical forests. **The American Naturalist**, v. 179, n. 5, p. 664-672, 2012. Disponível em: [duke.edu](https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/665007). Acesso em: 18 ago. 2026. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/665007>. Acesso em: 18 ago. 2026.

WADSWORTH, F. H. **Forest production for Tropical America**. Washington, DC: USDA Forest Service, 1997. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/21808>. Acesso em: 18 ago. 2026.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. DOI: 10.1002/9780470517277. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470517277>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WIEGAND, T.; MOLONEY, K. A. **Handbook of spatial point-pattern analysis in ecology**. Boca Raton: CRC Press, 2014. Disponível em:

<http://www.thorsten-wiegand.de/Programita2014/AdditionsErrataBookWiegandMoloney.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2026.

WIENS, J. A. Spatial scaling in ecology. **Functional Ecology**, v. 3, n. 4, p. 385-397, 1989. DOI: 10.2307/2389612. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/2389612>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WITTMANN, F.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 196, n. 1, p. 199-212, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.02.060. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112704001948>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WITTMANN, F. *et al.* Manual of trees from Central Amazonian várzea floodplains: taxonomy, ecology and use. **Rodriguésia**, v. 61, n. 1, p. 139-146, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Pia_Parolin/publication/235602074_Manual_of_tree_species_from_Central_Amazonian_white-water_floodplains_Taxonomy_Ecology_and_Use/links/0c9605338687f9d9fc000000.pdf. Acesso em: 18 ago. 2026.

WRIGHT, S. J. *et al.* Plant responses to nutrient addition experiments conducted in tropical forests. **Ecological Monographs**, v. 91, n. 4, p. e1487, 2021. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecm.1487>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; ELPHICK, C. S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 1, n. 1, p. 3-14, 2010. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CAPÍTULO II

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E RELAÇÕES AMBIENTAIS DE *Platymiscium ulei* Harms. NO MÉDIO SOLIMÕES

RESUMO

Investigou-se o estado atual e os condicionantes ambientais das duas únicas populações remanescentes de *Platymiscium ulei* Harms (Macacaúba) na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Médio Solimões, espécie madeireira de alto valor, historicamente superexplorada e atualmente classificada como "Em Perigo" (EN) pela IUCN. O estudo analisou 59 indivíduos adultos georreferenciados (37 na primeira população e 22 na segunda) e atributos físico-químicos de 83 amostras de solo (62 na população 1 e 19 na 2), empregando uma abordagem integrada de geoestatística e análise multivariada. Os resultados revelaram um cenário crítico de conservação para ambas as populações, com densidade média muito baixa (população 1: 1.41; população 2: 1.38, ind./0.16 ha). Na primeira população, a densidade da espécie exibiu Efeito Pepita Puro (EPP), indicando distribuição espacial aleatória e ausência de dependência espacial, interpretada como assinatura de colapso populacional severo associado a um possível efeito Allee. Na segunda população, embora um modelo Gaussiano tenha se ajustado ao semivariograma experimental ($R^2 = 1.00$), o desempenho insatisfatório na validação cruzada ($R^2_{\text{xvalid}} = 0.20$) inviabilizou a krigagem, demonstrando que a agregação sugerida pela estatística descritiva não se traduz em padrão espacial preditivo. A análise fatorial da população 1 identificou um único eixo ambiental dominante, o gradiente bipolar de fertilidade/acidez (FAT1), composto por pH, Saturação por Bases (V) e acidez potencial (H+Al), que também apresentou EPP, configurando uma dupla aleatoriedade que restringe a espécie a manchas estocásticas e raras de solo com baixa acidez e alta saturação por bases. Para a população 2, a análise fatorial foi inviabilizada pelo índice KMO de 0.17, classificado como "inaceitável", indicando correlações extremamente fracas entre os atributos edáficos e um ambiente edáfico caótico. Nenhuma variável em nenhuma das duas populações atendeu aos critérios para aplicação da krigagem ordinária, sendo todos os atributos interpolados por IDW. Concluiu-se que a proteção passiva é insuficiente para reverter o declínio da espécie, sendo necessárias intervenções ativas de manejo diferenciado: enriquecimento seletivo nas manchas de solo ótimas da primeira população, proteção rigorosa dos indivíduos remanescentes da segunda população e busca ativa por novas populações na região.

Palavras-chave: Arranjo populacional; Variografia; Várzea amazônica; Filtros edáficos; Resiliência florestal; Silvicultura tropical.

ABSTRACT

The current status and environmental determinants of the only two remaining populations of *Platymiscium ulei* Harms (Macacaúba) in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, Middle Solimões, were investigated. This species is a high-value timber tree, historically overexploited, and currently classified as "Endangered" (EN) by the IUCN. The study analyzed 59 georeferenced adult individuals (37 in the first population and 22 in the second) and physicochemical attributes from 83 soil samples (62 in population 1 and 19 in population 2), employing an integrated approach of geostatistics and multivariate analysis. The results revealed a critical conservation scenario for both populations, with very low average density (population 1: 1.41; population 2: 1.38 ind./0.16 ha). In the first population, species density exhibited a Pure Nugget Effect (PNE), indicating random spatial distribution and an absence of spatial dependence, interpreted as a signature of severe population collapse associated with a possible Allee effect. In the second population, although a Gaussian model fitted the experimental semivariogram ($R^2 = 1.00$), the unsatisfactory performance in cross-validation ($R^2_{xvalid} = 0.20$) rendered kriging unfeasible, demonstrating that the aggregation suggested by descriptive statistics does not translate into a predictive spatial pattern. Factor analysis for population 1 identified a single dominant environmental axis, the bipolar fertility/acidity gradient (FAT1), composed of pH, Base Saturation (V), and potential acidity (H+Al), which also presented a PNE, establishing a double randomness that restricts the species to stochastic and rare soil patches with low acidity and high base saturation. For population 2, factor analysis was deemed unfeasible due to a KMO index of 0.17, classified as "unacceptable," indicating extremely weak correlations between edaphic attributes and a chaotic soil environment. No variable in either population met the criteria for applying ordinary kriging, with all attributes being interpolated by Inverse Distance Weighting (IDW). It was concluded that passive protection is insufficient to reverse the species' decline, requiring active interventions of differentiated management: selective enrichment in optimal soil patches in the first population, rigorous protection of remaining individuals in the second population, and active searching for new populations in the region.

Keywords: Pure Nugget Effect; Population fragmentation; Chaotic matrix; Allee effect; Active restoration.

1 INTRODUÇÃO

Platymiscium ulei Harms., conhecida popularmente como Macacaúba, macawood, trebol ou pau-roxo, é uma espécie arbórea emblemática da família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Faboideae, tribo Dalbergieae (Cardoso *et al.*, 2021; Lpwg, 2017). Taxonomicamente, seu posicionamento reflete um grupo de espécies neotropicais com elevado valor econômico e ecológico (Klitgaard; Lavin, 2005; Sartori & Tozzi, 2017). Sua madeira, classificada como pesada (densidade entre 0.85 - 1,05 g cm⁻³), de cor alaranjada a vermelho-acastanhada, com grão fino, textura uniforme e extrema durabilidade natural, é historicamente reconhecida como uma das mais nobres da Amazônia, amplamente utilizada em marcenaria de luxo, fabricação de instrumentos musicais, pisos especiais, construção naval e elementos estruturais de alta resistência (Carvalho, 2003; Lorenzi, 2009; Mainieri; Chimelo, 1989).

É considerada uma espécie arbórea emblemática por reunir um conjunto singular de atributos ecológicos, econômicos, culturais e simbólicos que a tornam representativa tanto das riquezas quanto das vulnerabilidades das florestas amazônicas. Ecologicamente, a espécie funciona como um indicador de ambientes preservados de terra firme e várzea alta, sendo sensível a perturbações antrópicas e alterações hidrológicas, o que a torna um bioindicador da saúde desses ecossistemas (Parolin *et al.*, 2013; Wittmann *et al.*, 2010). Culturalmente, está profundamente enraizada no conhecimento tradicional das populações ribeirinhas, que a identificam não apenas pela qualidade da madeira, mas também por seus usos medicinais e sua presença em narrativas locais (Abreu, 2018; Queiroz, 2005). Portanto, *P. ulei* transcende seu valor madeireiro: ela encarna a complexa interação entre valor econômico, função ecológica, significado cultural e risco de extinção, representando um símbolo vivo da necessidade de equilíbrio entre uso e conservação na Amazônia.

Do ponto de vista fitoquímico, a espécie é fonte de uma diversidade de metabólitos secundários, incluindo flavonoides, taninos e cumarinas, que conferem não apenas sua notável resistência a deterioração por fungos e insetos, mas também propriedades farmacológicas de interesse, como atividade anti-inflamatória e antioxidante (Costa *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2018). Ecologicamente, *P. ulei* é uma espécie cleistógama, com flores que não se abrem completamente, sugerindo um sistema reprodutivo que pode envolver autopolinização ou polinização por insetos de pequeno porte, um mecanismo ainda pouco estudado em condições naturais (Gribel; Gibbs, 2002; Oliveira; Gibbs, 2000). A dispersão de suas sementes é anemocórica, com sâmaras aladas típicas da tribo Dalbergieae, o que pode limitar sua dispersão a distâncias relativamente curtas e contribuir para padrões de distribuição agregada (Ruiz *et al.*, 2021; Van Der Pijl, 1982). Há também evidências de propagação vegetativa através de brotação de raízes ou tocos, uma adaptação que pode favorecer sua persistência após perturbações como o corte seletivo (Freitas *et al.*, 2019).

Essa associação a habitats menos inundáveis sugere uma tolerância moderada à anoxia radicular, inferior à de espécies típicas de várzea baixa, tornando-a particularmente sensível a alterações no regime hidrológico e ao aumento da frequência e duração de inundações (Parolin *et al.*, 2013; Schöngart *et al.*, 2021). A regeneração natural é considerada crítica, com baixa densidade de plântulas no sub-bosque e dependência de clareiras de pequeno e médio porte para estabelecimento e crescimento inicial (Dalling *et al.*, 1998; Poorter, 2001).

Climaticamente, distribui-se em regiões de clima equatorial úmido, com precipitação anual entre 2.000 e 3.000 mm e temperaturas médias anuais entre 24°C e 28°C, sem períodos prolongados de seca (Schöngart *et al.*, 2021). Sua distribuição geográfica é neotropical restrita, ocorrendo de forma descontínua na Amazônia ocidental (Brasil, Peru, Colômbia) e em algumas áreas do escudo das

Guianas, sempre associada a formações florestais primárias ou secundárias avançadas (Cardoso *et al.*, 2021). Devido à exploração histórica intensiva, perda de habitat e baixa taxa de regeneração natural, *P. ulei* encontra-se atualmente classificada na categoria "Em Perigo" (EN) na Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2022) e é considerada vulnerável em avaliações nacionais, como o Livro Vermelho da Flora do Brasil (CNCFlora, 2022), configurando-se como uma espécie de alta prioridade para conservação e manejo sustentável na região amazônica.

O histórico de exploração da Macacaúba (*P. ulei*) no Médio Solimões, juntamente com os relatos e o conhecimento etnoecológico das comunidades da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) (Abreu, 2018; Queiroz, 2005), atestam que a extração da Macacaúba está intrinsecamente ligado à consolidação da economia madeireira regional, que entre as décadas de 1950 e 1980 transformou as várzeas em um dos principais fornecedores de madeiras nobres para os mercados nacional e internacional (Barros; Uhl, 1995; Homma, 2011; Rosa, 2008). Nesse período, a espécie foi alvo de uma extração sistemática e não planejada, favorecida pela sua ocorrência em margens de rios e igarapés de água branca, o que facilitava o arraste e transporte via flutuação (Ayres *et al.*, 2006; Rosa, 2008). A exploração seguia um padrão de corte seletivo de alto impacto, no qual apenas os indivíduos de maior diâmetro (acima de 50 cm DAP) eram removidos, sem qualquer critério de manejo que garantisse a perpetuação da espécie (Marinho, 2008; Sabogal *et al.*, 2006). Esse processo resultou em um esgotamento acelerado dos estoques naturais, uma vez que a taxa de extração superava em muito a capacidade natural de regeneração e crescimento da espécie, que apresenta incremento diamétrico anual modesto, inferior a 0.5 cm/ano em condições naturais, tornando-se uma espécie de ocorrência rara e localizada na paisagem contemporânea (Lentini *et al.*, 2021; Parolin *et al.*, 2013); Schöngart, 2008; Wadsworth, 1997).

Além disso, a ausência de políticas de fiscalização eficazes e a pressão do mercado madeireiro, especialmente durante o ciclo da borracha e posterior expansão urbana na Amazônia, intensificaram a retirada desordenada (Erdmann, 2019; Rede Simex, 2022). Relatos etnográficos e documentos históricos da Reserva Mamirauá indicam que, em algumas áreas, a Macacaúba foi localmente extirpada, restando apenas indivíduos isolados ou rebrotas de baixo vigor, configurando um legado de degradação que ainda define sua distribuição espacial atual (Abreu, 2018; Queiroz, 2005). Esse cenário histórico não apenas reduziu drasticamente a densidade populacional, mas também alterou a estrutura etária e genética das populações remanescentes, tornando-as mais vulneráveis a efeitos de depressão endogâmica e à perda de variabilidade genética essencial para a adaptação a mudanças ambientais (Fao, 2014; Vinceti *et al.*, 2013). Portanto, a distribuição contemporânea de *P. ulei* no Médio Solimões não reflete apenas suas preferências ecológicas, mas também carrega a marca profunda de um processo histórico de superexploração, o qual deve ser considerado como um filtro adicional na interpretação de seus padrões espaciais atuais.

A criação da RDSM em 1996 e os acordos comunitários de proteção foram respostas diretas a este esgotamento, mas o estado atual de duas únicas populações remanescentes identificadas na área de estudo permanece desconhecido sob uma perspectiva quantitativa e espacialmente explícita (Marinho, 2008; RDSM, 2014). A resposta a estas questões é um pré-requisito para avaliar a efetividade das últimas três décadas de proteção, diagnosticar a viabilidade da auto recuperação e, sobretudo, gerar o conhecimento de base necessário para o planejamento de qualquer estratégia ativa de manejo adaptativo, enriquecimento ou restauração desta espécie-chave (Chazdon, 2008; Holl; Branchioni, 2020).

Portanto, este capítulo tem como objetivo analisar a distribuição espacial e a estrutura de dependência espacial das populações remanescentes de *P. ulei* no

Médio Solimões, e identificar suas relações com os atributos físico-químicos do solo. Utilizando uma abordagem integrada de geoestatística e análise multivariada, busca-se responder se a população apresenta um padrão espacial claro e modelável; a intensidade e o alcance de sua dependência espacial; se existe uma associação mensurável entre sua ocorrência e gradientes específicos de fertilidade, acidez ou textura do solo. As respostas fornecerão um diagnóstico espacialmente explícito e inédito para a conservação da Macacaúba, transformando a narrativa histórica de declínio em uma base científica para sua futura sustentabilidade na Amazônia.

2 MATERIAL E MÉTODOS APLICADOS

Para as informações referentes à área de pesquisa, à identificação de cada população de Macacaúba e também os atributos do solo, vide o item “2 Metodologia Compartilhada” e seus subitens (2.1, 2.2 e 2.3), deste documento.

2.1. Delimitação e Caracterização das duas populações amostradas

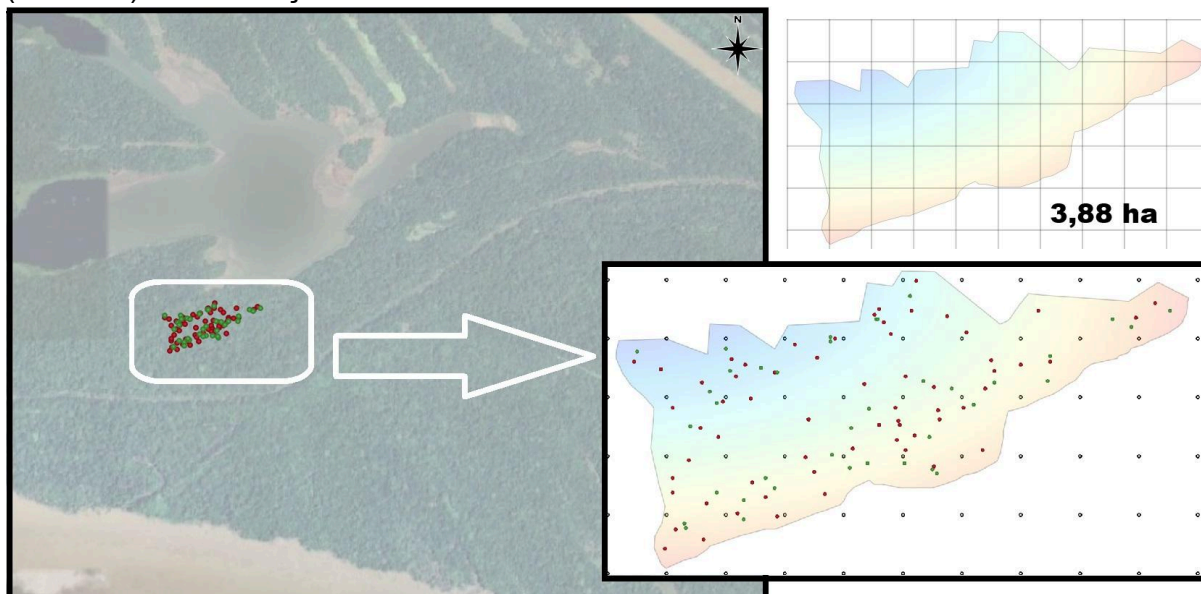
Foram estudadas as duas populações encontradas dentro da reserva e que são delimitáveis de *P. ulei Harms*, refletindo sua raridade atual na paisagem. Esse padrão já foi documentado em estudos recentes sobre a distribuição de espécies madeireiras historicamente exploradas na região (Lentini *et al.*, 2021; PAROLIN *et al.*, 2013; Rosa, 2008). Esta condição de populações isoladas e fragmentadas é consistente com o status de conservação da espécie, classificada como "Em Perigo" (EN) pela International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2022) e como vulnerável em avaliações nacionais (CNCFlora, 2022), evidenciando o grau de redução populacional decorrente da exploração histórica intensiva.

A primeira população, denominada MAC1, foi delimitada em 3.88 hectares, foram demarcados 27 quadrantes e identificados os 37 indivíduos, foram realizadas também 62 coletas de solo (Figura 1).

A segunda população remanescente, denominada MAC2, ocupa uma área de 1.76 hectares. Esta população, de menor extensão, foi subdividida em 16 quadrantes nos quais foram catalogados todos os 22 indivíduos e realizadas 46 coletas de solo (Figura 2). A inclusão da segunda população (adicionado em 2026), embora menor, é crucial para evitar que o diagnóstico da espécie se baseie em uma única ocorrência local, permitindo uma compreensão mais robusta de seus padrões de distribuição e associações ambientais (SUTHERLAND, 2006).

A densidade de indivíduos por quadrante é quantificada para cada uma das 43 unidades amostrais (27 + 16) que compõem o conjunto das duas populações.

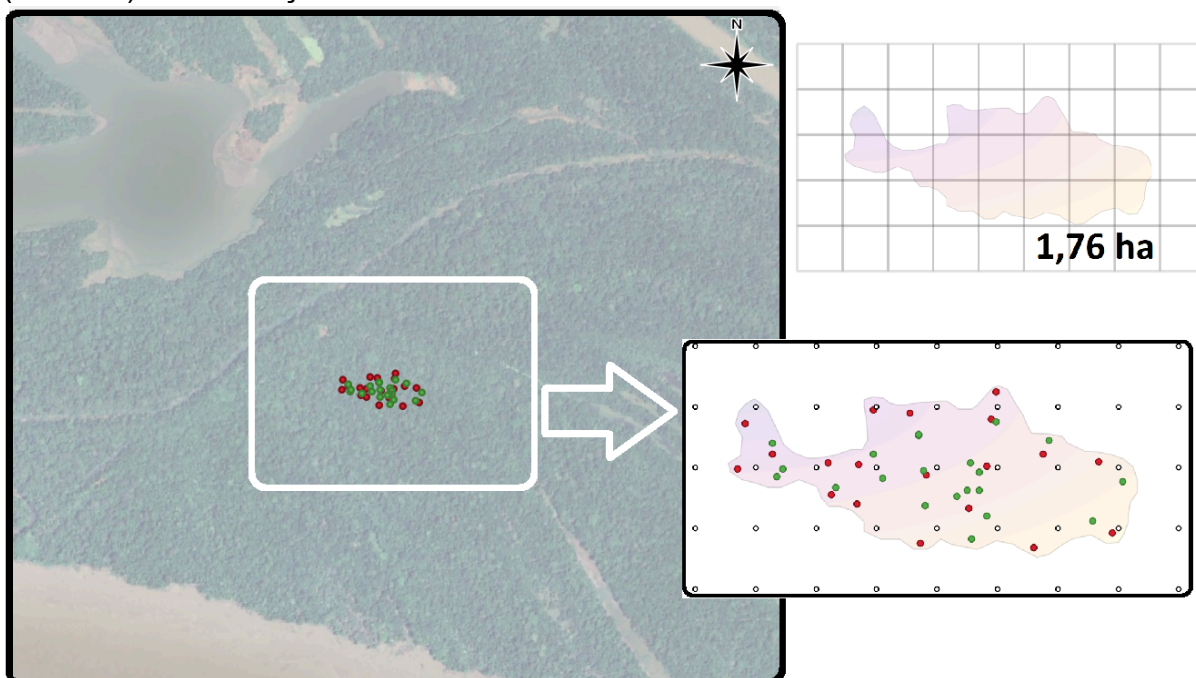
Figura 1 - População 1: delimitação da área (3.88 ha), malha de 27 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 37 indivíduos



Nota: Pontos verdes: Indivíduos; Pontos vermelhos: Coleta de solo.

Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis (2024).

Figura 2 - População 2: delimitação da área (1.76 ha), malha de 16 quadrantes (40x40m) e distribuição dos 22 indivíduos



Nota: Pontos verdes: Indivíduos; Pontos vermelhos: Coleta de solo.
 Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis (2026).

2.3. Aplicação dos Métodos Gerais

Os dados das populações de *P. ulei*, compostos pelas matrizes integradas de densidade de indivíduos e variáveis ambientais descritas na primeira seção, foram submetidos à mesma sequência de métodos geoestatísticos e multivariados estabelecida na abordagem analítica geral (Seção 2.2 e 2.3 da Metodologia Compartilhada).

3 RESULTADOS PARCIAIS

3.1. Análise da População 1

A população 1 de *Platymiscium ulei* apresenta características estruturais e ambientais distintas que refletem sua ecologia e o legado da exploração histórica. Conforme demonstrado na tabela 1, a densidade média da espécie é de 1.41 indivíduos por quadrante. A estrutura populacional caracterizou-se por um coeficiente de assimetria positivo ($C_s = 0.65$) e de um valor discrepante (*outlier*) que indica a formação de agrupamentos locais de até 4 indivíduos/quadrante, em meio a quadrantes vazios.

A área é marcada por uma heterogeneidade topográfica extrema, com altitudes variando de 17.78 m a 83.82 m, e um coeficiente de variação de 20.52. Foram identificados três *outliers* de altitude na área avaliada, confirmando a existência de pontos de relevo atípico, como mogotes ou depressões profundas.

Quimicamente, os solos são ácidos e apresentaram pH médio de 5.14. A soma de bases (SB) de 13.30 cmolc dm⁻³ e Saturação por Bases (V) de 68.11%. Contudo, destaca-se elevada variabilidade no teor de Areia, que variou de 0 a 450 g kg⁻¹ (CV = 88.61), com a presença de três *outliers*, enquanto o teor de Argila variou de 420 a 810 g kg⁻¹. Esta variabilidade textural é fundamental, pois controla diretamente a drenagem, a retenção de nutrientes e a dinâmica hídrica.

Para a população 1 de *P. ulei*, observou-se a presença de múltiplos *outliers* para os micronutrientes (boro, cobre, ferro e zinco), bem como para os atributos capacidade de troca de cátions efetiva (t) e matéria orgânica (MO). Os dados indicam que a população 1 habita um ambiente caracterizado por variabilidade topográfica e textural, além de flutuações na fertilidade química do solo, marcada por manchas de concentração pontual de elementos.

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 1 de Macacaúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2023

MAC1	Min	Max	$\bar{x}$	s^2	S	Cs	CV%	Outlier
Macacaúba	0	4	1.41	0.94	0.97	0.65	68.79	1
NI								
Altitude	17.78	83.82	53.9	122.4	11.06	0.66	20.52	3
m								
pH	4.81	5.45	5.14	0.02	0.14	0.13	2.72	-
água								
K	123	178	152.8	154.6	12.43	-0.06	8.13	-
mg dm ⁻³								
P	7.7	48.2	21.79	1.57	9.10	0.92	41.76	2
mg dm ⁻³								
Ca	6.9	13.23	10.54	1.57	1.25	-0.36	11.86	1
cmolc dm ⁻³								
Mg	1.56	3.15	2.37	0.11	0.33	-0.12	13.92	1
cmolc dm ⁻³								
Al	0.04	0.52	0.21	0.01	0.12	0.46	57.14	-
cmolc dm ⁻³								
S	8.97	63.73	22.09	93.68	9.68	2.14	43.82	2
mg dm ⁻³								
B	0.16	0.36	0.26	0.002	0.04	0.22	15.38	4
mg dm ⁻³								
Cu	2.32	7.47	4.51	1.25	1.12	0.71	24.83	3
mg dm ⁻³								
Fe	105.6	297.5	177.6	1583.96	39.8	0.87	22.41	3
mg dm ⁻³								
Mn	4.85	33.58	16.26	61.67	7.85	0.41	48.28	-
mg dm ⁻³								
Zn	0.31	5.31	1.15	0.69	0.83	2.7	72.17	4
mg dm ⁻³								
H+Al	4.53	7.99	06.03	0.66	0.81	0.06	13.43	-
cmolc dm ⁻³								
m	0.31	4.18	1.60	0.88	0.94	0.53	58.75	-

%								
t								
cmolc dm ⁻³	14.96	22.53	19.34	1.96	1.4	-0.63	7.24	3
SB								
cmolc dm ⁻³	8.81	16.45	13.30	2.22	4.53	-0.20	34.06	-
V								
%	58	77	68.11	20.55	4.53	-0.21	6.65	-
MO								
%	1.38	4.38	2.15	0.43	0.65	1.12	30.23	1
Argila								
g kg ⁻¹	420	810	682.2	6388.53	79.93	-1.53	11.72	3
Areia								
g kg ⁻¹	0	450	108.5	9242.12	96.14	2.11	88.61	3
Silte								
mg dm ⁻³	120	250	211.4	628.57	25.07	-1.78	11.86	3

Nota: min: mínimo; max: máximo; $\bar{x}$: média; s^2 : variância; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria. NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca de cátions efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise variográfica revelou um cenário espacial notavelmente distinto com implicações ecológicas significativas, o resultado de maior destaque é da própria densidade de *P. ulei* (NI) que apresentou Efeito Pepita Puro (EPP), conforme discriminado nas Tabela 02 e na Figura 4 do Apêndice A.

Apesar de alguns atributos edáficos terem apresentado ajuste teórico de semivariograma, nenhuma das variáveis analisadas atendeu aos critérios de validação cruzada. Dessa forma, não foi possível confirmar a estrutura de dependência espacial para Altitude, potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), boro (B), cobre (Cu), capacidade de troca de cátions efetiva (t) e matéria orgânica (MO), inviabilizando a interpolação por Krigagem. Os demais atributos, pH, fósforo (P),

alumínio (Al), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), acidez potencial (H+Al), saturação por alumínio (m), saturação por bases (V), soma de bases (SB) e as frações texturais (argila, areia e silte), manifestaram Efeito Pepita Puro (EPP).

Tabela 2 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 1 de *Platymiscium ulei* Harms

MAC1	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A	RMSE xvalid	R ² xvalid
Altitude	0.61	GAU	200	0	39.22	38.62	25.83	0
m								
K	0.97	EXP	200	95.7	156.6	119.7	13.16	0
mg dm ⁻³								
Ca	0.81	EXP	175	1.17	1.67	164.84	1.29	0
cmolc dm ⁻³								
Mg	0.66	GAU	171	0.08	0.11	97.1	0.33	0
cmolc dm ⁻³								
B	0.86	GAU	160	0.001	0.002	138.46	0.05	0
mg dm ⁻³								
Cu	0.86	ESF	165	0.66	1.2	56.49	1.17	0
mg dm ⁻³								
t	0.95	GAU	175	1.22	1.94	60.39	1.43	0.01
cmolc dm ⁻³								
MO	0.55	ESF	210	0.30	0.55	46.72	0.83	0
%								

Nota: R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima; C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio da Validação Cruzada; R² Val.: Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada; EPP: Efeito Pepita Puro; GAU: Gaussiano; ESF: Esférico; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A Análise Fatorial Exploratória (AFE) aplicada aos atributos do solo da população 1, resultou na extração de um único fator latente (FAT1), conforme apresentado nas Tabelas 04 e 05. Foram previamente excluídas do modelo final, por não atenderem aos pressupostos de normalidade e comunalidade inicial baixa, as variáveis potássio (K 0.23), cálcio (Ca 0.46), magnésio (Mg 0.34), soma de bases (SB 0.48) e capacidade de troca de cátions efetiva (t 0.09).

O modelo final foi constituído pelas variáveis pH, acidez potencial (H+Al) e Saturação por Bases (V), que apresentaram valores de comunalidade final de 0.82, 0.74 e 0.73, respectivamente. A matriz de cargas fatoriais rotacionadas revelou que o FAT1 apresentou cargas fatoriais positivas elevadas para o pH (0.92) e para a Saturação por Bases (V: 0.94), acompanhadas por uma carga fatorial negativa expressiva para a acidez potencial (H+Al: -0.94), refletindo consistência adequada para interpretação.

Tabela 3 - Comunalidades das variáveis edáficas na Análise Fatorial para a população 1 de *Platymiscium ulei* Harms

Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*	Atributo	1ª Extração*	2ª Extração*
pH	0.96	0.82	H+Al	0.56	0.74
K	0.23	-	t	0.09	-
Ca	0.46	-	SB	0.48	-
Mg	0.34	-	V	0.71	0.73

Nota: A 1ª Extração: análise fatorial inicial incluindo todos os atributos observados; 2ª Extração: modelo final; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Tabela 4 - Matriz de cargas fatoriais rotacionadas (método *varimax*) para os atributos edáficos da população 1 de *Platymiscium ulei* Harms

Atributo	FAT1
pH	0.92
H+Al	-0.94
V	0.94

Nota: FAT1 (Fertilidade/Acidez); H+Al: acidez potencial; V: saturação por bases.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise da dependência espacial do Fator 1, responsável por 87% da variância total dos dados edáficos, revelou que é um eixo bipolar de fertilidade/acidez e apresentou Efeito Pepita Puro (EPP). Os parâmetros numéricos indicam a ausência de dependência espacial estruturada ou autocorrelação para este escore fatorial, conforme sintetizado na Tabela 6 e ilustrado na Figura 4 do Apêndice C, este resultado é significativo.

Tabela 5 - Estrutura espacial dos fatores edáficos da população 1 de *Platymiscium ulei* Harms: parâmetros estatísticos, variográficos e interpolador

FAT1	Min	Max	Cs			
	-2.4205	2.0084	-0.02			
	R ² variog	Model	Dist. Max	C ₀	C ₀ +C	A
	-	EPP	-	-	-	-
V, pH, H+Al	RMSE xvalid	R ² xvalid	GD		Interpolador	
	-	-	Independente		IDW	

Nota: Min: mínimo; Max máximo; Cs: coeficiente de assimetria; R² variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima, C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE xvalid: raiz do erro quadrático; R² xvalid: coeficiente de determinação da validação cruzada; GD: grau de dependência espacial; IDW: Interpolação por Distância Inversa Ponderada; EPP: Efeito Pepita Puro; SB: soma de bases; V: saturação por bases; H+Al: acidez potencial.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.2. Análise da População 2

Conforme pode ser observado na tabela 6, a segunda população de *Platymiscium ulei* Harms apresentou características distintivas em relação à primeira, com densidade média de 1.38 indivíduos por quadrante, totalizando 22 indivíduos censitados em uma área de 1.76 ha. A ocorrência variou de 0 a 3 indivíduos por quadrante, configurando pequenos agrupamentos isolados em meio a áreas sem registro, com coeficiente de assimetria positiva ($C_s = 0.83$) e a presença de um valor discrepante (*outlier*) para a variável densidade.

A topografia da área apresenta moderada heterogeneidade, a altitude variou de 41.29 m a 62.04 m, com média de 49.62 m e coeficiente de variação de 9.37%. Quimicamente, os solos são ácidos e apresentaram pH médio de 4.82, o menor valor médio de pH dentre as duas populações. A soma de bases (SB) foi de 8.45 cmolc dm⁻³, a Saturação por Bases (V) foi de 54.67% e a capacidade de troca de cátions efetiva (t) foi de 9.02 cmolc dm⁻³, mostrando uma menor capacidade do solo reter e disponibilizar nutrientes essenciais.

Os atributos edáficos registraram coeficientes de variabilidade (CV) baixa, inferiores a 10.0 para a maioria das variáveis, com destaque para o potássio (K; CV = 6.49%), cálcio (Ca; CV = 7.67%) e matéria orgânica (MO; CV = 4.80%), esses valores contrastam fortemente com a alta heterogeneidade observada na população 1.

Texturalmente, o solo apresentou teor médio de argila de 490.27 g kg⁻¹ (CV = 7.76%) e teor médio de areia de 352.81 g kg⁻¹ (CV = 3.53%).

Tabela 6 - Estatística descritiva das variáveis do solo e da distribuição dos indivíduos da população 2 de Macacaúba no Médio Solimões no estado do Amazonas, no ano de 2026

MAC2	Min	Max	$\bar{x}$	s^2	S	Cs	CV%	Outlier
Macacaúba	0	3	1.38	1.32	1.15	0.32	83.33	-
NI								
Altitude	41.29	62.04	49.62	21.59	4.65	0.23	9.37	-
m								
pH	4.52	5.4	4.82	0.4	0.19	1.5	3.94	1
água								
K	81.78	101.98	90.55	34.52	5.88	0.63	6.49	-
mg dm ⁻³								
P	2.7	11.05	4.84	4.63	2.15	1.59	44.42	1
mg dm ⁻³								
Ca	6.8	7.92	6.52	0.25	0.50	1.51	7.67	1
cmolc dm ⁻³								
Mg	1.55	1.95	1.71	0.01	0.11	0.87	6.43	2
cmolc dm ⁻³								
Al	0	01.03	0.56	0.07	0.27	-0.37	48.21	-
cmolc dm ⁻³								
S	5.74	8.53	07.10	0.70	0.84	0.18	11.83	-
mg dm ⁻³								
B	0.10	0.16	0.13	0.02	0.11	0.42	84.62	-
mg dm ⁻³								
Cu	0.45	0.63	0.52	2	0.04	0.56	7.69	-
mg dm ⁻³								
Fe	102.0	152.2	127.6	142.94	11.96	0.10	9.37	-
mg dm ⁻³								
Mn	6.87	11.44	8.66	02.06	1.44	0.56	16.63	-
mg dm ⁻³								
Zn	0.34	1.16	0.56	0.04	0.19	1.70	33.93	1
mg dm ⁻³								
H+Al	4.63	8.79	6.96	1.44	1.20	-0.11	17.24	-
cmolc dm ⁻³								
m	0	11.11	6.27	8.87	2.98	-0.49	47.53	-
%								

t	8.48	10.10	09.02	0.20	0.45	1.11	4.99	-
cmolc dm ⁻³								
SB	7.94	9.83	8.45	0.28	0.53	1.29	6.27	-
cmolc dm ⁻³								
V	48	65	54.67	25.41	05.04	0.63	9.22	-
%								
MO	2.37	2.87	2.71	0.02	0.13	-0.85	4.80	-
%								
Argila	475	510	490.2	74.42	8.63	0.59	7.76	-
g kg ⁻¹								
Areia	330	381	352.8	154.89	12.45	0.32	3.53	-
g kg ⁻¹								
Silte	138	171	157	61.88	7.87	-0.65	5.01	1
g kg ⁻¹								

Nota: min: mínimo; max: máximo; $\bar{x}$: média; s^2 : variância; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria. NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca de cátions efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A análise variográfica dos dados da segunda população indicou a predominância de Efeito Pepita Puro (EPP) para a maioria dos atributos avaliados, indicando ausência de dependência espacial autocorrelacionada e variabilidade essencialmente aleatória, conforme discriminado na Tabela 7 e na Figura 5 do Apêndice A..

O resultado mais importante é que a própria densidade de *P. ulei* (NI), embora tenha apresentado um modelo Gaussiano ajustado com alto R^2 variog (1.00) e Grau de Dependência classificado como Forte (GD = 0.35), falhou no critério da validação cruzada. O R^2 xvalid foi de apenas 0.20 e o RMSE xvalid de 1.20, valores que demonstram que o modelo não possui capacidade preditiva robusta.

O mesmo raciocínio aplica-se à Altitude, que apresentou modelo Exponencial ajustado (R^2 variog = 0.83) e GD classificado como Moderado (0.61), mas com validação cruzada insatisfatória (R^2 xvalid = 0.17; RMSE xvalid = 3.81 m), indicando baixa capacidade preditiva.

Manifestaram Efeito Pepita Puro (EPP) todos os atributos analisados, incluindo o pH, potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), alumínio (Al), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), acidez potencial efetiva (t), soma de bases (SB), saturação por alumínio (m), saturação por bases (V), matéria orgânica (MO) e as frações texturais (argila, areia e silte).

Tabela 7 - Modelo, parâmetros e grau da dependência espacial do semivariograma ajustado para os atributos do solo e dos indivíduos da população 2 de *Platymiscium ulei* Harms

MAC2	R^2 variog	Model	Dist. Max	C_0	C_0+C	A	RMSE xvalid	R^2 xvalid
Macacaúba	1	GAUS	151.6	0.94	1.44	73.0	1.2	0
NI								
Altitude	0.83	EXP	100	6.46	16.75	90.22	3.81	0.17
m								
H+Al	0.48	ESF	120	0	120	71.62	-	-
cmolc dm ⁻³								

Nota: R^2 variog: coeficiente de determinação do semivariograma; Model: modelo; Dist.Max: Distância máxima; C_0 : Efeito Pepita; C_0+C : Patamar; A: Alcance Prático (m); RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio da Validação Cruzada; R^2 Val.: Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada; EPP: Efeito Pepita Puro; GAU: Gaussiano; ESF: Esférico; NI: Número de indivíduos; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; H+Al: acidez potencial; m: saturação por alumínio; t: capacidade de troca de cátions efetiva; SB: soma de bases; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A avaliação da adequação dos dados edáficos da população 2 à Análise Fatorial Exploratória (AFE) registrou um índice de Kaiser-Meyer-Olkin geral (overall KMO) de 0.17. Em função desse valor situar-se abaixo do limite crítico de 0.50, indicando ausência de correlações e de variância compartilhada suficiente entre os atributos

medidos, a extração de fatores comuns interpretáveis restou inviabilizada. Diante disso, a Análise Fatorial Exploratória não foi aplicada para a população 2, prosseguindo-se a análise do conjunto de dados com base nos parâmetros descritivos e geoestatísticos.

4 DISCUSSÃO

A análise integrada das duas populações de *P. ulei* Harms no Médio Solimões oferece um retrato quantitativo e espacialmente explícito do estado crítico desta espécie após décadas de exploração histórica e subsequente proteção.

Evidencia-se que esses fragmentos sofrem os reflexos tardios do corte seletivo, um diagnóstico que encontra respaldo histórico nos estudos de Ayres *et al.* (2006) e Rosa (2008). Sustenta-se que a inclusão da segunda população no desenho amostral foi determinante para conferir solidez e contraponto às inferências ecológicas e de distribuição espécie-ambiente, evitando vieses interpretativos comuns em análises baseadas em ocorrências estritamente locais, conforme alertado por Brower *et al.* (1998) e Sutherland (2006).

A partir dos dados obtidos, torna-se possível avançar na formulação de explicações ecológicas para o quadro de degradação atual da espécie, caracterizado por densidades marginais, estruturas espaciais surpreendentemente discrepantes e respostas edáficas particulares, elementos considerados urgentes para subsidiar estratégias de manejo e conservação baseadas em evidências (Chazdon, 2008; Gardner *et al.*, 2019)

4.1. Baixa Densidade e Padrões Espaciais Contrastantes: Legado da Exploração e Efeito de Fundo Allee

Verificou-se que ambas as populações de *P. ulei* exibem densidades médias severamente reduzidas, 1.41 indivíduos na primeira população e 1.38 indivíduos na segunda, por 0.16 hectare. Avalia-se que essa homogeneidade na escassez quantitativa é um reflexo direto do estado de raridade imposta à espécie, um fenômeno amplamente documentado por Peres *et al.* (2010) e Lentini *et al.* (2021) para remanescentes florestais submetidos a ciclos crônicos de extração madeireira.

Contudo, a modelagem geoestatística, ao adotar a validação cruzada como filtro restritivo, revelou que essa escassez biológica se organiza de forma antagônica no espaço.

Na população 1, o ajuste da densidade ao Efeito Pepita Puro (EPP) permite afirmar que há uma ausência completa de dependência espacial estruturada. Em termos geoestatísticos, Cambardella *et al.* (1994) e Goovaerts (1997) definem esse comportamento como uma desorganização estocástica dos dados. Sob a perspectiva ecológica, infere-se que essa quebra de continuidade espacial funciona como uma evidência matemática do colapso demográfico do fragmento, onde os indivíduos perderam o contato de vizinhança. Esse isolamento severo, conforme postulam Legendre (1993) e Fortin; Dale (2005), tende a desestruturar processos reprodutivos e ecológicos que dependem diretamente da proximidade física entre coespecíficos. A partir desse padrão, sustenta-se a hipótese de que a exploração madeireira desarticulou a estrutura populacional a ponto de transformá-la em um processo no qual cada indivíduo remanescente ocupa uma coordenada aleatória e independente, sem qualquer relação biológica com a presença de outras árvores próximas, um padrão conceitual discutido nos modelos ecológicos de Lamont *et al.* (1993) e Gascoigne *et al.* (2009).

Embora a densidade média calculada para a população 1 possa sugerir uma falsa impressão de uniformidade, o coeficiente de assimetria positivo ($C_s = 0.65$) e os *outliers* quantitativos encontrados comprovam a premissa de que a espécie resiste em núcleos locais discretos. Conforme garantem Clark, Evans (1954) e Zuur *et al.* (2010), desvios dessa natureza na simetria de dados amostrais constituem assinaturas típicas de distribuições restritas ou agregadas. Interpreta-se que essa agregação pontual reflete os mecanismos intrínsecos de regeneração e dispersão da Macacaúba. Essa visão alinha-se aos modelos dinâmicos de Condit *et al.* (2000) e Harms *et al.* (2001) para o dossel tropical, os quais demonstram que o arranjo de

espécies arbóreas é governado por fatores como a limitação na dispersão de sementes pesadas, recrutamento associado a clareiras estocásticas e exigências ecológicas em microhabitats específicos.

Para a população 2, a análise revelou um comportamento metodológico distinto. O ajuste matemático inicial obtido no semivariograma falhou no teste preditivo da validação cruzada. Apoiando-se nos fundamentos geoestatísticos de Diggle e Ribeiro (2007), Bernardi *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2023), ressalta-se que um modelo só possui validade preditiva real quando exibe baixos desvios quadráticos e alta acurácia preditiva simultâneos. Como o modelo da população 2 não resistiu a essa validação, rejeitou-se o uso da Krigagem e concluiu-se que a agregação sugerida pela estatística descritiva não se sustenta como um padrão espacialmente contínuo ou previsível na paisagem. Essa fragilidade preditiva em dados estruturais sem suporte espacial é corroborada pelas advertências teóricas de Webster e Oliver (2007) e Bivand *et al.* (2021).

Ao integrar os dois cenários, propõe-se que a aleatoriedade estrita da população 1 e a agregação não validada da população 2 constituem faces distintas de um mesmo colapso estrutural. Em ambas as áreas, os indivíduos remanescentes encontram-se isolados. Sugere-se que essa desestruturação evoca a ocorrência de um efeito de fundo Allee (*Allee effect*), conceito ecológico detalhado por Lamont *et al.* (1993), Gascoigne *et al.* (2009) e Peres *et al.* (2010), segundo o qual populações que cruzam um limiar crítico de baixa densidade sofrem a falência de seus processos reprodutivos vitais, como limitação de polinizadores, escassez de fluxo gênico e ausência de facilitação entre plântulas, impedindo a regeneração natural e bloqueando a recuperação autônoma das populações.

4.2. O Solo como Filtro Determinante: Do Eixo Primário de Fertilidade/Acidez à Aleatoriedade Generalizada

As características físicas e químicas observadas nas áreas amostrais refletem a forte influência da dinâmica deposicional das planícies aluviais do Médio Solimões. Conforme apontam Latrubesse *et al.* (2020) e Hauser *et al.* (2022), a heterogeneidade topográfica dessas paisagens delimita os tempos de inundação, separando setores de baixo daqueles de várzea alta. Entende-se que a presença de *outliers* altimétricos sinaliza a existência de microdepressões e pequenas elevações na área. Sob a óptica pedológica e ecológica de Wittmann *et al.* (2004) e Junk *et al.* (2011), essas variações microtopográficas geram condições hidrológicas singulares, controlando diretamente a seleção e a estruturação física das comunidades vegetais associadas.

Os resultados obtidos indicam que os solos de ambas as áreas guardam o caráter ácido e os níveis de fertilidade moderada típicos das várzeas amazônicas (Teixeira *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018). Contudo, observou-se que a organização interna dessas propriedades seguiu caminhos opostos.

Na população 1, detectou-se uma matriz textural em mosaico, marcada por flutuações extremas nos teores de areia e argila. Avalia-se que essa oscilação granulométrica atua como um regulador crítico, pois interfere diretamente na capacidade de drenagem e retenção iônica, afetando as preferências ecológicas e o estabelecimento de plantas vasculares, conforme teorizado por Furquim *et al.* (2021).

Por outro lado, os dados da população 2 revelaram uma paisagem predominantemente argilosa e quimicamente muito mais homogênea, com coeficientes de variação inferiores a 10.0 para a maioria das variáveis, com destaque para potássio, cálcio e matéria orgânica. Propõe-se que essa uniformidade edáfica

indica processos de sedimentação mais regulares e contínuos nesta área específica, atenuando o padrão clássico de manchas que caracteriza as várzeas da região (Latrubesse *et al.*, 2020; Hauser *et al.*, 2022).

A identificação de múltiplos *outliers* edáficos (boro, cobre, ferro, zinco, t, MO, magnésio e silte) reforça a hipótese de que o ambiente aluvial é pontuado por ilhas localizadas de recursos químicos (Hauser *et al.*, 2022). Na primeira população, esses valores extremos distribuem-se ao acaso, enquanto que na segunda eles ocorrem em pontos isolados e distintos. Sustenta-se que a dispersão espacial dessas anomalias valida a ocorrência de variações ambientais legítimas em microescala, afastando erros analíticos de laboratório, em consonância com as diretrizes de validação de dados extremos propostas por Bishop e Lark (2006).

As modelagens multivariadas e geoestatísticas evidenciaram, porém, uma quebra conceitual profunda entre as duas populações. Para a população 1, a Análise Fatorial Exploratória sintetizou os dados com sucesso em um único gradiente estruturado (FAT1), caracterizado como um eixo bipolar de fertilidade e acidez (altas cargas positivas para pH e V contrapondo-se à carga negativa de H+Al). Esse arranjo reflete uma oposição biogeoquímica clássica descrita na literatura de solos (John *et al.*, 2007; Kabata-Pendias, 2011). A eliminação de cátions essenciais (Ca, Mg, K) do modelo devido às baixas comunalidades iniciais indica que, nesta área, a disponibilidade desses nutrientes isolados não caminha em sincronia com o status de acidez do solo, um comportamento assíncrono discutido por Fabrigar e Wegener (2021) em sistemas multivariados complexos.

O ajuste do FAT1 ao Efeito Pepita Puro na população 1 revela que, embora essa associação química exista, sua expressão espacial na paisagem ocorre de forma aleatória e sem autocorrelação, um comportamento estocástico delimitado pelos critérios de Cambardella *et al.* (1994) e Goovaerts (1997). Esse padrão

contrapõe-se à forte estrutura espacial encontrada para a altitude e para o cálcio (alcance de 165 metros), mas se alinha ao Efeito Pepita Puro verificado para o pH, fósforo e acidez na mesma área. Interpreta-se que essa contradição espacial confirma o caráter caótico dos depósitos sedimentares fluviais em microescala, em perfeito acordo com as observações de Furquim *et al.* (2021) e Hauser *et al.* (2022).

Para a população 2, os testes apontaram um cenário radicalmente oposto: a Análise Fatorial Exploratória foi estatisticamente inviabilizada. O índice KMO obtido foi de apenas 0.17, patamar formalmente classificado como inaceitável na literatura estatística por indicar ausência de correlações lineares e escassa variância compartilhada (Kaiser, 1974; HAIR *et al.*, 2019; Kassambara, 2021). Conclui-se que os atributos edáficos na segunda população variam de forma totalmente autônoma e descoordenada.

Conforme indicam Costello e Osborne (2019) e Fabrigar e Wegener (2021), matrizes com esse perfil carecem de sustentação estatística para técnicas de redução de dimensionalidade. Avalia-se que esse resultado constitui um achado central do presente estudo: ele demonstra que a heterogeneidade da população 2 é intrinsecamente diferente daquela mapeada na população 1, onde isolou-se gradientes estruturados (Furquim *et al.*, 2021; Hauser *et al.*, 2022).

A análise variográfica da segunda população confirmou essa desorganização estrutural generalizada ao indicar Efeito Pepita Puro para todas as variáveis edáficas. Embora a altitude e a acidez potencial tenham esboçado ajustes experimentais, a altitude falharam na validação cruzada.

Sob a óptica da ecologia de comunidades, propõe-se que esses cenários abióticos impõem filtros rigorosos à persistência de *P. ulei*. Na população 1,

identificou-se uma condição de dupla aleatoriedade: tanto a densidade da espécie quanto o seu gradiente regulador (FAT1) são regidos pelo Efeito Pepita Puro.

A interpretação indica que a espécie se distribui ao acaso porque o seu próprio fator limitante comporta-se como um mosaico imprevisível no espaço, um cenário que mimetiza um "campo minado" abiótico, conforme os conceitos de fragmentação espacial debatidos por Wiens (1989) e Fortin e Dale (2005). Nesse contexto, as árvores remanescentes sobrevivem confinadas a manchas edáficas específicas de melhor status químico que ocorrem na várzea (Harms *et al.*, 2001; Hauser *et al.*, 2022).

Na população 2, a impossibilidade da AFE e a dominância do Efeito Pepita Puro no solo indicam a existência de uma matriz fragmentada, na qual cada ponto amostral exibe uma combinação isolada e não repetitiva de atributos, padrão que se ajusta às teorias de heterogeneidade local de Wiens (1989) e Keddy (1992).

Sugere-se que a desestruturação das correlações químicas pode ser um reflexo de pulsos de inundação e deposições sedimentares severamente irregulares e episódicos (Latrubesse *et al.*, 2020), ou decorrer da escala espacial reduzida da área, que suprime a expressão de gradientes de larga escala. Diante da falha nos pressupostos multivariados, a discussão para a população 2 apoia-se estritamente nos parâmetros descritivos e univariados, conduta metodológica referendada por McGarigal *et al.* (2000).

Adicionalmente aos resultados do KMO e da validação cruzada, é fundamental considerar que a população 2 de *Platymiscium ulei* é composta por uma amostragem restrita de apenas 22 indivíduos, tamanho amostral substancialmente inferior ao mínimo recomendado na literatura geoestatística para a estruturação e modelagem confiável de semivariogramas (geralmente $N > 100$). Essa densidade

amostral reduzida limita severamente o número de pares de pontos formados por classe de distância lag, gerando instabilidade na variância espacial e elevando o erro amostral, o que justifica diretamente o predomínio do Efeito Pepita Puro (EPP) e o fraco desempenho das métricas de predição na validação cruzada para esta população.

Diante da inviabilidade da interpolação geoestatística contínua por Krigagem e da AFE, sugere-se adotar abordagens analíticas focadas em amostragem por ponto e por área (parcelas ou quadrantes) para trabalhos futuros. A abordagem por ponto permite avaliar a microvariabilidade edáfica pontual por meio da correlação direta entre o número de indivíduos e os atributos do solo no local exato de amostragem, enquanto a abordagem por área/zona possibilita agrupar os indivíduos em subáreas ou microtopografias distintas e comparar as médias dos atributos edáficos via estatística não paramétrica (como Kruskal-Wallis) ou Análise de Agrupamento (*Cluster*), permitindo identificar gradientes ambientais locais sem depender da continuidade espacial contínua do terreno.

Em suma, o diagnóstico final indica que ambas as populações sofrem fortes pressões de isolamento biótico inseridas em ambientes edáficos espacialmente imprevisíveis. Sustenta-se que a persistência histórica de *P. ulei* no Médio Solimões está indissociavelmente vinculada à atuação conjunta de filtros ambientais locais e legados de perturbação antrópica (Harms *et al.*, 2001; Chazdon, 2008).

4.3. Implicações para Conservação: Da Proteção Passiva ao Manejo Ativo Diferenciado

O estado demográfico e geoestatístico constatado para as populações de *P. ulei* sinaliza a necessidade de uma mudança de paradigma nas estratégias de conservação aplicadas à espécie. Avalia-se que a simples proteção passiva por

meio da vedação legal do corte, em vigor desde meados da década de 1990, mostra-se insuficiente para reverter o declínio populacional crônico.

Essa limitação da proteção passiva diante de quadros de fragmentação extrema e possíveis manifestações do efeito Allee encontra sustentação teórica nas discussões de Chazdon (2008), Gascoigne *et al.* (2009) e Gardner *et al.* (2019), os quais alertam para o isolamento reprodutivo de remanescentes florestais. Os dados obtidos no presente diagnóstico direcionam, portanto, para a obrigatoriedade de intervenções ativas de manejo fundadas em mapeamentos espaciais explícitos, em consonância com as abordagens de conservação de habitats propostas por Lindenmayer *et al.* (2010) e Holl e Brancalion (2020).

Para a população 1, na qual o presente estudo identificou um gradiente abiótico bem delineado (eixo bipolar de fertilidade/acidez - FAT1), propõe-se uma estratégia de enriquecimento florestal direcionado. Sugere-se que o plantio de novas mudas de *P. ulei* seja executado de forma restrita às manchas edáficas mapeadas via interpolador IDW como polos de alta saturação por bases e menor acidez, otimizando o aproveitamento de refúgios químicos, técnica de manejo espacial que se apoia nos conceitos cartográficos de Fortin e Dale (2005). Adicionalmente, postula-se que, para projetos de reintrodução em unidades de conservação regionais, a prática de calagem pontual pode funcionar como um mecanismo indutor para expandir as áreas de habitat propício. Esse manejo químico localizado para a criação de núcleos de dispersão natural alinha-se aos princípios universais de restauração ecológica discutidos por Holl (2017).

Para a população 2, o diagnóstico delineado impõe desafios metodológicos e práticos superiores. Sob as condições de desorganização ambiental, defende-se que as ações conservacionistas priorizem a proteção absoluta e o monitoramento individualizado das matrizes remanescentes, associados à colheita imediata de germoplasma para a estruturação de bancos genéticos *ex situ*. Essa abordagem

justifica-se pelo fato de a regeneração natural *in situ* aparentar um quadro de severo comprometimento reprodutivo, pressuposto que encontra eco nas diretrizes globais para recursos genéticos florestais da FAO (2014) e de Vinceti *et al.* (2013).

Adicionalmente, projeta-se o rastreamento da dinâmica regenerativa nos raios de vizinhança dos agrupamentos atuais por meio de protocolos de manejo adaptativo, permitindo ajustes progressivos conforme as respostas biológicas da espécie no tempo, de acordo com as metodologias de Lindenmayer *et al.* (2010) e Holl (2017).

Por fim, os resultados dão suporte à recomendação de buscas ativas por novas subpopulações de *P. ulei* no ecossistema do Médio Solimões. Sugere-se a utilização dos critérios espaciais estabelecidos para o FAT1 da área da população 1 como matriz de ponderação cartográfica para otimizar e direcionar as expedições de campo em ecossistemas de várzea. A localização de novos genótipos remanescentes é considerada essencial para expandir a variabilidade genética da espécie na bacia amazônica e mitigar os riscos de depressão por endogamia, conforme as metas internacionais de salvaguarda de espécies ameaçadas estipuladas pela FAO (2014) e pela IUCN (2022).

4.4. Síntese Ecológica: Duas Populações, Um Mesmo Alerta

Em conclusão, os dados demonstram que as populações de *P. ulei* persistem como conjuntos de indivíduos remanescentes espacialmente desconectados. Avalia-se que a ocorrência de ambas está ancorada em condições edáficas específicas, embora de natureza marcadamente distinta entre as duas áreas estudadas. Na população 1, a distribuição restringe-se ao gradiente de fertilidade e acidez sintetizado pelo fator FAT1, o qual se manifesta de forma aleatória no espaço. Por outro lado, na população 2, a impossibilidade de identificar qualquer gradiente

ambiental estruturado ($KMO = 0.17$) indica um ambiente edáfico com variações descoordenadas, cenário no qual a sobrevivência e o estabelecimento da espécie tendem a ser governados por processos ainda mais estocásticos e imprevisíveis.

Este diagnóstico, estruturado por meio da integração entre as análises espaciais e multivariadas, expande o entendimento para além da simples constatação da raridade biológica. Identificam-se os mecanismos ambientais prováveis da restrição de ocorrência, fornecendo-se um embasamento científico para subsidiar a reversão da trajetória de declínio desta espécie na região, cuja relevância histórica e ecológica é discutida por Ayres *et al.* (2006) e Chazdon (2008).

A abordagem comparativa entre as duas populações revela que a conservação de *P. ulei* não comporta uma estratégia única ou homogeneizada. Conclui-se que as intervenções de manejo devem ser contextualizadas e adaptadas às condições específicas de cada núcleo remanescente, respeitando-se o histórico particular de perturbação antrópica e a realidade edáfica contemporânea de cada fragmento, conforme os pressupostos de manejo adaptativo defendidos por Lindenmayer *et al.* (2010) e Gardner *et al.* (2019).

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A análise integrada das duas populações remanescentes de *Platymiscium ulei* no Médio Solimões, permite concluir que a espécie persiste em um estado ecológico crítico, marcado por restrições demográficas e por uma desestruturação espacial evidente, embora com particularidades distintas entre as duas áreas amostradas.

Ambas as populações apresentam densidade média muito baixa, confirmando o quadro de raridade decorrente do histórico de exploração seletiva na região. No entanto, os padrões de distribuição espacial, quando submetidos ao crivo da validação cruzada, revelaram-se distintos e igualmente alarmantes. Para a primeira população, a densidade da espécie exibiu Efeito Pepita Puro (EPP), indicando ausência de dependência espacial autocorrelacionada e uma distribuição essencialmente aleatória. Para a segunda população, embora um modelo Gaussiano tenha sido ajustado ao semivariograma experimental com coeficiente de determinação nominal igual a 1.00 e Grau de Dependência Espacial classificado como Forte (0.35), o desempenho insatisfatório na etapa de validação cruzada ($R^2_{\text{xvalid}} = 0.20$) inviabilizou o uso da Krigagem, demonstrando que a agregação sugerida pela estatística descritiva não se traduz em um padrão espacial contínuo ou preditivo. Em ambas as populações, portanto, a estrutura espacial necessária para a formação de núcleos regenerativos funcionais encontra-se severamente comprometida.

A avaliação das relações espécie-ambiente revelou contrastes marcantes na organização abiótica dos fragmentos. Para a MAC1, a Análise Fatorial Exploratória identificou um único eixo ambiental dominante, o gradiente bipolar de fertilidade e acidez (FAT1), composto pelas variáveis pH, Saturação por Bases (V) e acidez potencial (H+Al), como o sintetizador da covariância entre os atributos edáficos.

Contudo, este escore fatorial também apresentou Efeito Pepita Puro, indicando que o gradiente de fertilidade e acidez se manifesta de forma espacialmente aleatória na paisagem. Essa condição de dupla aleatoriedade, tanto da densidade da espécie quanto de seu principal fator edáfico regulador, configura um cenário no qual a persistência de *P. ulei* na área da população 1 está confinada a manchas estocásticas e raras de solo que atendem simultaneamente a critérios de baixa acidez e elevada saturação por bases.

Para a população 2, a Análise Fatorial Exploratória mostrou-se estatisticamente inviabilizada. O valor do índice de Kaiser-Meyer-Olkin geral igual a 0.17, classificado formalmente como inaceitável, demonstra que as correlações entre os atributos edáficos são incipientes e a variância compartilhada é insuficiente para justificar a extração de fatores comuns. Esse resultado indica que, na população 2, os atributos do solo variam de forma independente e descoordenada, sem formar associações consistentes, sugerindo um ambiente edáfico com flutuações desorganizadas, no qual a sobrevivência e o estabelecimento da espécie tendem a ocorrer de forma predominantemente ao acaso.

A análise geoestatística dos atributos ambientais reforçou o diagnóstico de fragilidade estrutural em ambas as áreas. Na população 1, a maioria das variáveis edáficas apresentou Efeito Pepita Puro, e as propriedades que exibiram modelos experimentais ajustados não resistiram ao crivo da validação cruzada, registrando coeficientes de determinação preditivos nulos ou muito baixos. Como nenhuma variável, em ambas as populações, atendeu concomitantemente aos critérios de semivariograma experimental consistente e validação cruzada preditiva satisfatória, conclui-se que o emprego da Krigagem Ordinária é inviável, adotando-se o método de Interpolação por Distância Inversa Ponderada (IDW) para o mapeamento espacial de todas as propriedades edáficas e da densidade das populações.

Por fim, as evidências indicam que a estratégia de proteção passiva baseada apenas na vedação legal do corte é insuficiente para reverter a trajetória de declínio de *P. ulei*. A recuperação da espécie nestes fragmentos depende da superação de um duplo obstáculo: uma densidade crítica reduzida, capaz de inibir processos vitais de regeneração natural por meio do efeito Allee, e uma disponibilidade de habitat adequado que se manifesta de forma rara e espacialmente imprevisível na paisagem aluvial. O diagnóstico quantitativo obtido fornece as bases científicas para a transição em direção a um modelo de manejo ativo e diferenciado, focado no enriquecimento seletivo das manchas edáficas ótimas identificadas pelo fator FAT1 na população 1, na proteção rigorosa e monitoramento dos indivíduos remanescentes com salvaguarda de germoplasma na população 2, e na busca ativa por novas populações na região para fins de conservação genética e manejo adaptativo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. L. **Predição do tamanho de clareira em área de várzea sob regime de manejo florestal**: estudo de caso na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. 2018. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6797>. Acesso em: 10 ago. 2026.
- AYRES, J. M. *et al.* Os mamíferos da Reserva de Mamirauá. *In*: QUEIROZ, H. L.; MARMONTEL, M. (ed.). **Estudos de Mamirauá**. Tefé: Sociedade Civil Mamirauá, 2006. v. 2, p. 45-68. Disponível em: <https://mamiraua.org.br/>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- BARTLETT, M. S. A note on the multiplying factors for various χ^2 approximations. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 16, n. 2, p. 296-298, 1954. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1954.tb00174.x. Disponível em: <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2517-6161.1954.tb00174.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.
- BARROS, A. C.; UHL, C. A evolução da exploração madeireira na Amazônia Oriental. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Ciências Naturais, Belém, v. 1, n. 1, p. 103-127, 1995. Disponível em: https://boletimcn.museu-goeldi.br/bcnaturais/pt_BR. Acesso em: 10 ago. 2026.
- BISHOP, T. F. A.; LARK, R. M. **The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale**. *Geoderma*, v. 134, n. 1-2, p. 193-206, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706106001145>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- BIVAND, R. S.; PEBESMA, E. J.; GÓMEZ-RUBIO, V. **Applied spatial data analysis with R**. 2. ed. New York: Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-1-4614-7618-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51997702_Applied_Spatial_Data_Analysis_With_R. Acesso em: 10 ago. 2026.
- BROWER, J. E.; ZAR, J. H.; VON ENDE, C. N. **Field and laboratory methods for general ecology**. 4. ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1998. Disponível em: <https://fcen.uncuyo.edu.ar/upload/broweretal19871a-c.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CARDOSO, D. *et al.* Revisiting the phylogeny of papilionoid legumes: new insights from comprehensively sampled early-branching lineages. **American Journal of Botany**, v. 99, n. 12, p. 1991-2013, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/233879619_Revisiting_the_phylogeny_of_papilionoid_legumes_New_insights_from_comprehensively_sampled_early-branching_lineages. Acesso em: 18 ago. 2026

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. 1039 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 10 ago. 2026.

CHAZDON, R. L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1458-1460, 2008. DOI: 10.1126/science.1155365. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1155365>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CLARK, P. J.; EVANS, F. C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. **Ecology**, v. 35, n. 4, p. 445-453, 1954. DOI: 10.2307/1931034. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1931034>. Acesso em: 20 ago. 2026

CENTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA FLORA. **Platymiscium ulei na Lista Vermelha da Flora Brasileira versão 2022**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://cncflora.jbrj.gov.br/>. Acesso em: 10 ago. 2026.

CONDIT, R. *et al.* Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, v. 288, n. 5470, p. 1414-1418, 2000. DOI: 10.1126/science.288.5470.1414. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.288.5470.1414>. Acesso em: 20 ago. 2026.

COSTA, E. V. *et al.* Secondary metabolites from *Platymiscium floribundum* and their chemotaxonomic significance. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 89, p. 104002, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262647923_New_Flavonoids_and_Coumarins_from_Platymiscium_floribundum_Vogel. Acesso em: 18 ago. 2026

COSTELLO, A. B.; OSBORNE, J. W. Best practices in exploratory factor analysis: four recommendations for getting the most from your analysis. **Practical Assessment, Research & Evaluation**, v. 10, n. 7, p. 1-9, 2005. Disponível em: <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/1650/galley/1601/view/>. Acesso em: 10 ago. 2026.

DALLING, J. W. *et al.* Seed dispersal, seedling establishment and gap partitioning among tropical pioneer trees. **Journal of Ecology**, v. 86, n. 4, p. 674-689, 1998. DOI: 10.1046/j.1365-2745.1998.00298.x. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2745.1998.00298.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

DORMANN, C. F. *et al.* Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. **Ecography**, v. 30, n. 5, p. 609-628, 2007. DOI: 10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x>. Acesso em: 20 ago. 2026

ERDMANN, A. A. **Fatores que influenciam a dinâmica florestal após exploração de madeira na Amazônia brasileira**. 2019. 194 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-02092019-095634/pt-br.html>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FABRIGAR, L. R.; WEGENER, D. T. **Exploratory factor analysis**. New York: Oxford University Press, 2012. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Exploratory_Factor_Analysis.html?id=DSppAgAAQBAJ. Acesso em: 18 ago. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The state of the world's forest genetic resources**. Rome: FAO, 2014. 235 p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i3825e/i3825e.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2026.

FONSECA, C. R. *et al.* Ecologia e manejo de espécies madeireiras da várzea amazônica. In: JUNK, W. J. *et al.* (org.). **Manejo sustentável das várzeas amazônicas: 50 anos de cooperação técnica e científica**. Manaus: Editora INPA, 2020. p. 115-138. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

FORTIN, M. J.; DALE, M. R. T. **Spatial analysis: a guide for ecologists**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: [10.1017/CBO9780511542039](https://doi.org/10.1017/CBO9780511542039) . Disponível em:

<https://www.cambridge.org/core/books/spatial-analysis/7E24BBFA121C16F08AC8E9F7AC3BA6A0>. Acesso em: 17 ago. 2026.

FREITAS, M. G. *et al.* Resprouting as a persistence strategy of tropical dry forest trees. **Forest Ecology and Management**, v. 433, p. 413-424, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811271831818X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

FURQUIM, S. A. C. *et al.* Pedogenesis in a Pleistocene fluvial system of the Northern Pantanal – Brazil. **Geoderma**, v. 255-256, p. 58-69, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611500143X>. Acesso em: 17 ago. 2026.

GARDNER, T. A. *et al.* The spatial distribution of threats to species in Australia. **Biological Conservation**, v. 232, p. 110-122, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320719300640>. Acesso em: 18 ago. 2026.

GASCOIGNE, J. *et al.* Allee effects in ecology and conservation. Oxford: Oxford University Press, 2009. 256 p. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Allee_Effects_in_Ecology_and_Conservatio.html?id=IS4TDAAQBAJ. Acesso em: 18 ago. 2026.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. Disponível em: <https://global.oup.com/academic/product/geostatistics-for-natural-resources-evaluation-9780195115383>. Acesso em: 18 ago. 2026.

GRIBEL, R.; GIBBS, P. E. High outbreeding as a consequence of selfed ovule mortality and single vector bat pollination in the Amazonian tree *Pseudobombax munguba* (Bombacaceae). **International Journal of Plant Sciences**, v. 163, n. 6, p. 703-715, 2002. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/342631>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HAIR, J. F. *et al.* **Multivariate data analysis**. 8. ed. Andover: Cengage Learning EMEA, 2019. Disponível em: <https://au.cengage.com/c/multivariate-data-analysis-8e-hair-babin-anderson-black/9781473756540/>. Acesso em: 17 ago. 2026.

HARMS, K. E.; CONDIT, R.; HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B. Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. **Journal of Ecology**, v. 89, n. 6, p. 947-959, 2001. DOI: 10.1046/j.0022-0477.2001.00615.x. Disponível em:

<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.0022-0477.2001.00615.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

HAUSER, M. W. *et al.* Geomorphology influences soil and tree structure in Amazonian floodplain ecosystems. **Geomorphology**, v. 414, p. 108396, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108396>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X22002896>. Acesso em: 17 ago. 2026.

HOLL, K. D.; BRANCALION, P. H. S. Restoration of tropical forest ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 51, p. 541-566, 2020. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-ecolsys-011720-111400>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HOLL, K. D. **Primer of ecological restoration**. 2. ed. Oxford: Wiley, 2020. 224 p. Disponível em: <https://islandpress.org/books/primer-ecological-restoration>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HOMMA, A. K. O. Madeira na Amazônia: extração, manejo ou reflorestamento? **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 7, n. 13, p. 147-161, 2011. Disponível em: <https://www.basa.com.br/revista/index.php/amazoniacienciadesenvolvimento/article/view/180>. Acesso em: 10 ago. 2026.

IMAFLOA. **Amazônia, o gigante florestal brasileiro**: desafios e oportunidades para o uso e a conservação das florestas naturais de produção. Piracicaba: Imaflora, 2024. 24 p. (Série Timberflow, 1). Disponível em: <https://www.imaflora.org/publicacoes>. Acesso em: 18 ago. 2026.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Platymiscium ulei**. The IUCN Red List of Threatened Species: version 2022-2. Gland: IUCN, 2022. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org/species/32978/191807357>. Acesso em: 10 ago. 2026.

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. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0604666104>. Acesso em: 18 ago. 2026.

JUNK, W. J. *et al.* A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0190-7.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13157-011-0190-7>. Acesso em: 20 ago. 2026.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 55-90. DOI: 10.1201/b10158. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b10158/trace-elements-soils-plants-alina-kabata-pendias>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KAISER, H. F. An index of factorial simplicity. **Psychometrika**, v. 39, n. 1, p. 31-36, 1974. DOI: 10.1007/BF02291575.

KEDDY, P. A. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 2, p. 157-164, 1992. DOI: 10.2307/3235676. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/3235676>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KLITGAARD, B. B.; LAVIN, M. Tribe Dalbergieae. In: LEWIS, G. P. *et al.* (eds.). **Legumes of the world**. Kew: Royal Botanic Gardens, 2005. p. 307-335 [1.13, 1.21]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270404644_Legumes_of_the_World. Acesso em: 18 ago. 2026.

LAMONT, B. B. *et al.* The spatial scale of genetic differentiation in the Honey possum, *Tarsipes rostratus*: an analysis of population structure from DNA fingerprinting. **Molecular Ecology**, v. 2, n. 5, p. 299-304, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.1993.tb00021.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-294X.1993.tb00021.x>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LATRUBESSE, E. M. *et al.* Geomorphology of the Amazon basin and its rivers: a review. In: SHRODER, J. F. (ed.). **Treatise on Geomorphology**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2022. v. 8, p. 228-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00096-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128182345000967>. Acesso em: 17 ago. 2026.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/numerical-ecology/legendre/978-0-444-53868-0>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? **Ecology**, v. 74, n. 6, p. 1659-1673, 1993. DOI: 10.2307/1939924.

LINDENMAYER, D. B. *et al.* Adaptive management in conservation: learning by doing. In: SODHI, N. S.; EHRLICH, P. R. (eds.). **Conservation Biology for All**. Oxford: Oxford University Press, 2010. p. 260-275. Disponível em: https://conbio.org/images/content_publications/ConservationBiologyforAll.pdf. Acesso em: 18 ago. 2026.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2009. v. 1, p. 230. Disponível em: <https://www.plantarum.com.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LEGUME PHYLOGENY WORKING GROUP. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. **Taxon**, v. 66, n. 1, p. 44-77, 2017. Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/items/1cf4d48b-b844-45b7-8515-bdd0c4ae3fdc>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S. A.; STAFFORD, S. G. **Multivariate statistics for wildlife and ecology research**. New York: Springer, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-1288-1>. Acesso em: 18 ago. 2026

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 418 p. (Publicação IPT, 1791). Disponível em: <https://www.ipt.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

MARINHO, T. A. S. **Distribuição e estrutura da população de quatro espécies madeireiras em uma floresta sazonalmente alagável na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Amazônia Central**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Botânica) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2008. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/4096>. . Acesso em: 18 ago. 2026.

OLIVEIRA, P. E.; GIBBS, P. E. Reproductive biology of woody plants in a cerrado community of Central Brazil. **Flora**, v. 195, n. 4, p. 311-327, 2000. DOI: 10.1016/S0367-2530(17)30985-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0367253017309850>. Acesso em: 20 ago. 2026.

PAROLIN, P. *et al.* A falta de dados e a urgência da conservação das áreas úmidas (várzeas) da Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 139-146, 2013. OI: 10.1590/S0044-59672013000200001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/yz549YY8ZgHY6JpDSmZ9ypp/> . Acesso em: 10 ago. 2026.

POORTER, L. Light-dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species. **Functional Ecology**, v. 15, n. 1, p. 113-123, 2001. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2001.00488.x. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2435.2001.00488.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 24 jul. 2025.

QUEIROZ, H. L. (org.). **Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá: gestão e pesquisa**. Tefé: Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, 2005. Disponível em: <https://www.mamiraua.org.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for the environmental sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 2008. Disponível em: <https://www.gammadesign.com>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ROSA, M. F. **Análise histórica do uso dos recursos madeireiros na várzea do Médio Solimões, Amazônia Central**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3638>. Acesso em: 18 ago. 2026.

RUIZ-BENITO, J. *et al.* Dispersal syndromes and climate drive topsoil organic carbon stocks across Iberian forests. **Journal of Ecology**, v. 109, n. 5, p. 2184-2199, 2021. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2745.13631>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SABOGAL, C. *et al.* **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira: restrições e oportunidades: relatório síntese**. Belém, PA: CIFOR, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/376134>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SARTORI, A. L. B.; TOZZI, A. M. G. A. Revisão taxonômica de *Platymiscium* (Leguminosae: Dalbergieae). **Rodriguésia**, v. 68, n. 4, p. 1235-1248, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1590/2175-7860201566209>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rod/a/VpG7C3NfRshmRzmd663c8zb/>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SCHÖNGART, J. Growth-oriented logging (GOL): a new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian floodplains. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 1, p. 29-42, 2008. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811270800769X>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SCHÖNGART, J. *et al.* The impact of climate change on the hydrology of the Central Amazon floodplains. **Frontiers in Water**, v. 3, p. 725774, 2021. Disponível em:
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frwa.2021.725774/full>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SILVA, F. R. *et al.* Antioxidant and antimicrobial activities of extracts from *Platymiscium* species (Fabaceae). **Natural Product Research**, v. 32, n. 22, p. 2724-2728, 2018. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786419.2017.1378210>. Acesso em: 18 ago. 2026.

SLOCUM, T. A. *et al.* **Thematic cartography and geovisualization**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003150527. Disponível em:
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003150527/thematic-cartography-geovisualization-terry-slocum-robert-mcmaster-fritz-kessler-hu-huaiyu-wang>. Acesso em: 20 ago. 2026.

SUTHERLAND, W. J. **Ecological census techniques**: a handbook. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. Disponível em:
<https://www.cambridge.org/core/books/ecological-census-techniques/1FEE9847ADC E3DFDC4E091DC7D57B36E>. Acesso em: 18 ago. 2026.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 27 abr. 2025.

TER BRAAK, C. J. F.; SMILAUER, P. **Canoco reference manual and user's guide**: software for ordination (version 5.0). Ithaca: Microcomputer Power, 2012. 496 p. Disponível em: <https://www.canoco5.com>. Acesso em: 18 ago. 2026.

REDE SIMEX. **A evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 a 2020 e as oportunidades para seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década**. Belém, PA: Imazon, 2022. Disponível em:

<https://imazon.org.br/livros/a-evolucao-do-setor-madeireiro-na-amazonia-entre-1980-a-2020-e-as-oportunidades-para-seu-desenvolvimento-inclusivo-e-sustentavel-na-proxima-decada>. Acesso em: 18 ago. 2026.

VAN DER PIJL, L. **Principles of dispersal in higher plants**. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 215 p. Disponível em:

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-87925-8>. Acesso em: 18 ago. 2026.

VINCETI, B. *et al.* The use of DNA marker-based pedigree information in the conservation of small populations: a case study. **PLoS ONE**, v. 8, n. 9, p. e74761, 2013. Disponível em:

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0074761>. Acesso em: 18 ago. 2026.

WADSWORTH, F. H. **Forest production for Tropical America**. Washington, DC: USDA Forest Service, 1997. Disponível em:

<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/21808>. Acesso em: 18 ago. 2026.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed.

Chichester: John Wiley & Sons, 2007. DOI: 10.1002/9780470517277. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470517277>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WIENS, J. A. Spatial scaling in ecology. **Functional Ecology**, v. 3, n. 4, p. 385-397, 1989. DOI: 10.2307/2389612. Disponível em:

<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/2389612>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WITTMANN, F.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 196, n. 1, p. 199-212, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.02.060. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112704001948>. Acesso em: 20 ago. 2026.

WITTMANN, F. *et al.* **Manual dos peixes da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá**. Tefé: Sociedade Civil Mamirauá, 2010. Disponível em:

<https://www.mamiraua.org.br>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; ELPHICK, C. S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 1, n. 1, p. 3-14, 2010. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CAPÍTULO III

ANÁLISE COMPARATIVA E SÍNTESE INTEGRADA DA DISTRIBUIÇÃO DE *Calophyllum brasiliense* Cambess. E *Platymiscium ulei* Harms.: UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA E GEOESTATÍSTICA

RESUMO

Este capítulo sintetiza e compara os padrões de distribuição espacial e as relações espécie-ambiente de *Calophyllum brasiliense* (três populações) e *Platymiscium ulei* (duas populações) no Médio Solimões, articulando-os ao contexto histórico comum de exploração madeireira. Aplicou-se uma abordagem integrada de geoestatística e análise multivariada para contrastar os parâmetros de dependência espacial e os fatores edáficos associados à ocorrência de cada espécie. Os resultados revelam trajetórias pós-perturbação radicalmente distintas. *C. brasiliense* mantém, em todas as suas populações, um padrão de distribuição agregado e espacialmente estruturado, com dependência moderada e alcances entre 274 e 288 metros, o que indica resiliência espacial e capacidade de recuperação autônoma a partir de núcleos regenerativos. Em contraste, *P. ulei* apresenta, em ambas as suas populações remanescentes, distribuição espacial independente caracterizada por Efeito Pepita Puro, assinatura geoestatística de colapso populacional severo. Na população 1, a espécie demonstra dependência crítica e restrita ao gradiente bipolar de fertilidade/acidez, que também se manifesta de forma aleatória no espaço. Na população 2, o ambiente edáfico revela-se tão caótico que a Análise Fatorial sequer é possível ($KMO = 0.17$), inviabilizando a identificação de gradientes ambientais estruturados. Conclui-se que a mesma perturbação histórica gera respostas ecológicas distintas conforme a vulnerabilidade de cada espécie. Enquanto a proteção passiva pode ser suficiente para a Jacareúba, a Macacaúba exige intervenções ativas e diferenciadas de manejo e restauração.

Palavras-chave: Respostas assimétricas; Trajetórias pós-perturbação; Vulnerabilidade taxonômica; Manejo diferencial; Legado antropogênico.

ABSTRACT

This chapter synthesizes and compares the spatial distribution patterns and species-environment relationships of *Calophyllum brasiliense* (three populations) and *Platymiscium ulei* (two populations) in the Middle Solimões River, linking them to the common historical context of logging. An integrated approach of geostatistics and multivariate analysis was applied to contrast the parameters of spatial dependence and the edaphic factors associated with the occurrence of each species. The results reveal radically different post-disturbance trajectories. *C. brasiliense* maintains, in all its populations, an aggregated and spatially structured distribution pattern, with moderate dependence and ranges between 274 and 288 meters, indicating spatial resilience and the capacity for autonomous recovery from regenerative nuclei. In contrast, *P. ulei* presents, in both of its remaining populations, an independent spatial distribution characterized by the Pure Nugget Effect, a geostatistical signature of severe population collapse. In the 1 population, the species demonstrates a critical and restricted dependence on the bipolar fertility/acidity gradient, which also manifests itself randomly in space. In the 2 population, the edaphic environment is so chaotic that Factor Analysis is not even possible ($KMO = 0.17$), making it impossible to identify structured environmental gradients. It is concluded that the same historical disturbance generates distinct ecological responses according to the vulnerability of each species. While passive protection may be sufficient for the Jacaréúba, the Macacaúba requires active and differentiated management and restoration interventions.

Keywords: Asymmetric responses; Post-disturbance trajectories; Taxonomic vulnerability; Differential management; Anthropogenic legacy

1 INTRODUÇÃO

Os Capítulos 1 e 2 desta tese forneceram diagnósticos espacialmente explícitos sobre o estado atual das populações remanescentes de *Calophyllum brasiliense* Cambess. e *Platymiscium ulei* Harms no Médio Solimões. Através da aplicação de geoestatística e análise multivariada, foi possível decifrar os padrões de distribuição, a estrutura da dependência espacial e as relações espécie-ambiente que caracterizam cada táxon em seus respectivos habitats (Fortin; Dale, 2005; Goovaerts, 1997). Contudo, o potencial explicativo completo da ecologia espacial só se realiza na síntese comparativa, onde padrões divergentes e convergentes revelam os processos subjacentes que estruturam comunidades e paisagens (Legendre; Legendre, 2012; Mcgarigal *et al.*, 2000). A mera descrição isolada, embora necessária, é insuficiente para desvendar as interações complexas entre história, ambiente e biologia que moldam a distribuição atual de espécies exploradas (Chazdon, 2008; Lindenmayer *et al.*, 2010).

Este capítulo tem, portanto, um objetivo sintético e integrador: contrastar e conciliar os achados sobre as duas espécies à luz da dupla perspectiva que fundamenta esta tese, a histórica e a geoestatística. Parte-se da premissa de que a distribuição atual não constitui um instantâneo ecológico, mas sim um resultado legível da sobreposição de camadas de influência, nas quais se combinam a ecologia intrínseca de cada espécie, a heterogeneidade ambiental inerente às várzeas e o impacto duradouro da exploração madeireira histórica (Barros; Uhl, 1995; Peres *et al.*, 2010; ROSA, 2008). A geoestatística, ao quantificar a organização e a aleatoriedade espacial, fornece a métrica objetiva para esta leitura integrada do passado no presente (Dormann *et al.*, 2007; Monteiro; Bhering, 2019).

A síntese comparativa é orientada pela investigação de questões centrais que articulam padrões espaciais, nichos edáficos e histórico de perturbação. Busca-se avaliar em que medida os padrões de agregação e os alcances espaciais diferem

entre as espécies, e o que essas diferenças revelam sobre suas estratégias ecológicas ou resiliência pós-perturbação (Condit *et al.*, 2000; Harms *et al.*, 2001). Além disso, objetiva-se comparar seus nichos edáficos, considerando que *C. brasiliense* respondeu a múltiplos fatores ambientais, enquanto a ocorrência de *P. ulei* na população 1 foi dominada por um eixo único de fertilidade/acidez e a população 2 sequer permitiu a aplicação da Análise Fatorial (John *et al.*, 2007; Keddy, 1992). De forma crucial, pretende-se elucidar como um histórico comum de exploração seletiva intensiva (Ayres, 2006; Homma, 2011) imprimiu assinaturas espaciais distintas nas trajetórias de recuperação de cada espécie. Por fim, examina-se se a aleatoriedade espacial completa (Efeito Pepita Puro) observada em *P. ulei* representa um estágio de colapso populacional mais avançado do que a agregação estruturada ainda presente em *C. brasiliense* (Gascoigne *et al.*, 2009; Isbell *et al.*, 2017).

Este capítulo articula uma análise comparativa tripartite. Inicialmente, contrasta os padrões de distribuição e os parâmetros variográficos, explorando as implicações ecológicas das diferentes estruturas espaciais. Em seguida, compara os drivers ambientais identificados, investigando como a heterogeneidade edáfica atua como um filtro seletivo diferencial para cada espécie (Ter Braak; Smilauer, 2012). Por fim, e de forma inovadora, entrelaça essas linhas de evidência analítica com o fio condutor da história do uso do território, propondo uma síntese histórico-ecológica que interprete os cenários atuais não como fatos isolados, mas como estágios distintos em trajetórias de recuperação pós-perturbação, moldadas por vulnerabilidades ecológicas específicas (Chazdon, 2014; Martins *et al.*, 2021).

Este exercício de síntese transcende a mera descrição comparativa. Ele busca demonstrar que a integração entre a análise espacial quantitativa e a contextualização histórica constitui uma ferramenta poderosa para transformar dados ecológicos em narrativa interpretativa robusta (Laurance *et al.*, 2011). Em

última instância, visa gerar subsídios diferenciados e contextualizados para o manejo adaptativo e a conservação efetiva destas duas espécies-chave, cuja persistência é vital para a integridade ecológica e a herança socioeconômica das florestas de várzea amazônica (Gardner *et al.*, 2019; Parolin *et al.*, 2013).

2 METODOLOGIA DE SÍNTESE

A síntese comparativa e integrada proposta neste capítulo foi conduzida a partir da articulação estruturada dos resultados dos Capítulos 1 e 2, utilizando-se de uma abordagem analítica que combina análise espacial explícita, comparação estatística e interpretação ecológica contextualizada.

Essa estrutura metodológica, desenvolvida para guiar o cruzamento de dados nesta etapa da pesquisa, fundamenta-se nos princípios consolidados de integração de dados ecológicos propostos por Brooks *et al.* (2020), bem como no arcabouço conceitual estabelecido por Low-Décarie *et al.* (2014), cujas diretrizes validam a união de múltiplos eixos analíticos na ecologia espacial, permitindo o direcionamento do estudo por meio de três eixos principais de abordagem.

2.1. Análise Comparativa de Padrões Espaciais e Estrutura Geoestatística

A comparação dos padrões de distribuição e da dependência espacial entre *C. brasiliense* (JAC1, JAC2 e JAC3) e *P. ulei* (MAC1 e MAC2) foi realizada mediante a confrontação sistemática dos parâmetros geoestatísticos obtidos na modelagem por semivariograma. Esse delineamento analítico baseou-se na metodologia estabelecida para análise comparativa de estruturas espaciais consagrada por Webster e Oliver (2007) e discutida por Monteiro e Bhering (2019), permitindo contrastar o grau e a classificação da dependência espacial (forte, moderada, fraca ou efeito pepita puro) para a densidade de indivíduos de cada espécie com base no critério de Cambardella *et al.* (1994).

Adicionalmente, mensuraram-se os alcances práticos dos modelos ajustados para indicar a escala espacial característica da autocorrelação, verificando-se a presença ou ausência de Efeito Pepita Puro como indicador de aleatoriedade espacial, fundamentando-se no arcabouço de Goovaerts (1997). Por fim, essa abordagem quantitativa viabilizou a categorização e o contraste entre os tipos de

padrão espacial (agregado estruturado contra aleatório) e suas respectivas escalas, consolidando a base objetiva necessária para a elaboração de inferências ecológicas comparativas no presente estudo.

2.2. Análise Comparativa dos Drivers Ambientais e Relações Solo-Espécie

A comparação dos fatores condicionantes da ocorrência das espécies baseou-se na interpretação conjunta e contrastiva dos resultados das análises fatoriais e das correlações espaciais identificadas em cada etapa da pesquisa. Essa estruturação metodológica adotou abordagens integrativas voltadas para a ecologia de comunidades desenvolvidas por Ter Braak e Smilauer (2012) e Hair *et al.* (2019), permitindo comparar o número, a natureza e a variância explicada dos fatores edáficos extraídos para cada população, além da composição variável de cada fator e do grau de dependência espacial em confronto com a estrutura da respectiva espécie.

Para a visualização e a análise dessas relações no espaço, procedeu-se à sobreposição sistemática de indivíduos e mapas temáticos no ambiente do Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS, valendo-se novamente dos pressupostos integrativos de Ter Braak e Smilauer (2012) e Hair *et al.* (2019). Os indivíduos de cada espécie foram sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave, como pH, saturação por bases e textura, viabilizando uma avaliação visual direta da coincidência espacial e identificando áreas de convergência ou divergência ecológica.

A seleção dos atributos edáficos para comparação na população 1 da Jacareúba fundamentou-se na estrutura multidimensional identificada pela Análise Fatorial Exploratória (AFE), conforme os critérios de modelagem de Hair *et al.* (2019). Para testar a hipótese de associação entre a ocorrência agregada da espécie e os gradientes modelados, selecionaram-se o pH e a soma de bases (SB)

para representar o Fator 1 (fertilidade/acidez); a fração de argila para o Fator 2 (textura); e o escore do Fator 3, composto por cobre, zinco e manganês.

Por sua vez, a modelagem fatorial da segunda população de Jacareúba indicou um único fator ambiental dominante (FAT1), caracterizado por uma carga fatorial proeminente para o boro, pautando-se nos pressupostos de seleção de Kaiser (1960) e Fabrigar e Wegener (2021).

Na população 3, a estratégia analítica priorizou o pH, visto que a análise variográfica demonstrou ser esse o único atributo edáfico com dependência espacial modelável sob o arcabouço geoestatístico de Goovaerts (1997) e Webster e Oliver (2007). Paralelamente, incluíram-se o potássio e a matéria orgânica, que exibiram alta variabilidade pontual e presença de outliers na análise descritiva, com o intuito de testar se a ocorrência da espécie responderia a essas discontinuidades de recursos, além do boro em representação ao Fator 2.

Em relação à população 1 de *P. ulei*, a seleção dos atributos edáficos para a análise comparativa derivou diretamente do resultado unidimensional obtido na Análise Fatorial, a qual extraiu um único fator latente responsável pela maior parte da covariância edáfica, em conformidade com as diretrizes de Hair *et al.* (2019) e Costello e Osborne (2019). Esse fator foi definido como um eixo bipolar de fertilidade/acidez, apresentando cargas fatoriais elevadas e opostas para pH e Saturação por Bases (positivas) em relação à acidez potencial (negativa).

Por fim, para a população 2 de *P. ulei*, a Análise Fatorial Exploratória não se mostrou passível de aplicação. A avaliação da adequação amostral indicou uma medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) geral de 0.17, sendo essa estrutura classificada como inadequada segundo os critérios consagrados de Kaiser (1974) e reiterados por Hair *et al.* (2019) e Kassambara (2021). Esse valor evidenciou que as correlações entre os atributos edáficos eram demasiadamente fracas e que a variância compartilhada era insuficiente para justificar a extração de fatores comuns,

alinhando-se às limitações apontadas por Costello e Osborne (2019) e Fabrigar e Wegener (2021). Desse modo, a análise espécie-ambiente para a população 2 de Macacaúba conduziu-se estritamente por meio de estatísticas descritivas, parâmetros geoestatísticos, uma vez que os atributos exibiram Efeito Pepita Puro ou modelos não validados, e pela inspeção visual das sobreposições no QGIS via interpolação por Ponderação do Inverso da Distância (IDW). Essa impossibilidade analítica configurou-se como um achado ecológico relevante, sugerindo um ambiente edáfico desestruturado, onde os atributos do solo variam de forma independente e sem associações consistentes passíveis de captura por métodos multivariados.

2.3. Síntese Histórico-Ecológica Integrada

A etapa final e interpretativa consistiu na articulação dos padrões espaciais e ambientais comparados com o contexto histórico comum de exploração. Essa síntese construiu-se por meio de um raciocínio interpretativo no qual os padrões geoestatísticos contemporâneos, divididos entre agregação estruturada e aleatoriedade, foram adotados como indicadores do estado de recuperação ou colapso populacional pós-exploração, pautando-se nas teorias sobre dinâmica de populações perturbadas discutidas por Chazdon (2014) e Gascoigne *et al.* (2009).

Sob essa mesma vertente analítica, interpretaram-se as associações espécie-ambiente específicas como manifestações das exigências ecológicas e nichos diferenciados de cada táxon, incorporando os princípios da ecologia de nichos de Keddy (1992), ao mesmo tempo em que tais exigências e estados de recuperação foram contextualizados dentro da narrativa histórica documentada sobre a intensidade e a seletividade da exploração madeireira regional descrita por Ayres (2006) e Rosa (2008).

A partir da triangulação entre o padrão espacial estabelecido via geoestatística, o filtro ambiental mapeado pela análise multivariada e a pressão

histórica do contexto, emergiu uma narrativa integrada voltada a explicar a distribuição atual e as causas determinantes das distintas trajetórias espaciais pós-perturbação, seguindo a abordagem de ecologia histórica proposta por Balée (2006) e Laurance *et al.* (2011).

Por fim, essa síntese estruturou o fundamento para as conclusões gerais e para as recomendações de manejo que encerram a tese, alinhando-se diretamente aos princípios do manejo adaptativo baseado em evidências preconizados por Lindenmayer *et al.* (2010).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO INTEGRADA

A análise integrada dos dados de *C. brasiliense* e *P. ulei* à luz da abordagem geoestatística e do contexto histórico permite a construção de uma narrativa ecológica comparativa que transcende a mera descrição de padrões isolados. Essa articulação analítica evidencia como a integração de dados espaciais e temporais se faz essencial para a compreensão de trajetórias pós-perturbação, alinhando-se aos pressupostos teóricos defendidos por Lindenmayer *et al.* (2010) e Chazdon (2014).

Ademais, a fusão dos resultados com a sua respectiva interpretação demonstra como histórias de perturbação semelhantes são capazes de gerar cenários espaciais contemporâneos radicalmente diferentes, processo este que se manifesta mediado pelas especificidades ecológicas de cada espécie em conformidade com os princípios fundamentais da ecologia de espécies exploradas estabelecidos por Gascoigne *et al.* (2009) e Peres *et al.* (2010).

3.1 Comparação dos Padrões de Distribuição Espacial

A primeira e mais impactante divergência entre as espécies reside na própria organização espacial das populações remanescentes.

Para *C. brasiliense*, os resultados foram consistentes em suas três populações. A espécie apresenta, sem exceção, um padrão de distribuição espacial agregado e estruturado, com dependência espacial moderada e alcances práticos entre 274 e 288 metros, confirmados pela validação cruzada. Este padrão indica a persistência de processos ecológicos auto organizativos, como dispersão limitada, regeneração clonal ou facilitação, que mantêm uma "memória espacial" e permitem a formação de núcleos regenerativos, mesmo em densidades reduzidas (Condit *et al.*, 2000; Harms *et al.*, 2001). A agregação estruturada da Jacareúba sinaliza resiliência espacial e a manutenção de uma organização que pode favorecer a recuperação populacional in situ.

Para *P. ulei*, o quadro é radicalmente distinto e preocupante. Ambas as populações remanescentes apresentaram distribuição espacial independente, caracterizada por Efeito Pepita Puro (EPP), conforme os critérios estabelecidos por Cambardella *et al.* (1994) e Goovaerts (1997). Isto significa que, diferentemente da Jacareúba, a Macacaúba não exibe qualquer dependência espacial autocorrelacionada em suas populações atuais.

Este padrão de aleatoriedade espacial generalizada constitui uma forte evidência geoestatística de um colapso populacional mais severo. A distribuição dos indivíduos remanescentes não forma agrupamentos previsíveis ou conectados espacialmente; ao contrário, assemelha-se a um processo de *Poisson*, no qual cada indivíduo sobrevivente ocupa uma localização independente, sem influência dos demais (Lamont *et al.*, 1993; Legendre, 1993).

Esta configuração sugere que a exploração seletiva intensiva reduziu as populações de *P. ulei* a um nível tão baixo que os processos ecológicos dependentes da densidade, como polinização cruzada eficiente, dispersão de sementes e facilitação para recrutamento, foram severamente comprometidos,

caracterizando um provável efeito de fundo Allee (*Allee effect*) (Gascoigne *et al.*, 2009; Peres *et al.*, 2010).

Em síntese, a comparação dos padrões de distribuição espacial revela um contraste marcante: enquanto *C. brasiliense* mantém uma organização agregada e estruturada (resiliência espacial), *P. ulei* apresenta, em ambas as suas populações, uma distribuição independente e aleatória (colapso espacial). Esta diferença não é trivial, ela constitui um diagnóstico geoestatístico claro de distintos estados populacionais pós-exploração, com profundas implicações para as estratégias de conservação e manejo de cada espécie.

3.2 Comparação dos Drivers Ambientais

Paralelamente à divergência nos padrões espaciais, as espécies revelam relações fundamentalmente distintas com o ambiente edáfico. *C. brasiliense* demonstra uma notável plasticidade ecológica e capacidade de resposta contextual, sendo essa uma característica associada na literatura a espécies generalistas ou com ampla tolerância em ambientes heterogêneos, conforme discutido por Keddy (1992) e John *et al.* (2007). A ocorrência da referida espécie associou-se a diferentes complexos ambientais em cada população, manifestando fatores múltiplos (fertilidade, textura e micronutrientes) na população 1, um gradiente específico de boro na população 2 e, hierarquicamente, o pH do solo na população 3. Essa versatilidade sugere a existência de uma estratégia de "oportunismo condicionado", na qual o táxon se mostra capaz de se estabelecer aproveitando diferentes nichos disponíveis no mosaico heterogêneo da várzea.

Platymiscium ulei, em contrapartida, apresentou uma dependência crítica e restrita a um único eixo ambiental primordial, correspondente ao gradiente bipolar de fertilidade/acidez (FAT1), o qual opõe solos férteis (alto pH e saturação por bases) a solos ácidos (alta acidez potencial). Esse comportamento configura uma associação típica de espécies especialistas com exigências nutricionais específicas,

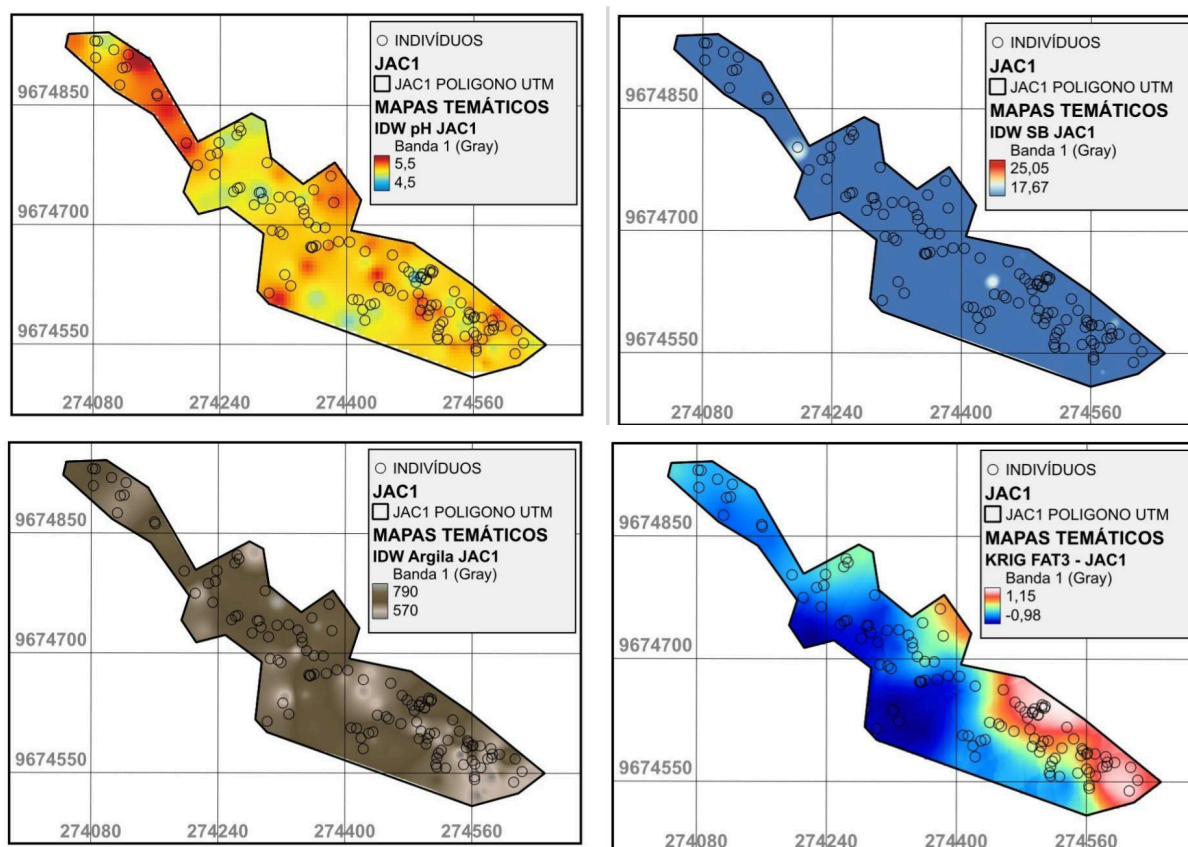
fundamentada nos cenários descritos por Ter Braak e Šmilauer (2012) e Kabata-Pendias (2011).

A persistência de *P. ulei* parece estreitamente vinculada a manchas de solo que atendam simultaneamente a esses critérios, uma condição que se mostrou distribuída de forma aleatória por meio do Efeito Pepita Puro (EPP) do FAT1. Essa exigência ecológica mais estreita atua como um filtro ambiental rigoroso e estocástico, explicando em grande parte sua ocorrência pontual e rara, em consonância com o padrão observado por Harms *et al.* (2001) para espécies sensíveis a gradientes químicos específicos em paisagens fragmentadas.

Na população 1 de *C. brasiliense*, os indivíduos distribuem-se de forma agregada, formando núcleos localizados que não coincidem espacialmente com os gradientes contínuos de pH, soma de bases e o Fator 3, composto por cobre, zinco e manganês. A ocorrência de agregação em espécies arbóreas tropicais frequentemente reflete a influência de fatores históricos ou biológicos, a exemplo da dispersão limitada ou do legado de perturbação explicitados por Condit *et al.* (2000), sobrepondo-se à resposta direta a gradientes ambientais contínuos.

Adicionalmente, a análise geoestatística prévia indicou Efeito Pepita Puro para a esmagadora maioria dos atributos do solo nessa população, o que sugere uma variabilidade edáfica ocorrendo em microescala e de forma não estruturada, nos moldes teóricos descritos por Cambardella *et al.* (1994). Dessa forma, a distribuição espacial mapeada corrobora a hipótese de que a ocorrência da espécie nessa área está mais associada a condições pontuais e aleatórias do solo ou a fatores não mensurados, como o histórico de exploração, do que a gradientes ambientais espacialmente explícitos em larga escala.

Figura 1 - Indivíduos da população 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess., sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave



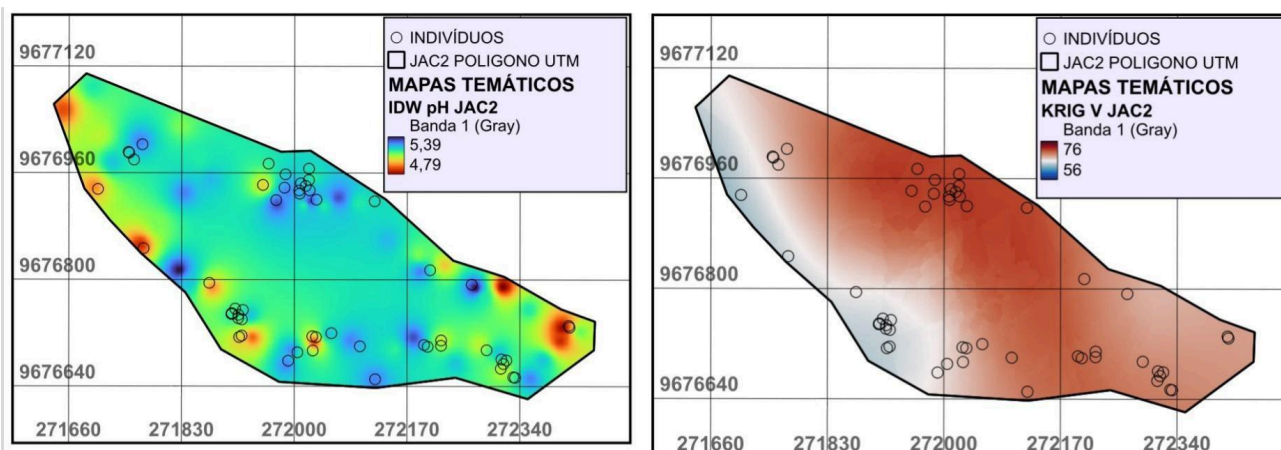
Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis, 2024.

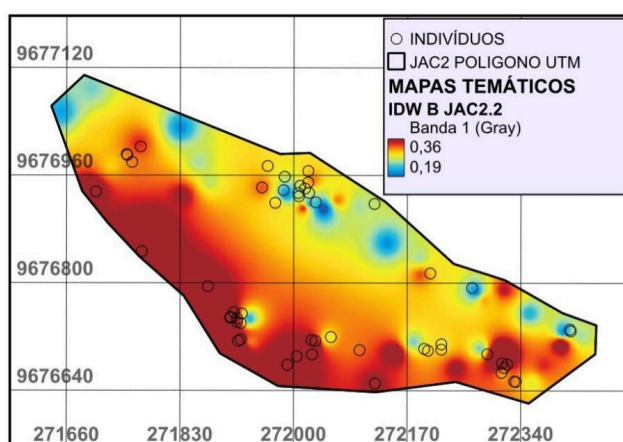
Na população 2 de *C. brasiliense*, observou-se o papel central do boro (B) como fator discriminatório, conforme demonstrado na modelagem cartográfica. Os indivíduos agrupam-se prioritariamente em setores caracterizados por manchas de maior teor de boro, em comparação com os demais segmentos da área. Esse padrão confirma que a agregação da espécie nessa região está especificamente associada a porções do solo com maior disponibilidade desse micronutriente, destacando sua relevância como um potencial fator limitante ou indicador de condições edáficas favoráveis em solos sob influência arenosa.

Ainda na população 2, os agrupamentos do táxon apresentam correspondência espacial com o gradiente interpolado de Saturação por Bases (V), o qual exibiu dependência espacial moderada e alcance dimensional similar ao mapeado para a densidade da espécie, na ordem de aproximadamente 274 metros. Essa sobreposição sugere que a fertilidade do solo, representada pela saturação por cátions básicos, pode atuar como um filtro ambiental em macroescala, atuando como condicionante para a ocorrência dos agrupamentos nos moldes teóricos previstos por Keddy (1992).

Essa relação evidencia que os núcleos de maior densidade da espécie se localizam preferencialmente em áreas com valores intermediários a altos de V. Esse comportamento alinha-se ao conceito de nicho edáfico, no qual espécies arbóreas distribuídas de forma agregada frequentemente respondem a gradientes de recursos do solo que estruturam a paisagem em escalas compatíveis com seus processos ecológicos, em conformidade com as evidências apontadas por John *et al.* (2007).

Figura 2 - Indivíduos da população 2 de *Calophyllum brasiliense* Cambess., sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave





Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis, 2024.

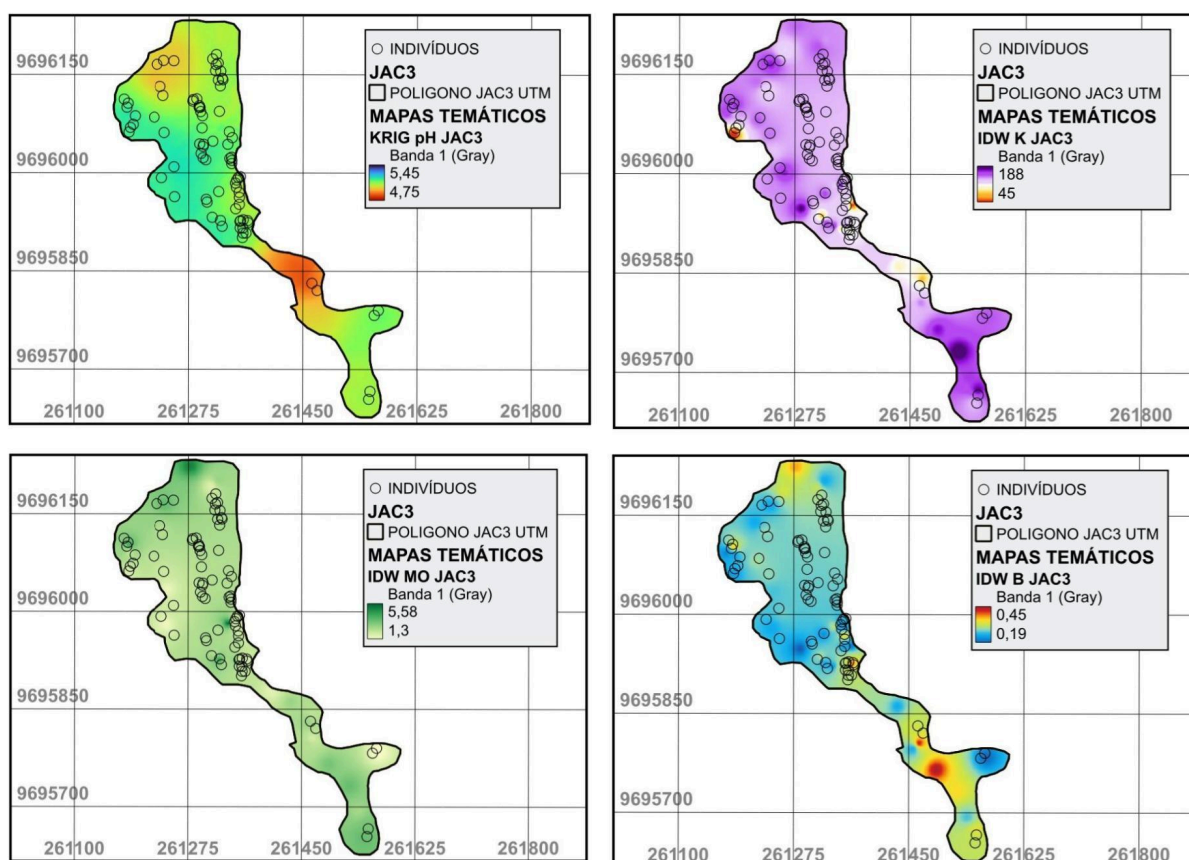
Para a população 3, a análise integrada revela uma forte associação espacial entre os agrupamentos de *C. brasiliense* e o gradiente de pH do solo, o qual consistiu no único atributo edáfico com dependência espacial clara, modelado por uma estrutura esférica com alcance prático de 129 metros nessa área.

Conforme evidenciado na modelagem cartográfica, os indivíduos concentram-se em setores caracterizados por pH intermediário, evitando os extremos de acidez. Esse resultado sustenta a premissa de que, em ambientes altamente heterogêneos e com variabilidade aleatória predominante por Efeito Pepita Puro (EPP) generalizado, as espécies podem utilizar um gradiente ambiental principal e contínuo, como o pH, como um eixo organizador para sua distribuição, enquanto fatores locais aleatórios modulam a densidade dentro das faixas favoráveis, em consonância com o modelo teórico de Wiens (1989).

A relevância desse parâmetro é corroborada pela literatura, sendo a acidez do solo amplamente reconhecida como um dos principais filtros abióticos para o estabelecimento de plantas em ecossistemas tropicais, conforme preconizado por Ter Braak e Šmilauer (2012).

Observa-se, complementarmente, uma correspondência espacial com as menores quantidades de boro (B) disponíveis no ambiente. Em contrapartida, para os teores de matéria orgânica (MO) e potássio (K), a distribuição espacial da espécie na área amostral não manifestou coincidência com os respectivos gradientes interpolados.

Figura 3 - Indivíduos da população 3 de *Calophyllum brasiliense* Cambess., sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave



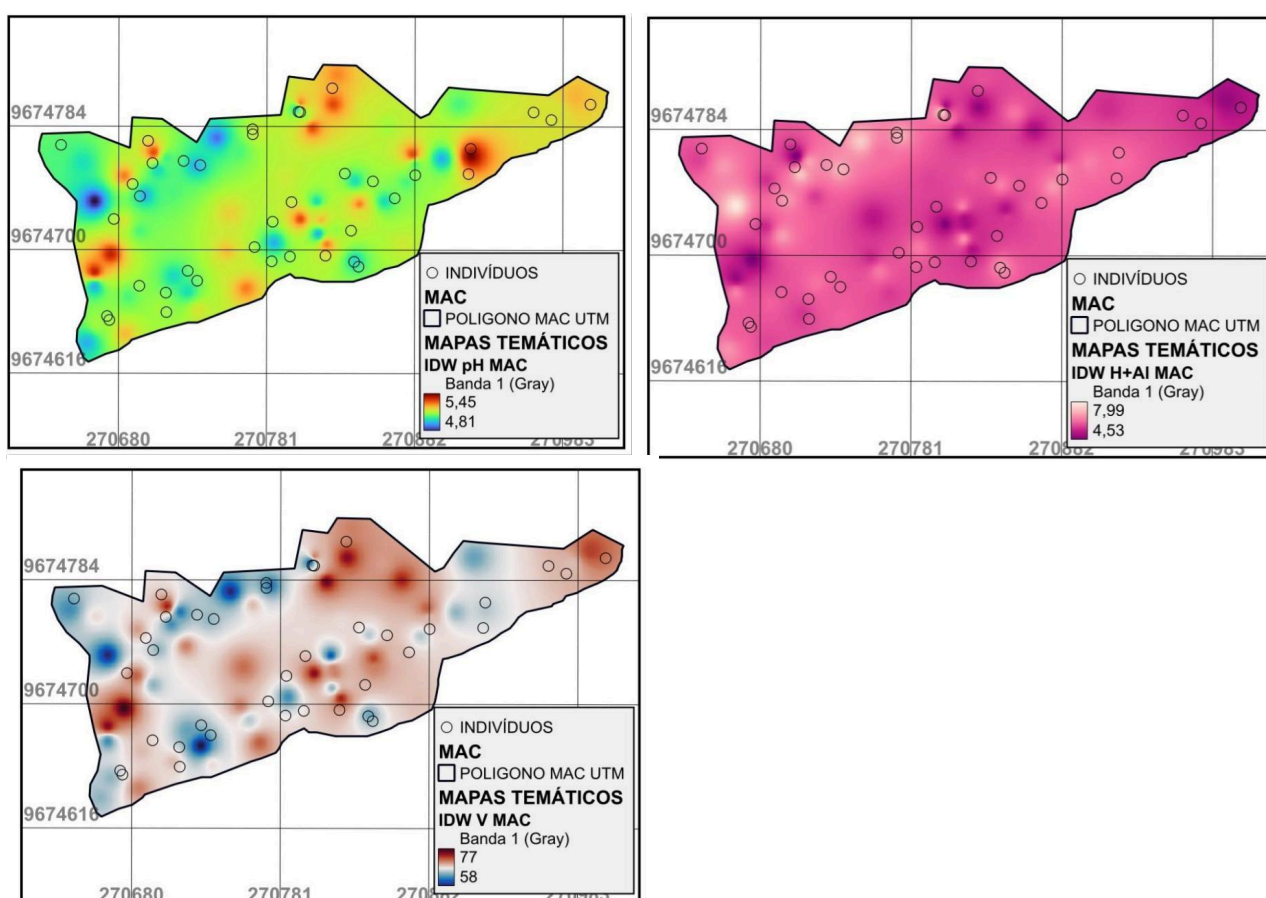
Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis, 2024.

Na população 1 de *P. ulei*, a distribuição dos indivíduos caracteriza-se por uma dispersão esparsa e menos estruturada em relação aos mapas de fatores edáficos interpolados. Essa configuração espacial condiz com os resultados

geoestatísticos anteriores, os quais indicaram baixa densidade, aleatoriedade espacial predominante e fraca correlação com os fatores edáficos modelados.

Tal padrão sugere que a ocorrência remanescente dessa espécie pode ser mais fortemente influenciada pelo legado histórico de exploração intensiva e por limitações no recrutamento, associadas ao efeito Allee, do que por gradientes contemporâneos de solo em escala local, hipótese que encontra respaldo no panorama de degradação discutido por Lentini *et al.* (2021).

Figura 4 - Indivíduos da população 1 de *Platymiscium ulei* Harms, sobrepostos aos mapas dos principais fatores edáficos e de variáveis ambientais-chave



Fonte: Elaborado pela autora, Adaptado do Qgis, 2024.

Para a população 2 de *P. ulei*, a Análise Fatorial Exploratória (AFE) não se mostrou passível de aplicação. O valor obtido para a medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) geral foi de 0.17, patamar formalmente classificado como inadequado segundo os critérios de Kaiser (1974) e Hair *et al.* (2019). Esse índice demonstrou que as correlações entre os atributos edáficos são extremamente fracas e que a variância compartilhada entre as variáveis é insuficiente para justificar a extração de fatores comuns interpretáveis, alinhando-se às limitações conceituais apontadas por Costello e Osborne (2019) e Fabrigar e Wegener (2021).

Esse resultado indica que, na população 2, os atributos do solo variam de forma independente e descoordenada, sem a formação de associações consistentes.

A inviabilidade da AFE para essa população revela que a heterogeneidade edáfica é de natureza fundamentalmente distinta daquela observada na população 1 de Macacaúba, sugerindo um cenário em que os processos pedogenéticos e de deposição sedimentar atuam de forma tão irregular e episódica que as relações de covariância entre os nutrientes foram rompidas, em conformidade com a dinâmica de sistemas aluviais descrita por Latrubesse *et al.* (2020) e Hauser *et al.* (2022). Nesse contexto ambientalmente caótico, o estabelecimento e a sobrevivência da espécie tornam-se ainda mais estocásticos e imprevisíveis, não sendo possível mapear gradientes abióticos contínuos que orientem sua ocorrência espacial.

3.3 Síntese Histórico-Ecológica e Implicações para a Dinâmica Florestal

A articulação final entre os padrões espaciais, os indutores ambientais e a história de perturbação permite tecer uma síntese explicativa fundamentada nos princípios da ecologia histórica e da dinâmica pós-perturbação estabelecidos por Balée (2006) e Chazdon (2014).

Ambos os táxons sofreram o mesmo impacto histórico decorrente da exploração madeireira seletiva nas décadas de 1970 e 1980, período no qual as madeiras de alto valor comercial foram intensivamente extraídas das várzeas do Médio Solimões, em conformidade com o panorama de degradação documentado por Barros e Uhl (1995) e Rosa (2008). No entanto, as trajetórias observadas na atualidade constituem o produto da interação dessa perturbação comum com vulnerabilidades ecológicas intrínsecas e distintas de cada espécie.

Para *C. brasiliense*, a maior plasticidade ambiental e a inerente capacidade de manutenção de uma agregação estruturada demonstram uma resiliência espacial proeminente. Apesar da redução drástica de suas populações, a espécie logrou manter uma organização espacial, caracterizada por dependência moderada e alcances consistentes, situados entre 274 e 288 metros, a qual favorece processos de recuperação *in situ* a partir de núcleos regenerativos.

A aptidão para associar-se a diferentes complexos edáficos, variando entre fertilidade, textura, micronutrientes, pH ou boro a depender da população, revela uma estratégia de "oportunismo condicionado" que viabiliza a exploração de distintos nichos disponíveis no mosaico heterogêneo da várzea. Essa combinação de atributos posiciona a Jacareúba como um elemento de recuperação autônoma, ainda que lenta, desde que os núcleos agregados sejam alvo de proteção.

Por outro lado, o cenário delineado para *P. ulei* mostra-se severamente mais grave e exige uma interpretação diferenciada entre os dois núcleos remanescentes, embora ambos confluem para um diagnóstico de colapso estrutural.

Em ambas as populações da espécie, constatou-se uma distribuição espacial independente definida por Efeito Pepita Puro. Na área da população 1, a ocorrência do táxon depende criticamente do gradiente bipolar de fertilidade/acidez (FAT1), o qual também se distribui de forma aleatória na paisagem, configurando uma

condição de dupla aleatoriedade que torna raras e imprevisíveis as manchas de solo adequado. Na população 2, o diagnóstico revela-se ainda mais crítico, visto que a Análise Fatorial restou estatisticamente inviabilizada pelo índice de KMO igual a 0.17, explicitando um ambiente edáfico caótico e desprovido de associações consistentes entre os atributos do solo, o que impede a identificação de gradientes orientadores e indica um estágio avançado de colapso ecológico.

Desse modo, a perspectiva histórica e geoestatística integrada não apenas elucida as dinâmicas pretéritas e diagnostica o estado contemporâneo, mas também fundamenta caminhos diferenciados e cientificamente embasados para as ações de conservação futura.

Em síntese, a recuperação do ecossistema de várzea não se manifesta como um processo uniforme, configurando, ao contrário, um mosaico de trajetórias sucessionais espécie-específicas, conforme o modelo sucessional discutido por Chazdon (2008) e Martins *et al.* (2021). Enquanto a Jacareúba, amparada por sua resiliência espacial e plasticidade, atua como um vetor de recuperação autônoma a partir de núcleos agregados, a Macacaúba encontra-se em estado de colapso espacial e ecológico.

Essa fragilidade manifesta-se pela dependência restrita a um gradiente ambiental aleatório na população 1 ou pela inserção em uma matriz edáfica caótica e desestruturada na população 2 de Macacaúba, convergindo para a conclusão de que a estratégia de proteção passiva é insuficiente e que a espécie demanda intervenções silviculturais ativas e diferenciadas para reverter o declínio populacional.

4. CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo geral desta pesquisa foi alcançado ao demonstrar que a paisagem atual no Médio Solimões constitui um reflexo legível onde os processos ecológicos e

as dinâmicas históricas se entrelaçam de forma indelével. A investigação revelou que, embora as duas espécies compartilhem um passado comum de exploração intensiva que as reduziu a populações remanescentes, os táxons seguem trajetórias ecológicas pós-perturbação profundamente distintas, as quais se manifestam moldadas pelas vulnerabilidades específicas de cada espécie e pela heterogeneidade ambiental do ecossistema de várzea.

A principal similaridade identificada reside no legado espacial decorrente da pressão antrópica histórica, evidenciada pelo fato de ambas as espécies persistirem na paisagem em densidades populacionais excessivamente baixas, configurando um cenário de raridade imposta que demanda ações urgentes de conservação.

No entanto, as divergências evidenciadas mostram-se mais reveladoras e constituem o cerne das conclusões deste estudo. *C. brasiliense* demonstrou uma resiliência espacial notável, mantendo, no conjunto de suas três populações avaliadas, um padrão de distribuição agregado e espacialmente estruturado, caracterizado por dependência moderada e alcances consistentes.

Essa característica estrutural, associada a uma plasticidade ecológica que viabiliza a associação do táxon a diferentes complexos edáficos de acordo com a área amostral, indica uma capacidade intrínseca de recuperação autônoma a partir de núcleos regenerativos, ainda que o processo ocorra de forma lenta.

Em contrapartida, *P. ulei* apresenta um quadro de colapso espacial e ecológico severo. Em ambas as populações remanescentes avaliadas, a espécie exibiu uma distribuição espacial independente classificada como Efeito Pepita Puro, cenário que indica a perda completa da estrutura populacional original.

Na área da população 1, a ocorrência dos indivíduos mostrou-se rigidamente dependente de um gradiente de fertilidade/acidez que também se distribui de maneira aleatória na paisagem, enquanto na população 2 a matriz edáfica

revelou-se caótica a ponto de impedir a identificação de gradientes ambientais estruturados. Em ambos os cenários, a condição de dupla aleatoriedade, envolvendo tanto a dispersão da espécie quanto a distribuição de seu habitat essencial, configura um panorama no qual a estratégia de proteção passiva se mostra insuficiente, exigindo intervenções silviculturais ativas e diferenciadas para reverter a atual trajetória de declínio.

O significado ecológico dessa coexistência assimétrica indica que uma mesma perturbação histórica é capaz de gerar respostas populacionais radicalmente distintas, a depender do nicho ecológico e das estratégias de vida intrínsecas a cada táxon arbóreo. Os resultados confirmam que o ambiente de várzea não se recupera de forma homogênea, processando-se como um mosaico de trajetórias sucessionais espécie-específicas.

Nesse contexto, a Jacareúba, caracterizada por um comportamento mais generalista e por maior capacidade de agregação, atua como um elemento de resiliência estrutural na floresta em recuperação, ao passo que a Macacaúba, apresentando características de especialista e severamente impactada pela atividade extrativista, torna-se um indicador de perturbação limítrofe, cuja persistência na região dependerá estritamente de um manejo ativo e cientificamente orientado.

Por conseguinte, as conclusões gerais desta investigação apontam para a necessidade de formulação de estratégias de manejo e conservação diferenciadas e espacialmente explícitas.

Para *C. brasiliense*, a prioridade consiste na proteção e na conectividade dos núcleos agregados identificados, potencializando a capacidade natural de regeneração da espécie. Para *P. ulei*, faz-se imperativo transitar da proteção passiva para um modelo de manejo ativo de restauração, o qual deve incluir o mapeamento

preciso de manchas de solo adequadas por meio dos fatores ambientais identificados nesta pesquisa, além do plantio dirigido de mudas para restabelecer uma base populacional mínima e funcional. Desse modo, a abordagem geo-histórica empregada cumpre o propósito de transformar o diagnóstico do passado em um roteiro científico para a ação futura, garantindo perspectivas de permanência para ambas as espécies na dinâmica florestal do Médio Solimões.

REFERÊNCIAS

- AYRES, J. M.; AYRES, C. História do desenvolvimento da atividade madeireira na várzea: a vila e a floresta. *In*: AYRES, J. M. **As matas de várzea do Mamirauá**. 2. ed. Belém: Sociedade Civil Mamirauá, 2006. p. 45-60. Disponível em: https://mamiraua.org.br/tipos_de_publicacoes/livros/. Acesso em: 20 fev. 2025.
- BALÉE, W. The research program of historical ecology. **Annual Review of Anthropology**, v. 35, n. 1, p. 75-98, 2006. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.anthro.35.081705.123231>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- BARROS, A. C.; UHL, C. A evolução da exploração madeireira na Amazônia Oriental. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Ciências Naturais, Belém, v. 1, n. 1, p. 103-127, 1995. Disponível em: https://boletimcn.museu-goeldi.br/bcnaturais/pt_BR. Acesso em: 10 ago.2026.
- BROOKS, M. E. *et al.* glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. **The R Journal**, v. 9, n. 2, p. 378-400, 2017. Disponível em: <https://journal.r-project.org/archive/2017/RJ-2017-066/index.html>. Acesso em: 18 ago. 2026.
- CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x . Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>. Acesso em: 20 ago. 2026.
- CHAZDON, R. L. **Second growth**: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation. Chicago: University of Chicago Press, 2014. 472 p. DOI: 10.7208/chicago/9780226118109.001.0001. Disponível em: <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/S/bo17585093.html>. Acesso em: 20 ago. 2026.
- CHAZDON, R. L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1458-1460, 2008. DOI: 10.1126/science.1155365. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1155365>. Acesso em: 20 ago. 2026.
- CONNELL, J. H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. **Science**, v. 199, n. 4335, p. 1302-1310, 1978. DOI: 10.1126/science.199.4335.1302. Disponível em:

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.199.4335.1302>. Acesso em: 20 ago. 2026.

CONDIT, R. *et al.* Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, v. 288, n. 5470, p. 1414-1418, 2000. DOI: 10.1126/science.288.5470.1414 . Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.288.5470.1414>. Acesso em: 20 ago. 2026.

DORMANN, C. F. *et al.* Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. **Ecography**, v. 30, n. 5, p. 609-628, 2007. DOI: 10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x>. Acesso em: 20 ago. 2026

FORTIN, M. J.; DALE, M. R. T. **Spatial analysis**: a guide for ecologists. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: 10.1017/CBO9780511542039 . Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/spatial-analysis/7E24BBFA121C16F08AC8E9F7AC3BA6A0>. Acesso em: 17 ago. 2026.

GARDNER, T. A. *et al.* The spatial distribution of threats to species in Australia. **Biological Conservation**, v. 232, p. 110-122, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320719300640>. Acesso em: 18 ago. 2026.

GASCOIGNE, J. *et al.* Allee effects in ecology and conservation. Oxford: Oxford University Press, 2009. 256 p. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Allee_Effects_in_Ecology_and_Conservatio.html?id=IS4TDAAQBAJ. Acesso em: 18 ago. 2026.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. Disponível em: <https://global.oup.com/academic/product/geostatistics-for-natural-resources-evaluation-n-9780195115383>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HAIR, J. F. *et al.* **Multivariate data analysis**. 8. ed. Andover: Cengage Learning EMEA, 2019. Disponível em: <https://au.cengage.com/c/multivariate-data-analysis-8e-hair-babin-anderson-black/9781473756540/> . Acesso em: 17 ago. 2026.

HARMS, K. E.; CONDIT, R.; HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B. Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. **Journal of Ecology**, v. 89, n. 6, p. 947-959, 2001. DOI: 10.1046/j.0022-0477.2001.00615.x. Disponível em:

<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.0022-0477.2001.00615.x>. Acesso em: 20 ago. 2026.

HOLL, K. D. **Restoration ecology**: the new frontier. 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012. 394 p. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Restoration+Ecology%3A+The+New+Frontier%2C+2nd+Edition-p-9781118223154>. Acesso em: 18 ago. 2026.

HOMMA, A. K. O. Madeira na Amazônia: extração, manejo ou reflorestamento? **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 7, n. 13, p. 147-161, 2011. Disponível em: <https://www.basa.com.br/revista/index.php/amazoniacienciadesenvolvimento/article/view/180>. Acesso em: 10 ago. 2026.

ISBELL, F. *et al.* Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. **Nature**, v. 546, n. 7656, p. 65-72, 2017. DOI: 10.1038/nature22899. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature22899>. Acesso em: 20 ago. 2026.

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. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0604666104>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 55-90. DOI: 10.1201/b10158. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b10158/trace-elements-soils-plants-alina-kabata-pendias>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KEDDY, P. A. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 2, p. 157-164, 1992. DOI: 10.2307/3235676. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/3235676>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LAMONT, B. B. *et al.* The spatial scale of genetic differentiation in the Honey possum, *Tarsipes rostratus*: an analysis of population structure from DNA fingerprinting. **Molecular Ecology**, v. 2, n. 5, p. 299-304, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.1993.tb00021.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-294X.1993.tb00021.x>. Acesso em: 18 ago. 2026.

LAURANCE, W. F. *et al.* The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biological Conservation**, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011. DOI:

10.1016/j.biocon.2010.09.021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320710003780>. Acesso em:
20 ago. 2026.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012. Disponível em:
<https://shop.elsevier.com/books/numerical-ecology/legendre/978-0-444-53868-0>.
Acesso em: 18 ago. 2026.

LINDENMAYER, D. B. *et al.* Adaptive management in conservation: learning by doing. In: SODHI, N. S.; EHRLICH, P. R. (eds.). **Conservation Biology for All**. Oxford: Oxford University Press, 2010. p. 260-275. Disponível em:
https://conbio.org/images/content_publications/ConservationBiologyforAll.pdf.
Acesso em: 18 ago. 2026.

LOW-DÉCARIE, E. *et al.* Merging ecology and evolution: a new frontier for synthesis. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 7, p. 409-416, 2014. DOI:
10.1016/j.tree.2014.04.009. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534714000969>. Acesso em:
20 ago. 2026.

MARTINS, K. G. *et al.* Incorporating spatial autocorrelation in species distribution models: a review of methods and applications in ecology. **Ecological Modelling**, v. 475, p. 110301, 2023. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380023000297>. Acesso em:
18 ago. 2026.

MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S. A.; STAFFORD, S. G. **Multivariate statistics for wildlife and ecology research**. New York: Springer, 2000. Disponível em:
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-1288-1>. Acesso em: 18 ago. 2026

MONTEIRO, M. C.; BHERING, S. B. Geoestatística aplicada à ecologia e ciências ambientais: conceitos e fundamentos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 488-502, 2019. Disponível em:
<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/238711> Acesso em: 18 ago. 2026.

PAROLIN, P. *et al.* A falta de dados e a urgência da conservação das áreas úmidas (várzeas) da Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 139-146, 2013. Ol:
10.1590/S0044-59672013000200001. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/aa/a/yz549YY8ZgHY6JpDSmZ9ypp/> . Acesso em: 10 ago. 2026.

PERES, C. A. *et al.* Biodiversity conservation in human-modified Amazonian forest landscapes. **Biological Conservation**, v. 143, n. 10, p. 2314-2327, 2010. DOI: 10.1016/j.biocon.2010.01.021.

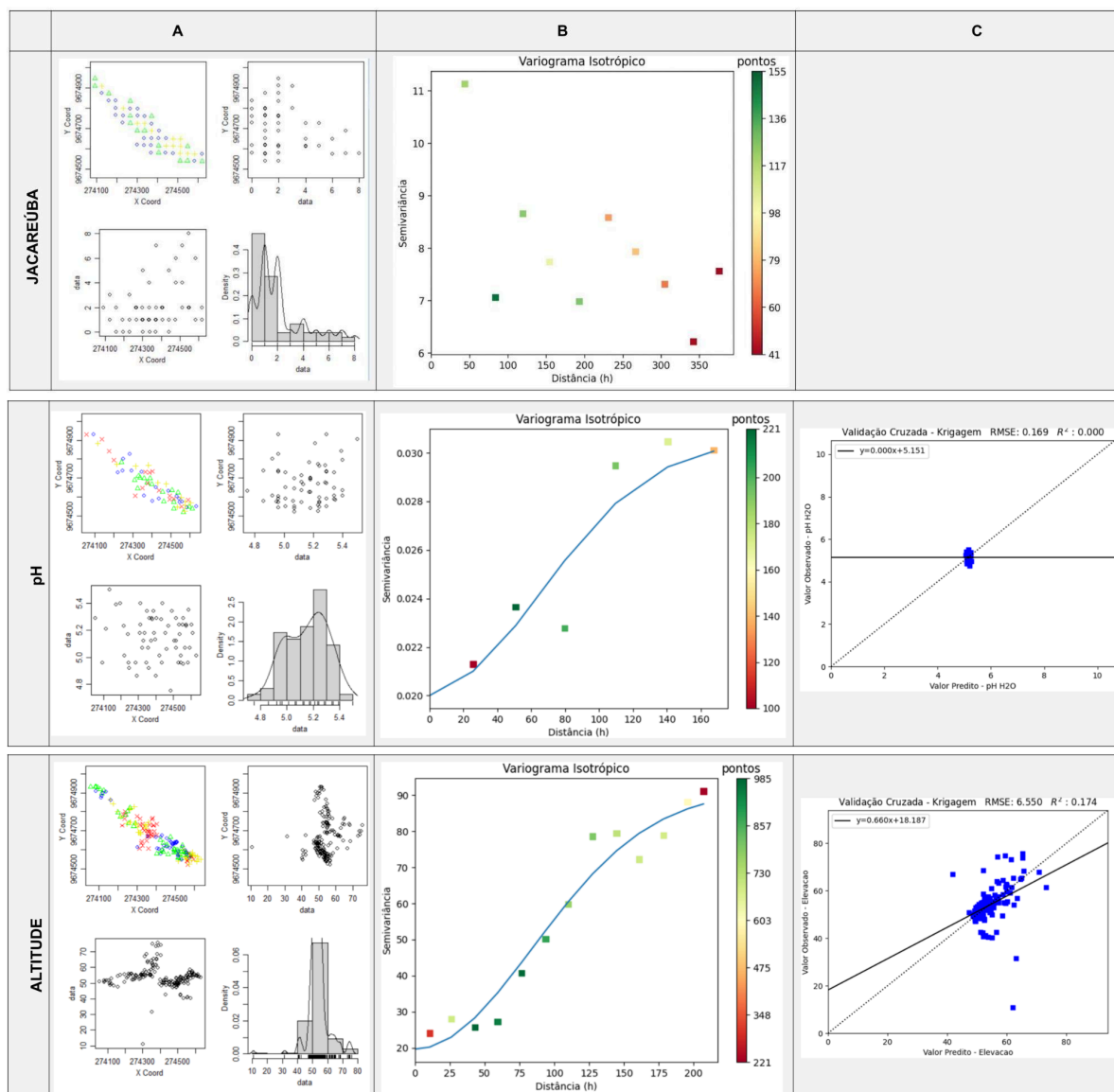
ROSA, M. F. **Análise histórica do uso dos recursos madeireiros na várzea do Médio Solimões, Amazônia Central**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3638> . Acesso em: 18 ago. 2026.

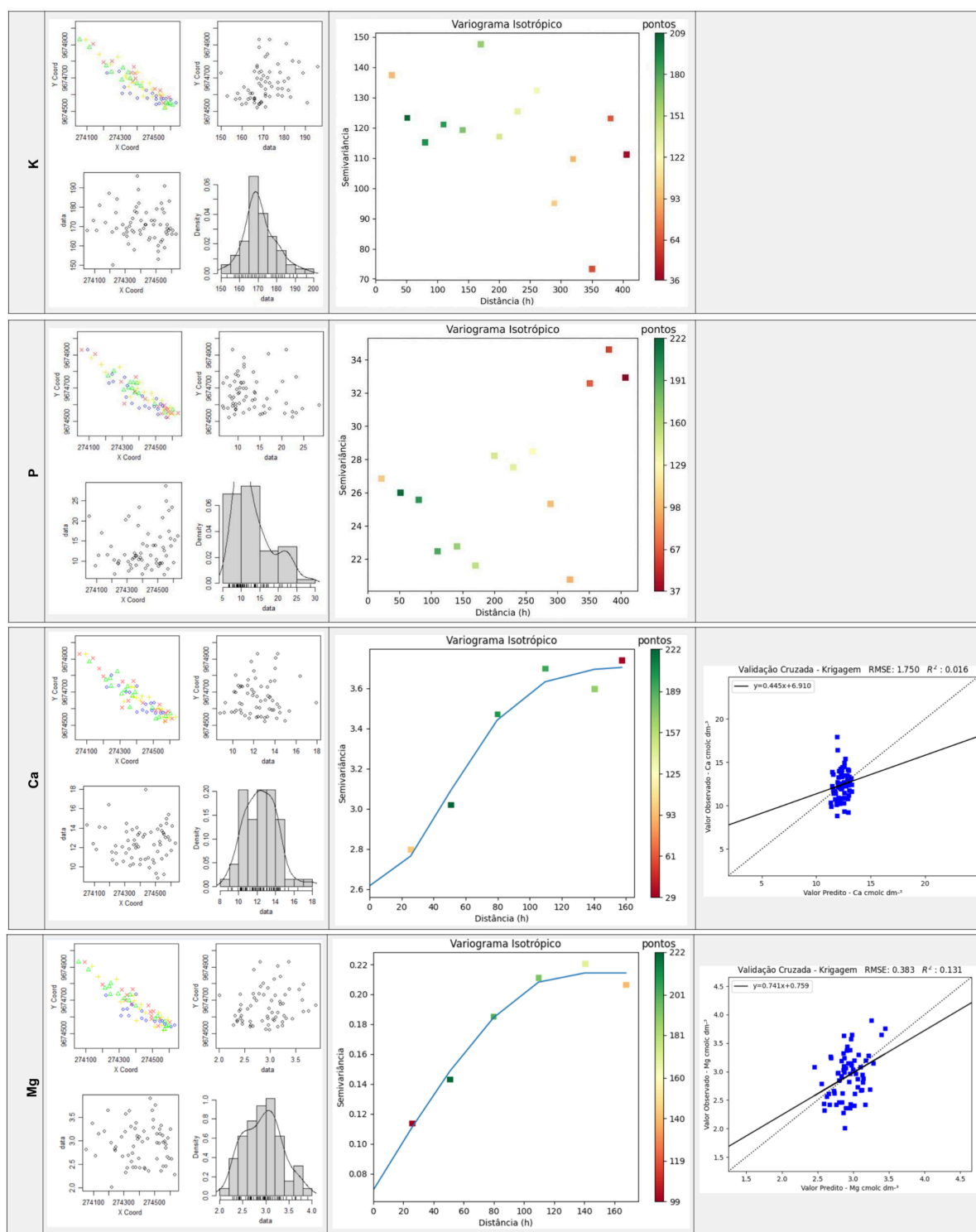
TER BRAAK, C. J. F.; SMILAUER, P. **Canoco reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.0)**. Ithaca: Microcomputer Power, 2012. 496 p. Disponível em: <https://www.canoco5.com>. Acesso em: 18 ago. 2026.

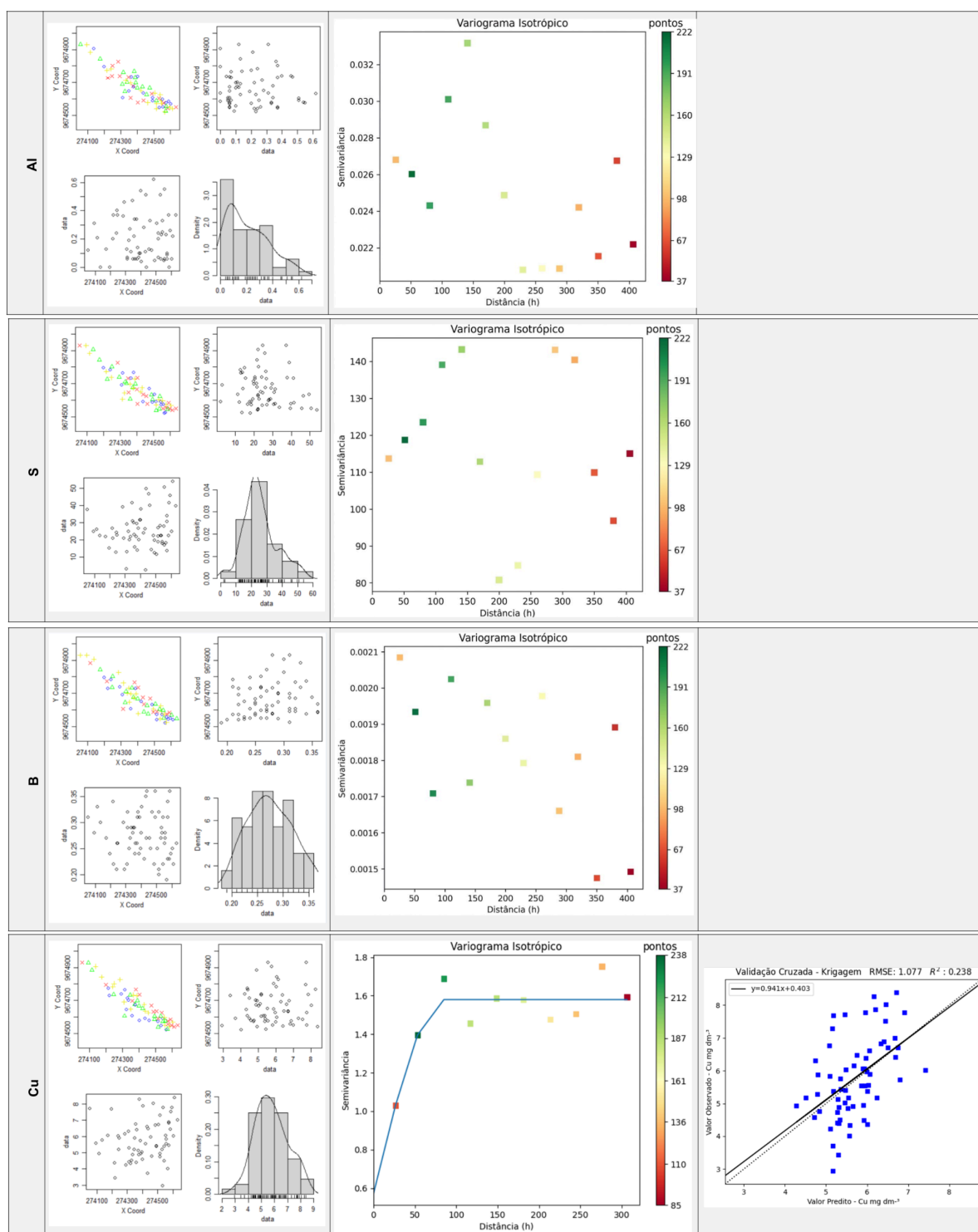
WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. DOI: 10.1002/9780470517277. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470517277>. Acesso em: 20 ago. 2026.

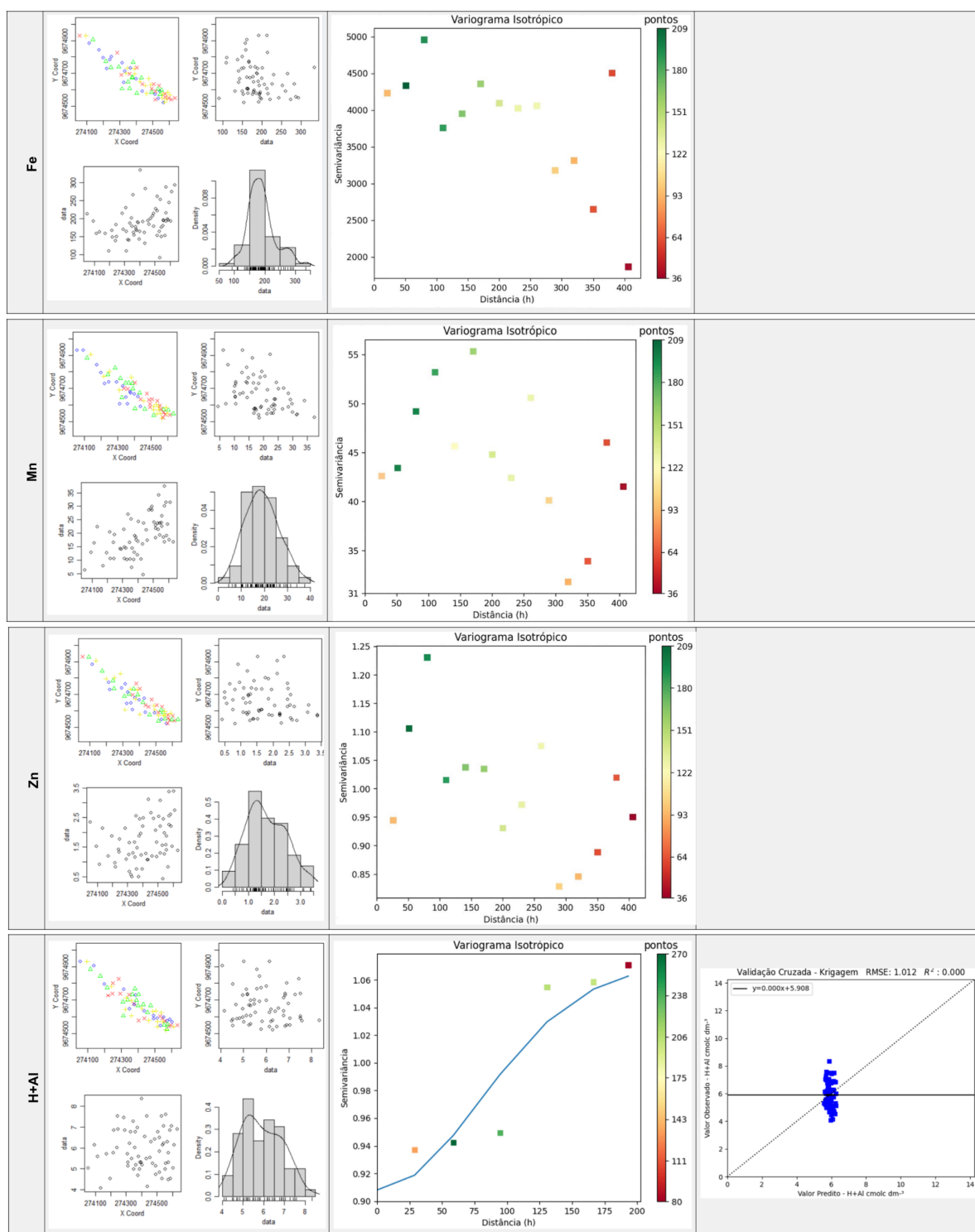
APÊNDICE A - Análise de variabilidade espacial

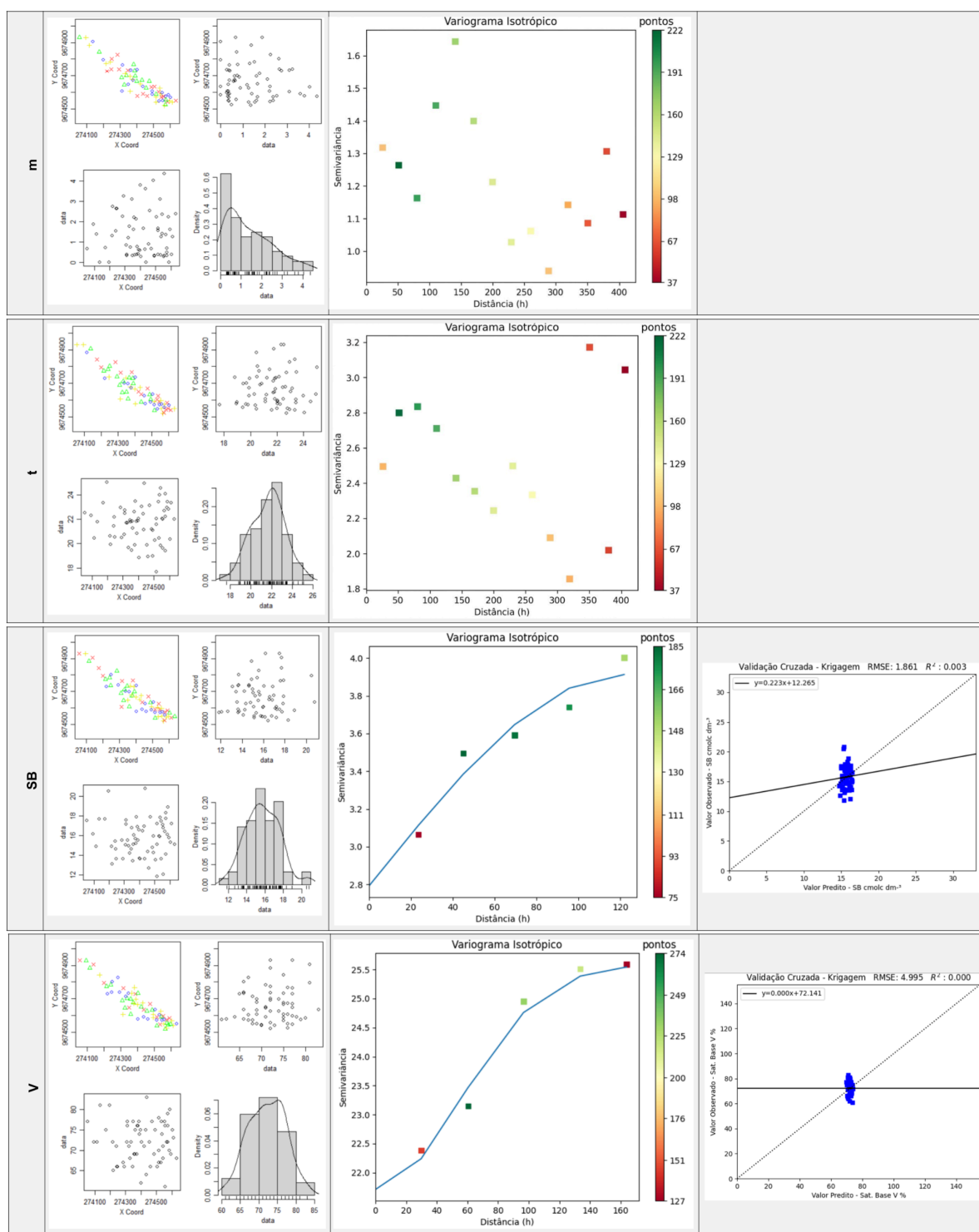
Figura 1 - Análise de variabilidade espacial de *Calophyllum brasiliense* Cambess. da população 1 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada







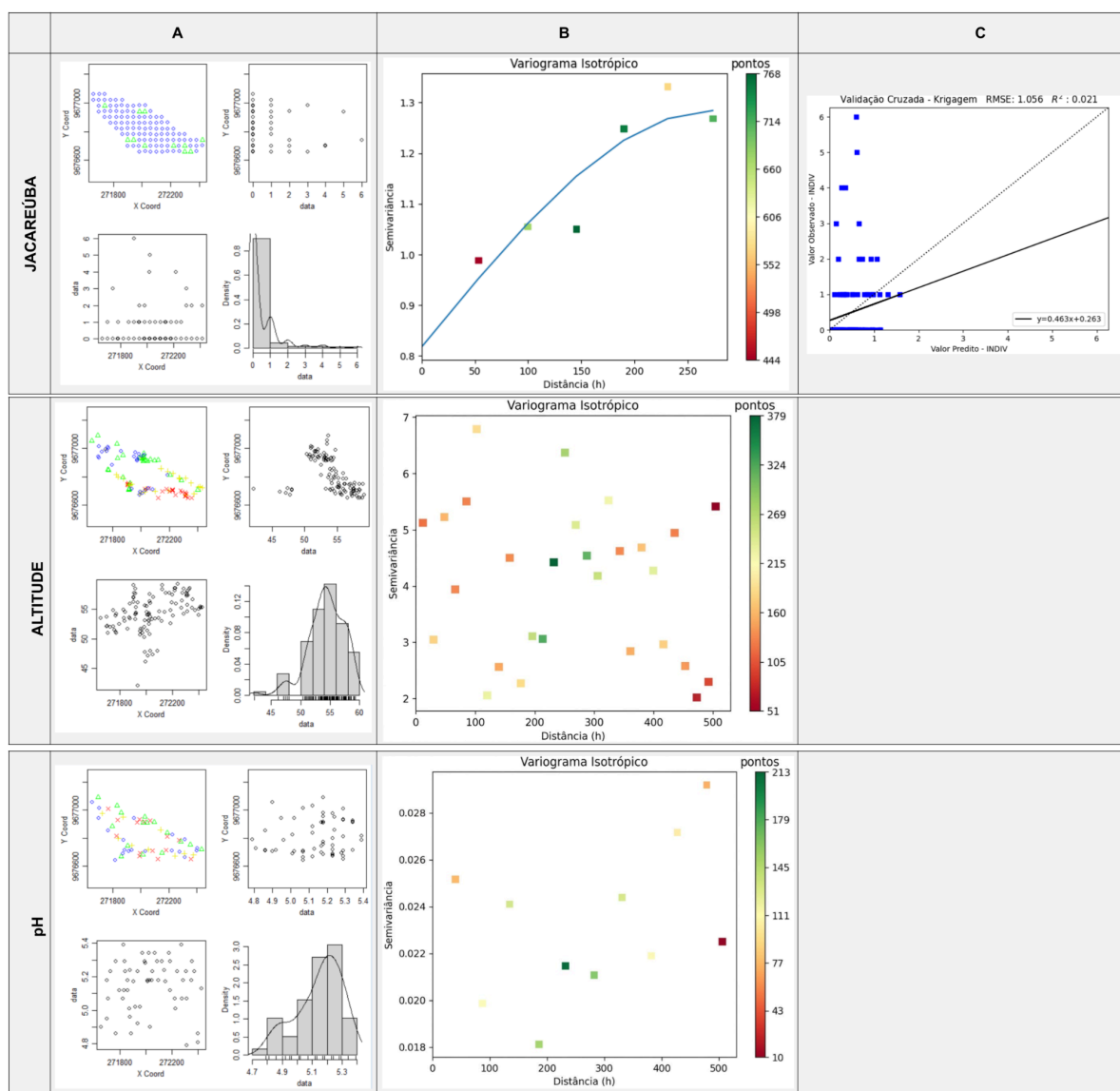


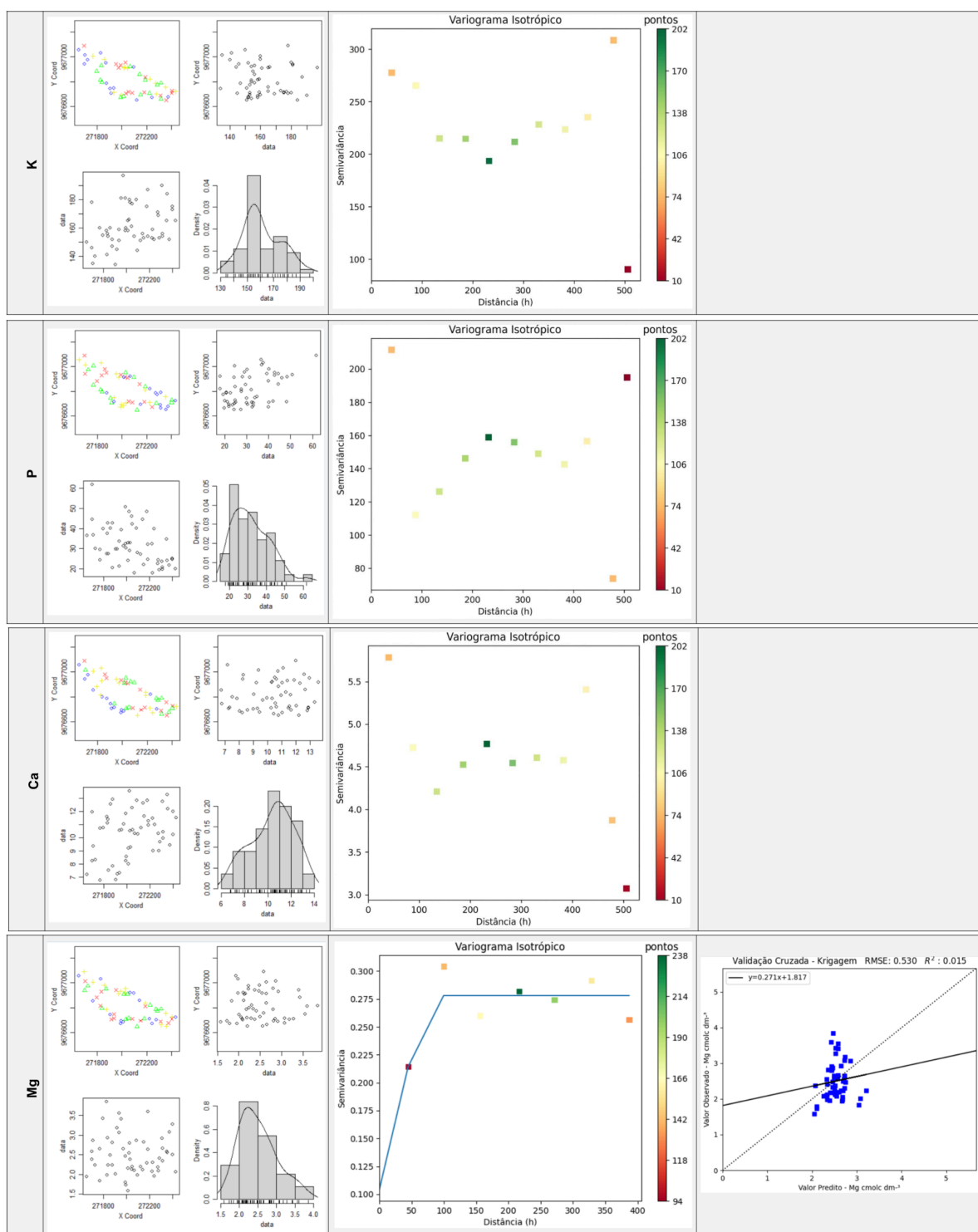




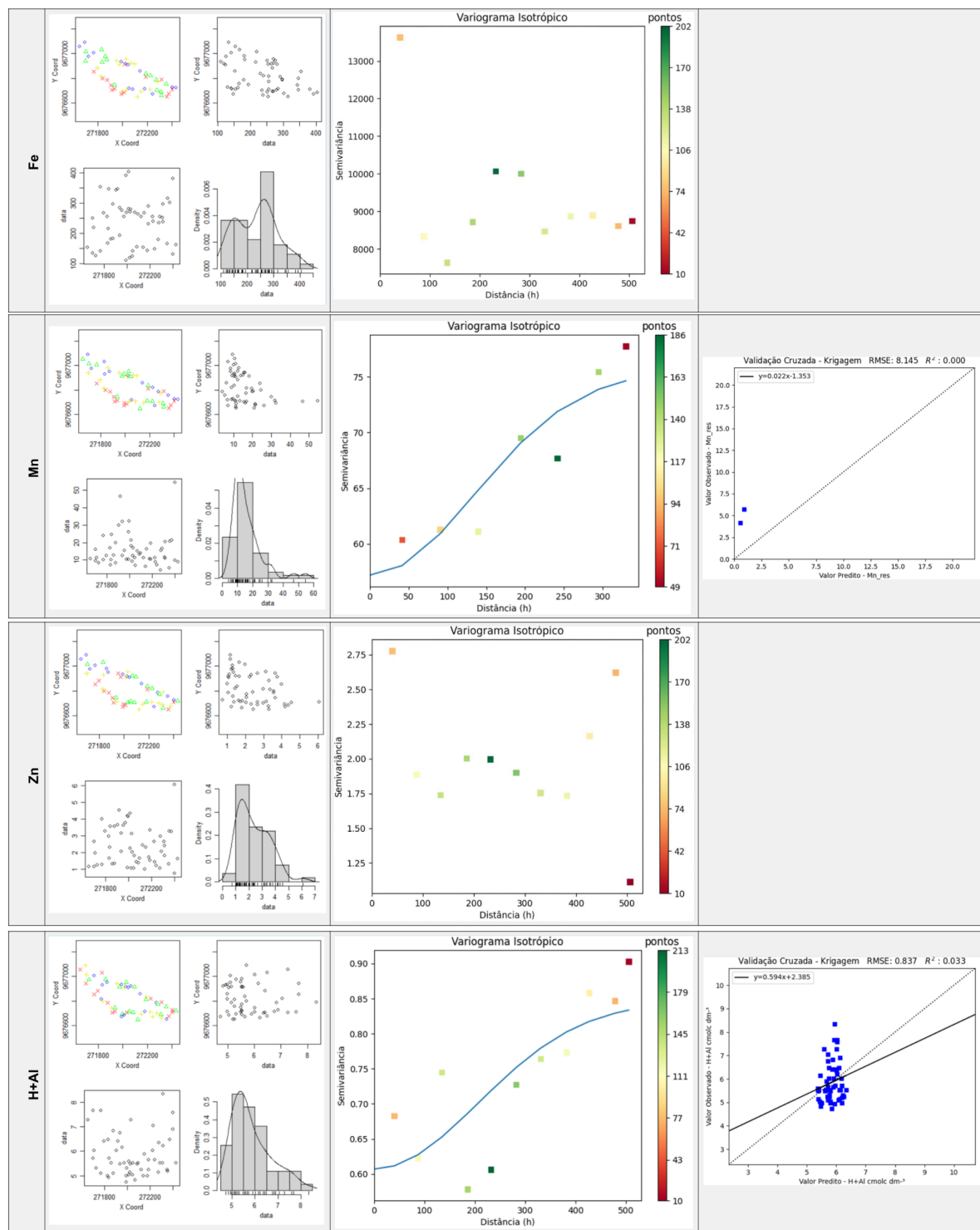
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

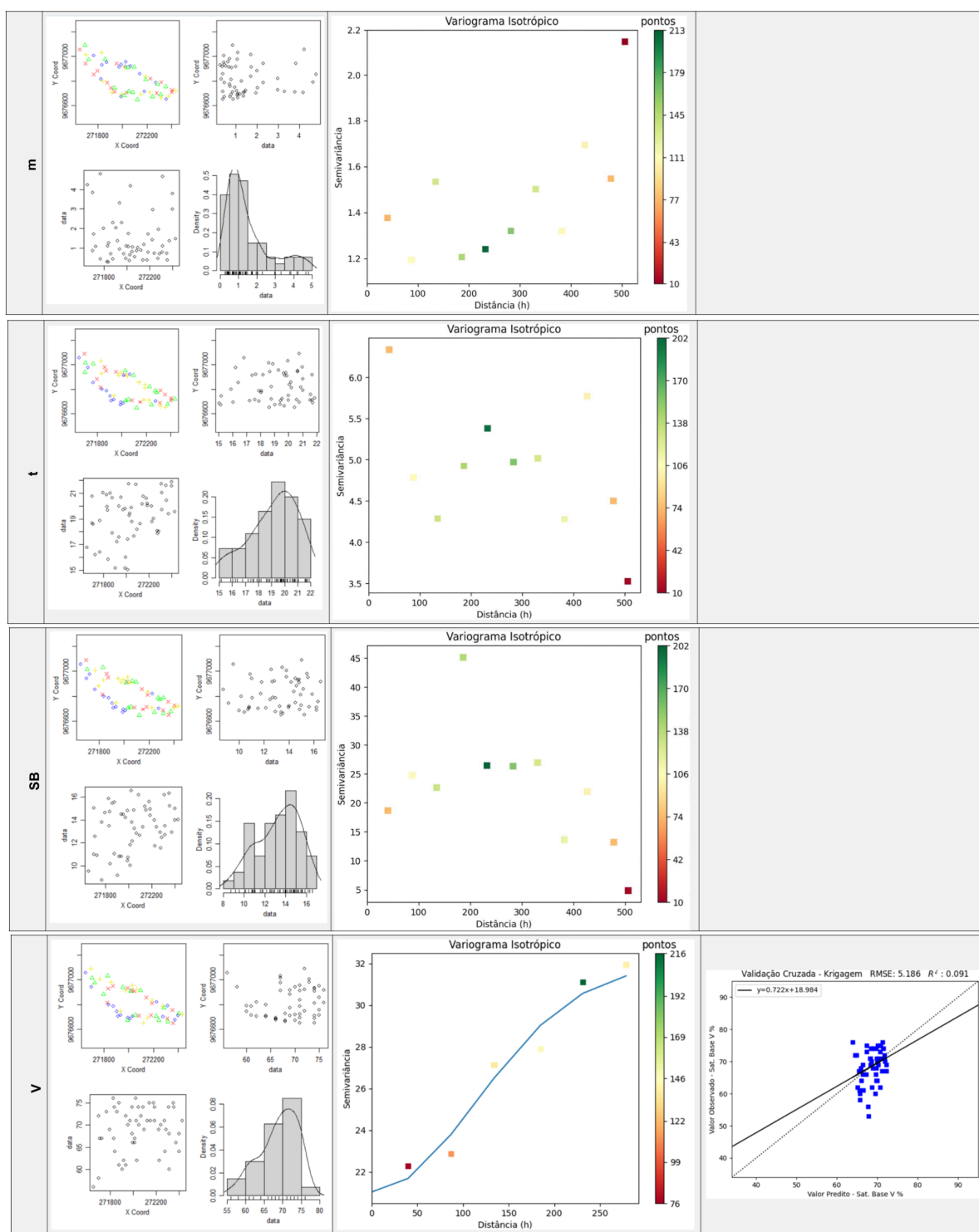
Figura 2 - Análise de variabilidade espacial de *Calophyllum brasiliense* Cambess.da população 2 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada







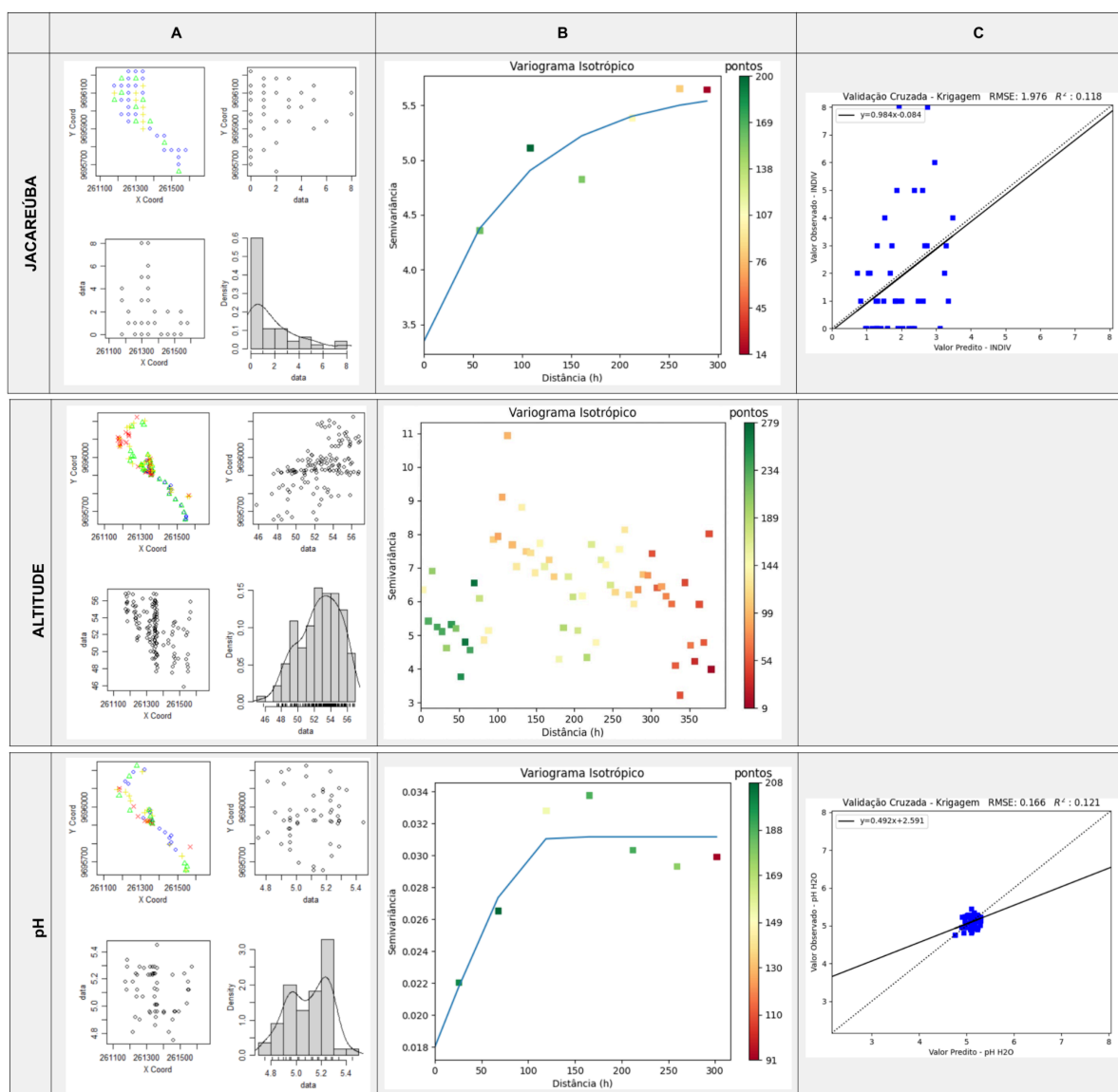


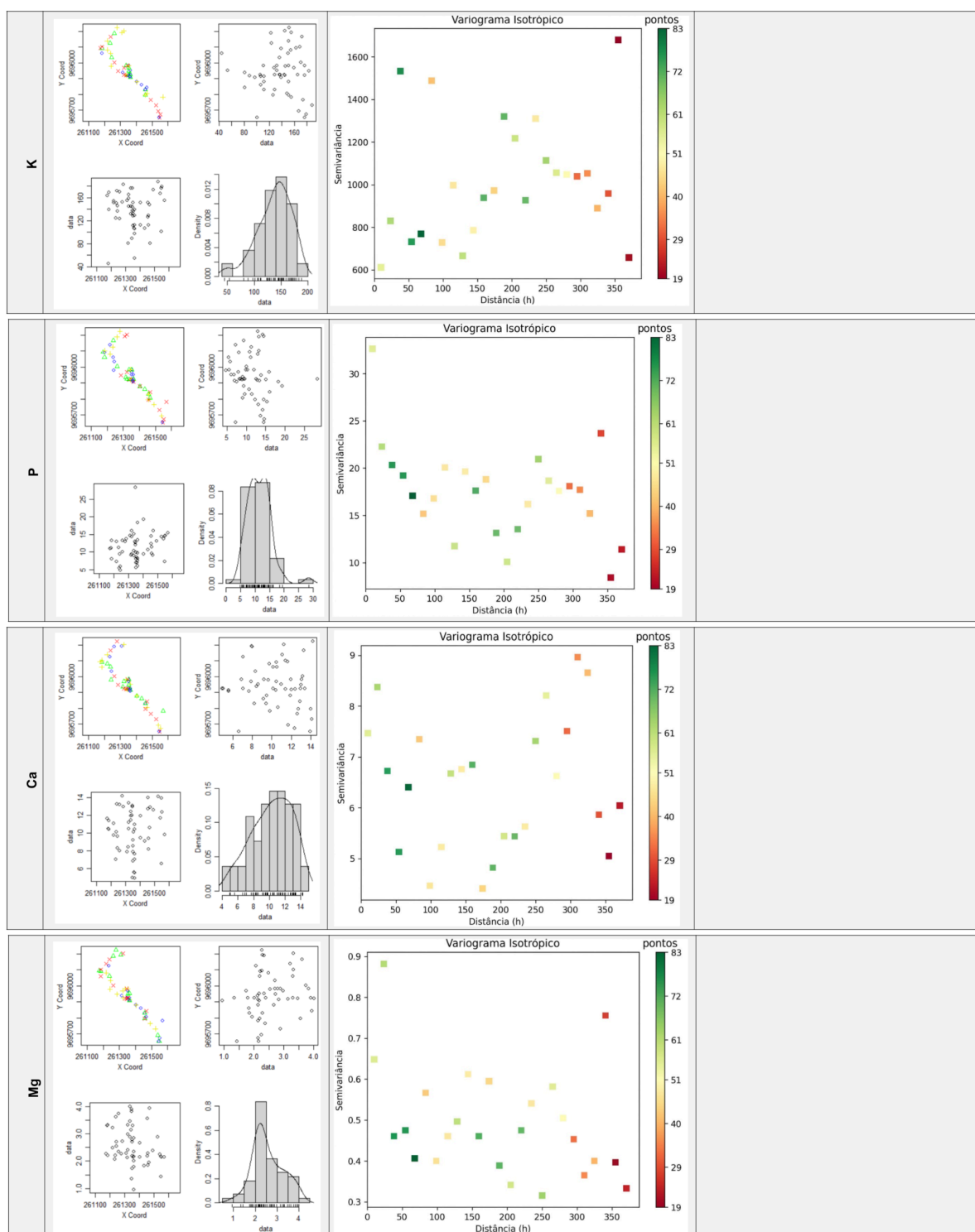


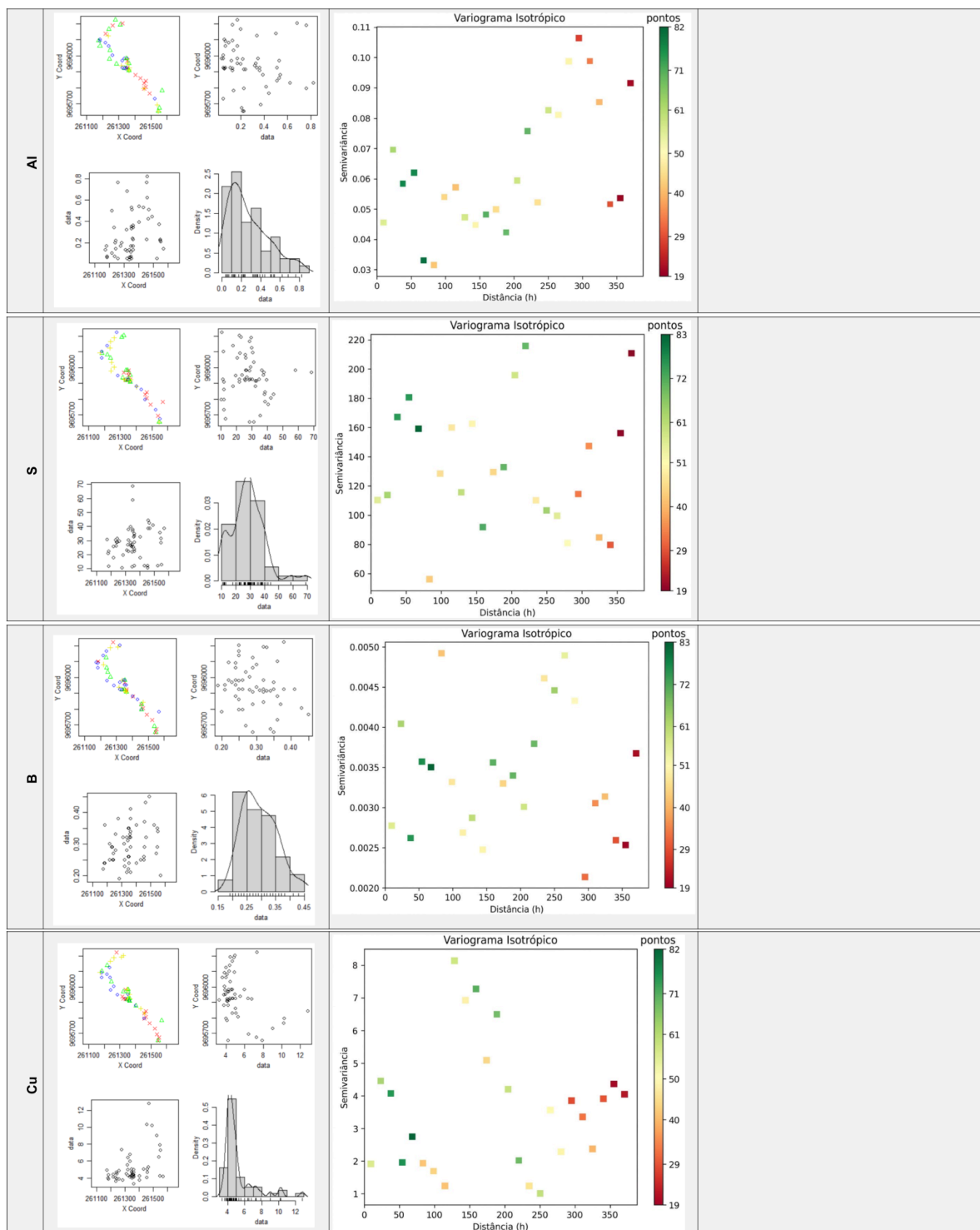


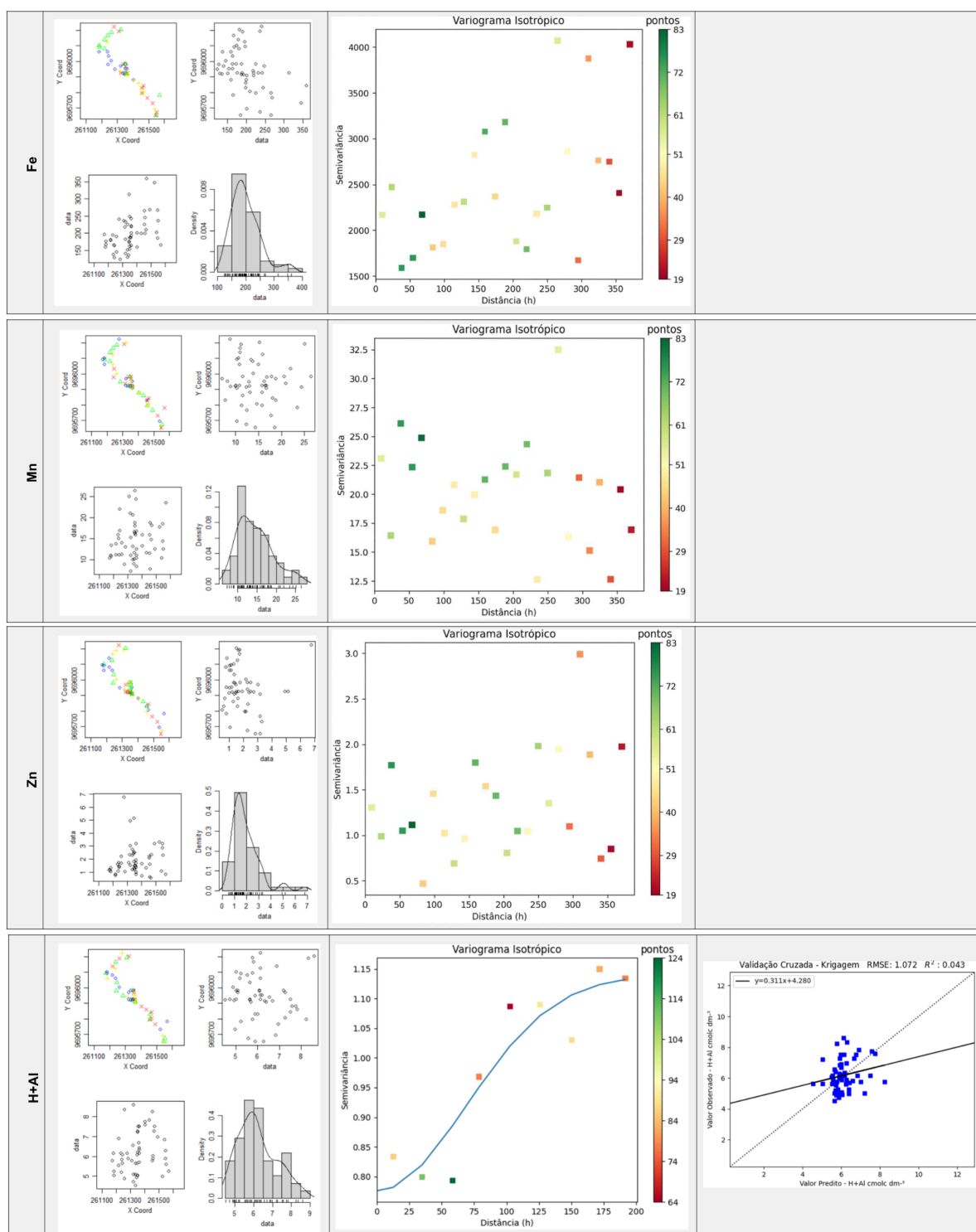
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Figura 3 - Análise de variabilidade espacial de *Calophyllum brasiliense* Cambess. da população 3 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada

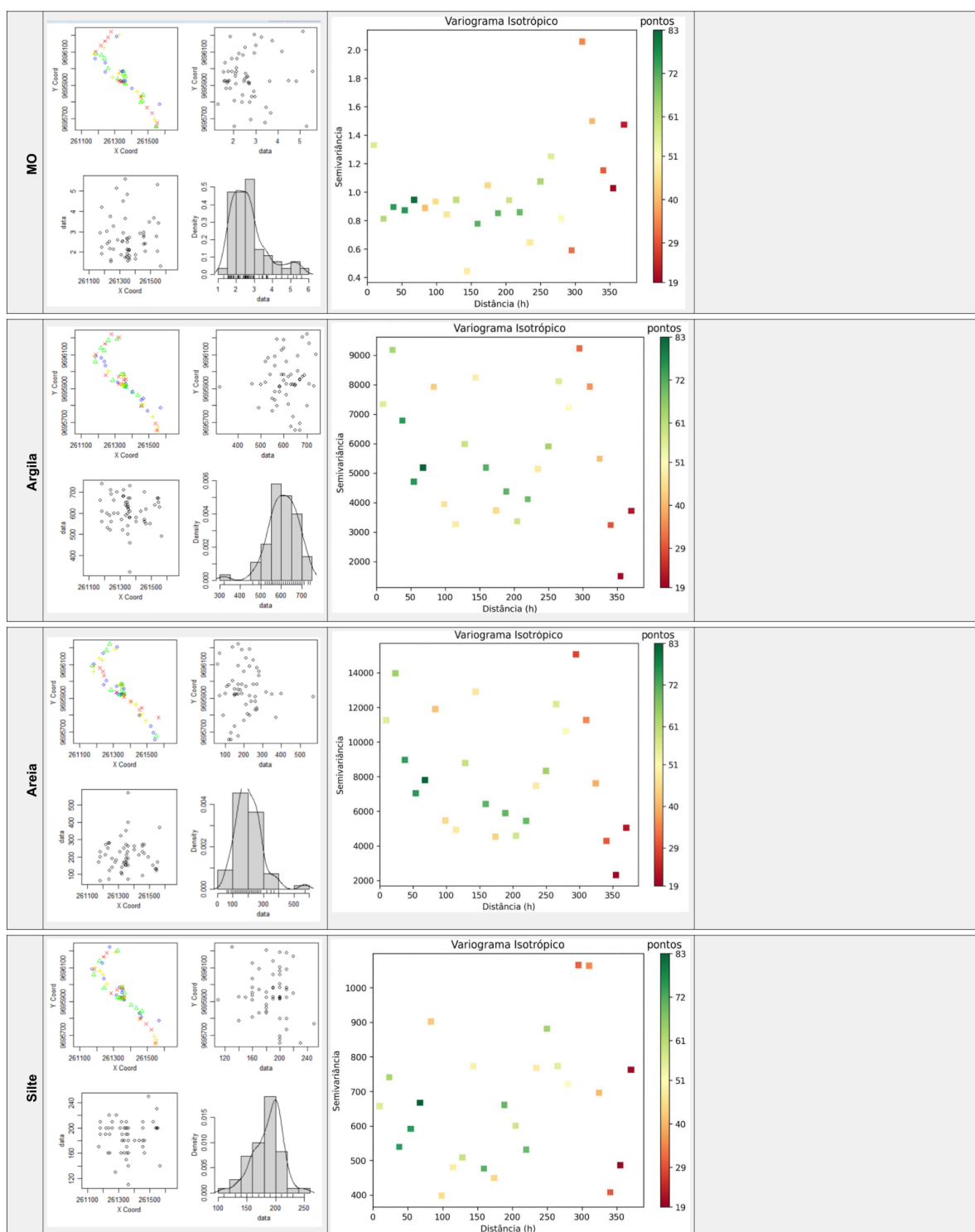






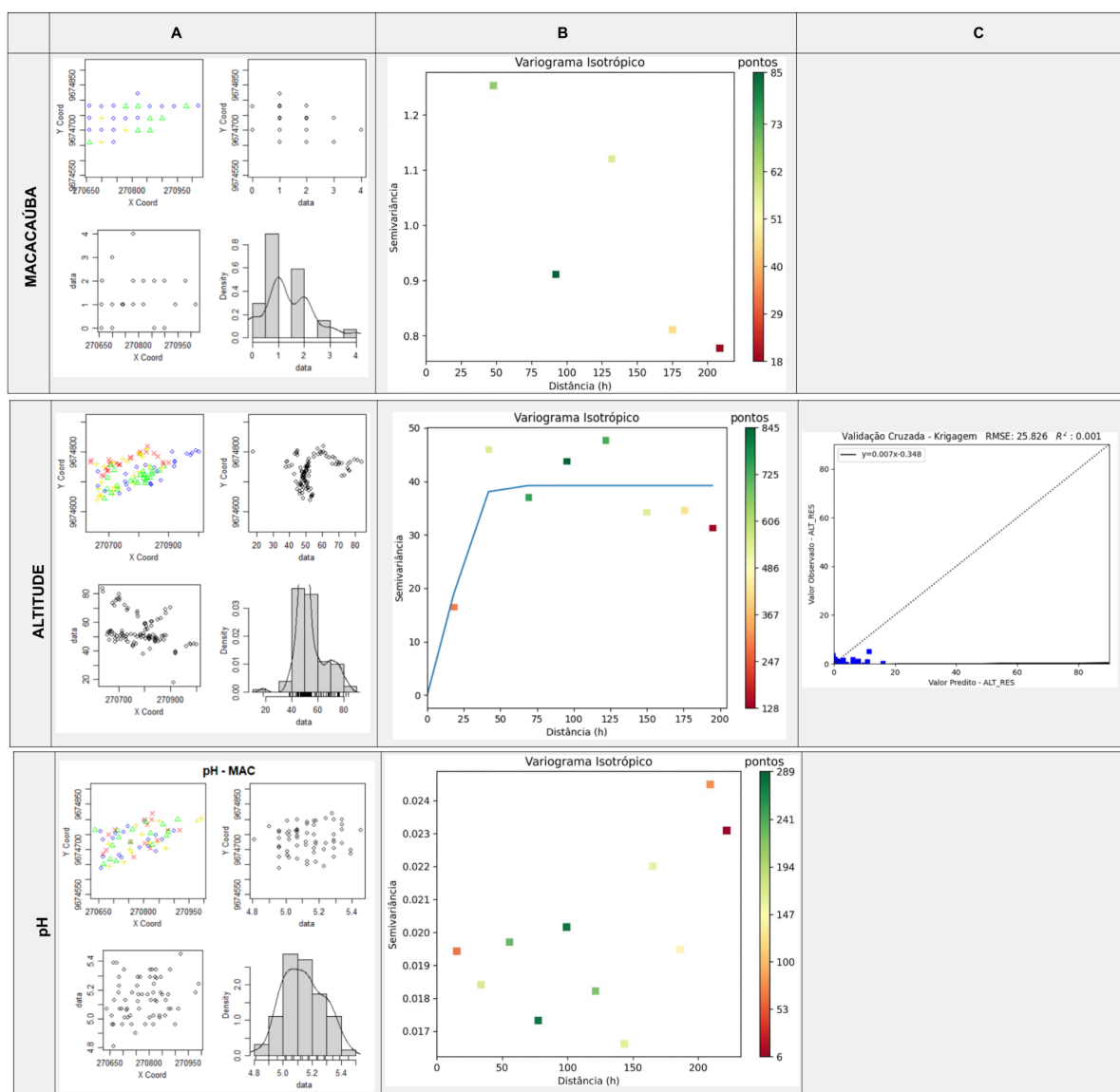


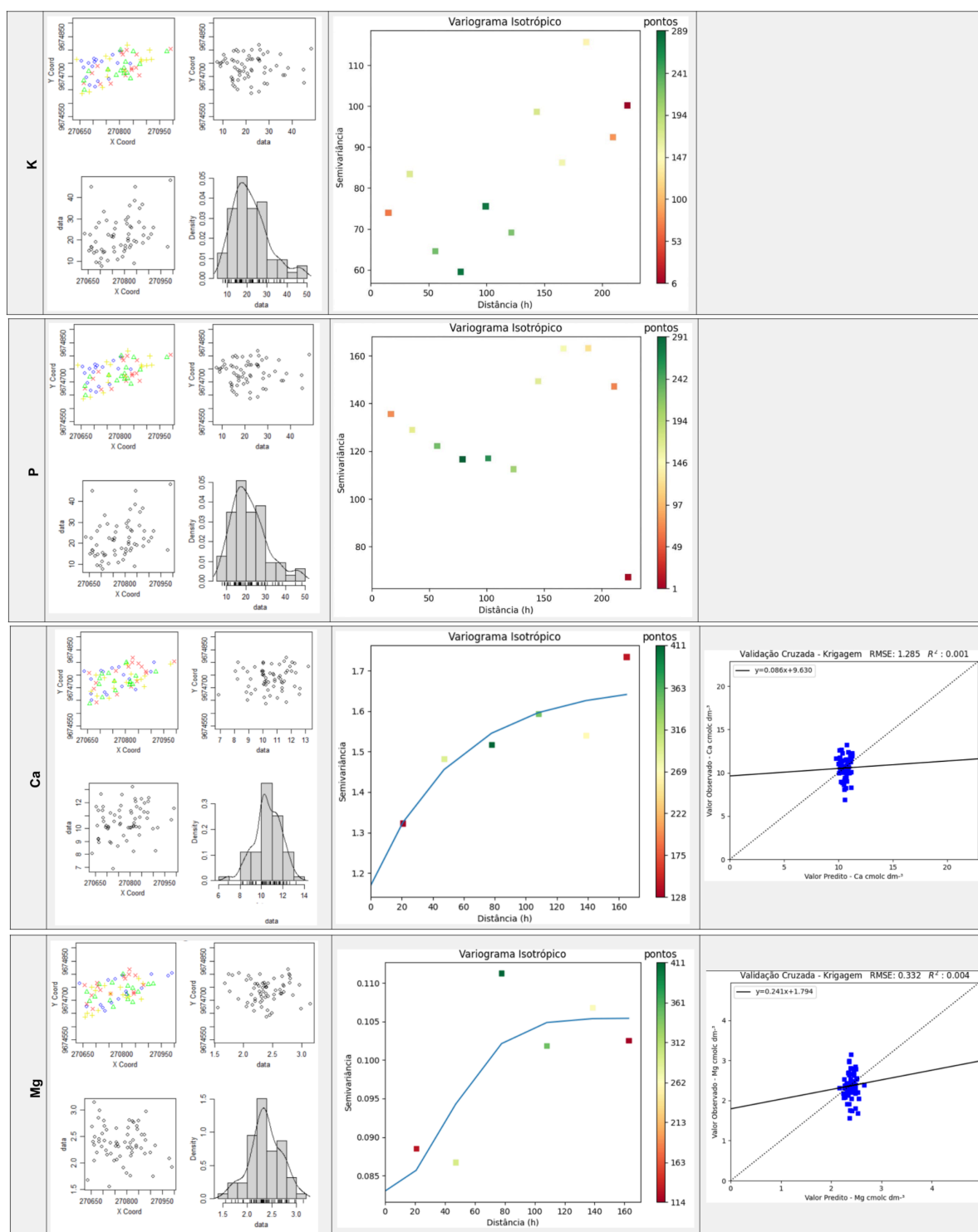


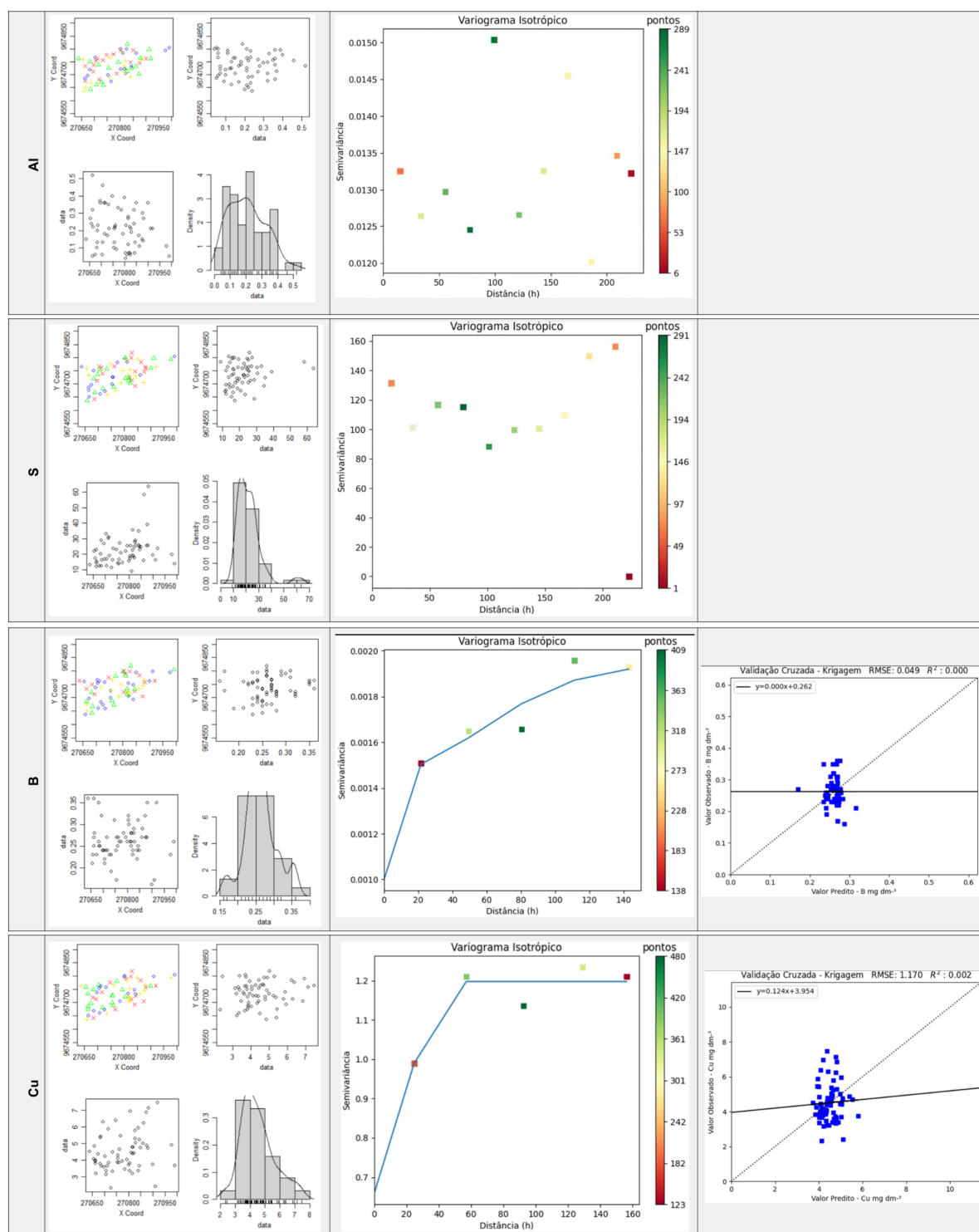


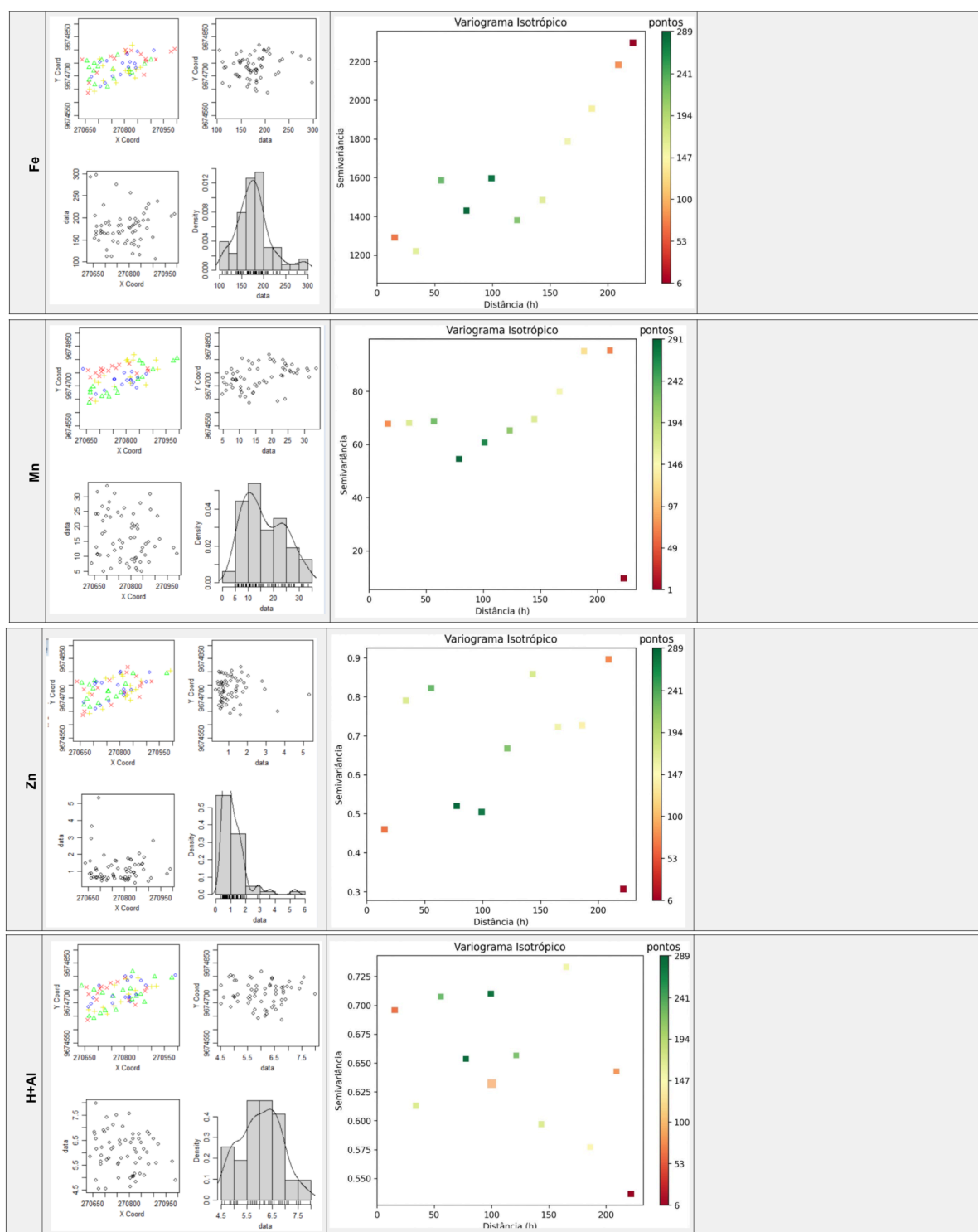
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

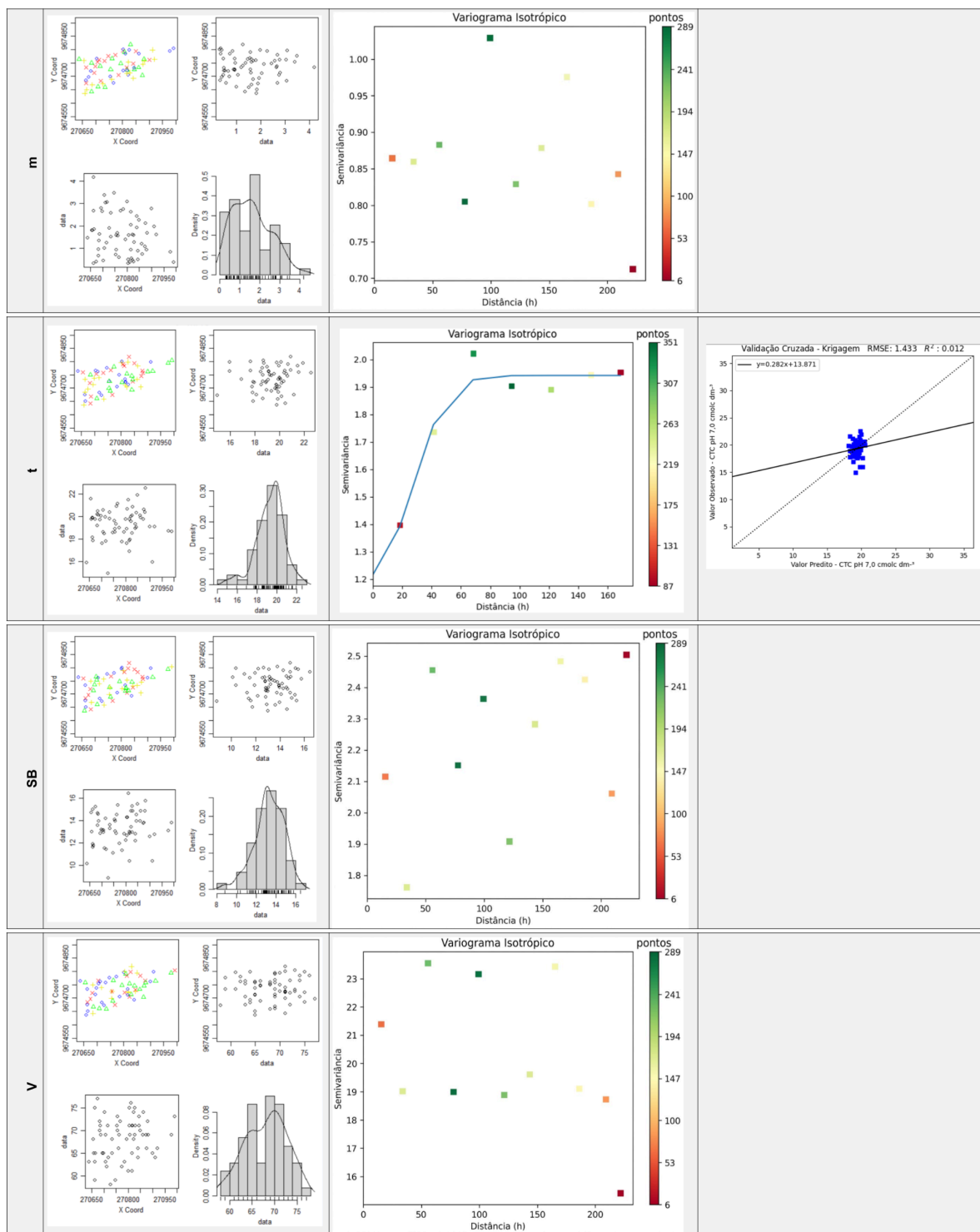
Figura 4 - Análise de variabilidade espacial de *Platymiscium ulei* Harms da população 1 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada

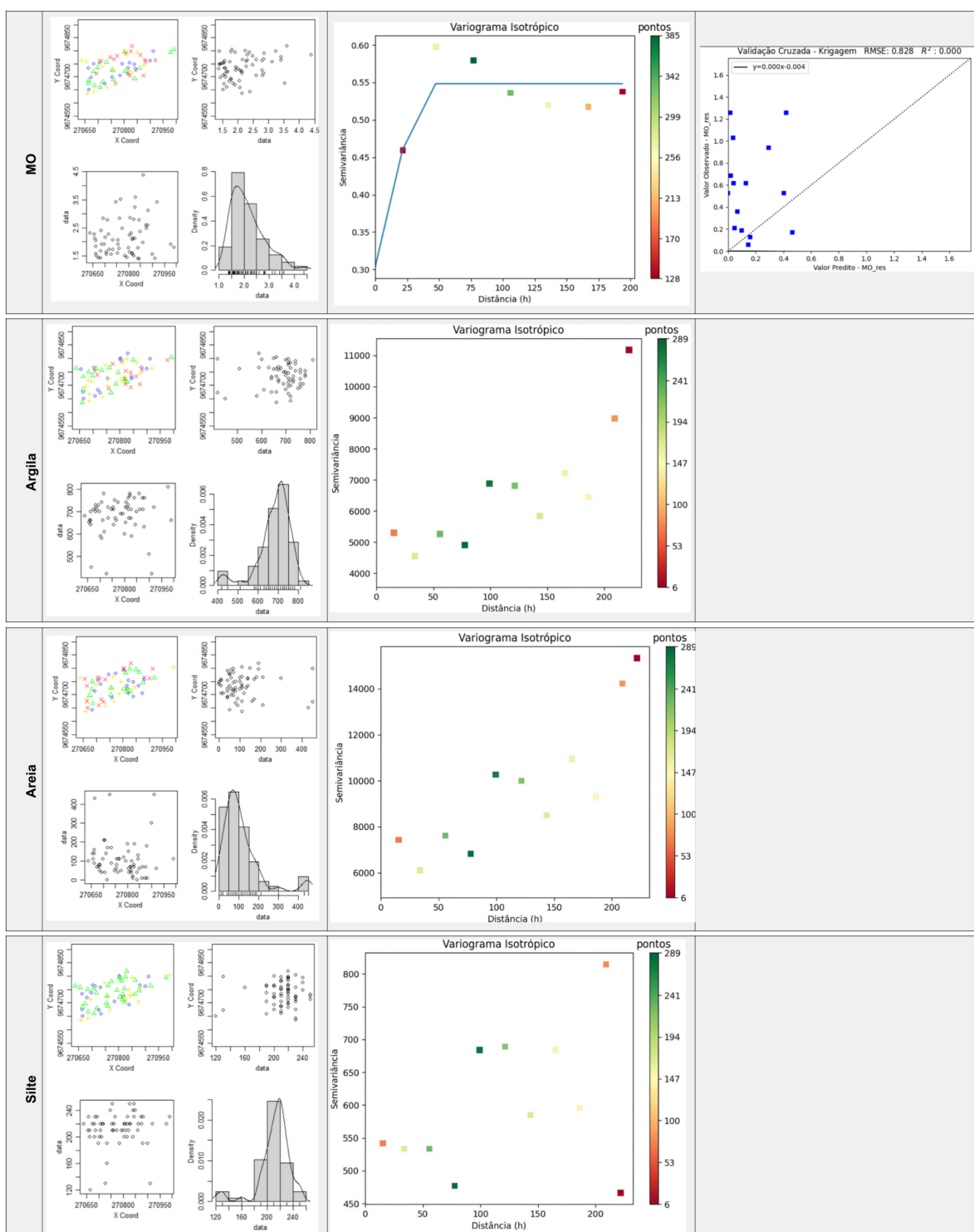






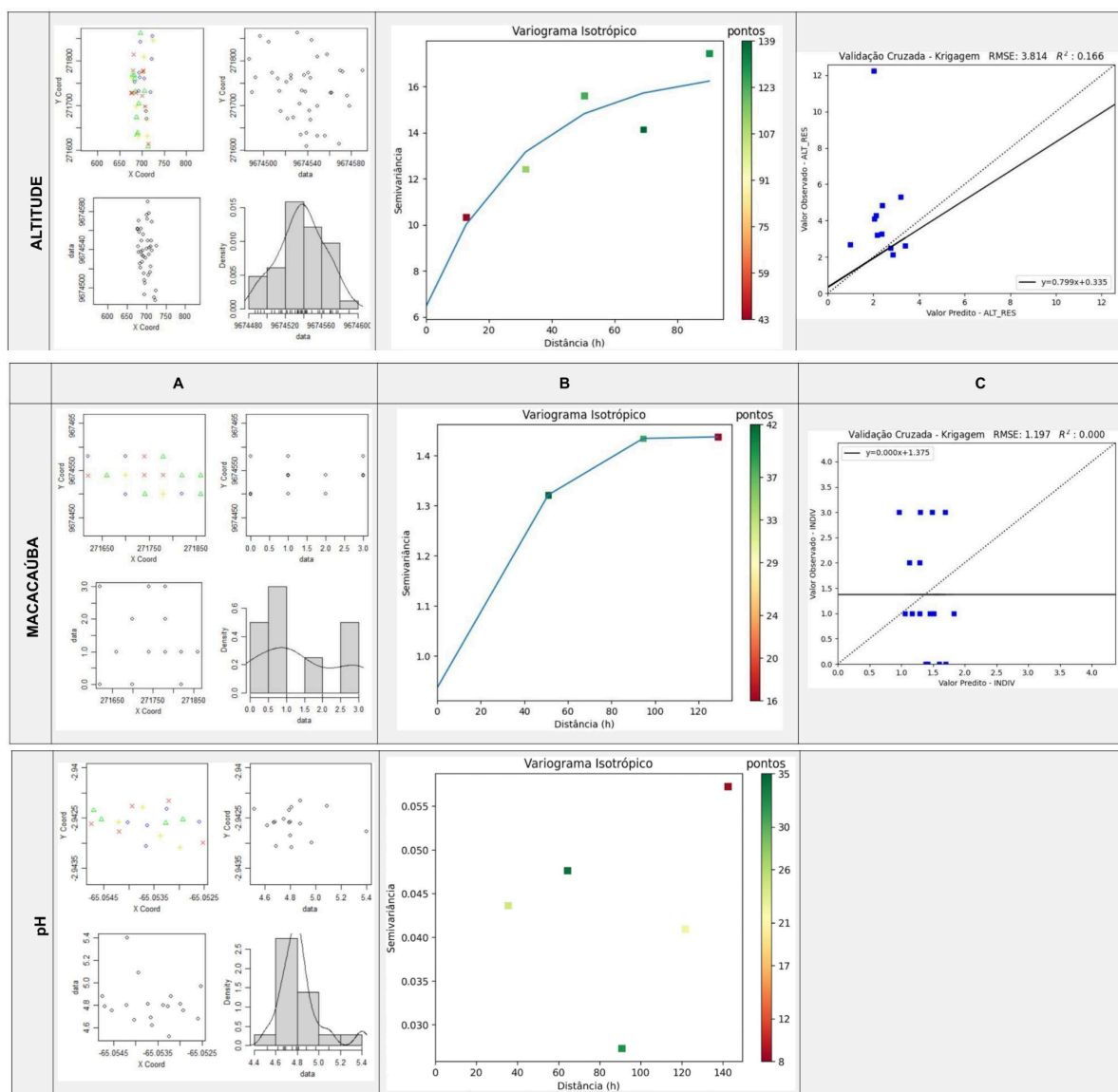


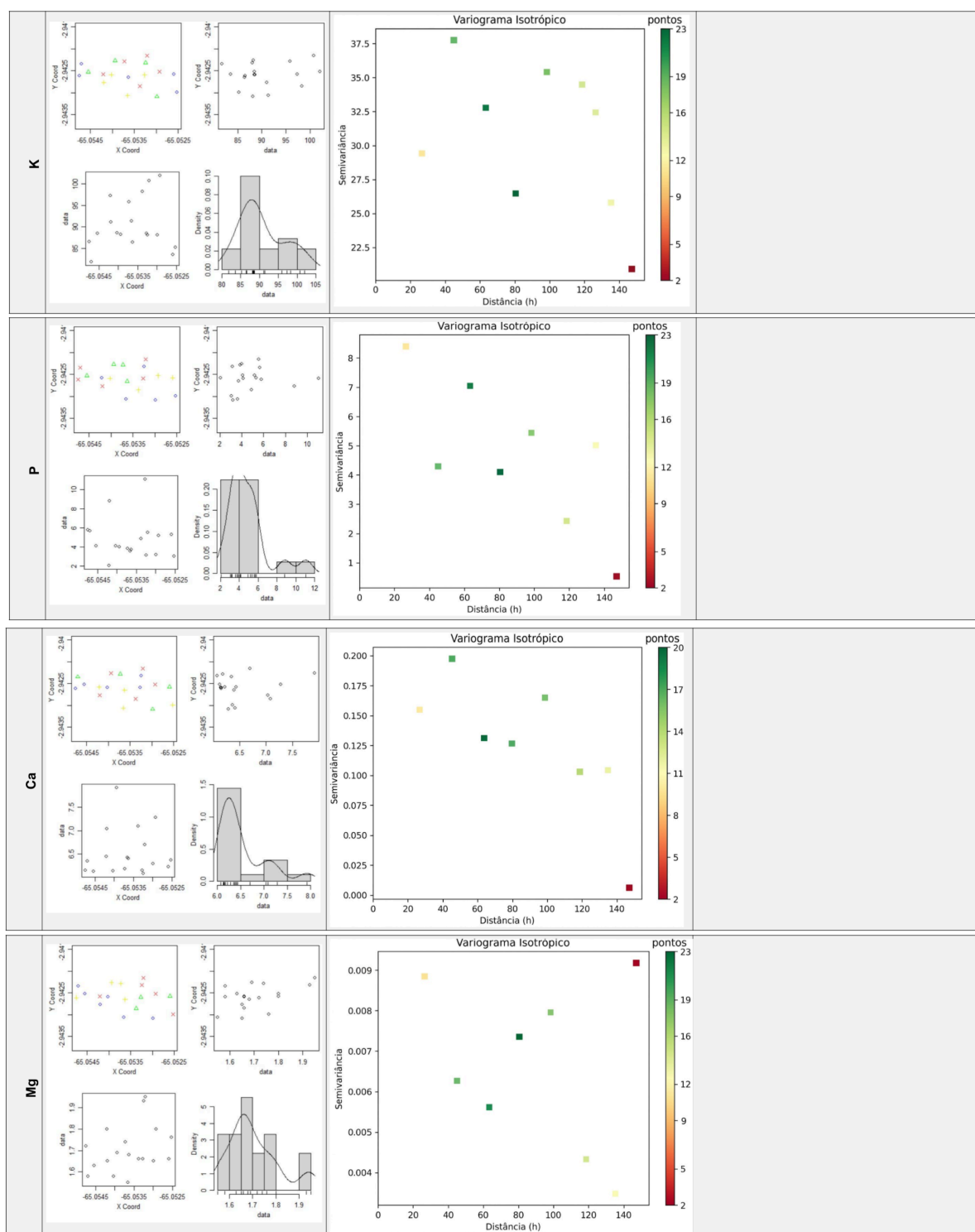


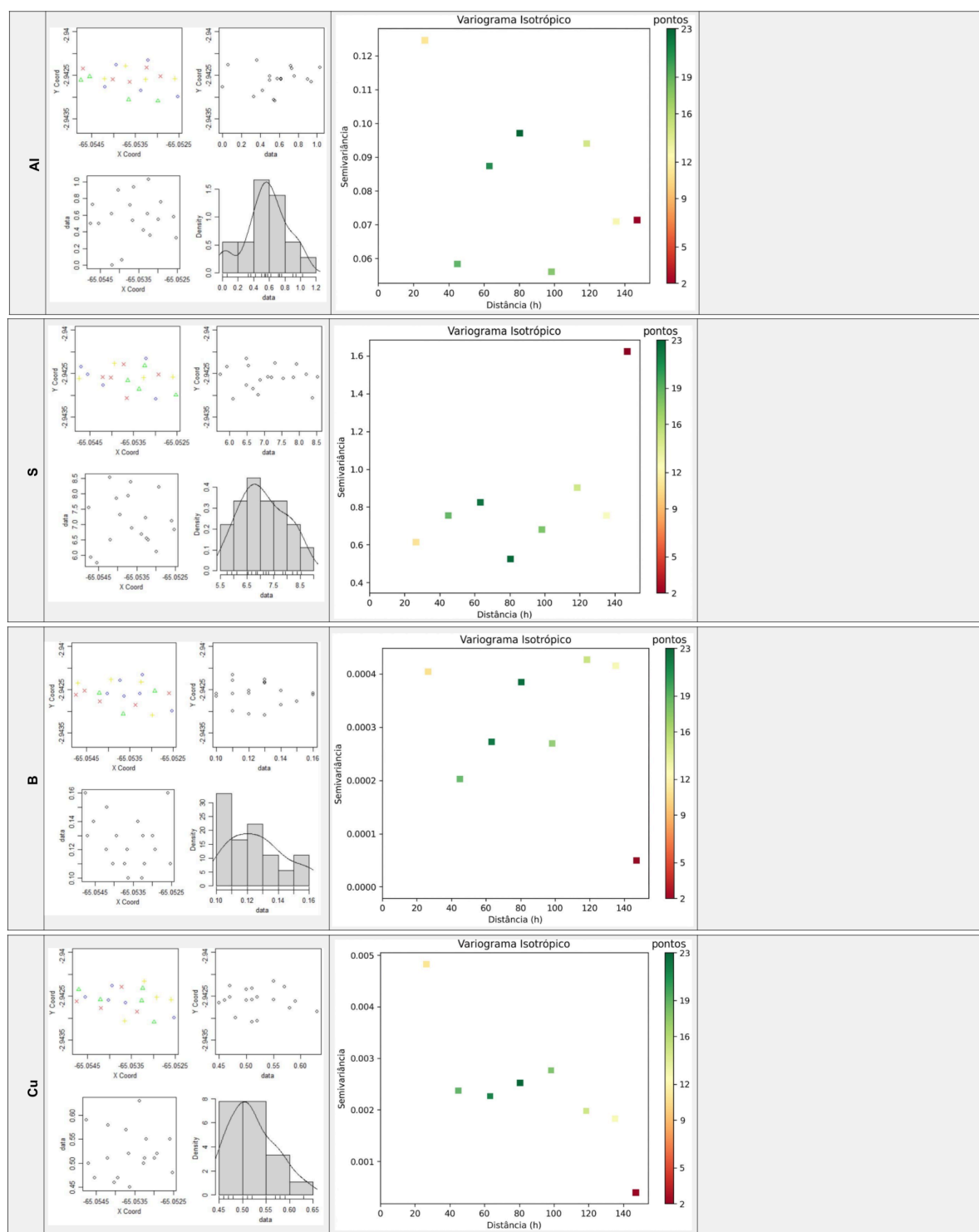


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Figura 5 - Análise de variabilidade espacial de *Platymiscium ulei* Harms da população 2 — (A) Estatística descritiva: gráfico de dispersão e barras; (B) Semivariograma; (C) Validação cruzada

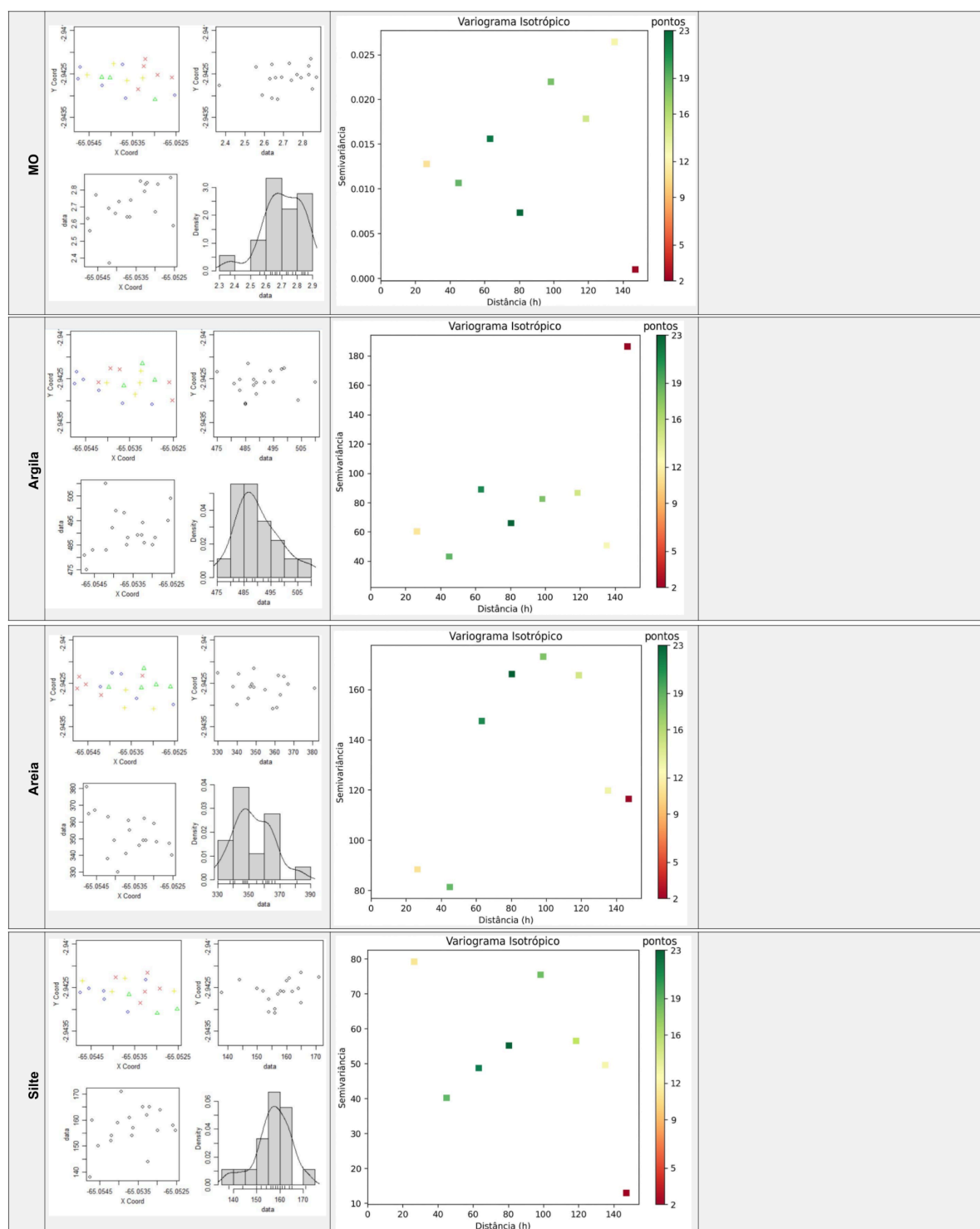








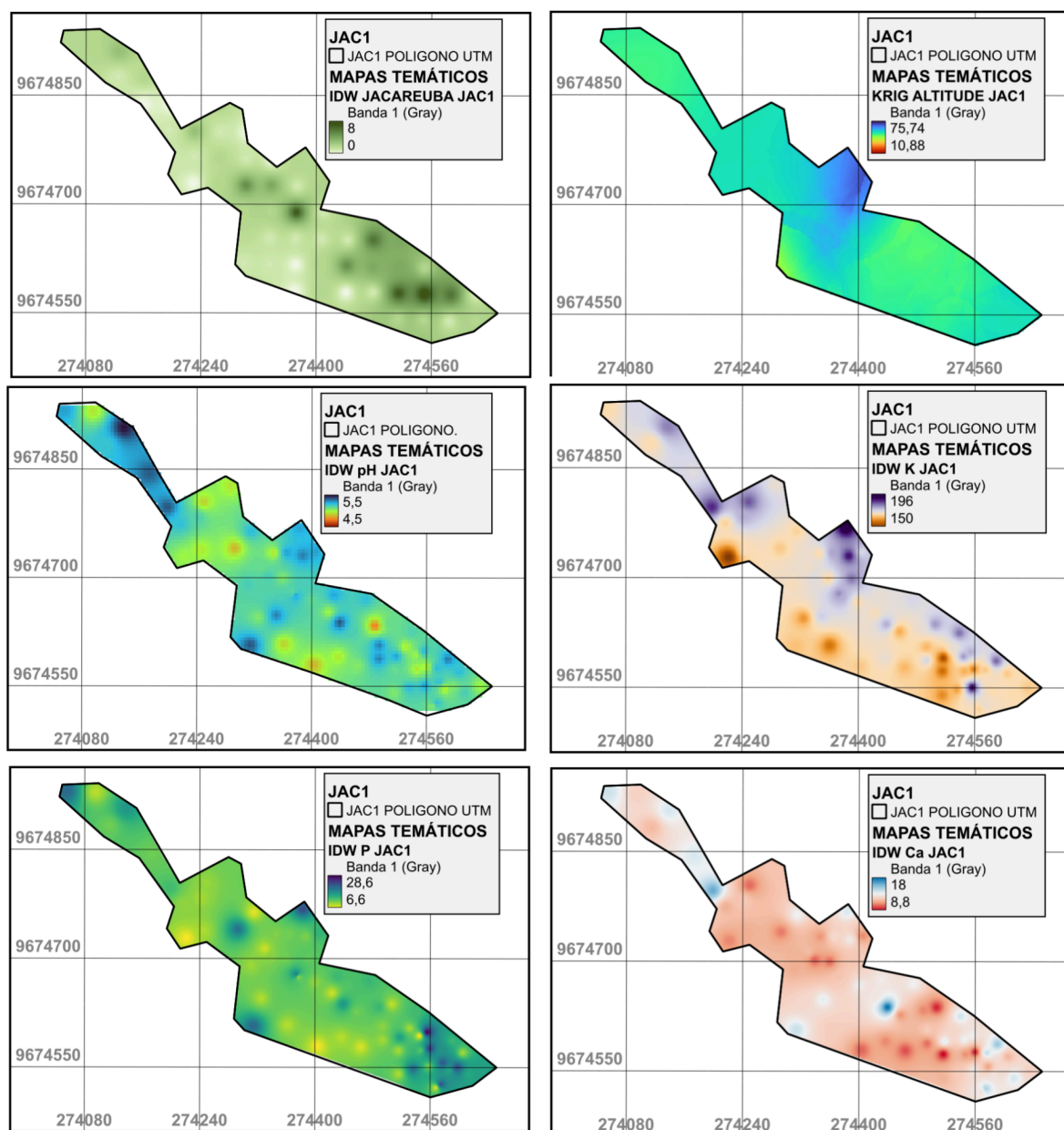


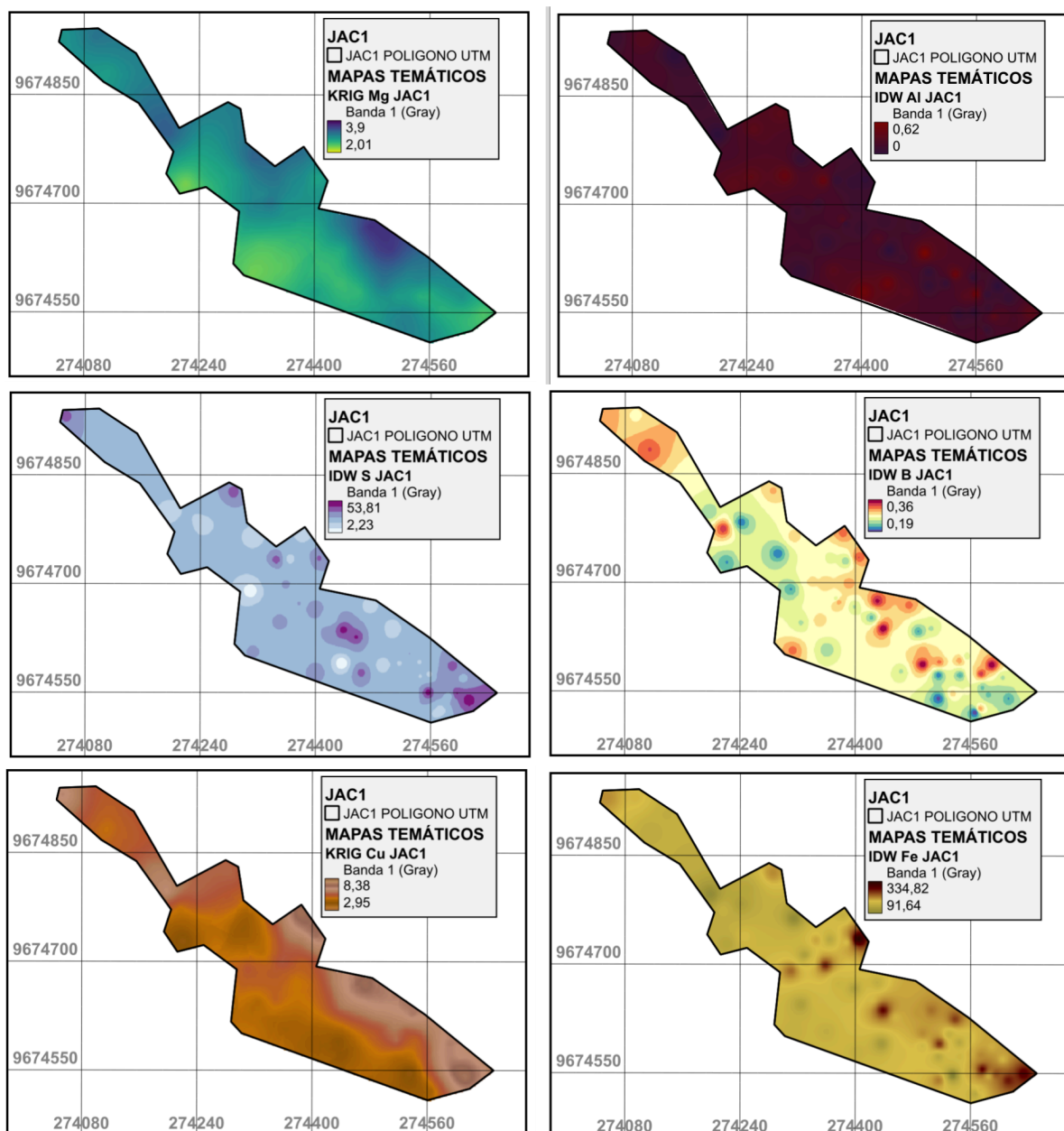


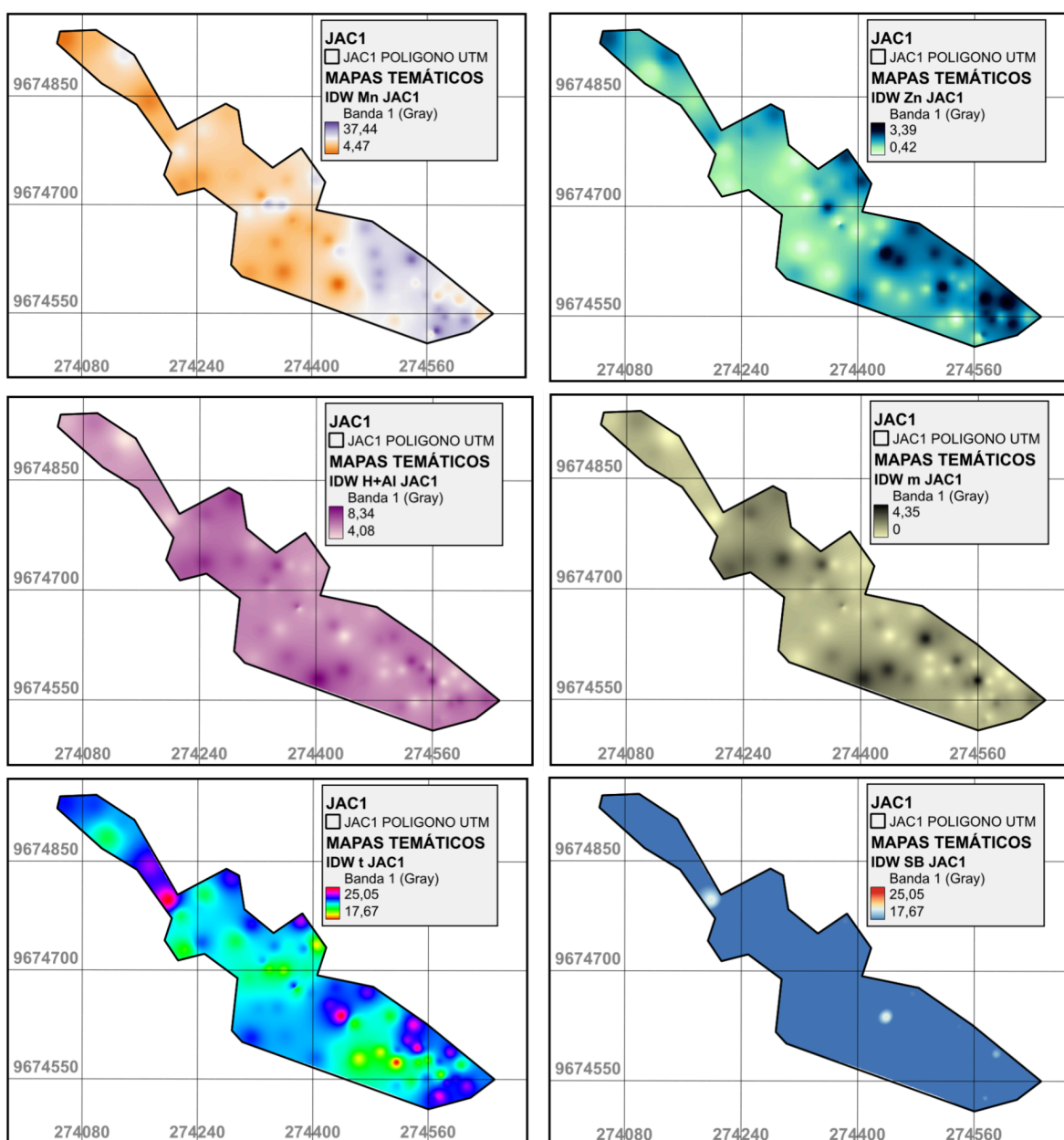
Fonte: Dados da pesquisa (2026).

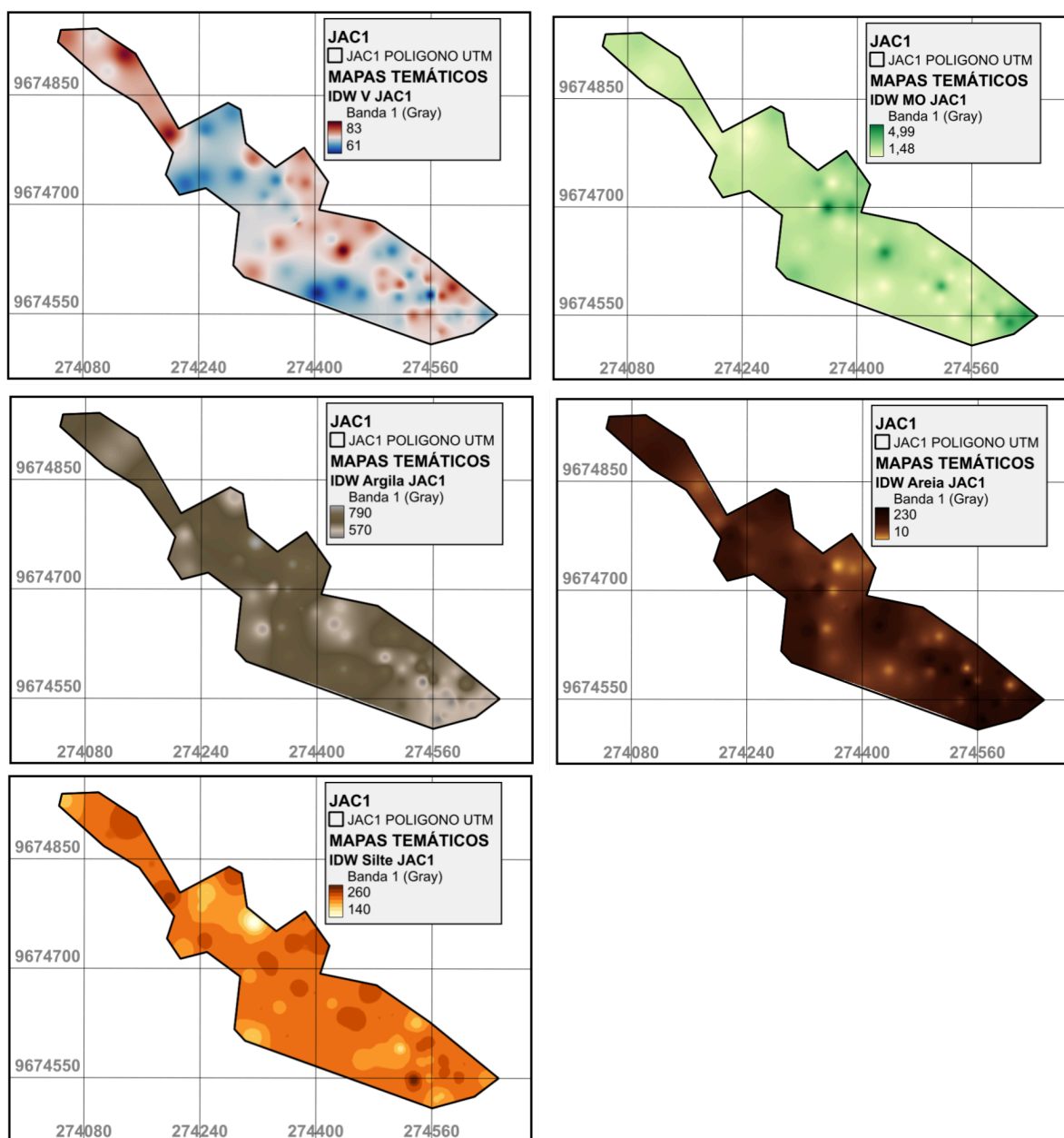
APÊNDICE B - Interpolação e distribuição espacial das variáveis

Figura 1 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de *Calophyllum brasiliense* Cambess. e dos fatores ambientais na população 1, Médio Solimões-AM



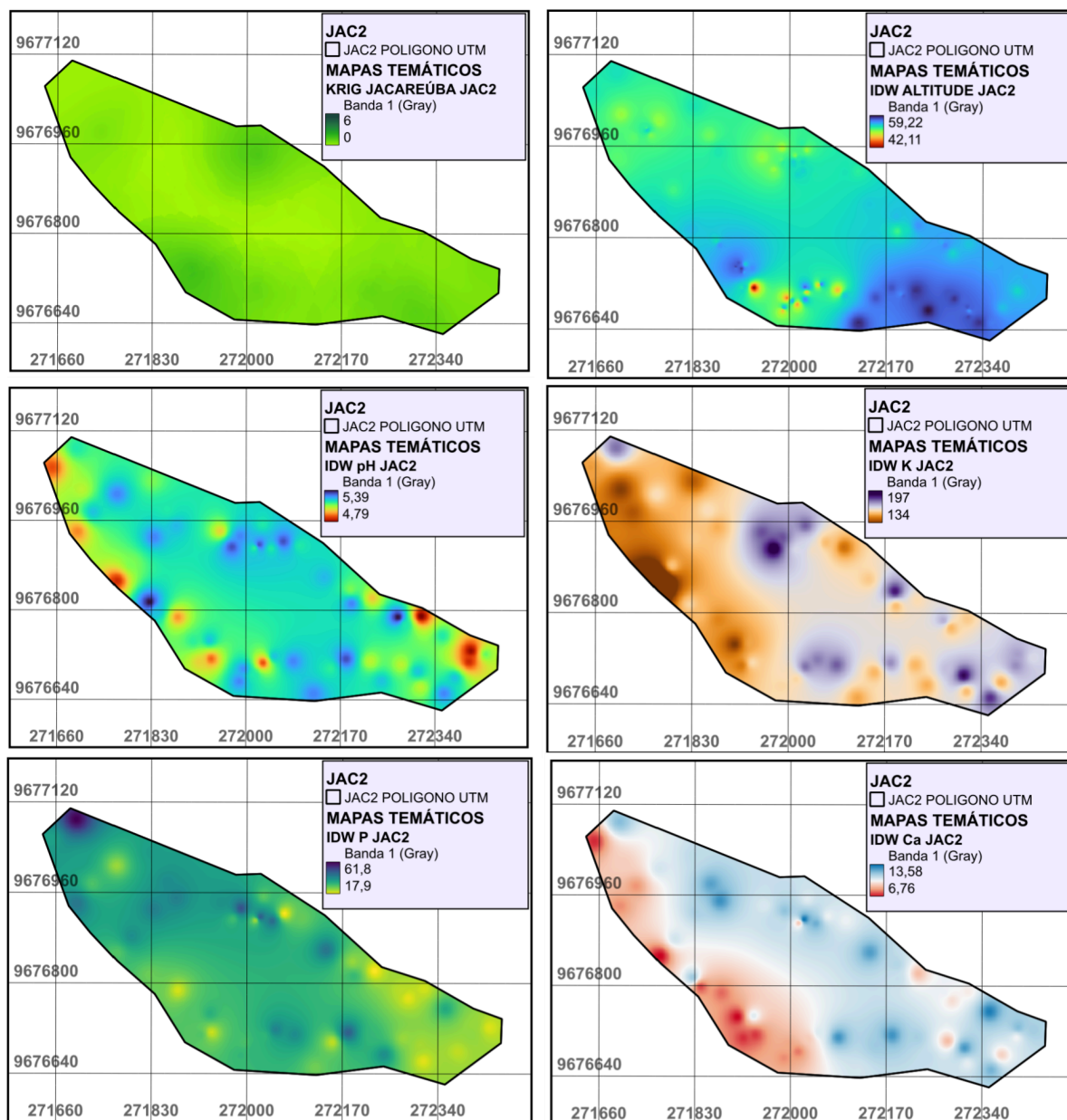


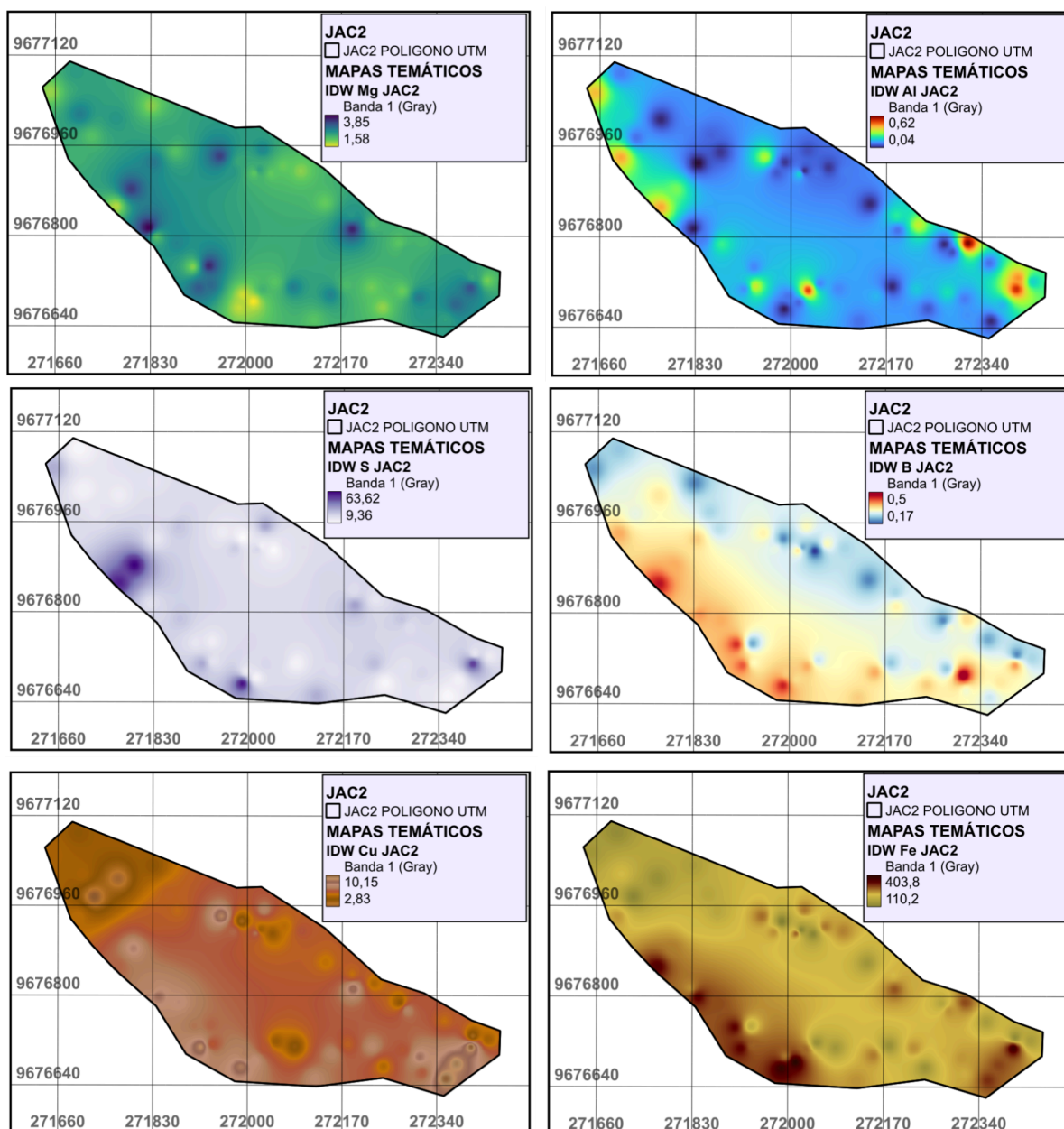


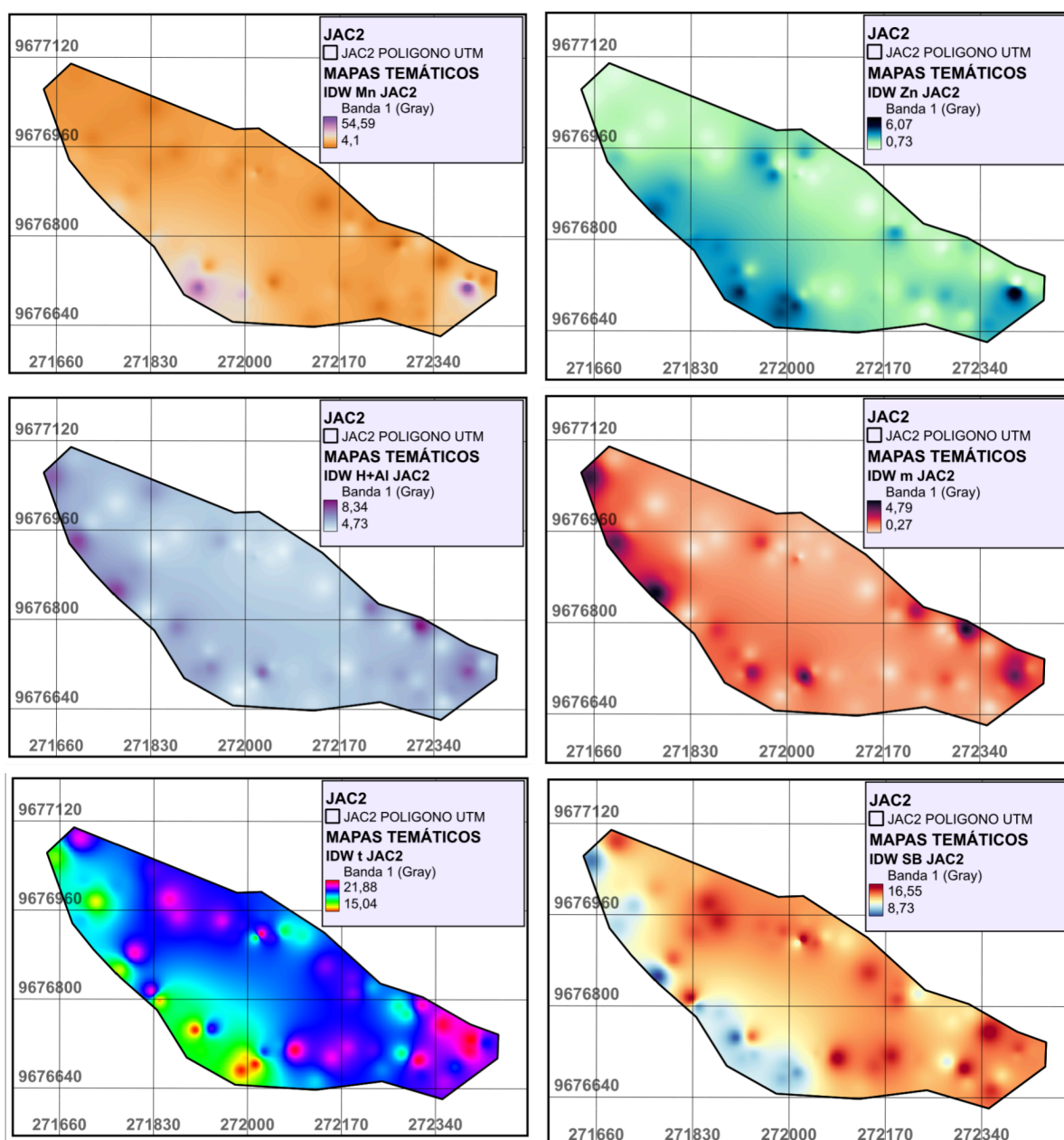


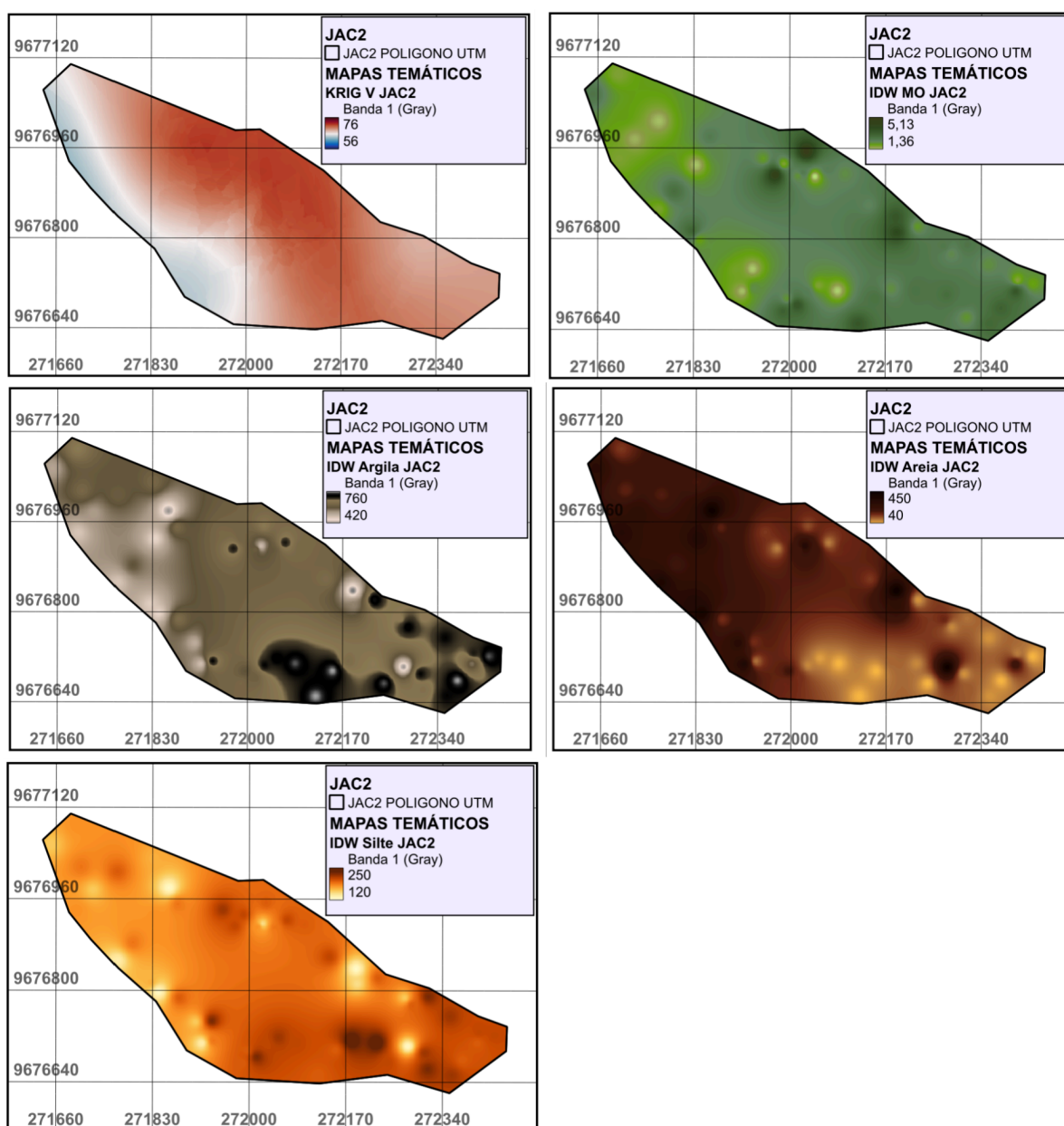
Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 2 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de *Calophyllum brasiliense* Cambess. e dos fatores ambientais na população 2, Médio Solimões-AM



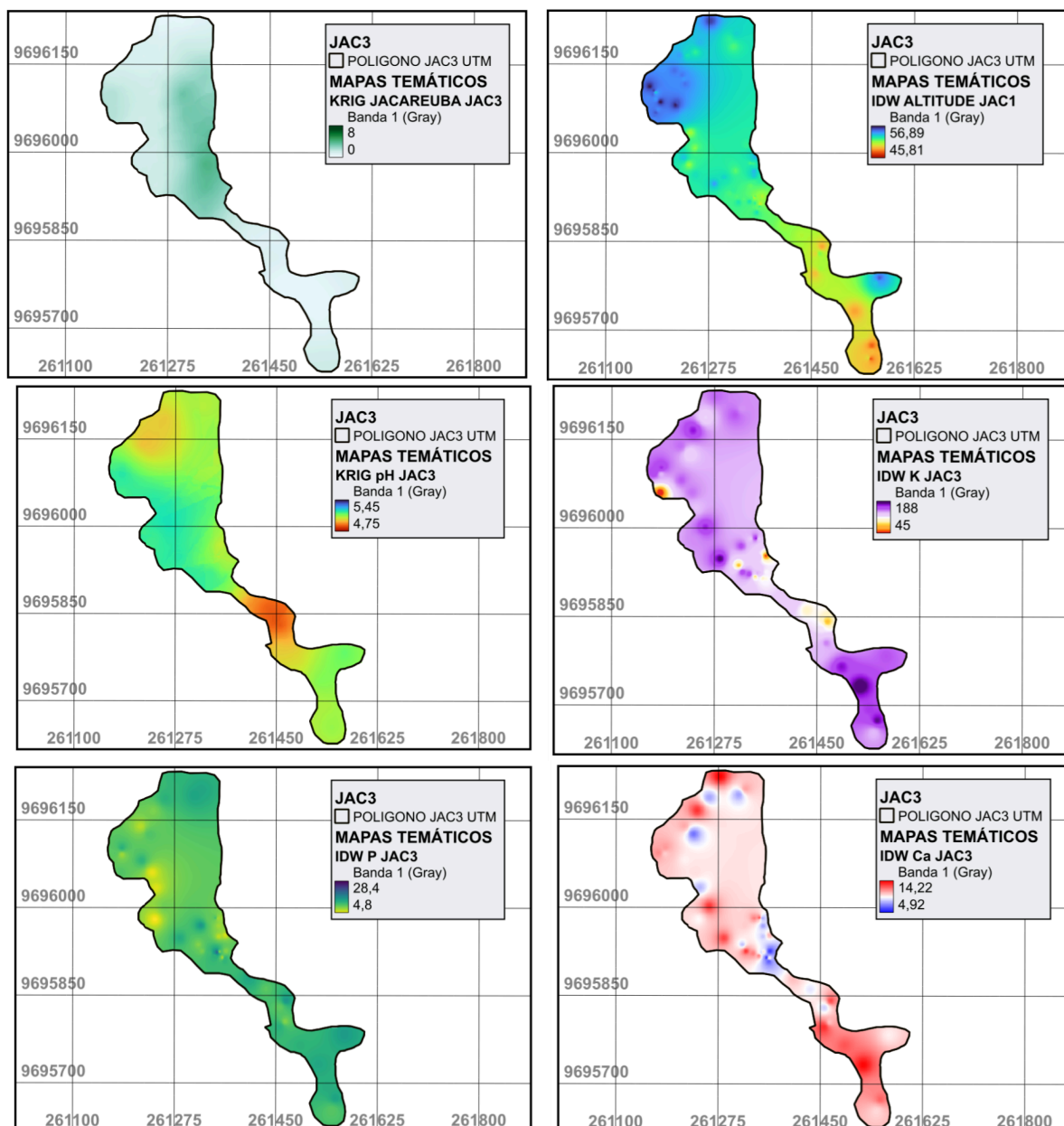


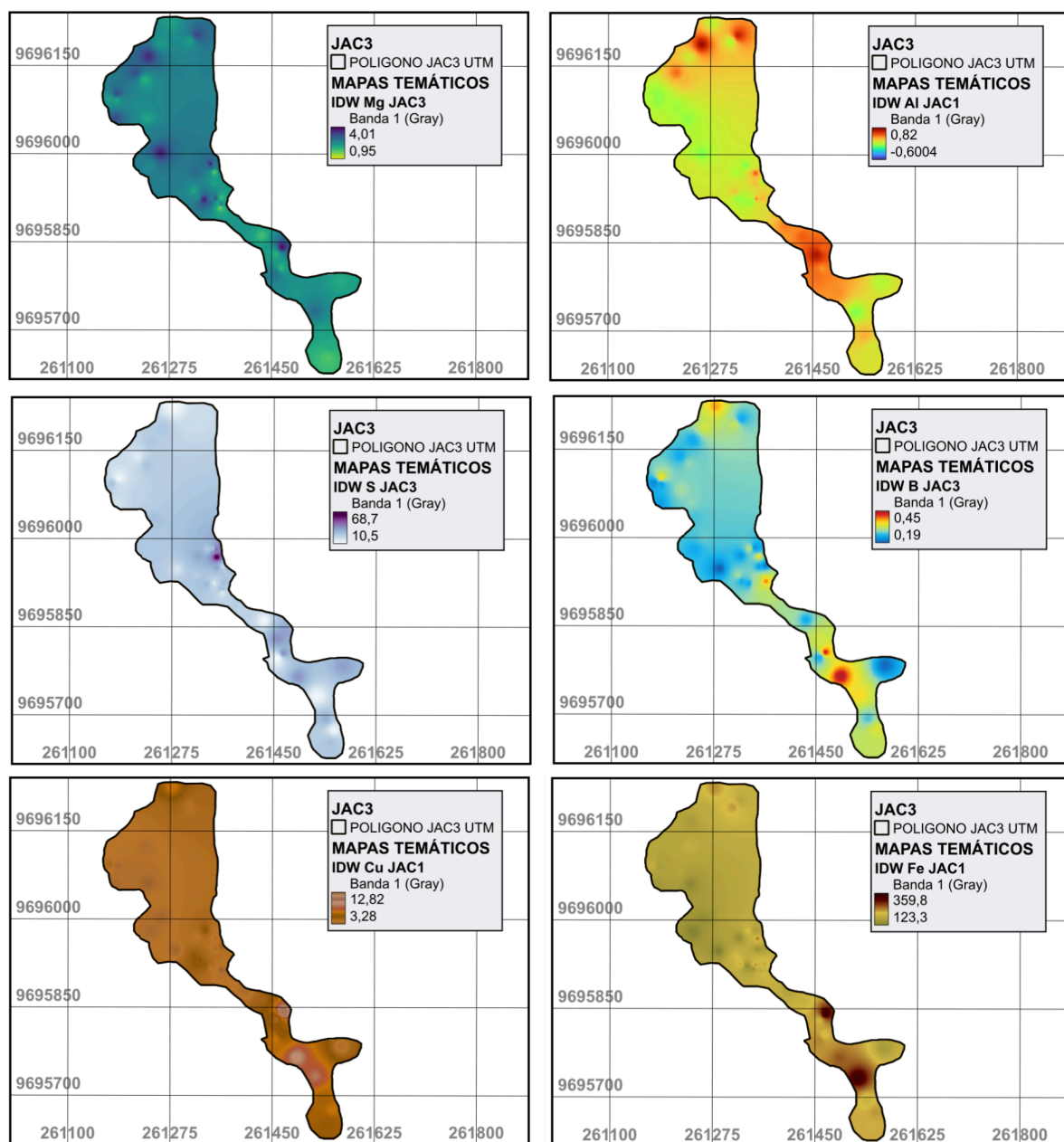


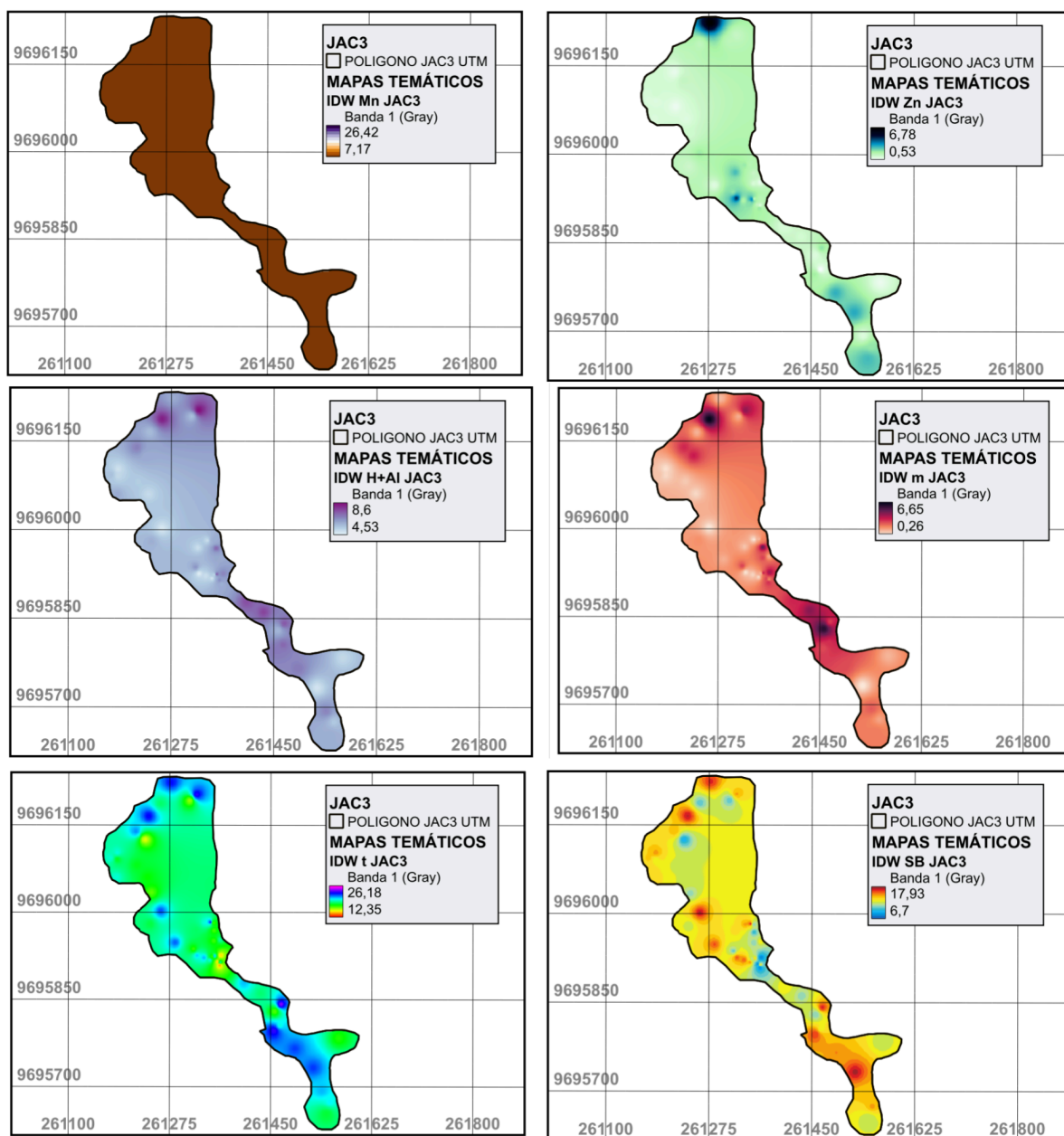


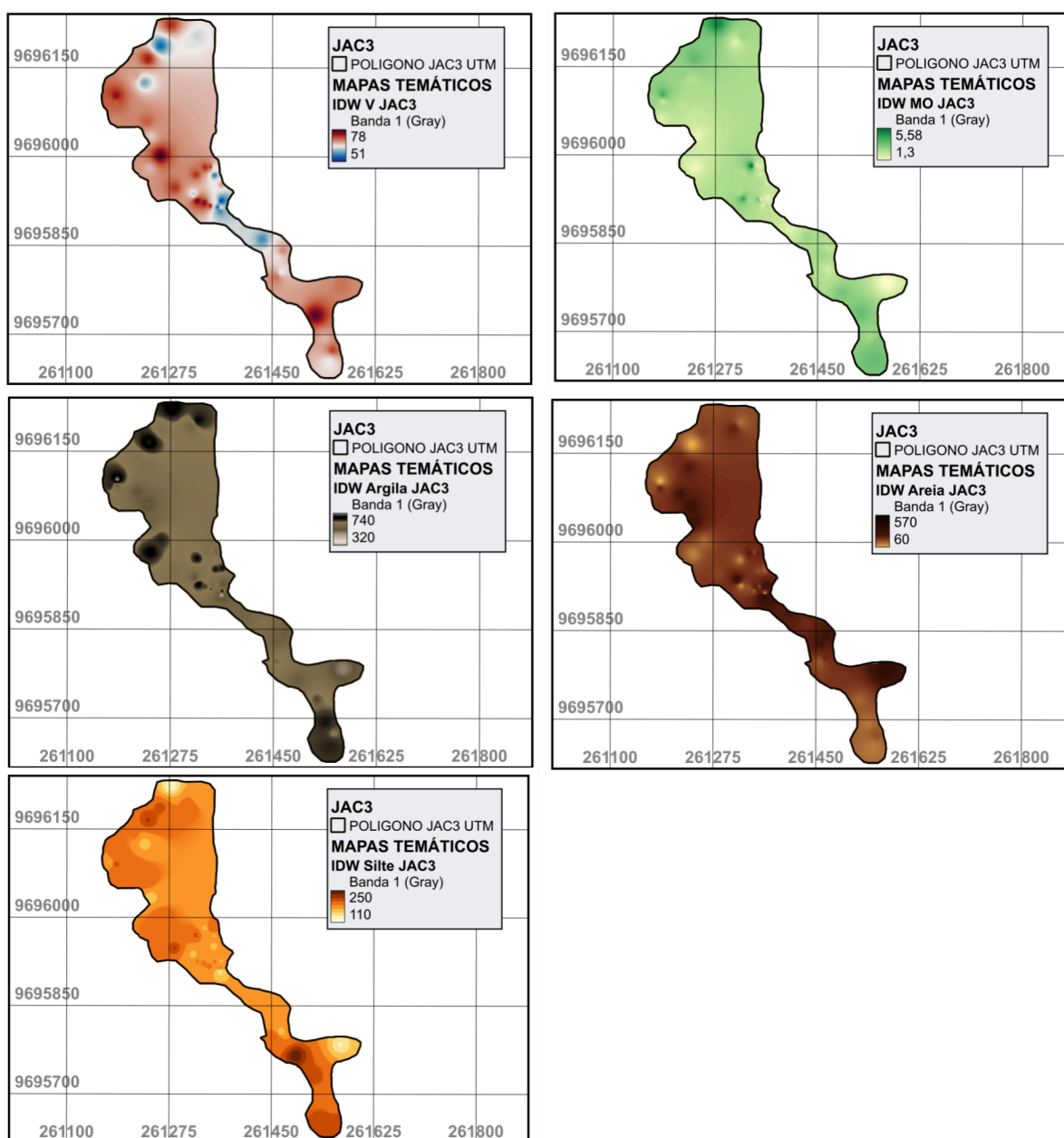
Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 3 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de *Calophyllum brasiliense* Cambess. e dos fatores ambientais na população 3, Médio Solimões-AM



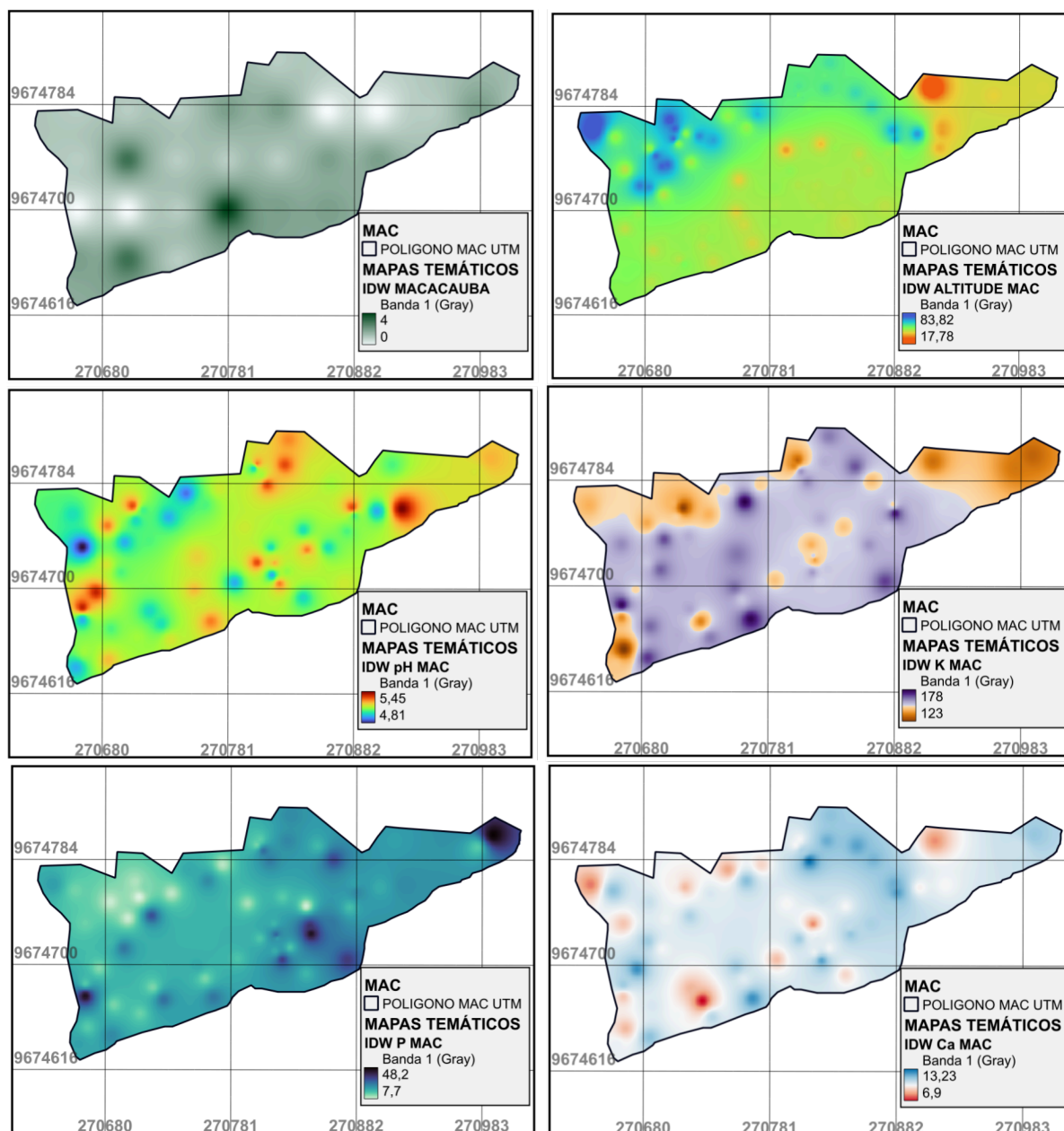


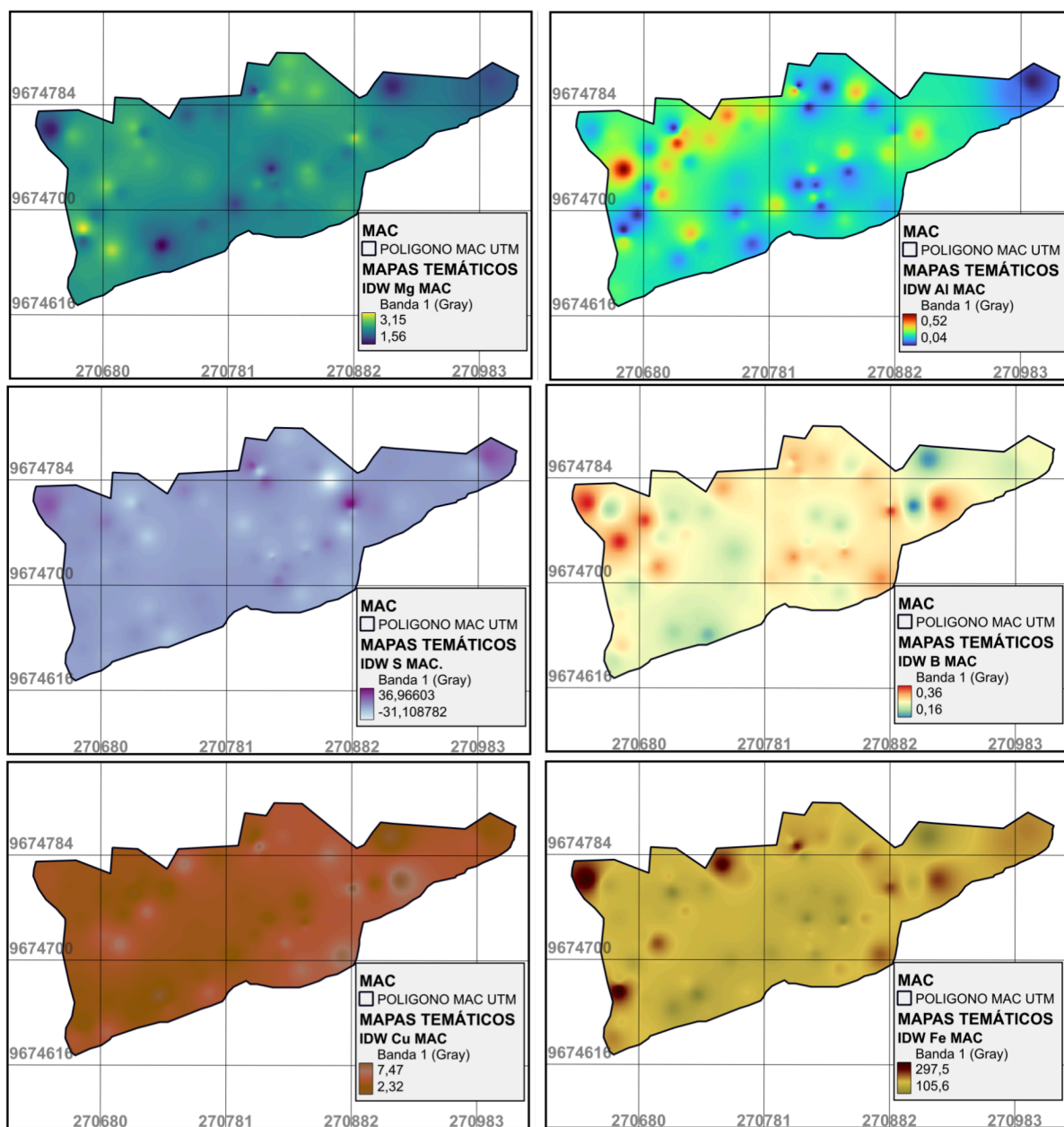


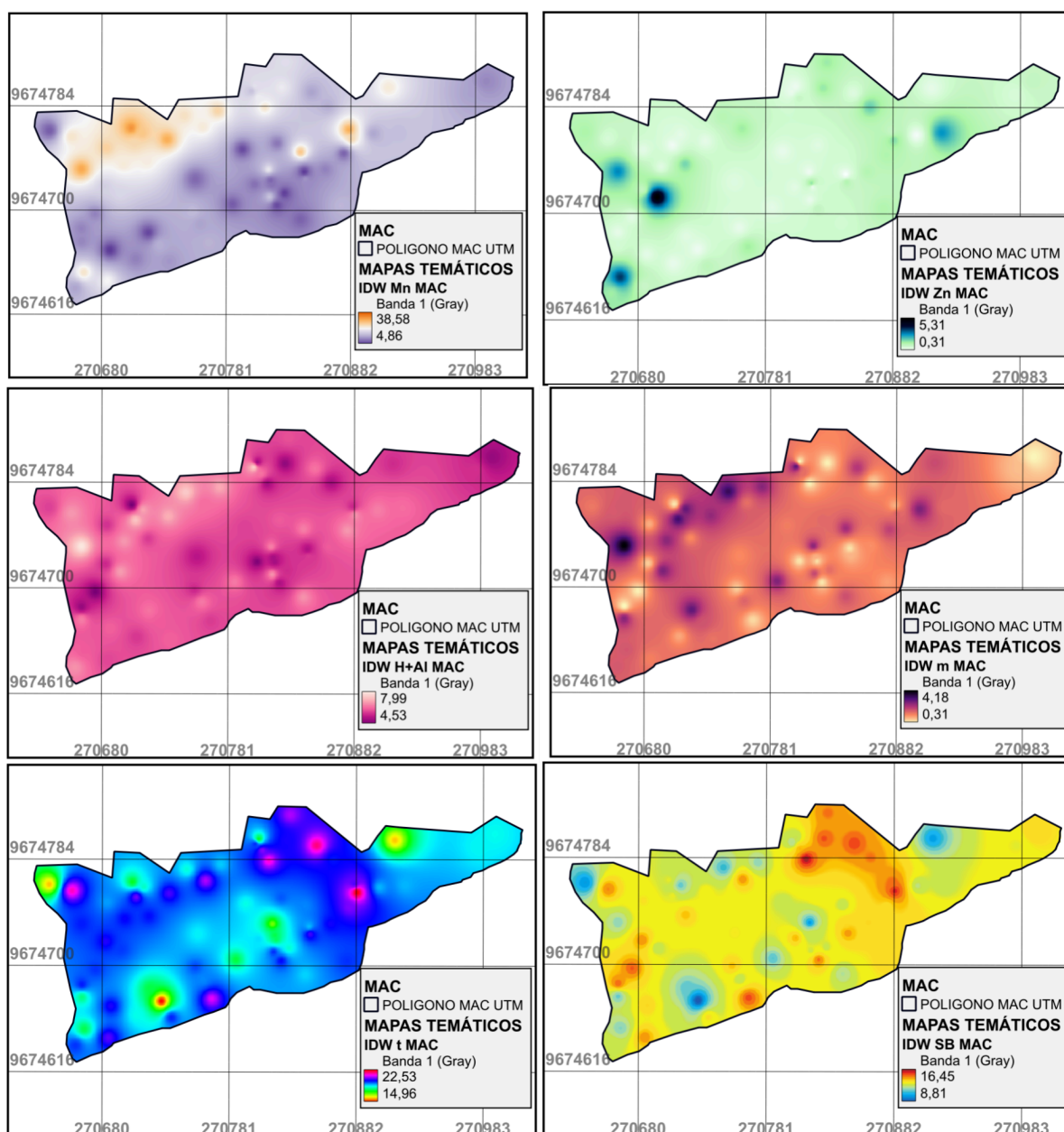


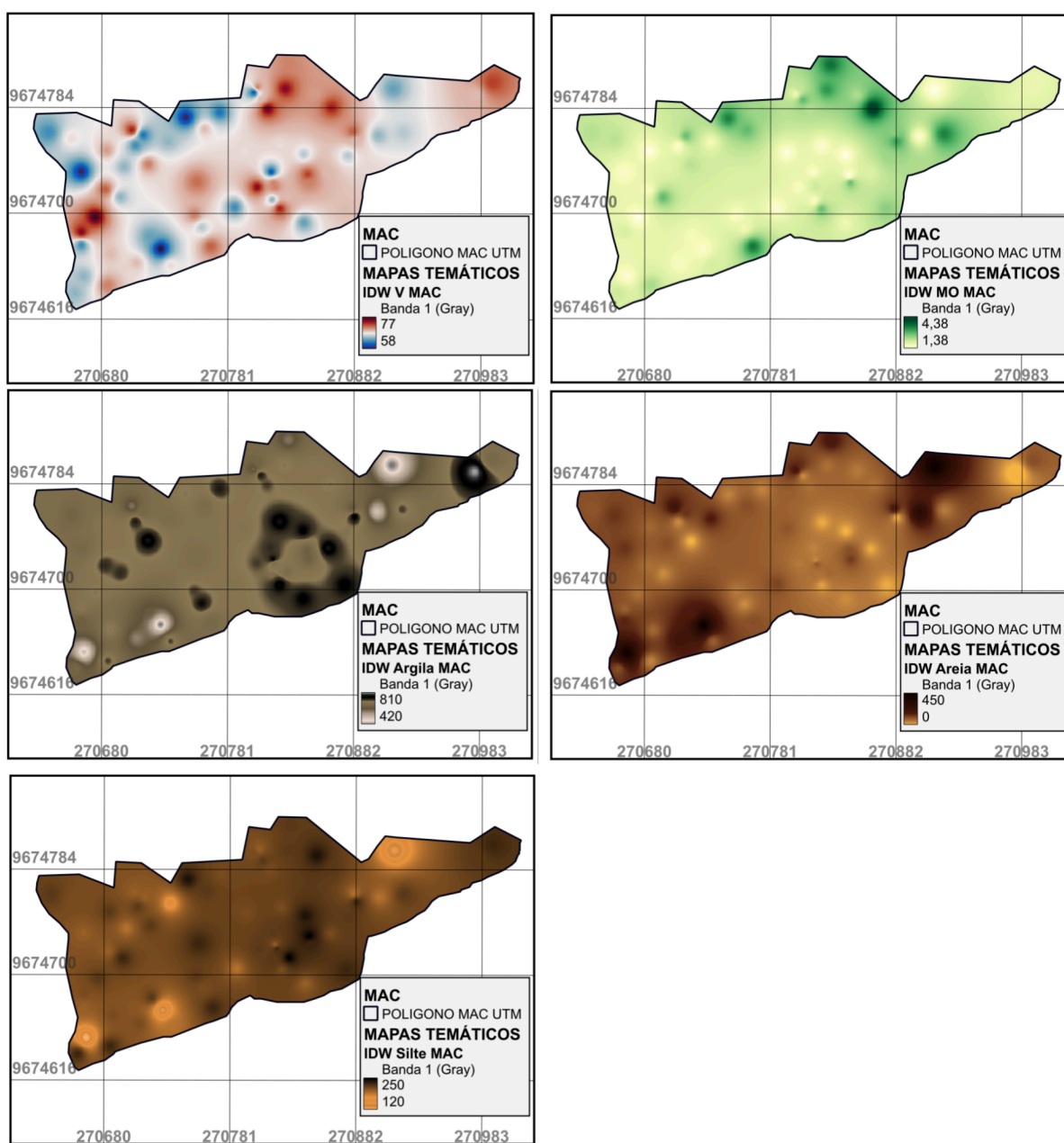
Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 4 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de *Platymiscium ulei* Harms. e dos fatores ambientais na população 1, Médio Solimões-AM



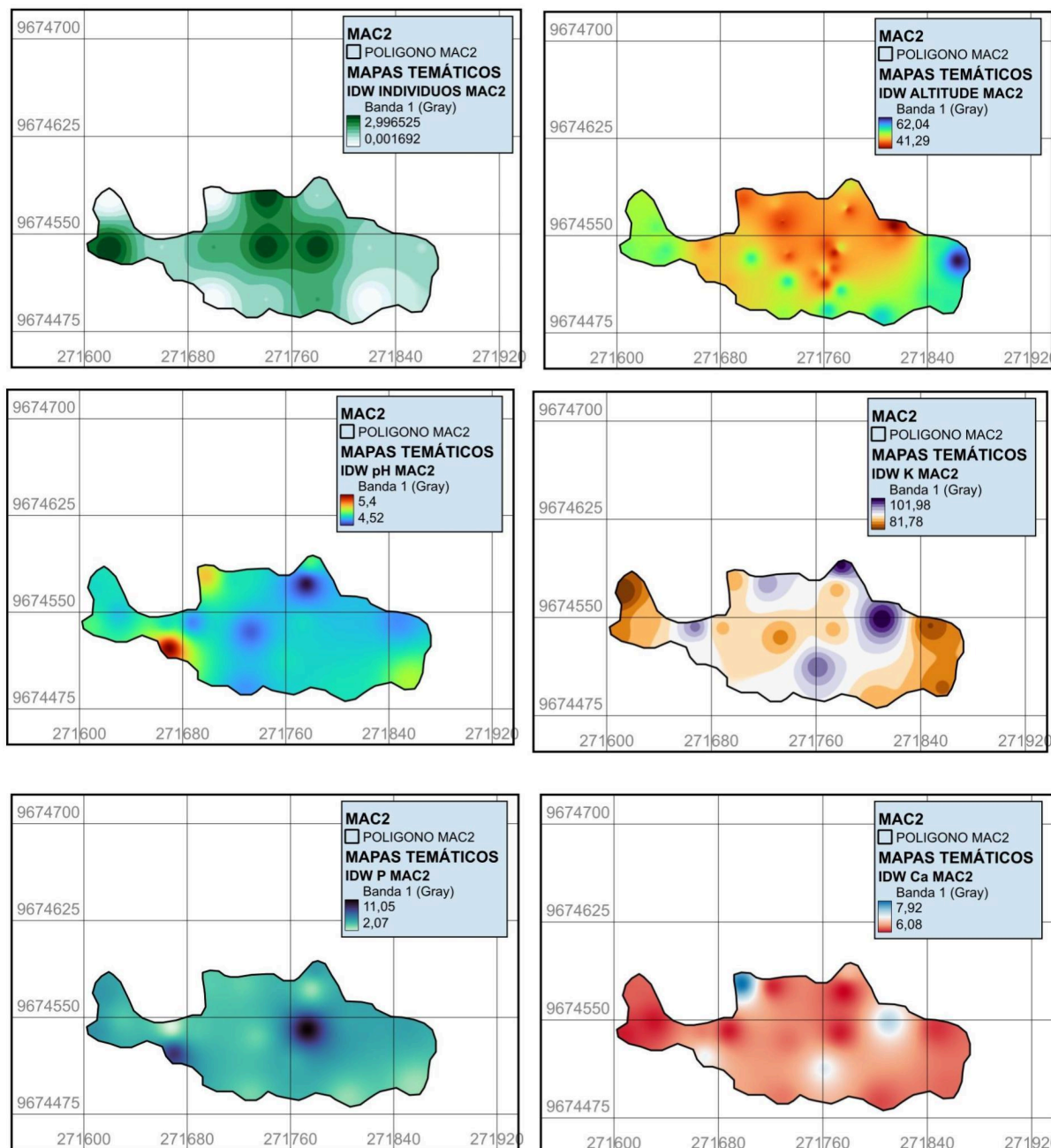


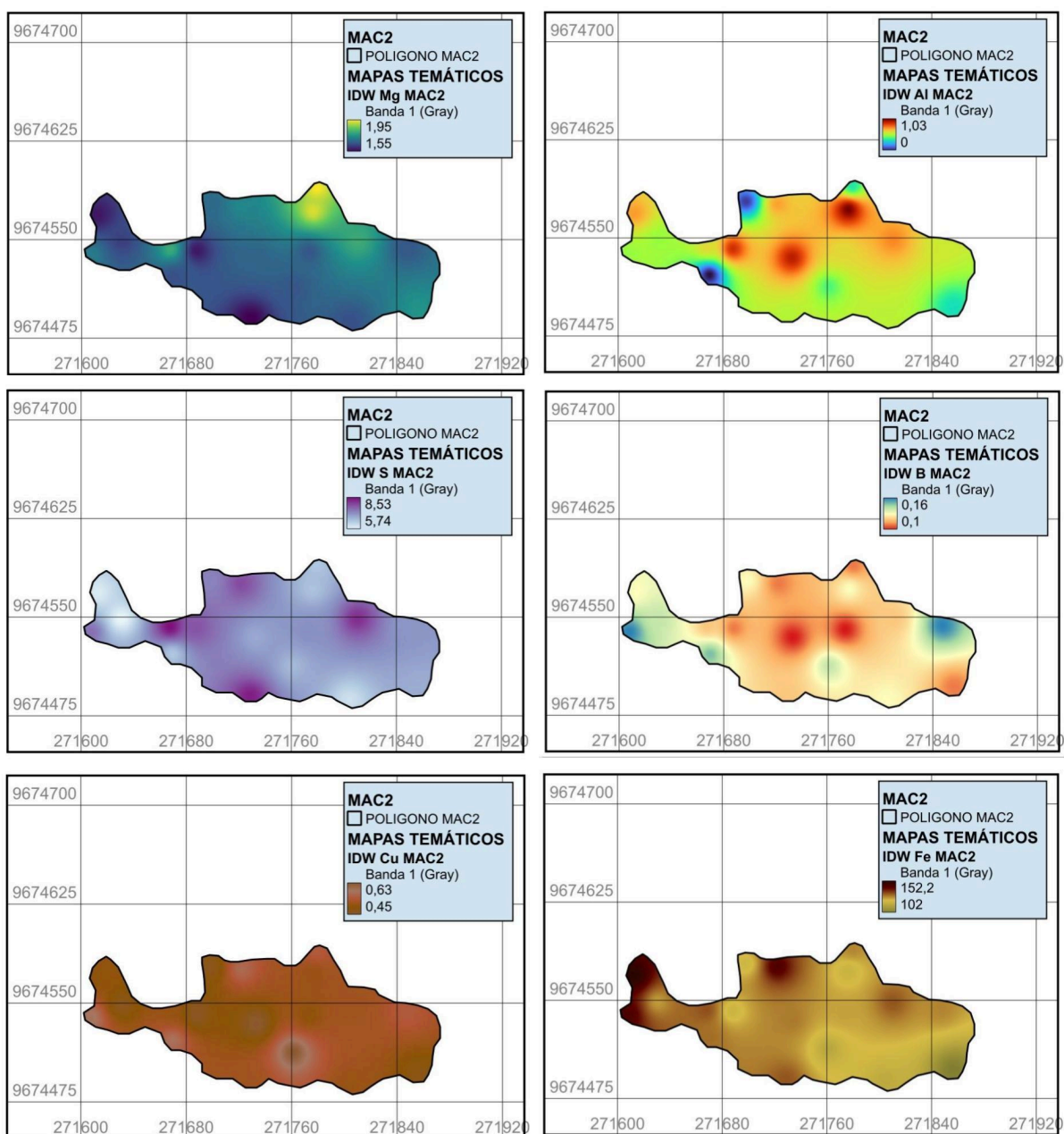


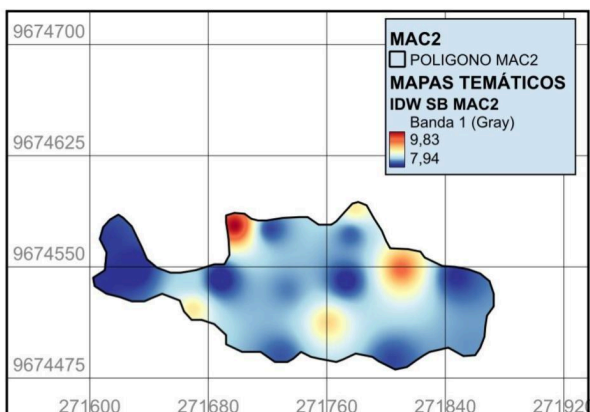
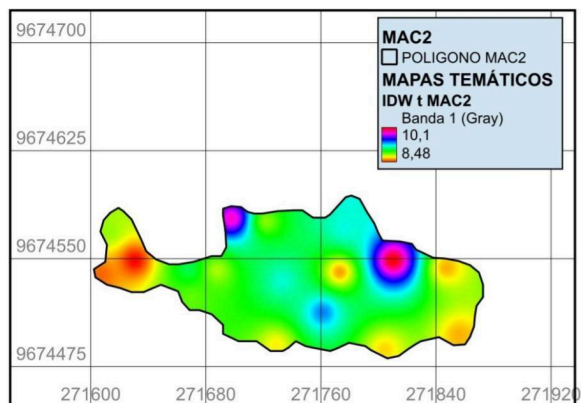
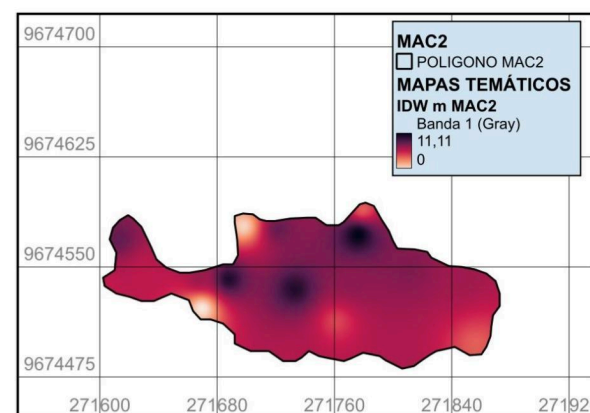
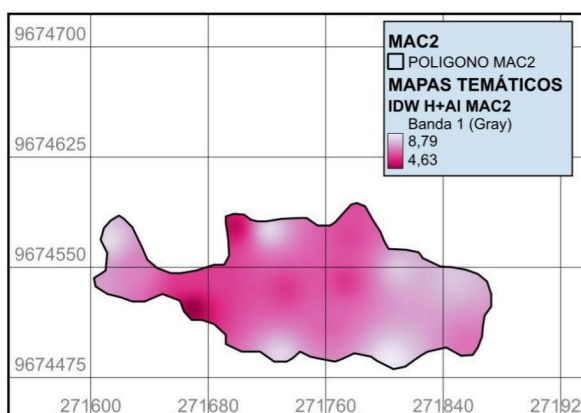
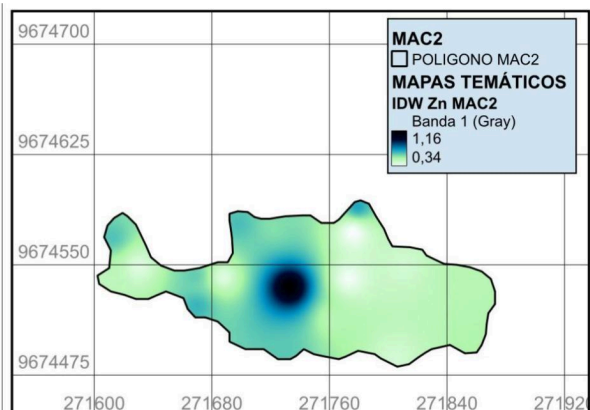
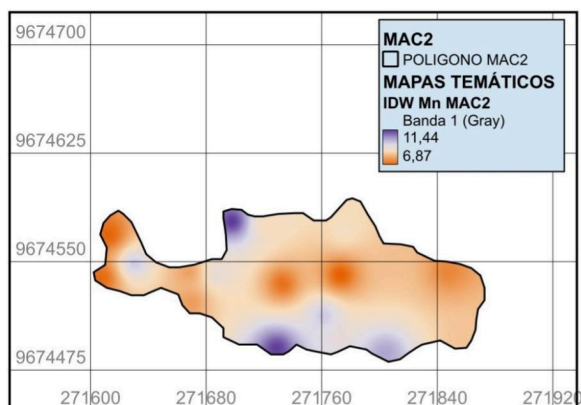


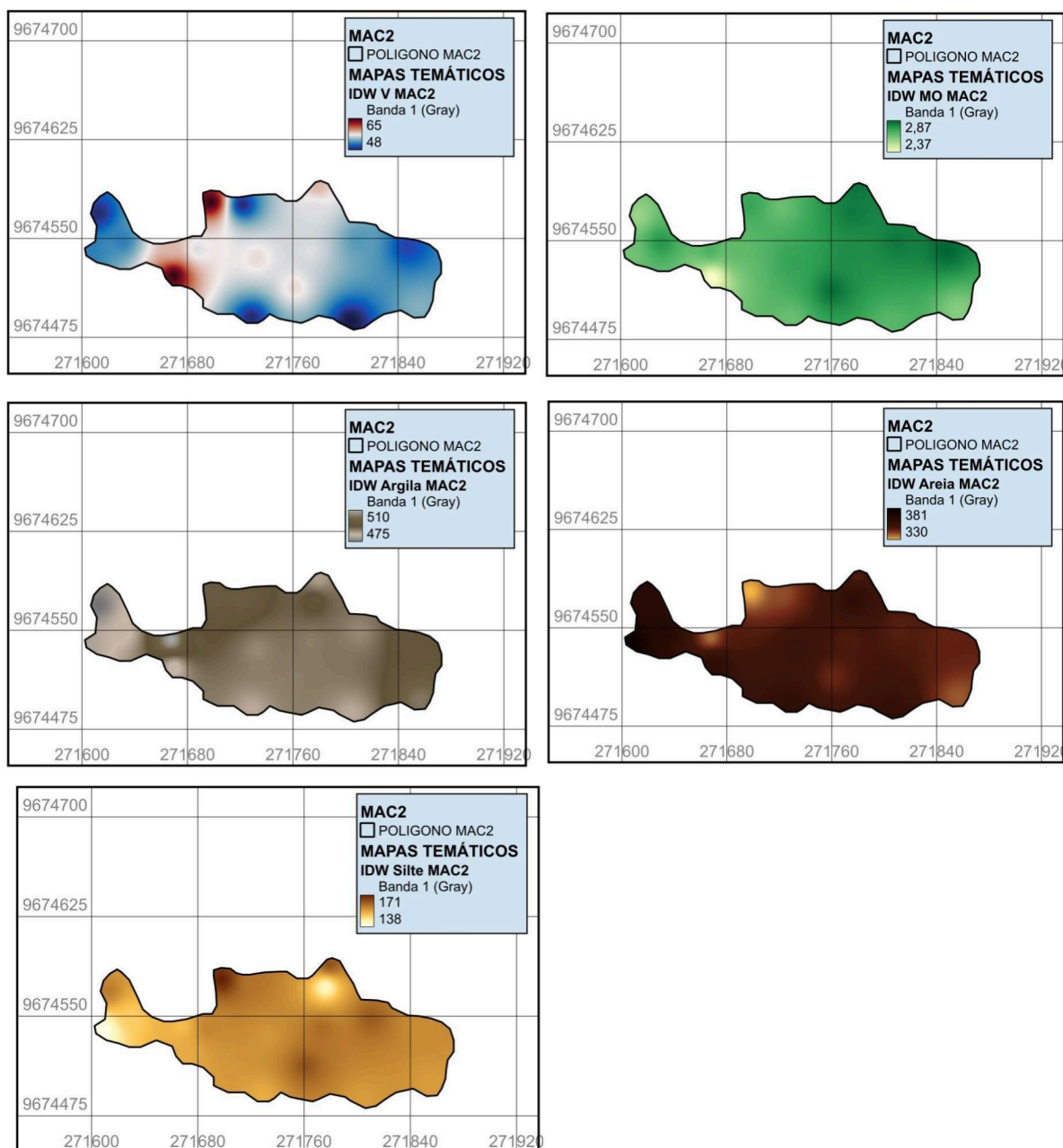
Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 5 - Distribuição espacial interpolada dos indivíduos de *Platymiscium ulei* Harms. e dos fatores ambientais na população 2, Médio Solimões-AM





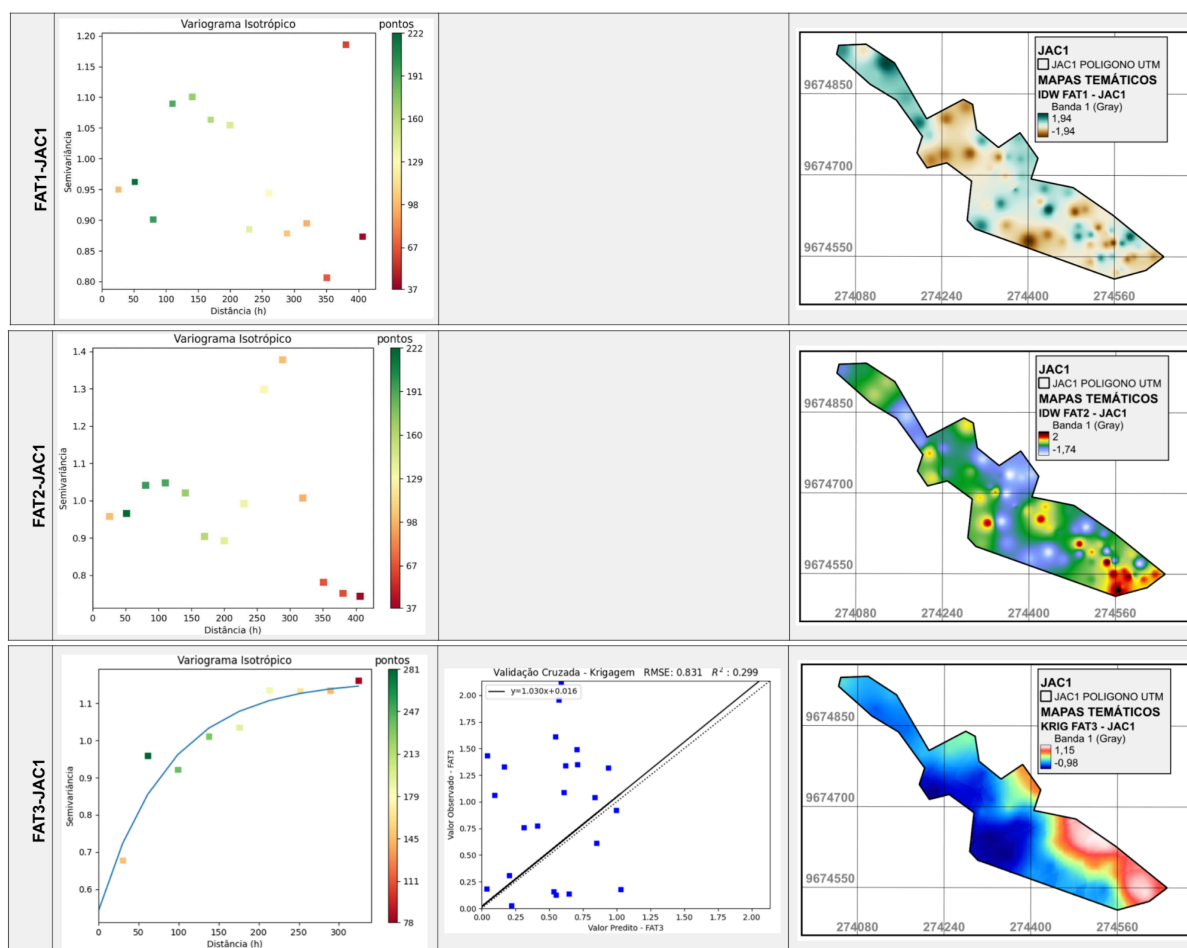




Fonte: Elaborado pela autora (2026)

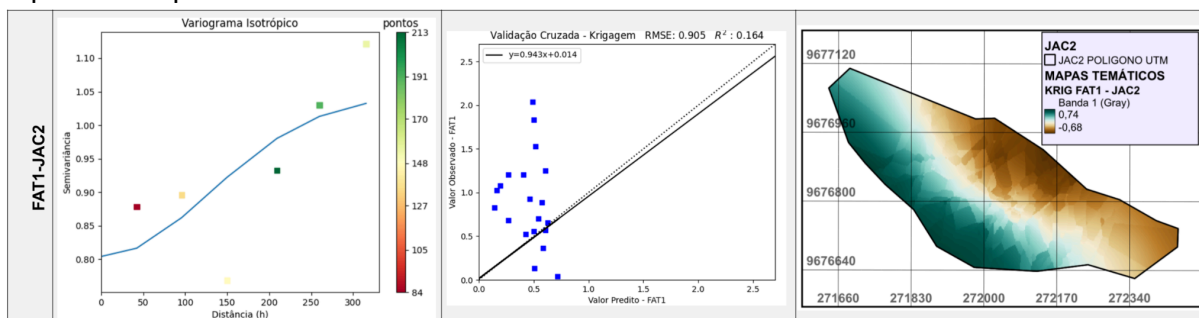
APÊNDICE C - Análise da variabilidade Fatorial

Figura 1 - Análise de variabilidade Fatorial de *Calophyllum brasiliense* Cambess. da população 1 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada.



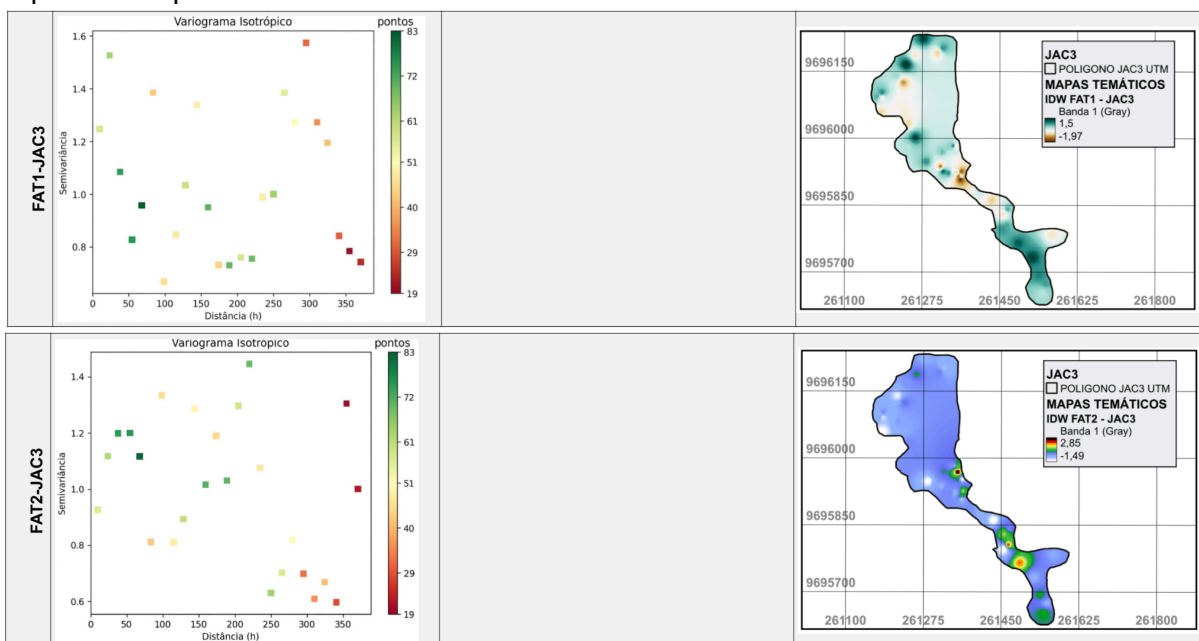
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 2 - Análise de variabilidade Fatorial de *Calophyllum brasiliense* Cambess. da população 2 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada.



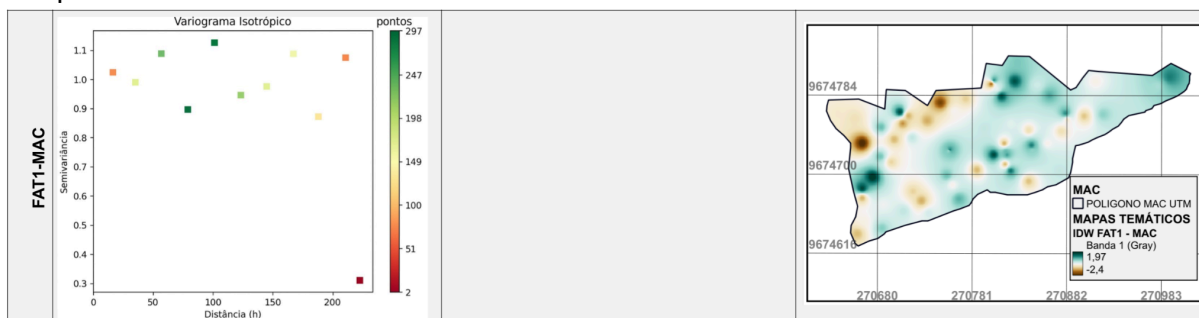
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 3 - Análise de variabilidade Fatorial de *Calophyllum brasiliense* Cambess. da população 3 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 4 - Análise de variabilidade Fatorial de *Platymiscium ulei* Harms. da população 1 — (A) Semivariograma; (B) Validação cruzada; (C) Mapa temático: distribuição espacial interpolada



Fonte: Dados da pesquisa (2024)