

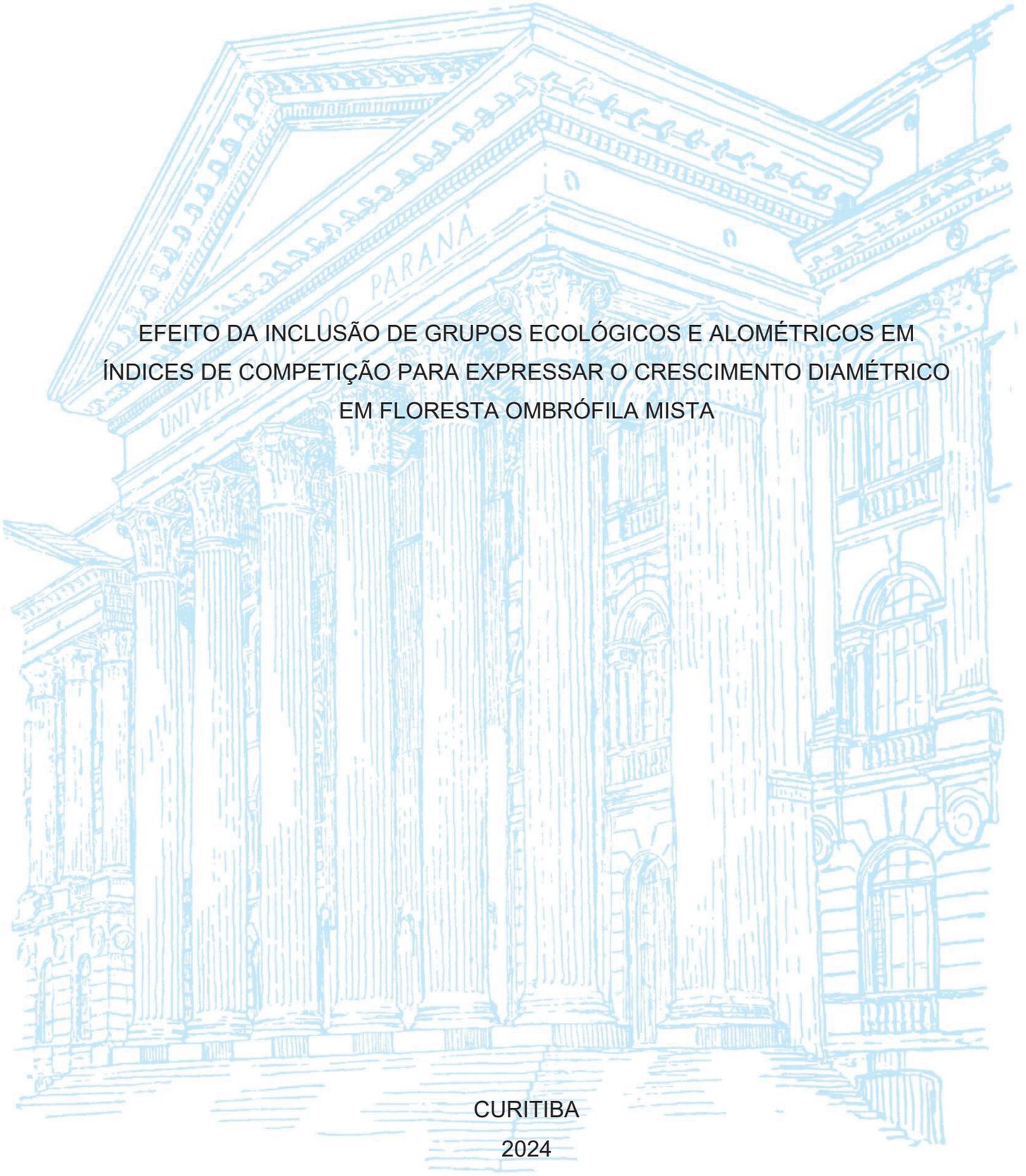
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL AGOSTINI ORSO

EFEITO DA INCLUSÃO DE GRUPOS ECOLÓGICOS E ALOMÉTRICOS EM  
ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA EXPRESSAR O CRESCIMENTO DIAMÉTRICO  
EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

CURITIBA

2024



GABRIEL AGOSTINI ORSO

EFEITOS DA INCLUSÃO DE GRUPOS ECOLÓGICOS E ALOMÉTRICOS EM  
ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA EXPRESSAR O CRESCIMENTO DIAMÉTRICO  
EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari  
Coorientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

CURITIBA

2024

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Orso, Gabriel Agostini

Efeito da inclusão de grupos ecológicos e alométricos em índices de competição para expressar o crescimento diamétrico em floresta ombrófila mista / Gabriel Agostini Orso. - Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientadores: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 14/03/2024. Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Árvores - Crescimento. 2. Árvores - Medição. 3. Florestas – Manejo. 4. Florestas tropicais. 5. Competição (Biologia). I. Machado, Sebastião do Amaral. II. Pelissari, Allan Libanio. III. Figueiredo Filho, Afonso. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.52

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **GABRIEL AGOSTINI ORSO** intitulada: **GRUPOS ECOLÓGICOS E ALOMÉTRICOS EM ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA EXPRESSAR O CRESCIMENTO DIAMÉTRICO EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**, sob orientação do Prof. Dr. SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Março de 2024.

Assinatura Eletrônica

15/03/2024 15:40:36.0

SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/03/2024 18:44:12.0

VINICIUS COSTA CYSNEIROS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

15/03/2024 11:08:35.0

SAULO JORGE TÉO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO OESTE DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

14/03/2024 20:00:11.0

LUCIANO RODRIGO LANSSANOVA

Avaliador Externo (INSTITUTO FED. DE EDUC., CIÊNC. E TECNOLOGIA DE MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica

14/03/2024 17:47:35.0

ANGELO AUGUSTO EBLING

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO)

## AGRADECIMENTOS

É impossível construir uma tese de doutorado sozinho. Além do auxílio profissional, recebemos também apoios de outros tipos, que em um primeiro momento podem não ser tão evidentes. Ser grato por eles é o mínimo que posso fazer.

O primeiro apoio que gostaria de agradecer é o familiar, pois minha família foi a primeira a me apoiar e fornecer amparo durante cada segundo dessa trajetória. Por isso agradeço meus pais Eliana e Adair, agradeço também Cleria, Nicolli e Marcelo.

O segundo amparo é o dos amigos (ou a segunda família) que me acompanharam durante o doutorado. Obrigado aos amigos do laboratório Ornélio, Aninha e Jimmy. Agradeço aos amigos que não mediram esforços nos campos do doutorado, além de terem feito parte importante da minha vida: Ageu, Clebson, Thiago, Manu, Kyvia, Antonio, Fran e Brown. Os três últimos também agradeço a amizade e carinho incomparável que recebi.

Gostaria também de agradecer imensamente Ivana, João, Raqui, Lucas, Cícero, Lore, Theo, Augusto, Dai, Leo e Dani por me permitirem fazer parte desse grupo maravilhoso de amigos, os quais tenho a certeza de poder contar para o resto da minha vida. Ao João, tenho especial agradecimento por poder dizer que é um irmão que o doutorado me deu, e sou muito feliz de que nossos caminhos tenham se encontrado. À Ivana dedico toda minha admiração e carinho, pois agradeço de coração todo o apoio e suporte incondicional que recebi durante os últimos (e mais difíceis) passos do doutorado, e espero poder retribuir todo o bem que me fez.

O terceiro auxílio é o acadêmico, o profissional. A esse amparo, sou extremamente grato aos secretários David e Reinaldo e aos professores Afonso Figueiredo Filho e Alexandre Behling. Também sou extremamente grato ao professor Allan Pelissari pelo incentivo recebido em diversos momentos. Também agradeço ao professor Sebastião Machado, pelo empenho e dedicação não só como orientador, mas também como pesquisador e acadêmico digno das mais altas honrarias.

Por fim, sou grato à CAPES pelo financiamento dessa pesquisa, e à Universidade Federal do Paraná pela estrutura e apoio fornecidos.

Todo começo é involuntário.  
Deus é o agente.  
O heroe a si assiste, vário  
E inconsciente.  
À espada em tuas mãos achada  
Teu olhar desce.  
"Que farei eu com esta espada?"

Ergueste-a, e fez-se.

O Conde D. Henrique (Fernando Pessoa)

## RESUMO

A pesquisa aborda o desafio de modelar o crescimento de florestas naturais, destacando a complexidade de lidar com dados de florestas com alta diversidade de espécies. Para isso, frequentemente são utilizados modelos a nível de árvore individual que estimam o crescimento das árvores a partir de índices de competição, medidas essas que resumem a influência das árvores vizinhas sobre uma árvore alvo. Esses modelos também são comumente utilizados em conjunto com a formação de grupos de alométricos ou de espécies, que tentam gerar conjuntos de observações mais homogêneas entre si. No entanto, o efeito competitivo que cada grupo exerce sobre outro ainda é pouco explorado, e poucas são as tentativas de inserir diretamente a informação do grupo no índice de competição. A pesquisa destaca os potenciais ganhos em realizar tal operação por meio das hipóteses de que a inclusão dos grupos melhora o desempenho dos índices de competição e fornece poder interpretativo para o efeito, e testa também se os grupos possuem diferentes relações ou efeitos entre si. O objetivo da pesquisa foi quantificar a competição individual entre árvores por meio de índices de competição dependentes e independentes da distância adaptados para incluir informação de grupos de espécies. A pesquisa foi conduzida na área experimental situada no campus Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná. A área total do fragmento de Floresta Ombrófila Mista (FOM) possui 12,96 hectares, porém foi selecionada somente a porção central, a fim de evitar efeito de borda nos índices de competição, o que totalizou uma área efetiva de 6,25 hectares de floresta. Toda a área foi alvo de censo, com medição inicial em 2006 e remeida a cada três anos, onde se mensurou o diâmetro a 1,3 m acima do solo (DAP) das árvores igual ou maior que 10 cm e coordenada das árvores. Foram utilizados os índices de competição independente de distância *Basal Area in Larger Trees* (BAL) e os índices dependentes de distância de Hegyi e de Tomé e Burkhart. Foram testados também dois métodos de agrupamento. O primeiro foi feito a partir da classificação ecológica das espécies em Pioneira, Secundárias e Climáticas, com a inclusão de um grupo para as espécies exóticas presentes no local, especialmente *Hovenia dulcis* Thunberg, *Ligustrum lucidum* W. T. Ait., e *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl. O segundo foi realizado a partir de uma relação alométrica entre a árvore alvo e as vizinhas a partir do diâmetro quadrático médio das árvores circundantes. A inclusão desses grupos nos índices de competição foi feita a partir da decomposição do índice via combinação linear, e a cada grupo foram atribuídos pesos obtidos a partir da maximização da correlação entre índice de competição ponderado e incremento diamétrico. A maximização foi realizada sob restrição, o que garante interpretação dos pesos encontrados. Após a ponderação, o diâmetro futuro foi estimado como função dos índices de competição utilizando um modelo de variâncias heterogêneas e uma função de ligação *log* do inverso do diâmetro. Os resultados mostraram os grupos podem ter diferentes níveis de influência na vizinhança. O índice independente de distância é mais afetado pela proporção de ocorrência dos outros grupos na vizinhança, ou seja, o grupo mais presente possivelmente resultará no mais influente. Há efeito também de árvores de diferentes dimensões na vizinhança. As menores árvores são pouco influenciadas pelas árvores maiores e vice-versa. O modelo heterocedástico foi oportuno para capturar a variabilidade entre grupos, e os índices ponderados utilizados foram capazes de prever os diâmetros erro médio de 23%.

Palavras-chave: BAL, Hegyi, combinação linear, decomposição linear, Floresta com Araucária.

## ABSTRACT

The research addresses the challenge of modeling the growth of natural forests, highlighting the complexity of dealing with data from natural forests. For this, models at the level of individual trees are often used, which estimate tree growth based on competition indices, measures that summarize the influence of neighboring trees on a target tree. These models are also commonly used in conjunction with the formation of allometric or species groups, which attempt to generate more homogeneous sets of observations among themselves. However, the competitive effect that each group exerts on another is still little explored in the field, and there have been few attempts to directly insert group information into the competition index. The research highlights the potential gains in performing such an operation through the hypotheses that the inclusion of groups improves the performance of competition indices and provides interpretative power for the effect, and also tests whether groups have different relationships or effects among themselves. The objective of the research was to quantify individual competition between trees through competition indices dependent and independent of distance adapted to include species group information. The research was conducted in the experimental area located at the Botanical Garden campus of the Federal University of Paraná. The total area of the Mixed Ombrophilous Forest (MOF) fragment is 12.96 hectares, but only the central portion was selected to avoid edge effects on competition indices, totaling an effective area of 6.25 hectares of forest. The entire area was surveyed, with initial measurements taken in 2006 and remeasured every three years, where the diameter at 1.3 m above ground level (DBH) of trees equal to or greater than 10 cm, and tree coordinates were measured. The competition indices independent of distance Basal Area in Larger Trees (BAL) and the dependent distance indices of Hegyi and Tomé and Burkhardt were used. Two clustering methods were also tested. The first was based on the ecological classification of species into Pioneer, Secondary, and Climactic, with the inclusion of a group for exotic species present on-site, especially *Hovenia dulcis* Thunberg, *Ligustrum lucidum* W. T. Ait., and *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl. The second was based on an allometric relationship between the target tree and its neighbors based on the mean quadratic diameter of the neighborhood. The inclusion of these groups in competition indices was done by decomposing the index via linear combination, and weights were assigned to each group obtained from maximizing the correlation between weighted competition index and diameter increment. The maximization was performed under constraint, ensuring interpretation of the weights found. After weighting, future diameter was estimated as a function of competition indices using a heterogeneous variances model and a log inverse diameter linking function. The results showed that groups may have different levels of influence in the neighborhood. Distance-independent indices are more affected by the proportion of occurrence of other groups in the neighborhood, meaning that the most present group will possibly result in the most influential one. There is also an effect of trees of different dimensions in the neighborhood. Smaller trees are minimally influenced by larger trees and vice versa. The heteroscedastic model was suitable for capturing variability between groups, and the weighted indices used were able to predict diameters with an average error of 23%.

Keywords: BAL, Hegyi, linear combination, linear decomposition, Araucaria forest

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLIFICAÇÃO DE FUNÇÕES DECRESCENTES GAUSSIANA (PRETA) E EXPONENCIAL (VERMELHA) PARA COMPOSIÇÃO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO. NO EIXO DAS ABCISSAS ESTÁ A DISTÂNCIA, EM METROS, DO CENTRO DA ÁRVORE. NO EIXO DAS ORDENADAS O VALOR DA FUNÇÃO. ....	25
FIGURA 2 - EXEMPLO DE SELEÇÃO DE ÁRVORES COMPETIDORAS A PARTIR DE ZONAS DE INFLUÊNCIA COMPETITIVA (ZIC). ....	26
FIGURA 3 - EXEMPLO DE DELIMITAÇÃO DE COMPETIDORAS A PARTIR DO ÂNGULO DE VISADA EM DIREÇÃO AO CÉU. ....	26
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE BORDA EM ÍNDICES INDEPENDENTES (A) E DEPENDENTES DA DISTÂNCIA (B). ....	27
FIGURA 5 - MÉTODO DA ZONA DE EXCLUSÃO COM APLICAÇÃO DE BUFFER DENTRO DA PARCELA DE INVENTÁRIO. ....	28
FIGURA 6 - MÉTODOS DE TRANSLAÇÃO (A) E REFLEXÃO (B) UTILIZADAS PARA CORREÇÃO DE EFEITO DE BORDA. ....	30
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS ECOLÓGICOS BASEADA EM DADOS. ....	34
FIGURA 8 - EXEMPLO DE CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS BASEADO EM PROCESSOS DINÂMICOS. A LINHA SÓLIDA REPRESENTA O AJUSTE DO MODELO PARA OS PONTOS PRETOS. A LINHA TRACEJADA REPRESENTA O AJUSTE DO MODELO PARA OS PONTOS BRANCOS, E A LINHA PONTILHADA O AJUSTE CONSIDERANDO OS DOIS CONJUNTOS DE DADOS. ....	35
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. ....	37
FIGURA 10 - DIVISÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM BLOCOS E DEFINIÇÃO DA ÁREA AMOSTRAL. ....	38
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR MEDIÇÃO. ....	40
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL DE $Q_i$ PARA FORMAÇÃO DOS GRUPOS ALOMÉTRICOS. ....	43
FIGURA 13 - EXEMPLIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARCIAIS DA ÁRVORE ALVO EM RELAÇÃO ÀS ÁRVORES VIZINHAS. ....	46

FIGURA 14 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA ADOTADA.....	52
FIGURA 15 - PROPORÇÃO DE OCORRÊNCIA DE GRUPOS VIZINHOS EM RELAÇÃO AOS GRUPOS ECOLÓGICOS.....	56
FIGURA 16 - PROPORÇÃO DE OCORRÊNCIA DE GRUPOS VIZINHOS EM RELAÇÃO AO GRUPO DA ÁRVORE ALVO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.....	61
FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE O LOGARITMO NATURAL (log) DO INVERSO DO DIÂMETRO FUTURO E RAIZ QUADRADA DO MÓDULO DO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO BAL PONDERADO PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO. ....	63
FIGURA 18 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS. ....	66
FIGURA 19 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO SEPARADO POR GRUPO ALOMÉTRICO.....	67
FIGURA 20 - HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO ADOTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS..	68
FIGURA 21 - VALORES OBSERVADOS VERSUS PREDITOS PELO MODELO DE CRESCIMENTO AJUSTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS. A LINHA TRACEJADA REPRESENTA A RETA 1:1. ....	69
FIGURA 22 - CURVAS AJUSTADAS DO MODELO DE CRESCIMENTO PROPOSTO PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO NA ESCALA ORIGINAL DA VARIÁVEL RESPOSTA (DIÂMETRO FUTURO). ....	70
FIGURA 23 - INTERVALOS DE PREDIÇÃO NA ESCALA DA VARIÁVEL RESPOSTA PARA O MODELO DE CRESCIMENTO POR GRUPO DE DIÂMETRO QUADRÁTICO MÉDIO.....	72
FIGURA 24 - RELAÇÃO ENTRE O LOGARITMO DO INVERSO DO DIÂMETRO FUTURO E RAIZ QUADRADA DO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO BAL PONDERADO PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO.....	73
FIGURA 25 - DISPERSÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO DE CRESCIMENTO PARA CADA ESPÉCIE DO GRUPO DAS ESPÉCIES EXÓTICAS. ...	74

FIGURA 26 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS. ....	76
FIGURA 27 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO SEPARADO POR GRUPO ECOLÓGICO.....	76
FIGURA 28 - HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO ADOTADO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS....	77
FIGURA 29 - VALORES OBSERVADOS VERSUS PREDITOS PELO MODELO DE CRESCIMENTO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS. A LINHA TRACEJADA REPRESENTA A RETA 1:1.....	77
FIGURA 30 - CURVAS AJUSTADAS DO MODELO DE CRESCIMENTO PROPOSTO PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO NA ESCALA ORIGINAL DA VARIÁVEL RESPOSTA. ....	78
FIGURA 31 - INTERVALOS DE PREDIÇÃO NA ESCALA DA VARIÁVEL RESPOSTA PARA O MODELO DE CRESCIMENTO POR GRUPO ECOLÓGICO. ....	79

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS FITOSSOCIOLÓGICOS DAS 20 ESPÉCIES COM MAIORES ÍNDICE DE VALOR DE COBERTURA (IVC) DA ÁREA DE ESTUDO PARA O CENSO MAIS RECENTE (2021).....	39
TABELA 2 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO FRAGMENTO POR ANO DE MEDIÇÃO. ....	40
TABELA 3 - DESCRIÇÃO E AMPLITUDE DE CADA GRUPO DA METODOLOGIA EMPREGADA NOS GRUPOS ALOMÉTRICOS.....	43
TABELA 4 - CONJUNTOS DE PESOS DE CADA GRUPO VIZINHO EM FUNÇÃO DO GRUPO ALVO.....	48
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS GRUPOS ECOLÓGICOS NA ÁREA DE ESTUDO .....	53
TABELA 6 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS GRUPOS ALOMÉTRICOS FORMADOS NA ÁREA.....	54
TABELA 7 - CONJUNTOS DE PESOS DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.....	55
TABELA 8 - DIÂMETRO MÉDIO, PROPORÇÃO EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO MÉDIO DA FLORESTA E ÁREA BASAL DAS ESPÉCIES EXÓTICAS. ....	57
TABELA 9 - VETORES DE PESOS DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS, DESCONSIDERANDO O GRUPO DE ESPÉCIES EXÓTICAS.....	57
TABELA 10 - CORRELAÇÕES ENTRE INCREMENTO DIAMÉTRICO ANTES E DEPOIS DE APLICAÇÃO DOS PESOS PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.....	59
TABELA 11 - VETORES DE PESOS DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.....	60
TABELA 12 - CORRELAÇÕES ENTRE INCREMENTO DIAMÉTRICO ANTES E DEPOIS DE APLICAÇÃO DOS PESOS PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.....	62
TABELA 13 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS COMPONENTES DO MODELO DE CRESCIMENTO ESCOLHIDO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS. ....	65

TABELA 14 - ESTIMATIVAS E TESTES DE HIPÓTESE MARGINAIS DOS PARÂMETROS DO MODELO AJUSTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS. ....	65
TABELA 15 - VARIÂNCIAS ESTIMADAS PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO A PARTIR DO ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS GENERALIZADOS. ....	66
TABELA 16 - RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (REQM) DAS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO FUTURO PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO. $d$ É O DIÂMETRO MÉDIO DO GRUPO. ....	71
TABELA 17 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS COMPONENTES DO MODELO DE CRESCIMENTO ESCOLHIDO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS. ....	74
TABELA 18 - ESTIMATIVAS E TESTES DE HIPÓTESE MARGINAIS DOS PARÂMETROS DO MODELO AJUSTADO AOS GRUPOS ECOLÓGICOS. ....	75
TABELA 19 - VARIÂNCIAS ESTIMADAS PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO A PARTIR DO ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS GENERALIZADOS. ....	75
TABELA 20 - RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (REQM) DAS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO FUTURO PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO DE DIÂMETRO QUADRÁTICO MÉDIO. $D$ É O DIÂMETRO MÉDIO DO GRUPO. ....	79
TABELA 21 - LISTA DE ESPÉCIES PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO. ....	89

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 HIPÓTESE .....	18
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo geral .....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1 MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	20
2.1.1 Modelos globais ou de povoamento .....	20
2.1.2 Modelos de classe de tamanho .....	21
2.1.3 Modelos de árvore individual.....	22
2.2 SELEÇÃO DE ÁRVORES COMPETIDORAS .....	23
2.2.1 Raio de seleção.....	24
2.2.2 Zonas de influência competitiva .....	25
2.2.3 Ângulo de visada em relação ao dossel da floresta (Sky view).....	26
2.3 EFEITO DE BORDA.....	27
2.3.1 Zonas de exclusão .....	28
2.3.2 Ponderação da área remanescente .....	29
2.3.3 Extrapolação do intervalo de confiança.....	29
2.3.4 Tratamento de bordas .....	30
2.4 IMPORTÂNCIA DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO NA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS .....	31
2.5 GRUPOS ECOLÓGICOS EM FLORESTAS NATURAIS .....	32
2.5.1 Grupos ecológicos subjetivos.....	33
2.5.2 Grupos ecológicos baseados em dados.....	33
2.5.3 Grupos baseados em processos dinâmicos.....	34
2.5.4 Utilização de grupos ecológicos na modelagem de florestas naturais .....	35
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	37
3.2 FORMAÇÃO DE GRUPOS DE ESPÉCIES .....	40
3.3 CÁLCULO DE ÍNDICES DE COMPETIÇÃO .....	44
3.3.1 Índice independente da distância.....	44

3.3.2 Índices dependentes da distância .....	45
3.3.3 Decomposição do índice de competição .....	45
3.4 MODELO DE CRESCIMENTO DIAMÉTRICO .....	50
3.5 RESUMO DA METODOLOGIA .....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
4.1 GRUPOS DE ESPÉCIES .....	53
4.2 DECOMPOSIÇÃO VIA COMBINAÇÃO LINEAR.....	54
4.2.1 Grupos ecológicos.....	54
4.2.2 Grupos Alométricos .....	59
4.3 CRESCIMENTO DIAMÉTRICO .....	62
4.3.1 Grupos Alométricos .....	63
4.3.2 Grupos ecológicos.....	72
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE 1 – LISTA DE ESPÉCIES PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento de florestas naturais é tema recorrente na ciência florestal. Em razão da notável dificuldade em descrever e analisar dados de florestas inequiâneas e com grande variedade de espécies, esse tema é matéria para diversos estudos atuais (FORRESTER, 2019; KUEHNE; WEISKITTEL; WASKIEWICZ, 2019; BAYAT et al., 2021).

A literatura especializada divide a modelagem do crescimento de florestas naturais em três níveis quanto ao escopo (WEISKITTEL et al., 2011): modelos de povoamento, por classe de tamanho e de árvore individual. Contudo, com o aumento da escala da resposta, aumenta-se também o erro e a dificuldade em estimar o crescimento (PENG, 2000). A variável resposta é decisiva na escolha do escopo de predição: variáveis de difícil mensuração estão propensas a predições por unidade de área (como volume e biomassa), enquanto variáveis de mais fácil medição (como crescimento diamétrico) são comuns em modelos de árvore individual (ORELLANA; VANCLAY, 2018).

É a partir dessas variáveis de fácil medição que são realizadas muitas das estimativas de crescimento em florestas naturais, *i.e.*, fazendo uso do incremento diamétrico. Embora de fácil medição, o crescimento em diâmetro de florestas naturais é uma variável de difícil predição (WEISKITTEL et al., 2011), em particular pela necessidade de inclusão de variáveis relacionadas às interações entre indivíduos e espécies diferentes, situação essa praticamente intrínseca ao uso de modelos de árvore individual.

Tais variáveis são comumente chamadas de índices de competição, medidas que buscam resumir a influência que uma árvore sofre das demais árvores vizinhas (POMMERENING; SÁNCHEZ-MEADOR, 2018), e podem levar ou não em conta a localização das árvores dentro da parcela (índices dependentes e independentes da distância). Embora com aplicações desde a década de 1970 (CURTIS, 1970), os principais desenvolvimentos da área se concentraram em florestas equiâneas ou de baixa riqueza de espécies, quando comparadas às florestas naturais brasileiras (WEINER, 1984; MIINA, 1993; PENG, 2000; MIINA; PUKKALA, 2002; WEISKITTEL et al., 2011). Portanto, raramente a informação da espécie ou do grupo de espécies é considerada na composição ou cálculo dos índices de competição.

No Brasil, o crescimento de florestas naturais fazendo uso de modelos de árvore individual é tema de estudo em praticamente todas as regiões do país (DELLA-FLORE; DURLO; SPATHELF, 2004; CURTO *et al.*, 2020; REIS *et al.*, 2016; VATRAZ; SILVA; ALDER, 2018), e é notável a baixa correlação entre índices de competição e crescimento diamétrico. Das pesquisas realizadas nesse tópico, é evidente que a composição das espécies arbóreas na vizinhança é fator relevante para a estimativa do crescimento (ORELLANA *et al.*, 2016). Além disso, países de sólida tradição florestal como a Alemanha buscam relacionar o efeito da composição da vizinhança na interação entre espécies (RÍO *et al.*, 2016; CONDÉS; PRETZSCH; RÍO, 2023), considerando as crescentes descobertas de interação e maior produtividade em florestas com várias espécies consorciadas (PRETZSCH *et al.*, 2016).

As florestas naturais brasileiras são marcadas por uma grande diversidade de espécies, não sendo diferente no sul do Brasil. Na Floresta Ombrófila Mista, os remanescentes podem conter mais de 100 espécies arbóreas coexistindo (SCHONS *et al.*, 2020), o que dificulta a inclusão das espécies nos índices de competição. A formação de grupos de espécies ou árvores com características similares é, portanto, uma alternativa válida para contrapor e amenizar a elevada variabilidade decorrente da diversificação em espécies, mas com o risco de formação de grupos “não representativos” ou de baixa homogeneidade, acarretando perdas de informação (GOURLET-FLEURY *et al.*, 2005). Tais grupos podem ser formados por espécies, onde cada espécie está presente em um único grupo, ou por meio de uma relação alométrica, onde cada árvore é classificada em um grupo pré-definido.

Poucos são os trabalhos em florestas naturais do Brasil que de alguma forma incluem informação de grupos de espécies em índices de competição (ORELLANA, 2014; ORELLANA; VANCLAY, 2018; VATRAZ; ALDER; SILVA, 2018). Ainda assim, a inclusão dos grupos nos índices de competição é feita calculando o índice para um subconjunto dos grupos em questão, sem relacionar de forma integrada o efeito da competição dentro e entre grupos.

Permanece ainda a necessidade de desenvolvimento de um método capaz de incluir os grupos de espécies na formulação de índices de competição, independente do tipo de índice de competição utilizado. Tal realização forneceria dados quantitativos da influência exercida para cada grupo nas imediações de uma árvore qualquer, o que

impactaria diretamente na correlação entre os índices de competição e o crescimento diamétrico.

Nesta pesquisa, propõe-se uma maneira de incluir a influência que os grupos exercem entre si em índices de competição de forma simples, com fácil interpretação dos resultados, e escalável para qualquer tipo de índice de competição e método de agrupamento utilizado.

## 1.1 HIPÓTESE

A pesquisa testará as seguintes hipóteses:

1. A inclusão dos grupos melhora o desempenho dos índices de competição, além de torná-los mais interpretativos.
2. Os grupos exercem diferentes níveis de influência entre si.
3. O método de agrupamento utilizado altera a capacidade dos índices de competição de se relacionarem com o crescimento das árvores.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi quantificar a competição individual entre árvores por meio de índices de competição dependentes e independentes da distância adaptados para incluir informação de grupos alométricos e ecológicos em Floresta Ombrófila Mista.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Testar alternativas para formação de grupos alométricos e ecológicos, visando a estimativa do crescimento em diâmetro com o uso de índices de competição dependentes e independentes da distância;
- b) Avaliar o efeito da competição exercida dentro do grupo e entre grupos ecológicos;

- c) Analisar a influência do método de agrupamento nos índices de competição e estimativa do crescimento em diâmetro das árvores.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

Os modelos matemáticos são simplificações que buscam representar as interações-chave de um sistema (VANCLAY, 1994), proporcionando uma conceitualização das dinâmicas do sistema. Essas representações, sejam de natureza matemática ou não, permitem ao pesquisador projetar logicamente processos ou comportamentos, gerando informações valiosas (PENG, 2000).

No contexto das florestas, que são sistemas complexos, dinâmicos e abertos, devido à multiplicidade de processos biológicos em constante mudança (PENG, 2000), também é possível representar esses processos e relações por meio de modelos, com diferentes graus de representatividade. Os modelos de crescimento e produção surgem como ferramentas essenciais para mensurar e compreender os aspectos dinâmicos das florestas, identificando os fatores mais relevantes nesse processo (WEISKITTEL *et al.*, 2011).

Os modelos de crescimento e produção são categorizados em três grupos: modelos globais ou de povoamento, modelos de classe de tamanho e modelos a nível de árvore individual (VANCLAY, 1994; PENG, 2000; PRETZSCH, 2009; WEISKITTEL *et al.*, 2011). Essa classificação não é unânime entre os pesquisadores, e diversas outras categorias são utilizadas (PORTÉ; BARTELINK, 2002). Cada grupo apresenta particularidades em termos de abordagem, variáveis de entrada e objeto de modelagem.

#### 2.1.1 Modelos globais ou de povoamento

As primeiras representações de florestas na engenharia florestal são as tabelas de produção, derivadas exclusivamente de observações da produção ao longo do tempo. No decorrer dos anos, a simples observação da tendência de crescimento foi substituída pelo uso de curvas de crescimento (PENG, 2000).

Os modelos globais ou do povoamento são geralmente mais simples e robustos, compõem o grupo mais amplamente difundido e utilizado em relação às florestas. A característica principal desses modelos é a incorporação de variáveis de

entrada que caracterizam o povoamento como um todo, tais como área basal, densidade, sítio, idade, grau de estocagem e homogeneidade do povoamento. A unidade básica de modelagem para esse grupo é o povoamento. Por utilizar informações em grande escala, esse grupo de modelos requer relativamente pouca informação para simular o crescimento (VANCLAY, 1994).

### 2.1.2 Modelos de classe de tamanho

Os modelos de classe de tamanho representam o método mais antigo desenvolvido para projeções do crescimento em florestas tropicais (ALDER, 2005). Essa abordagem utiliza as classes de árvores como unidade básica de modelagem. Essas classes podem ser formadas com base em atributos métricos, como diâmetro ou altura, bem como por grupos ecológicos, espécies ou outros fatores convenientes. Modelos globais podem ser vistos como modelos de classe de tamanho com uma única classe, enquanto modelos de árvores individuais podem ser considerados modelos de classe de tamanho, onde cada árvore representa uma classe. Dessa forma, a abordagem por classes de tamanho divide a floresta em duas ou mais classes, mas com menos classes do que o número total de árvores (VANCLAY, 1994). Essa classe de modelos já incorpora uma abordagem mais detalhada da floresta, incluindo estimativas de sobrevivência e recrutamento, o que é suficiente para diversas aplicações florestais (VANCLAY, 1994; PENG, 2000).

A modelagem em classe de diâmetro é amplamente utilizada em florestas plantadas, tendo a idade como base da modelagem (CASTRO et al., 2016). Para florestas nativas, a projeção da distribuição é realizada com base nos incrementos das classes diamétricas, utilizando, por exemplo, a razão de movimentação (AUSTREGÉSILO et al., 2004), que emprega a razão entre o incremento periódico anual (IPA) da classe e a amplitude da classe.

O quociente de Liocourt (De Liocourt (1898)) é outra das formas de projeção do crescimento entre classes, por meio de uma razão de movimentação com base em uma série geométrica. Outro método empregado é o método de Wahlenberg, que utiliza o incremento médio de cada indivíduo na classe e inclui esse incremento ao diâmetro das árvores da classe. A taxa de transição é feita somando os indivíduos que avançaram de classe (AUSTREGÉSILO et al., 2004). Posteriormente, métodos como

as Matrizes de Transição passaram a ser utilizadas, as quais utilizam a probabilidade de movimentação para outra classe (ALDER, 1995; PORTÉ; BARTELINK, 2002).

Por fim, outra classe de modelos que pode ser enquadrado nessa classificação são os modelos de coorte, que agrupam indivíduos com base em grupos de espécies e seus hábitos além de variáveis dendrométricas, e geram estimativas e projeções para esses grupos (ALDER; SILVA, 2000; ORELLANA, 2014).

### 2.1.3 Modelos de árvore individual

Os modelos de árvore individual se destacam por sua maior complexidade, exigindo uma quantidade significativa de informações para funcionar adequadamente (WEISKITTEL et al., 2011). Ao adotar o indivíduo como unidade de modelagem, é natural que as informações de entrada nesses modelos estejam diretamente vinculadas às características específicas das árvores, como espécie, diâmetro e localização geográfica.

Apesar da abordagem mais específica desse grupo, ele não exclui variáveis explicativas presentes nos demais conjuntos, como informações dimensionais ou produtivas. A diferença reside no fato de que essas agora têm uma expressão local, podendo ser representadas de maneira indireta ou agrupadas em uma única variável, variando de indivíduo para indivíduo. Essa maior granularidade torna esse conjunto de modelos adequado para florestas mistas e inequiâneas. Essas informações detalhadas podem ser uma desvantagem ao uso desses modelos, pois o detalhamento é acompanhado de um aumento nos custos operacionais e financeiros para sua construção (WEISKITTEL et al., 2011).

No Brasil, alguns estudos exploram esse tema em relação a florestas nativas, aplicando-se na Floresta Amazônica, Floresta Estacional e Floresta Ombrófila Mista. A maioria desses trabalhos se concentra na estimativa do crescimento de uma ou algumas espécies, analisadas de forma individual. Contudo, estudos que buscam determinar o crescimento de todos os indivíduos da floresta muitas vezes recorrem à formação de grupos de espécies ou indivíduos com base em classificações específicas.

Nesse conjunto de modelos, surgem os índices de competição, fornecendo informações sobre o estresse competitivo e podendo ser considerados fatores

limitadores do potencial de crescimento do indivíduo arbóreo naquele local (BURTON, 1993). Diversos índices de competição empregam diferentes abordagens ecológicas e matemáticas para avaliar o estado competitivo da floresta. Dada sua amplitude, os modelos de árvore individual frequentemente são divididos em dois grupos com base na natureza do índice de competição utilizado: índices independentes de distância e índices dependentes de distância.

Os índices independentes de distância são todos aqueles que não requerem de alguma forma a localização das árvores dentro da parcela para o cálculo, ou seja, não fazem uso de distâncias entre árvores. Já os índices dependentes da distância fazem uso direto ou indireto da distância entre árvores para sua construção. A distância pode ser utilizada diretamente incluída no índice, ou pode ser usada de forma indireta, apenas para definir quais árvores formarão a vizinhança de competidoras (VANCLAY, 1994). Não há consenso entre quais índices são melhores (ORSO et al., 2020), porém o índice independente da distância BAL (*Basal Area In Larger Trees*) e o índice dependente da distância de Hegyi (HEGYI, 1973) são bastante utilizados na literatura especializada.

## 2.2 SELEÇÃO DE ÁRVORES COMPETIDORAS

A forma de seleção das árvores vizinhas competidoras está intrinsecamente ligada à construção do índice de competição (IC), que por sua vez possuem diferentes classificações na literatura (VANCLAY, 1994; PENG, 2000; WEISKITTEL et al., 2011). Muitas vezes a lógica de funcionamento de um IC se dá justamente pela forma como as árvores competidoras são selecionadas.

Por se tratar de índices dependentes da distância (IDD), é natural assumir que a classificação de uma árvore vizinha envolve i) a localização dos indivíduos no entorno da árvore objeto, ou ii) alguma forma de (ao menos implicitamente) considerar as distâncias entre árvores na definição de competidora. Para essa discussão, optou-se pela classificação proposta por Vanclay (1994) para apresentar os métodos de seleção de árvores vizinhas e uma simples adaptação foi feita a seguir para dar ênfase ao método de seleção das competidoras.

### 2.2.1 Raio de seleção

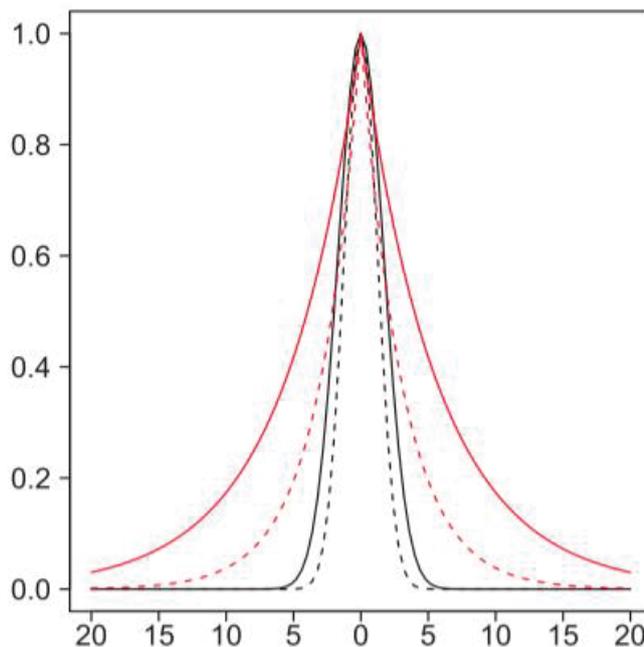
A maneira mais simples de considerar árvores vizinhas como competidoras é delimitar um raio  $R$  no entorno da árvore objeto, e todas as árvores situadas dentro dessa região serão consideradas competidoras. Este método é amplamente adotado nos trabalhos da área (ORELLANA, 2014; REIS et al., 2016; VATRAZ; SILVA; ALDER, 2018; KUEHNE; WEISKITTEL; WASKIEWICZ, 2019; CURTO et al., 2020; ORSO et al., 2020).

Um círculo é tradicionalmente utilizado para definir a região de vizinhança de uma árvore objeto. Embora não obrigatório, é intuitivo presumir que uma área circular seja a maneira adequada de definir a região de vizinhança. No que diz respeito à dimensão raio, não há consenso na literatura, apenas que este varia de acordo com a tipologia florestal. Trabalhos do norte da Europa costumam utilizar raios pequenos, de até 6 m para delimitação de competidoras (MIINA; PUKKALA, 2002), enquanto locais como na Floresta Ombrófila Mista podem relatar valores de até 20 m de raio para maximizar a relação com o crescimento diamétrico (ORSO et al., 2020).

Além da delimitação de um raio fixo, existe também a possibilidade de flexibilização do raio a depender das dimensões da árvore objeto (VANCLAY et al., 2013), ou de um ângulo que relacione distância e tamanho, similar à relascopia (MCTAGUE; WEISKITTEL, 2016). De maneira geral, esse tipo de critério de inclusão de vizinhas competidoras é comumente utilizado nos índices classificados como *size-distance* (TOMÉ; BURKHART, 1989; VANCLAY, 1994), pois consideram medidas de tamanho e distâncias na sua composição, como índice de Hegyi (HEGYI, 1974), Tomé e Burkhart (1989), entre outros.

Por fim, existe ainda a possibilidade de substituir a distância euclidiana, normalmente utilizada para a delimitação do raio, por uma função da distância (FIGURA 1). Assim, a contribuição de um indivíduo vizinho na competição da árvore objeto decresce com o aumento da distância, até o ponto onde ela se torna virtualmente nula. Tal abordagem elimina a necessidade de delimitação de um raio, e a taxa de decaimento dessa contribuição pode ser regulada pelos parâmetros das funções, inclusive com covariáveis observadas na floresta (POMMERENING; SÁNCHEZ-MEADOR, 2018).

FIGURA 1 - EXEMPLIFICAÇÃO DE FUNÇÕES DECRESCENTES GAUSSIANA (PRETA) E EXPONENCIAL (VERMELHA) PARA COMPOSIÇÃO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO. NO EIXO DAS ABCISSAS ESTÁ A DISTÂNCIA, EM METROS, DO CENTRO DA ÁRVORE. NO EIXO DAS ORDENADAS O VALOR DA FUNÇÃO.

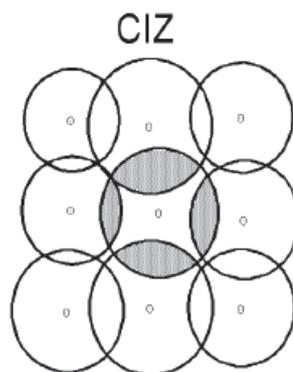


FONTE: adaptado de Pommerening e Sánchez-Meador (2018)

### 2.2.2 Zonas de influência competitiva

Outra maneira de delimitar as árvores competidoras é avaliando a sobreposição da área ocupada por cada árvore (FIGURA 2). Árvores que possuam sobreposição das áreas ocupadas (zonas de influência) são consideradas competidoras. Tradicionalmente, uma medida de diâmetro de copa é utilizada para definir as zonas de influência de cada árvore (LORIMER, 1983), porém outras medidas podem ser utilizadas, como uma transformação do DAP. Caso uma zona de influência de raio  $L$  seja constante para todas as árvores, o método se torna análogo a uma seleção por raio, discutida no tópico anterior, com um raio de vizinhança  $R = 2L$ .

FIGURA 2 - EXEMPLO DE SELEÇÃO DE ÁRVORES COMPETIDORAS A PARTIR DE ZONAS DE INFLUÊNCIA COMPETITIVA (ZIC).



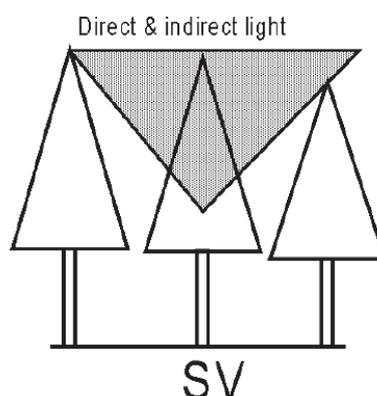
FONTE: adaptado de Vanclay (1994).

### 2.2.3 Ângulo de visada em relação ao dossel da floresta (Sky view)

Uma terceira forma de delimitar os indivíduos competidores é por meio de uma abertura angular situada na base da copa da árvore objeto, e voltada para o céu. Qualquer árvore vizinha cuja copa esteja 'dentro' desse ângulo, mesmo que parcialmente, será considerada competidora (FIGURA 3). Um ângulo de 45° é o mais utilizado, embora não haja consenso na literatura (VANCLAY, 1994).

Esse método de seleção de indivíduos requer a medida das alturas das árvores, algo nem sempre disponível em florestas naturais, o que restringe sua aplicação. Esse critério de inclusão é uma boa maneira de adicionar a informação de altura no índice de competição, a exemplo do trabalho realizado por Cunha e Finger (2013).

FIGURA 3 - EXEMPLO DE DELIMITAÇÃO DE COMPETIDORAS A PARTIR DO ÂNGULO DE VISADA EM DIREÇÃO AO CÉU.



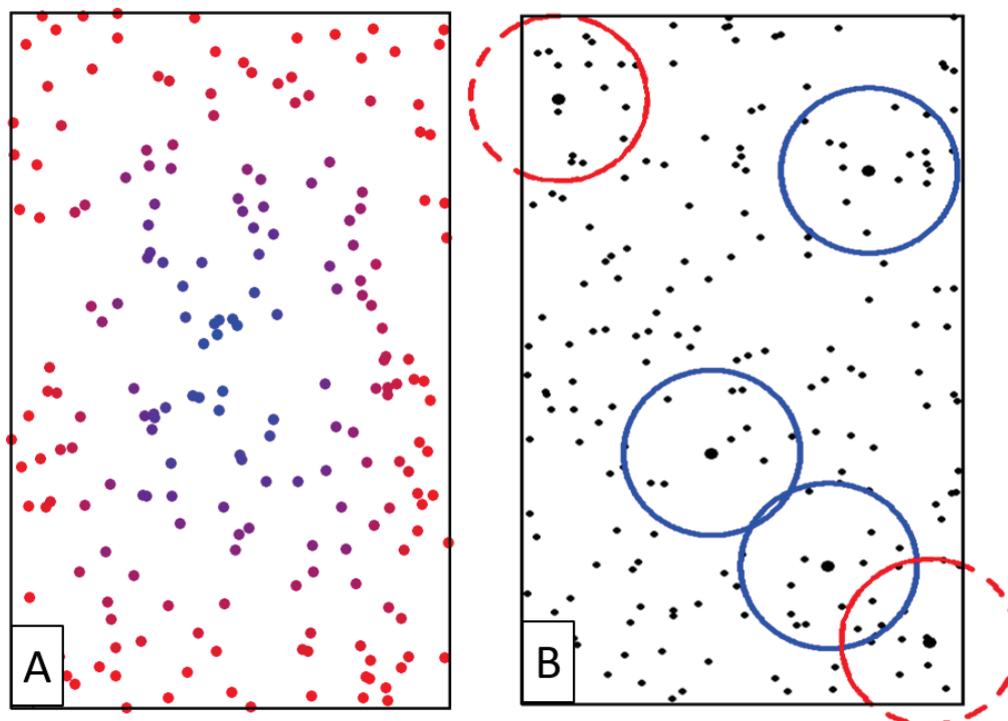
FONTE: adaptado de Vanclay (1994).

### 2.3 EFEITO DE BORDA

Índices de competição são funções tanto das árvores objeto, amostradas dentro de uma parcela de inventário, quanto de suas vizinhas, porém os índices de competição não são capazes de avaliar qualquer região fora da parcela. Quando uma árvore objeto está posicionada em uma região próxima da borda, então sua vizinhança conterá também árvores não observadas, fora dos limites da parcela, e que não serão incluídas no cálculo do índice de competição (IC).

O efeito de bordadura é uma condição intrínseca de índices de competição, sejam eles dependentes da distância (IDD) ou independentes de distância (IID). Para os IID, o efeito de borda tem impacto mínimo no centro da parcela, e aumenta conforme se aproxima da borda (FIGURA 4A). O efeito de borda é um fator apenas observado em parcelas cuja localização das árvores é conhecida, mas este não é um requisito para o cálculo dos IID.

FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE BORDA EM ÍNDICES INDEPENDENTES (A) E DEPENDENTES DA DISTÂNCIA (B).



FONTE: o autor (2023).

Para os IDD, o efeito de borda ocorre quando há truncamento da região de vizinhança delimitada (FIGURA 4B), ilustrado pelos círculos incompletos que

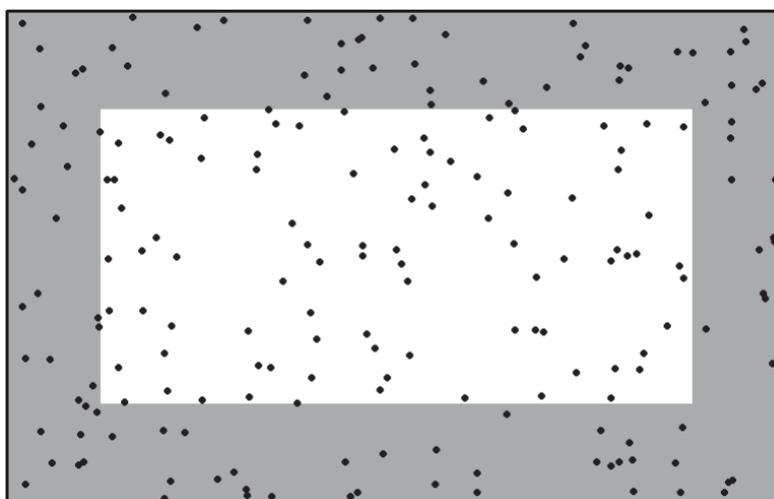
ultrapassam a borda da parcela. A posição de cada árvore é necessária para o cálculo dos IDD e, portanto, o efeito de borda influencia na estimativa da competição.

Os métodos de correção de bordadura podem agir por dois caminhos: sendo um deles dependente da região de vizinhança de cada árvore objeto, como os métodos da zona de exclusão, extrapolação do IC e ponderação a partir da área remanescente, e o outro simulando a ocorrência de observações nas imediações de uma parcela, também chamados de tratamento de bordas.

### 2.3.1 Zonas de exclusão

Uma vez que a maior parte dos IDD é baseada em somatórios, o truncamento da região de vizinhança resulta em uma subestimativa do índice para aquela árvore objeto. A zona de exclusão (POMMERENING; STOYAN, 2006), ou simplesmente *buffer*, é a primeira alternativa para correção do efeito de borda em IDD, que corresponde à inclusão de uma faixa interna à parcela, de largura  $R$ , onde  $R$  é o raio de delimitação de vizinhança (FIGURA 5).

FIGURA 5 - MÉTODO DA ZONA DE EXCLUSÃO COM APLICAÇÃO DE BUFFER DENTRO DA PARCELA DE INVENTÁRIO.



FONTE: o autor (2023).

Sob a premissa de que o raio  $R$  é suficiente para a demarcação de competidoras, e que indivíduos fora desse raio não afetam a árvore objeto, então o método da zona de exclusão é o único capaz de eliminar o efeito de borda nos IDD.

No entanto, o método pode ser bastante restritivo quanto às árvores disponíveis para cálculo do IC. Para uma parcela de 50 m x 50 m e um raio  $R = 6$  m, há uma redução de 2500 m<sup>2</sup> para 1444 m<sup>2</sup>, ou de 42,24% na área da parcela original. Uma parcela de 30 m x 30 m teria uma redução de 64% da área original para um mesmo raio. Menor área disponível reflete em menor número de observações disponíveis para o cálculo dos IC.

Além da menor disponibilidade de observações, Pommerening e Stoyan (2006) mostraram que métodos que envolvem alguma forma de rejeição de árvores da parcela (como as árvores contidas no *buffer*) levam a valores tendenciosos caso o número de observações se torne restrito. Esses autores ainda sugerem o uso dessa metodologia somente quando o número de observações por parcela seja alto, acima de 100 observações.

### 2.3.2 Ponderação da área remanescente

Na impossibilidade de delimitação de uma zona de exclusão, uma alternativa é a utilização de pesos nas árvores de borda a partir da área de vizinhança remanescente, ou seja, árvores muito próximas da borda tem menor área remanescente, e passam a contribuir menos no cálculo do IC.

Esse método, no entanto, não se mostrou eficaz, principalmente pela dificuldade em formular pesos adequados para as árvores de borda. Monserud e Ek (1974) revisaram e testaram diversas formulações, e concluíram que outros métodos de correção de bordadura são mais adequados.

### 2.3.3 Extrapolação do intervalo de confiança

A terceira alternativa para contornar o efeito de borda em IDD é a extrapolação do valor do índice com base na área truncada da região de vizinhança. Assumindo que a região de vizinhança é homogênea, então a extrapolação para a área total de vizinhança é uma aproximação razoável do IC caso não houvesse truncamento. A extrapolação normalmente é realizada com uma simples interpolação entre a região

remanescente, a região total de vizinhança e o valor do IC calculado para a região remanescente.

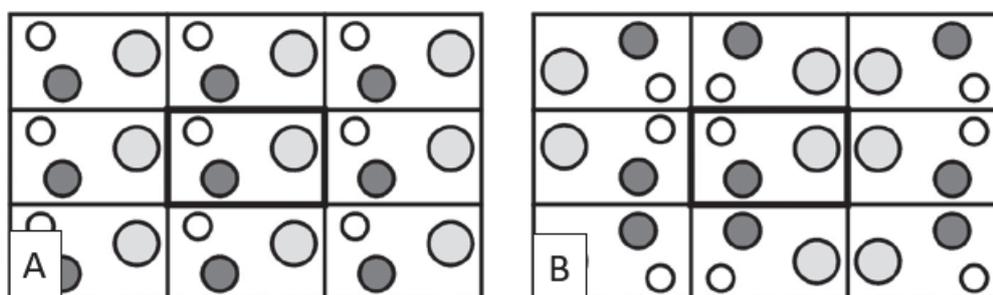
Embora simples, tanto a determinação das árvores que precisam de correção, bem como o cálculo da região remanescente, é uma tarefa que exige certo esforço, e pode se tornar laboriosa conforme aumenta o número de parcelas. Entretanto, as árvores que necessitam de interpolação são as que se situam dentro da zona de exclusão, o que pode facilitar os processamentos necessários.

#### 2.3.4 Tratamento de bordas

Sejam as árvores de uma parcela de inventário florestal uma representação de pontos em um plano cartesiano, e a parcela uma 'janela de observação' desses pontos, então os métodos de tratamento de bordas são uma extrapolação dessa janela para todas as direções do plano cartesiano (POMMERENING; STOYAN, 2006), e foram adaptados de metodologias de estatística espacial denominadas de processos pontuais (MONSERUD; EK, 1974; PETER J. DIGGLE, 2013).

Existem duas abordagens comumente utilizadas para esse tipo de correção, a correção por translação e a correção por reflexão (FIGURA 6). Ambos os métodos assumem que a distribuição espacial das árvores é homogênea no espaço, e, portanto, a parcela de inventário seria representativa das regiões adjacentes.

FIGURA 6 - MÉTODOS DE TRANSLAÇÃO (A) E REFLEXÃO (B) UTILIZADAS PARA CORREÇÃO DE EFEITO DE BORDA.



FONTE: adaptado de Pommerening e Stoyan (2006).

Para esse método, as árvores que eventualmente tenham parte de sua região de vizinhança reduzida fazem uso dessas parcelas adjacentes para compor a porção

faltante da vizinhança, e contorna a necessidade de criação de *buffers* ou extrapolação do valor do IC. Apenas a parcela central é utilizada para o cálculo dos índices, e as oito parcelas adjacentes são utilizadas para compor a vizinhança faltante.

No estudo conduzido por Pommerening e Stoyan (2006), o método da reflexão acarretou aumento do viés nas estimativas, com resultados piores que não realizar correção de borda, dessa maneira os autores sugerem evitar o uso de tal método. A translação foi adequada e é uma boa alternativa para reprodução do padrão espacial nas imediações da parcela.

## 2.4 IMPORTÂNCIA DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO NA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

A competição é resultado da ocupação de árvores em um dado espaço, e é um fator determinante no crescimento e produção de uma floresta (CURTIS, 1970). Árvores competem por uma miríade de recursos e espaço ao longo da sua vida, e quando o objetivo de um modelo é estudar os processos de crescimento, recrutamento ou mortalidade de uma floresta, faz-se necessário adicionar uma informação que reflita a 'situação competitiva' de uma dada árvore naquele momento (WEISKITTEL et al., 2011).

Modelos para árvores individuais frequentemente fazem uso de índices de competição para compor as equações, pois são medidas capazes de resumir informações da vizinhança e possuem correlação com alguma medida de crescimento da árvore objeto. A competição é um processo fundamental que regula o crescimento de uma árvore, e fornece base para o manejo florestal (NASCIMENTO, 2016).

Desde os primeiros estudos consolidados sobre a competição entre árvores (CURTIS, 1970; STAGE, 1973; EK; MONSERUD, 1975; HEGYI, 1974), especialmente para florestas monoespecíficas, diversos trabalhos voltaram sua atenção para o desenvolvimento de índices para florestas naturais (LORIMER, 1983; WU et al., 1985; WEINER, 1988, 1990; VANCLAY, 1991; BURTON, 1993), introduzindo diversos conceitos fundamentais para a construção de índices de competição, como a simetria da competição, vínculo do índice de competição com um determinado recurso (como luz solar), e competição intra ou interespecífica.

Para florestas mistas, os índices de competição podem ser oportunos para avaliar a interação entre grupos de espécies. Nos últimos 10 anos vários estudos têm voltado sua atenção para esse tipo de avaliação tanto no Brasil quanto na Europa (ORELLANA, 2014; DEL RÍO et al., 2016; PRETZSCH et al., 2016; ORELLANA; VANCLAY, 2018; CONDÉS; PRETZSCH; RÍO, 2023). Entre as descobertas estão aquelas em que há efeitos diferentes de competição entre cada grupo, como também existem efeitos benéficos da mistura de espécies no crescimento individual. A construção de modelos de crescimento para árvores individuais combinado com o uso de índices de competição permite representar de forma simples, diversas estruturas e condições da floresta (TOMÉ; BURKHART, 1989; (NASCIMENTO, 2016).

## 2.5 GRUPOS ECOLÓGICOS EM FLORESTAS NATURAIS

O método de formação de grupos está muito relacionado com o objetivo do estudo no sentido de que, a depender da maneira como as espécies são agrupadas, podem ou não surgir evidências do que é buscado no estudo. Para estudos do ponto de vista ecológico, grupos baseados em características qualitativas podem ser suficientes, como necessidade de luz, síndrome de dispersão etc. (SWAINE; WHITMORE, 1988). Em estudos onde o foco é a estimativa da mortalidade, por exemplo, outras variáveis como taxa de crescimento e diâmetro podem ser mais eficazes para a formação de grupos homogêneos.

Com foco na estimativa de algum processo dinâmico da floresta (crescimento, recrutamento, mortalidade) e sem perda de generalidade, os métodos para formação de grupos para florestas naturais seguem as mesmas premissas de outras ferramentas estatísticas de agrupamento: i) o método deve minimizar a variabilidade dentro de cada grupo, e ii) o método deve maximizar a variabilidade entre grupos. No entanto, uma condição extra muitas vezes presentes nas metodologias apresentadas é a necessidade de que os grupos sejam interpretáveis, ou que possam ser relacionados com alguma característica ecológica.

Os métodos de formação de grupos de espécies podem ser divididos em três abordagens (GOURLET-FLEURY et al., 2005): i) Grupos ecológicos subjetivos; ii) Grupos ecológicos baseados em dados; e iii) Grupos baseados em processos dinâmicos.

### 2.5.1 Grupos ecológicos subjetivos

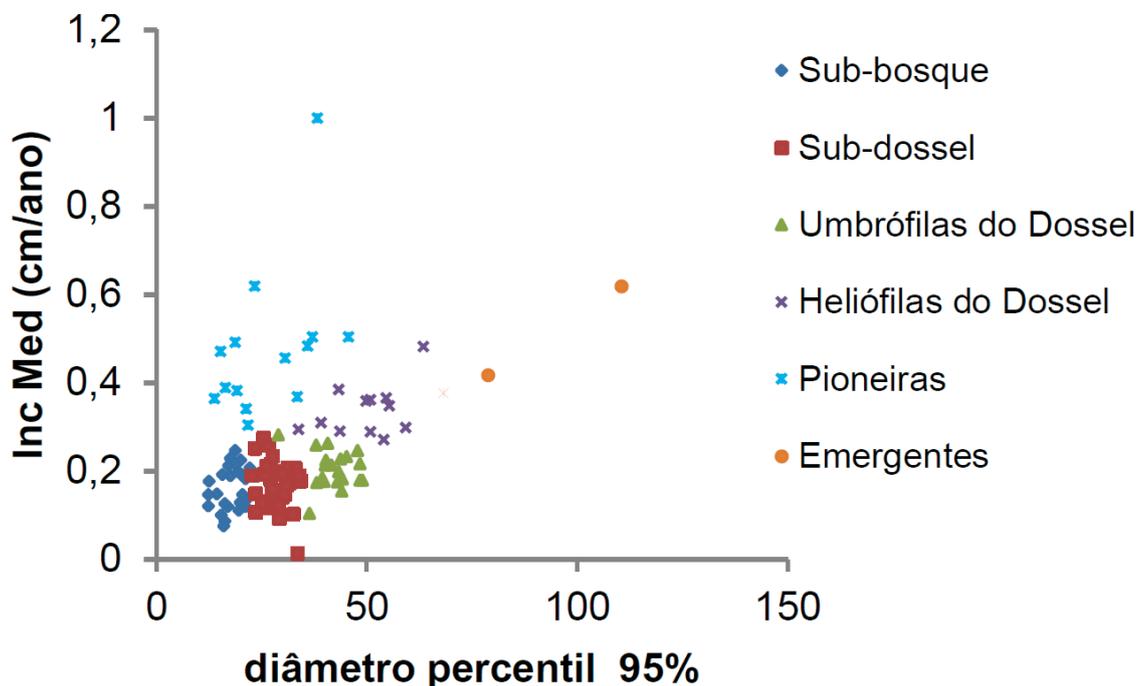
Os grupos ecológicos subjetivos são assim denominados pois sua formação depende do conhecimento empírico de observações de campo. Recai nessa classe os grupos sucessionais de pioneiras, secundárias e outras classificações adaptadas de Swaine e Whitmore (1988) e Whitmore (1989).

Para modelagem de alguma variável da floresta, esse método tem se mostrado inadequado, pois frequentemente forma grupos de espécies que não seguem as premissas apresentadas acima, além de ter muita sobreposição de variáveis morfológicas entre os grupos (PICARD et al., 2012; ORSO et al., 2020). Para amenizar essas condições, é recorrente adicionar outros critérios, como altura máxima (PICARD et al., 2010).

### 2.5.2 Grupos ecológicos baseados em dados

A segunda forma de classificação utiliza primariamente dados quantitativos para classificação das espécies, como características dinâmicas (mortalidade, incremento) e morfológicas (Altura, DAP médio) para agrupar as espécies (GOURLET-FLEURY et al., 2005). Uma metodologia muito utilizada nas florestas naturais da América do Sul é o método proposto por Alder (2000), que faz uso do percentil 95% do diâmetro acumulado e o incremento médio das espécies (FIGURA 7).

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS ECOLÓGICOS BASEADA EM DADOS.



FONTE: adaptado de Orellana (2014).

A classificação de Alder (2000) foi bastante explorada em trabalhos para florestas brasileiras (ORELLANA et al., 2017; VATRAZ; ALDER; SILVA, 2018). Outras variáveis também podem ser utilizadas para a classificação de espécies, como taxa de mortalidade anual, taxa de recrutamento ou densidade da madeira (GOURLET-FLEURY et al., 2005).

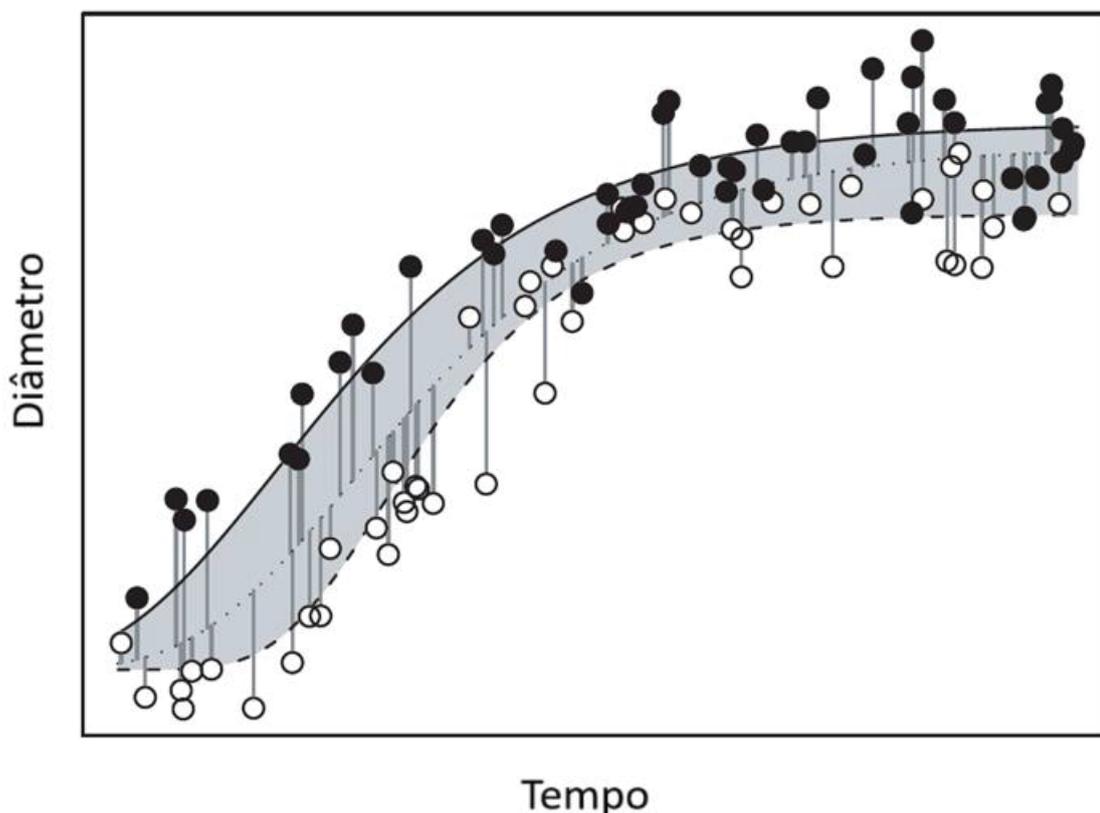
Além da conciliação com nomenclaturas que remetem às características ecológicas das espécies arbóreas (heliófilas, ombrófilas etc.), esse método de formação de grupos pode ser conciliado com técnicas estatísticas de agrupamento, como KNN (k vizinhos mais próximos) ou análise de componentes principais.

### 2.5.3 Grupos baseados em processos dinâmicos

A formação de grupos a partir de processos dinâmicos pode ser também expressa com base em modelos (*model-based*), pois envolvem a descrição teórica de um processo dinâmico da floresta (recrutamento, crescimento, mortalidade). Os grupos são formados a partir de partições dos dados com base no modelo teórico ajustado para os dados completos e para cada partição desejada. Em seguida, um

algoritmo é utilizado levando em conta as premissas de formação de grupos (FIGURA 8) (GOURLET-FLEURY et al., 2005).

FIGURA 8 - EXEMPLO DE CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS BASEADO EM PROCESSOS DINÂMICOS. A LINHA SÓLIDA REPRESENTA O AJUSTE DO MODELO PARA OS PONTOS PRETOS. A LINHA TRACEJADA REPRESENTA O AJUSTE DO MODELO PARA OS PONTOS BRANCOS, E A LINHA PONTILHADA O AJUSTE CONSIDERANDO OS DOIS CONJUNTOS DE DADOS.



FONTE: adaptado de Gourlet-Fleury et al. (2005).

O exemplo da FIGURA 8 foi construído a partir do modelo de crescimento de Gompertz. Entre as vantagens descritas pelos autores está a capacidade desse método capturar a variabilidade intra-grupo ao longo do ciclo de vida de uma espécie ou grupo, além de ser uma estratégia que contribui para a redução da variância dos parâmetros do modelo teórico proposto.

#### 2.5.4 Utilização de grupos ecológicos na modelagem de florestas naturais

A principal razão de utilizar grupos de espécies arbóreas é visando a homogeneização dos dados. A alta diversidade de espécies garante uma ampla

variabilidade de praticamente qualquer variável coletada em uma floresta, o que dificulta o desenvolvimento de modelos preditivos acurados (GOURLET-FLEURY et al., 2005).

Não bastasse a variabilidade ocasionada pela alta riqueza de espécies, muitas dessas são representadas por poucos indivíduos na floresta, e a construção de modelos para cada uma dessas espécies resultaria em modelos pouco acurados, com alta variância nos parâmetros. A agregação dessas espécies com outras similares, mas de maior ocorrência é uma das principais vantagens no agrupamento de espécies.

Outra informação valiosa, decorrente da formação dos grupos de espécies, é que se os grupos são bem definidos então é possível que cada grupo possua um traço funcional em comum e uma interpretação ecológica coerente. Quando possível, essa conciliação entre grupo e traço funcional facilita tanto a interpretação dos resultados quanto a extrapolação do modelo para diferentes cenários (GOURLET-FLEURY; HOULLIER, 2000).

O método utilizado para formar os grupos pode também ser construído de forma a responder as questões levantadas pelo pesquisador. Orellana; Vanclay (2018) avaliaram como grupos de espécies influenciam ou exercem competição sobre si e sobre os demais grupos da floresta. Nesse trabalho, os autores fizeram uso da metodologia apresentada na FIGURA 7, e encontraram resultados interessantes sobre a relação entre angiospermas, *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e outras angiospermas no sul do Brasil. Esse é um exemplo de como a conciliação entre modelos de árvores individuais, índices de competição e métodos de formação de grupos ecológicos pode fornecer respostas importantes para o entendimento do processo de crescimento da floresta.

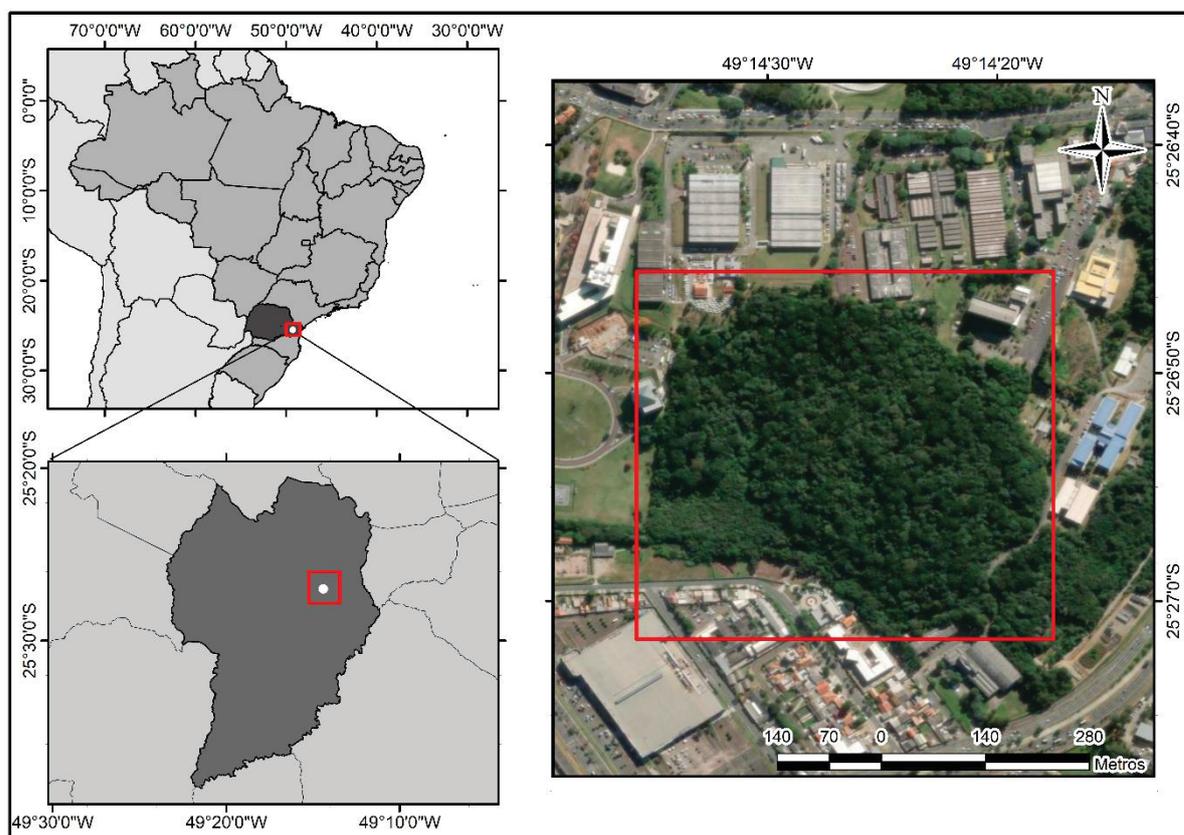
Além da formação de grupos a partir de características das árvores, a classificação a partir de critérios físicos como topografia e altitude também pode fornecer respostas importantes relacionadas aos fatores que conduzem o crescimento da floresta (KARIUKI et al., 2006).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado em um fragmento de floresta nativa situado em zona urbana de Curitiba, estado do Paraná - PR (FIGURA 9). O local é parte do Campus III - Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná. A área total do remanescente é de 15,24 hectares, dos quais 12,96 hectares são ocupados por Floresta Ombrófila Mista, e o restante ocupado por vegetação ripária e capoeira (MACHADO *et al.*, 2008).

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

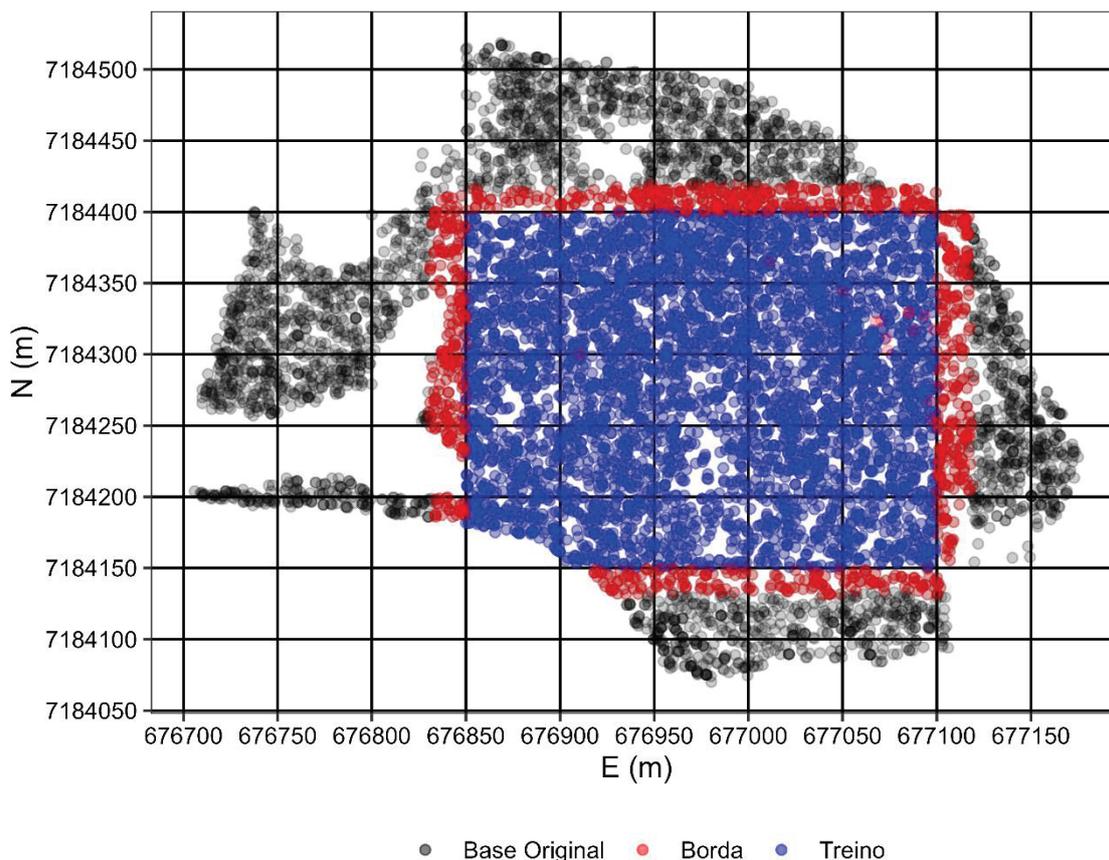


FONTE: o autor (2024).

Em 2006, a área foi alvo de censo florestal, e as remedições foram realizadas periodicamente a cada três anos, totalizando seis medições com a mais recente tendo sido efetivada em 2021. Os censos foram realizados a partir da divisão da área em blocos quadrados e contíguos de 50 m x 50 m, cujos vértices são georreferenciados

(projeção UTM, *datum* SAD69). Apenas a porção central (pontos azuis, FIGURA 10) do fragmento foi utilizada no estudo, e para minimizar o efeito de borda em índices de competição (POMMERENING, 2002) foi elaborada uma borda de 20 metros no entorno (pontos vermelhos), o que totalizou aproximadamente 6,25 hectares de área efetivamente amostrada e utilizadas nesta pesquisa.

FIGURA 10 - DIVISÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM BLOCOS E DEFINIÇÃO DA ÁREA AMOSTRAL.



FONTE: o autor (2024).

Em cada árvore foram coletadas as informações de diâmetro a 1,3 m ao nível do solo ( $d$ ), espécie e coordenadas cartesianas a partir do vértice do bloco. Para cada remedição, foi adotado diâmetro de inclusão de 10 cm. Após cada censo, os dados foram submetidos a verificações para averiguação de erros de medição ou de digitação. As verificações consistiram em conferência do somatório das colunas numéricas das planilhas físicas e digitais. Ao todo, foram identificadas 137 espécies arbóreas, das quais sete são espécies exóticas.

Na TABELA 1, apresenta-se o valor de cobertura das 20 espécies com maior Índice de Valor de Cobertura (IVC) da área de estudo. *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze é a espécie de maior valor de cobertura, típico dessa tipologia florestal. Isoladamente, a espécie ocupa um quarto da área basal do fragmento. Na FIGURA 11 está apresentada a distribuição diamétrica do fragmento em cada medição.

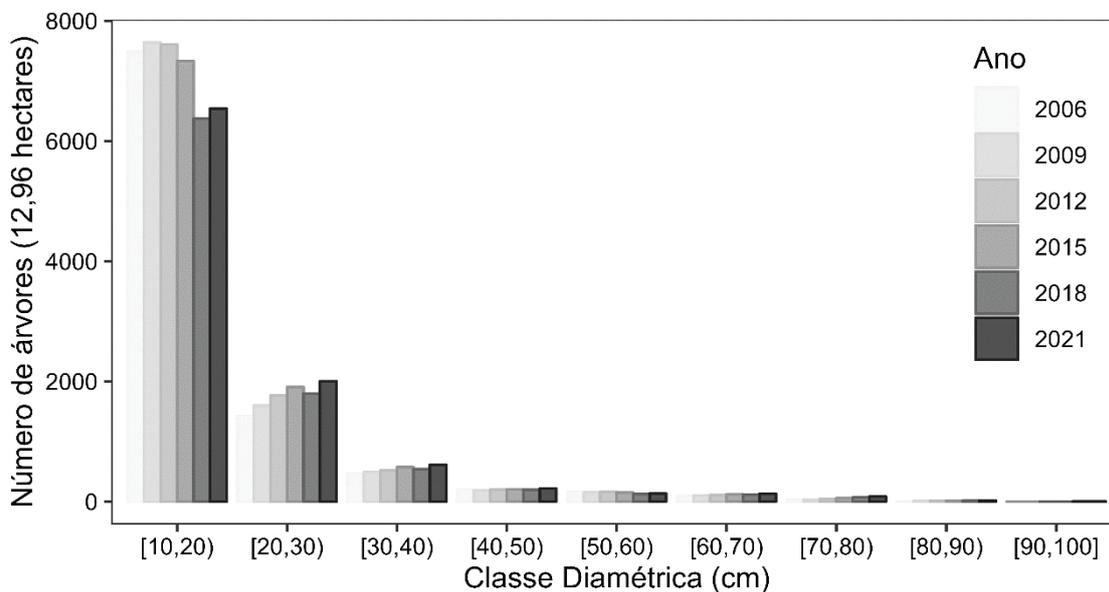
TABELA 1 - PARÂMETROS FITOSSOCIOLÓGICOS DAS 20 ESPÉCIES COM MAIORES ÍNDICE DE VALOR DE COBERTURA (IVC) DA ÁREA DE ESTUDO PARA O CENSO MAIS RECENTE (2021).

Espécie	DR (%)	DOR (%)	IVC
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	3,36	25,23	28,59
<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	14,98	6,94	21,92
<i>Luehea divaricata</i> Mart.	8,02	7,88	15,90
<i>Ocotea puberula</i> (Rich.) Nees	3,58	6,23	9,80
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	4,31	3,78	8,09
<i>Jacaranda puberula</i> Cham.	4,67	2,60	7,27
<i>Gymnanthes klotzschiana</i> Müll.Arg.	4,64	2,18	6,81
<i>Casearia obliqua</i> Spreng.	3,91	2,25	6,16
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	1,88	4,04	5,92
<i>Ocotea nutans</i> (Nees) Mez	2,91	2,61	5,52
<i>Allophylus edulis</i> (A.St.-Hil. et al.) Hieron. ex Niederl.	3,71	1,38	5,09
<i>Myrcia hatschbachii</i> D.Legrand	2,52	2,37	4,90
<i>Clethra scabra</i> Pers.	2,23	2,15	4,38
<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	2,17	2,02	4,18
<i>Nectandra lanceolata</i> Nees	1,57	2,39	3,96
<i>Ocotea bicolor</i> Vattimo-Gil	1,91	1,86	3,77
<i>Citronella gongonha</i> (Mart.) R.A.Howard	2,41	0,91	3,32
<i>Cupania vernalis</i> Cambess.	2,33	0,87	3,19
<i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC.	1,92	0,84	2,76
<i>Moquiniastrum polymorphum</i> (Less.) G. Sancho	1,12	1,49	2,62
Área Basal Total (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )		27,28	

DR: densidade relativa; DOR: dominância relativa; IVC: índice valor de cobertura.

FONTE: o autor (2024).

FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR MEDIÇÃO.



FONTE: o autor (2024).

Na TABELA 2 se encontram estatísticas do fragmento por ano de medição.

TABELA 2 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO FRAGMENTO POR ANO DE MEDIÇÃO.

Ano	Média (cm)	Mediana (cm)	Desvio Padrão	S	Mort. (ind.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	N (ind.ha <sup>-1</sup> )	Recr. (ind.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )
2006	18,03	14,55	10,17	130	0,000	760,957	0,000
2009	18,35	14,96	10,35	135	10,96	789,429	20,45
2012	18,75	15,28	10,67	134	13,86	804,475	18,88
2015	19,23	15,66	11,08	135	13,94	802,546	13,30
2018	19,62	15,92	11,52	132	40,120	716,049	11,29
2021	20,07	16,35	11,75	135	3,62	755,247	16,69

Média e mediana do diâmetro a 1,3 m (DAP). S é o número de espécies, Mort. é mortalidade por hectare no ano, N é o número de indivíduos vivos por hectare e Recr. é o número de árvores ingressantes por hectare no ano.

FONTE: o autor (2024).

### 3.2 FORMAÇÃO DE GRUPOS DE ESPÉCIES

Foram testadas duas alternativas para a formação de grupos. A primeira foi a classificação a partir dos grupos ecológicos de pioneiras (P), secundárias (S) e climáticas (CI) (SWAINE; WHITMORE, 1988). No local também existe a ocorrência de espécies exóticas, com ênfase nas espécies *Hovenia dulcis* Thunberg, *Ligustrum lucidum* W.T.Ait. e *Eriobotrya japônica* (Thunb.) Lindl. Por isso, também foi incluída uma quarta classificação para tais espécies (Ex). A classificação das espécies foi a mesma de Accioly (2018) para a mesma área de estudo. A lista completa das espécies e suas classificações pode ser encontrada apêndice 1(TABELA 21). Os grupos formados a partir dessa classificação foram denominados de Grupos Ecológicos.

A segunda alternativa consistiu em grupos de indivíduos em vez de espécies, em que se procura agrupar indivíduos similares quanto a uma proporção entre o diâmetro da árvore alvo e o diâmetro quadrático médio (dq) das árvores vizinhas. Foi considerado um raio de 15 m para seleção das árvores vizinhas, uma vez que estudos similares mostram que tal distância de inclusão maximiza a relação com incremento diamétrico (ORSO *et al.*, 2020). Os grupos formados a partir dessa classificação foram denominados de Grupos Alométricos.

Seja  $d_i$  o diâmetro da  $i$ -ésima árvore alvo, todas as árvores  $j$  situadas a uma distância  $L_{ij}$  tal que  $L_{ij} < R$  são consideradas vizinhas da árvore  $i$ , e  $R$  é o raio delimitado para inclusão de vizinhas ( $R = 15$  m). O diâmetro quadrático médio ( $dq_i$ ) da vizinhança da árvore alvo  $i$  é calculado a partir da transformação inversa da área transversal média das árvores vizinhas  $\bar{g}_i$ :

$$\begin{aligned}\bar{g}_i &= \frac{\sum_{j=1}^{n_i} g_j}{n_i} = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{d_j^2 \pi}{40000} \frac{1}{n_i} = \\ &= \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{d_j^2 \pi}{40000} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} d_j^2 \frac{\pi}{40000} = \\ \bar{g}_i &= dq_i^2 \frac{\pi}{40000}\end{aligned}$$

Em que  $\bar{g}_i$  é a área transversal média, em  $m^2$ , das  $j$  árvores vizinhas,  $g_j$  é a área transversal da  $j$ -ésima árvore vizinha,  $d_j$  é o diâmetro (em cm) da  $j$ -ésima árvore

vizinha,  $n_i$  é o número de árvores vizinhas da árvore alvo  $i$ ,  $dq_i$  é o diâmetro quadrático médio das árvores vizinhas  $j$ .

Portanto, o diâmetro quadrático médio pode ser definido como:

$$dq_i = \sqrt{\frac{\bar{g}_i 40000}{\pi}} \quad (1)$$

Dessa forma, define-se a razão  $Q_i$  entre  $d_i$  e  $dq_i$  como:

$$Q_i = \frac{d_i}{dq_i} \quad (2)$$

Analogamente à equação (1), o diâmetro da  $i$ -ésima árvore pode ser descrito como:

$$d_i = \sqrt{\frac{g_i 40000}{\pi}}$$

Note-se que, apesar de descrita em termos de diâmetro, a razão  $Q_i$  relaciona áreas transversais (Equação (3)), pois:

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{d_i}{dq_i} = \frac{\sqrt{\frac{g_i 40000}{\pi}}}{\sqrt{\frac{\bar{g}_i 40000}{\pi}}} = \\ &= \frac{\sqrt{g_i} \sqrt{\frac{40000}{\pi}}}{\sqrt{\bar{g}_i} \sqrt{\frac{40000}{\pi}}} = \frac{\sqrt{g_i}}{\sqrt{\bar{g}_i}} = \\ &Q_i = \sqrt{\frac{g_i}{\bar{g}_i}} \quad (3) \end{aligned}$$

Após o cálculo da razão  $Q_i$ , cada árvore foi classificada em grupos a partir da distribuição amostral de  $Q_i$ . A quantidade de grupos e sua amplitude foi arbitrária (TABELA 3), considerando testes de 'tentativa e erro' (visando minimizar o erro do

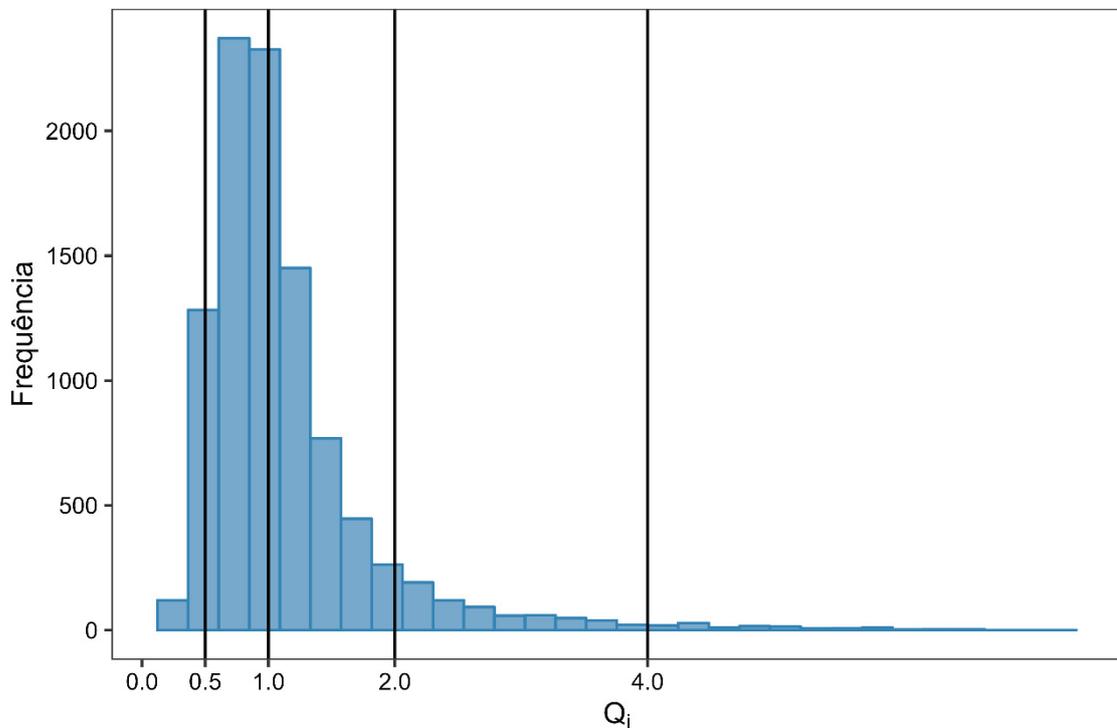
modelo final), além da quantidade de árvores em cada grupo a partir da distribuição amostral de  $Q_i$ .

TABELA 3 - DESCRIÇÃO E AMPLITUDE DE CADA GRUPO DA METODOLOGIA EMPREGADA NOS GRUPOS ALOMÉTRICOS.

Grupos	Amplitudes ( $Q_i$ )
A	0  -- 0,5
B	0,5  -- 1
C	1  -- 2
D	2  -- 4
E	4  -- $\infty$

FONTE: o autor (2024).

FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL DE  $Q_i$  PARA FORMAÇÃO DOS GRUPOS ALOMÉTRICOS.



$Q_i$  é a razão de diâmetro quadrático médio para a formação de grupos.

FONTE: o autor (2024).

### 3.3 CÁLCULO DE ÍNDICES DE COMPETIÇÃO

A modelagem de dados de crescimento em nível de árvore individual recorre frequentemente ao uso de índices de competição (WEISKITTEL *et al.*, 2011), em que a disponibilidade de informações espaciais (como localização dos indivíduos) é um fator limitante para o uso de índices dependentes ou independentes da distância (PUKKALA; KOLSTRÖM, 1987).

Nesse trabalho, foram utilizados índices de ambos os grupos. O índice independente de distância utilizado foi o índice BAL (*Basal Area in Larger Trees*), pois é um dos índices mais utilizados na literatura, pode ser calculado sem a necessidade de dados adicionais, como posição das árvores, e frequentemente é o que possui mais correlação com as medidas de crescimento.

Já os índices dependentes da distância utilizados foram o índice de Hegyi (HEGYI, 1974) e um dos índices propostos por Tomé e Burkhart (1989). Ambos relacionam o diâmetro das árvores alvo e vizinha com uma ponderação pela distância. O índice de Hegyi foi escolhido por ser amplamente utilizado em estudos quando há a localização das árvores na parcela. O índice de Tomé e Burkhart também foi escolhido pois diferentemente do anterior, possibilita a ocorrência de valores negativos, o que pode gerar maior correlação com o crescimento diamétrico (ORSO *et al.*, 2020).

#### 3.3.1 Índice independente da distância

O índice independente da distância utilizado foi o BAL (*Basal Area in Larger trees*), calculado como a soma de áreas transversais maiores que a área transversal da árvore alvo na parcela (Equação 4). Note que todas as árvores da parcela são candidatas a comporem o índice, que para cada parcela varia de  $BAL_i = 0$  a  $BAL_i = G_p - g_i$ , onde  $G_p$  é a área basal da parcela.

$$BAL_i = \sum_{j=1}^{n_i} g_j \quad \forall g_j > g_i \quad (4)$$

### 3.3.2 Índices dependentes da distância

Os dois índices de competição utilizados foram Hegyi (HEGYI, 1974) e Tomé e Burkhart (TOMÉ; BURKHART, 1989). Ambos fazem a comparação entre os diâmetros da árvore alvo e vizinhas ponderada pela distância euclidiana, enquanto o primeiro faz a razão entre diâmetros (Equação 5) e o segundo compara pela diferença entre diâmetros (Equação 6).

$$H_i = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{d_j}{d_i} \frac{1}{L_{ij}} \quad \forall L_{ij} \leq R \quad (5)$$

$$TB_i = \sum_{j=1}^{n_i} (d_j - d_i) \frac{1}{L_{ij}} \quad \forall L_{ij} \leq R \quad (6)$$

Onde  $H_i$  e  $TB_i$  são os índices de competição de Hegyi e Tomé e Burkhart para a árvore alvo  $i$ . No seu trabalho original, HEGYI (1974) faz a razão  $d_j/d_i$ , o que leva a uma correlação positiva com incremento diamétrico. Neste trabalho, no entanto, foi utilizada a razão conforme a Equação 5 para gerar correlação negativa.

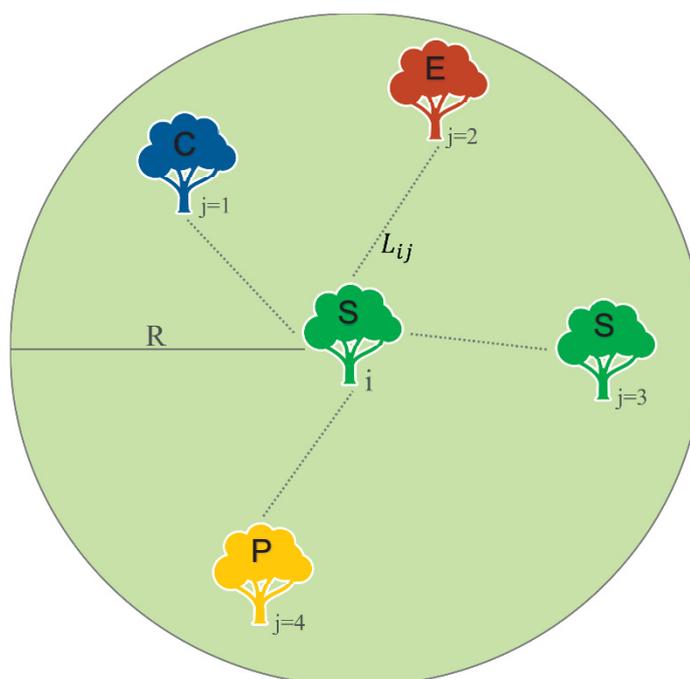
### 3.3.3 Decomposição do índice de competição

Da maneira que foram formulados, os índices de competição relacionam tamanhos, distâncias e quantidade de vizinhos para uma dada árvore. No entanto, originalmente não incorporam de nenhuma forma a espécie ou ao menos grupos de indivíduos similares. Atualmente, existem duas formas gerais de incorporar essa informação nos índices:

1. cálculo parcial do índice de competição, considerando apenas as árvores de interesse, como realizado por (ORELLANA; VANCLAY, 2018; CONDÉS; PRETZSCH; RÍO, 2023);
2. fracionar o valor do índice de competição para cada grupo de observações da vizinhança (HUI et al., 2018; SUN et al., 2022).

Pela FIGURA 13, exemplifica-se cada uma dessas formas de decomposição no cálculo dos índices de competição. Na primeira, a competição exercida pelo grupo C sobre o grupo S é calculada incluindo apenas o grupo C no cálculo do índice de competição, excluindo-se as demais árvores da vizinhança e relacionando o efeito de tal medida no crescimento de um dos grupos de interesse. Tal metodologia tem sido recentemente empregada em florestas naturais da Europa (RÍO et al., 2016; CONDÉS; PRETZSCH; RÍO, 2023). No Brasil, essa abordagem foi usada por Orellana (2014) e Orellana e Vanclay (2018) para avaliar o efeito competitivo entre *A. angustifolia* e angiospermas.

FIGURA 13 - EXEMPLIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARCIAIS DA ÁRVORE ALVO EM RELAÇÃO ÀS ÁRVORES VIZINHAS.



$i$  é o índice da árvore alvo;  $j$  é o índice das árvores vizinhas; P, S, C e E são os grupos de espécies, e  $L$  é a distância euclidiana entre árvores.

FONTE: o autor (2024).

O segundo método quantifica a contribuição de cada grupo no índice, *i.e.*, todas as árvores vizinhas são utilizadas, porém com pesos proporcionais ao efeito de cada grupo. Um exemplo dessa abordagem está presente em Sun et al. (2022), onde esses autores utilizaram modelos generalizados aditivos para avaliar o efeito de cada grupo na composição do índice de competição. Os grupos, no entanto, foram as

árvores vizinhas situadas nos quadrantes Norte, Sul, Leste e Oeste de cada árvore alvo.

Para o presente estudo, o segundo método inspirou o desenvolvimento da metodologia, com ênfase na metodologia proposta por Sun et al. (2022). A principal diferença é que o fracionamento dos índices de competição foi realizado via combinação linear dos grupos, ou seja, o índice de competição para uma dada árvore é calculado a partir de uma soma das frações dos grupos presentes na vizinhança (Equação 7). Seja  $IC_i$  um índice de competição qualquer calculado para a árvore  $i$ , então seu valor pode ser decomposto via combinação linear:

$$IC_i = \alpha_A ICP_{iA} + \alpha_B ICP_{iB} + \dots + \alpha_k ICP_{ik} = \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{ICP}_i \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_A \\ \alpha_B \\ \vdots \\ \alpha_k \end{bmatrix}_{k \times 1} \quad \mathbf{ICP}_i = \begin{bmatrix} ICP_{iA} \\ ICP_{iB} \\ \vdots \\ ICP_{ik} \end{bmatrix}_{k \times 1}$$

Onde  $\boldsymbol{\alpha}$  é o vetor de pesos ou coeficientes da combinação;  $\alpha_k$  é o peso do  $k$ -ésimo grupo;  $\mathbf{ICP}_i$  é o vetor de valores parciais do índice de competição da  $i$ -ésima árvore alvo;  $ICP_{ik}$  é o índice de competição parcial do  $k$ -ésimo grupo para a árvore  $i$ .

O resultado dessa operação é um escalar, o qual pode ou não se igualar ao valor original do índice de competição a depender de restrições impostas no vetor de pesos da combinação. Os pesos são o principal objetivo na Equação 7, pois refletem o efeito de cada grupo na competição sofrida por uma árvore qualquer. Assim, o método utilizado para obtenção do vetor de pesos deve seguir tal condição, sendo oportuno buscar pelos pesos que maximizem a relação entre o IC e o crescimento da árvore. Portanto, a metodologia consistiu em encontrar os pesos que maximizem a correlação entre o índice de competição e o incremento diamétrico (Equação 8).

$$f(\boldsymbol{\alpha}) = \underset{\boldsymbol{\alpha}}{\operatorname{argmax}} \operatorname{Corr}(\Delta d_i, \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{ICP}_i) \quad (8)$$

$$\Delta d_i = d_{i,t+\Delta t} - d_{i,t}$$

Em que  $\Delta d_i$  é o crescimento em diâmetro do tempo  $t$  para o tempo  $t + \Delta t$ .

Entretanto, não há razão para assumir que a competição é a mesma entre grupos (POMMERENING; SÁNCHEZ-MEADOR, 2018; OBOITE; COMEAU, 2019). Do contrário, o efeito competitivo exercido por um grupo A em B, denotado por  $A \rightarrow B$ , pode não ser o mesmo de  $B \rightarrow A$ . Tal condição estende o vetor de pesos na Equação 7 para uma matriz de pesos, uma vez que existirão  $k$  conjuntos de pesos, *i.e.*, um para cada grupo da árvore alvo em questão (TABELA 4). Assim, o número do total de pesos será  $k^2$ .

TABELA 4 - CONJUNTOS DE PESOS DE CADA GRUPO VIZINHO EM FUNÇÃO DO GRUPO ALVO.

		Grupo Alvo			
		$A$	$B$	$\dots$	$k$
Grupo Vizinho	$A$	$\alpha_{AA}$	$\alpha_{AB}$	$\dots$	$\alpha_{Ak}$
	$B$	$\alpha_{BA}$	$\alpha_{BB}$	$\dots$	$\alpha_{Bk}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	$k$	$\alpha_{kA}$	$\alpha_{kB}$	$\dots$	$\alpha_{kk}$

FONTE: o autor (2024).

Onde  $\alpha_{BA}$ , por exemplo, é o efeito que o grupo B exerce sobre o grupo A.

A TABELA 4 pode ser interpretada como um conjunto de vetores coluna, onde a primeira coluna se refere aos pesos que influenciam o primeiro grupo, e assim sucessivamente. Assim, é preciso modificar a Equação (7) a fim de conciliar o vetor de pesos correto para o grupo da árvore alvo. Isso pode ser feito adaptando o vetor  $\alpha$  da Equação (7) para a nova matriz de pesos  $\alpha$  associada a uma matriz de incidência  $M$ . Ao generalizar a Equação (7) da observação  $i$  para todas as observações, tem-se que

$$IC = ICP (M\alpha)^T$$

$$\mathbf{IC} = \begin{bmatrix} IC_1 \\ IC_2 \\ IC_3 \\ \vdots \\ IC_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_{AA} & \alpha_{AB} & \cdots & \alpha_{Ak} \\ \alpha_{BA} & \alpha_{BB} & \cdots & \alpha_{Bk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{kA} & \alpha_{kB} & \cdots & \alpha_{kk} \end{bmatrix}_{k \times k}$$

$$M = \begin{bmatrix} A & B & C & \cdots & k \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix}_{n \times k}$$

$$\mathbf{ICP} = \begin{bmatrix} A & B & C & \cdots & k \\ ICP_{1A} & ICP_{1B} & ICP_{1C} & \cdots & ICP_{1k} \\ ICP_{2A} & ICP_{2B} & ICP_{2C} & \cdots & ICP_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ICP_{nA} & ICP_{nB} & ICP_{nC} & \cdots & ICP_{nk} \end{bmatrix}_{n \times k}$$

Em que  $\mathbf{IC}$  agora deve ser um vetor de tamanho  $n$  com o valor do índice de competição para cada árvore;  $\mathbf{ICP}$  é a matriz com os valores parciais do IC para cada indivíduo por grupo;  $\boldsymbol{\alpha}$  é agora uma matriz de pesos dos grupos, e  $M$  é a matriz modelo que codifica o grupo da  $i$ -ésima observação. A matriz  $M$  é responsável por associar o vetor de pesos correto para o grupo de cada observação.

O resultado da operação é uma matriz de tamanho  $n \times n$ , onde apenas os elementos da diagonal possuem pesos corretamente associados aos grupos das observações. Tomando-se a diagonal dessa matriz e reordenando da equação, tem-se que o índice de competição pode ser reescrito conforme a Equação (9).

$$\mathbf{IC} = \text{diag}(\mathbf{ICP} \times \boldsymbol{\alpha} M^T) \quad (9)$$

A função a ser otimizada se torna então a Equação 10.

$$f(\boldsymbol{\alpha}) = \underset{\boldsymbol{\alpha}}{\text{argmax}} \text{Corr}(\Delta d, \mathbf{IC}) \quad (10)$$

A solução da Equação 10 foi obtida de forma numérica, utilizando o algoritmo Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) para otimização numérica (FLETCHER, 2000). A otimização também foi realizada sob restrição de norma 1, *i.e.*,  $\|\alpha\| = 1$ , para comparação do efeito entre os diferentes grupos.

### 3.4 MODELO DE CRESCIMENTO DIAMÉTRICO

Após a obtenção dos pesos para cada grupo, buscou-se modelar a produção futura em diâmetro como função linear dos grupos e dos índices de competição ponderados (Equação 11). Também foram testadas funções de ligação  $g(\cdot)$  buscando linearidade entre a variável dependente e os índices de competição.

$$g(d_{i,t+\Delta t}) = f(\text{Hegy}i_i, TB_i, BAL_i, \text{Grupo}_i) \quad (11)$$

Também foi modelada a estrutura de variância do modelo em função dos grupos criados utilizando o estimador de mínimos quadrados generalizados - GLS (FITZMAURICE; LAIRD; WARE, 2012). Os mínimos quadrados generalizados têm como estimador dos parâmetros do modelo a forma da Equação 12:

$$\hat{\beta} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} Y \quad (12)$$

Em que  $\hat{\beta}$  é o vetor de parâmetros estimados pela matriz do modelo  $X$  e a matriz de variância-covariância  $V$ .

A estrutura de variância ficou na forma da Equação 13.

$$V = \begin{bmatrix} \sigma_c^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_c^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_c^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_c^2 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad c = 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

Em que  $\sigma_c^2$  é a variância do  $c$ -ésimo grupo, e  $n$  é o número de indivíduos.

O modelo foi ajustado via estimador de máxima verossimilhança restrita, em que, por padrão, assumiu-se distribuição normal de  $E[Y|X]$ . Os critérios de avaliação

do modelo foram gráficos de dispersão e de distribuição dos resíduos, bem como estatísticas de ajuste, como coeficiente de determinação e raiz do erro quadrático médio.

Em caso de transformação da variável resposta via função de ligação  $g(\cdot)$ , a transformação de volta para a variável original foi realizada via *bootstrap* paramétrico com  $B = 5000$  reamostragens. Seja  $b_i$  uma amostra *bootstrap* a partir do modelo na escala transformada  $y^*$ , onde  $i = 1, 2, \dots, B$ , então

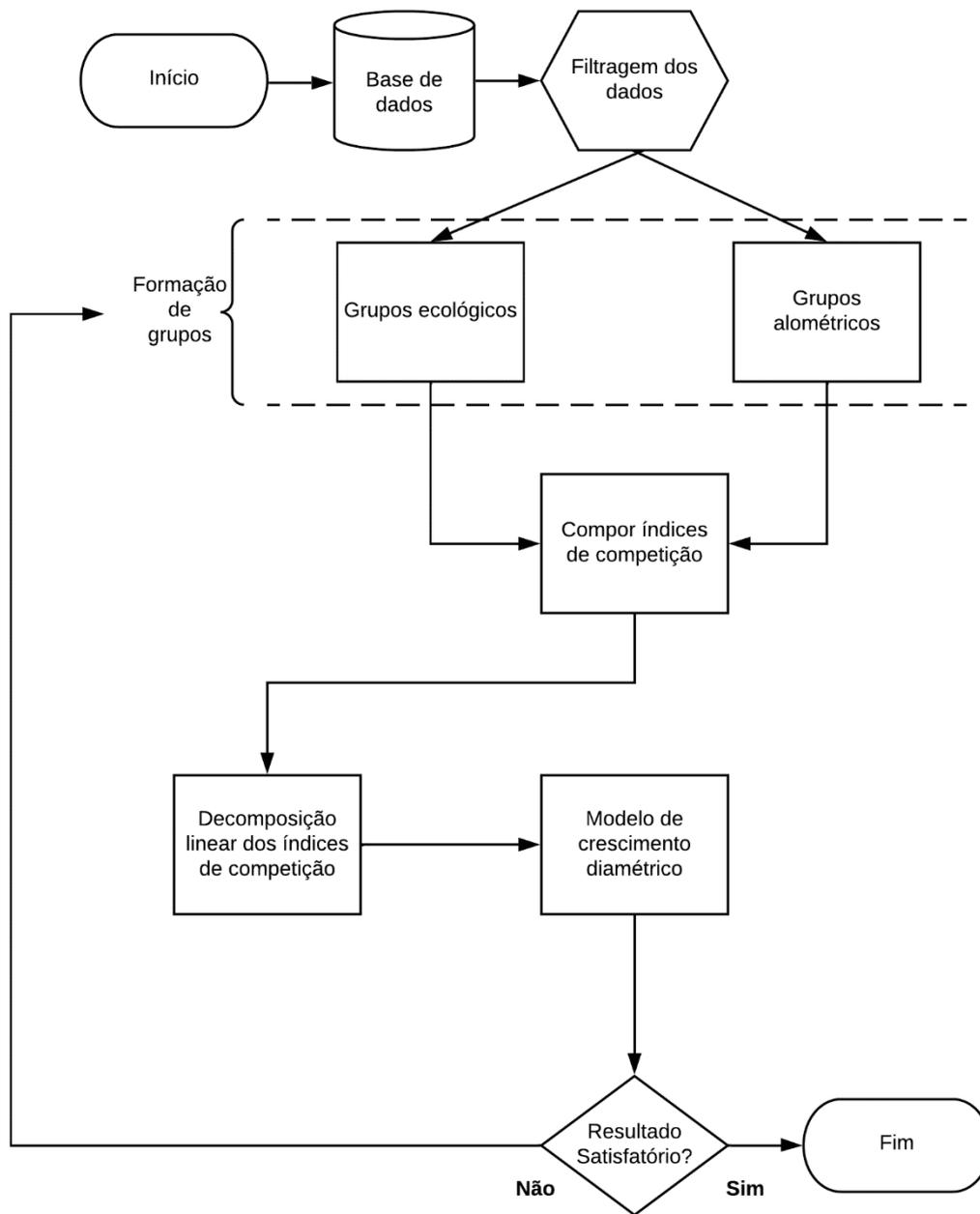
$$\begin{aligned} b_i &= g^{-1}(\hat{y}^*) \\ \hat{y} &= \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B b_i \end{aligned} \quad (14)$$

Em que  $y$  é a variável na escala original, e  $y^*$  é a variável transformada.  $g^{-1}(\cdot)$  é a inversa da função de ligação utilizada.

### 3.5 RESUMO DA METODOLOGIA

Na Figura 5, apresenta-se o fluxograma simplificado das etapas realizadas no estudo. Todos os processos (caixas retangulares) dependem diretamente dos grupos formados. Como foram testadas duas metodologias de formação de grupos, tanto a decomposição dos índices de competição quanto o modelo de crescimento foram realizados duas vezes.

FIGURA 14 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA ADOTADA.



FONTE: o autor (2024).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 GRUPOS DE ESPÉCIES

As TABELA 5 e TABELA 6 resumem as informações, respectivamente, da metodologia de grupos ecológicos conforme definido por Accioly (2018) para a mesma área de estudo e da metodologia de grupos alométricos a partir da razão do diâmetro com o diâmetro quadrático médio das vizinhas. Há, evidentemente, uma diferença do número de espécies de cada grupo para as duas metodologias. Enquanto no primeiro método garantem-se grupos mutuamente excludentes quanto às espécies que os compõem, o segundo gera grupos com composição florística diversa e com sobreposição de espécies.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS GRUPOS ECOLÓGICOS NA ÁREA DE ESTUDO

Grupo	Nº de espécies	d médio (cm)	d mediano (cm)	Desvio-padrão (cm)	CV (%)
P	22	19,03	16,87	12,81	67,28
S	30	16,37	16,55	10,28	62,76
Cl	45	23,82	18,14	17,66	74,14
Ex	3	24,18	23,35	12,17	50,31

d é o diâmetro à 1,3 m acima do solo (DAP). P, S, Cl e Ex são os grupos Pioneiras, Secundárias, Climáticas e Exóticas. CV é o coeficiente de variação do diâmetro.

FONTE: o autor (2024).

A formação dos grupos depende de inúmeros fatores, como a quantidade de espécies, comportamento dos dados observados e o objetivo do estudo. O primeiro método é geralmente usado quando a criação de modelos não é o objetivo principal do estudo. Por outro lado, o segundo agrupa os indivíduos a partir de uma característica medida ou observada, o que tende a gerar grupos bem definidos para construção de modelos (GOURLET-FLEURY *et al.*, 2005). Isso pode ser observado pelo menor coeficiente de variação do diâmetro para os grupos formados pelo segundo método.

TABELA 6 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS GRUPOS ALOMÉTRICOS FORMADOS NA ÁREA.

Grupo	Nº de Espécies	d médio (cm)	d mediano (cm)	Desvio-padrão (cm)	CV (%)
A	52	12.66	13.35	5.33	42.07
B	88	14.64	14.93	6.96	47.55
C	77	20.11	20.50	10.93	54.37
D	36	43.02	42.48	19.07	44.34
E	8	72.03	71.08	9.65	13.39

d é o diâmetro à 1,3 m acima do solo (DAP). A, B, C, D e E são os grupos alométricos formados.

FONTE: o autor (2024).

Outra diferença importante entre as duas metodologias é que, enquanto no primeiro método uma determinada árvore sempre pertencerá no mesmo grupo, no segundo, não há tal condição. Como o segundo método é função do diâmetro da árvore alvo, o crescimento da árvore permite o avanço de um grupo para o próximo, ou até mesmo retrocesso para um grupo anterior quando a árvore diminui seu ritmo de crescimento em comparação com as vizinhas.

Ao comparar os diâmetros médios e medianos, o segundo método evidencia um claro aumento de diâmetro do grupo (TABELA 6), em comparação com os grupos ecológicos (TABELA 5). O grupo E da segunda metodologia abriga espécies de maior tamanho na área de estudo, como *A. angustifolia*, *C. fissilis*, *O. nutans* e *O. puberula*. Ainda assim, todas as espécies do grupo E também compõem o grupo D, o que novamente marca a diferença entre os métodos de formação de grupos.

## 4.2 DECOMPOSIÇÃO VIA COMBINAÇÃO LINEAR

### 4.2.1 Grupos ecológicos

Os pesos que maximizam a correlação entre incremento diamétrico e os índices de competição para os grupos ecológicos são apresentados na TABELA 7. É evidente o efeito das árvores exóticas na vizinhança de uma determinada árvore. Mesmo com baixa densidade, é o grupo que mais influencia no crescimento dos demais nos dois índices de competição dependentes da distância. As três espécies

exóticas que resultaram nessas influencias foram *Ligustrum lucidum*, *Hovenia dulcis* e *Eriobotrya japonica*.

TABELA 7 - CONJUNTOS DE PESOS DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.

	P	S	CI	Ex
<b>Hegyí</b>				
P	0,20410	0,21016	0,15655	-0,10805
S	0,03107	0,07969	0,20054	0,42960
CI	0,12719	0,23280	0,07150	0,11448
Ex	0,63764	0,47735	0,57141	0,34787
<b>Tomé e Burkhart</b>				
P	0,28609	0,10542	0,15712	0,10279
S	-0,01617	0,20123	0,13916	0,49485
CI	0,06220	0,05363	0,07357	-0,22694
Ex	0,63554	0,63972	0,63014	0,17543
<b>BAL</b>				
P	0,15383	0,22774	0,20246	0,31916
S	0,43906	0,36957	0,28174	-0,30685
CI	0,16240	0,10217	0,20889	0,18781
Ex	0,24472	0,30052	0,30691	0,18618

P, S, CI e Ex são os grupos Pioneiras, Secundárias, Climáticas e Exóticas. BAL é o índice de competição BAL.

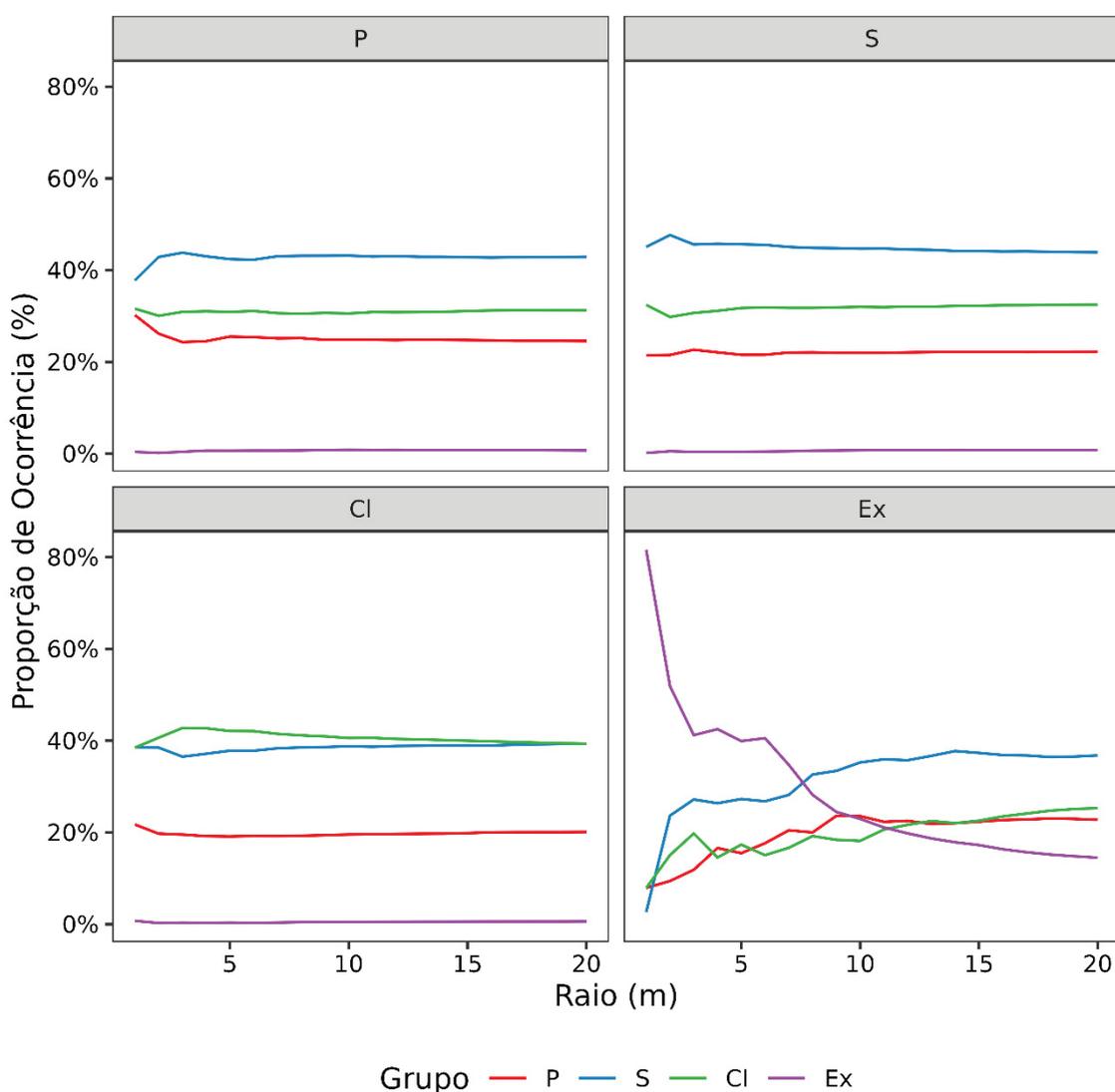
FONTE: o autor (2024).

Para o índice independente da distância (BAL), observou-se o contrário, onde o efeito das espécies exóticas não é o de maior magnitude para os outros grupos. Isso pode ser reflexo da própria forma com que o índice agrega a vizinhança. Os índices dependentes de distância frequentemente possuem as árvores alvo no centro da vizinhança, o que as tornam proporcionalmente suscetíveis ao efeito das demais após ponderação pela distância. Em contrapartida, os índices independentes de distância como BAL pode conter árvores alvo situadas em qualquer ponto da parcela considerada, além de frequentemente terem um maior número de árvores como vizinhas, quando comparados com os índices dependentes da distância (WEISKITTEL *et al.*, 2011). Tais condições podem conduzir a valores de peso mais relacionados à abundância de cada grupo na parcela.

As linhas da FIGURA 15 corroboram com esse pensamento, apresentando as proporções médias de ocorrência de cada grupo ecológico nas respectivas

vizinhanças. A ocorrência de espécies exóticas é mínima nos outros grupos, porém extremamente influente (TABELA 7). Por outro lado, as espécies exóticas têm padrão de ocorrência agregado para pequenas distâncias (FIGURA 15), o que aumenta a abundância do grupo na parcela, o que reflete no peso associado ao grupo para o índice BAL da TABELA 7.

FIGURA 15 - PROPORÇÃO DE OCORRÊNCIA DE GRUPOS VIZINHOS EM RELAÇÃO AOS GRUPOS ECOLÓGICOS.



P, S, CL e Ex são os grupos Pioneiras, Secundárias, Climácias e Exóticas, respectivamente.

FONTE: o autor (2024).

As espécies secundárias (S) são aproximadamente 40% da ocorrência de vizinhas em toda a distribuição radial (FIGURA 15) para os grupos de espécies

nativas. Os demais grupos de espécies nativas também têm comportamento similar entre si, com climáticas e pioneiras tendo proporção de ocorrência levemente maior, porém constante quando a árvore alvo é do mesmo grupo ecológico. A diferença está no comportamento do grupo de espécies exóticas. A vizinhança imediata desse grupo é composta majoritariamente não só de indivíduos do mesmo grupo, como também da mesma espécie, uma vez que tal comportamento é típico de algumas das espécies exóticas presentes no local, como *Ligustrum lucidum* (Ligustro/Alfeneiro) e *Hovenia dulcis* (uva-do-japão). A TABELA 8 apresenta a relação de tamanhos entre as espécies exóticas e as demais presentes na área de estudo. Além do padrão de ocupação agregado, duas das três espécies possuem diâmetro médio maior que a média das nativas.

TABELA 8 - DIÂMETRO MÉDIO, PROPORÇÃO EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO MÉDIO DA FLORESTA E ÁREA BASAL DAS ESPÉCIES EXÓTICAS.

	<i>E. japonica</i>	<i>H. dulcis</i>	<i>L. lucidum</i>
d médio (m)	14,24	22,44	17,76
Relação d/d	0,78	1,23	1,02
G (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	0,0039	0,0588	0,0421

d médio é o diâmetro medido à 1,3 m acima do solo (DAP) médio da espécie; Relação d/d é a razão entre o diâmetro médio da espécie exótica e as demais nativas, G é a área basal por hectare da espécie.

FONTE: o autor (2024).

Nem todas as árvores da área possuem espécies exóticas como vizinhas, e, como os pesos dentro de cada coluna não são independentes, pois foram obtidos sob restrição, os resultados da TABELA 7 não são os ótimos para todos os indivíduos. Na TABELA 9 apresenta-se a mesma análise, porém considerando somente árvores que não possuem espécies exóticas vizinhas dentro do raio de 15 m delimitado, cerca de 81,27% do banco de dados original utilizado, ou seja, aproximadamente uma a cada 5 árvores possui uma espécie exótica próxima até uma distância de 15 m.

TABELA 9 - VETORES DE PESOS DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS, DESCONSIDERANDO O GRUPO DE ESPÉCIES EXÓTICAS.

	P	S	CI
	<b>Hegyí</b>		
P	0,57718	0,29189	0,40503

	P	S	Cl
S	-0,05431	0,24086	0,41706
Cl	0,36851	0,46725	0,17791
<b>Tomé e Burkhart</b>			
P	0,77098	0,28413	0,46199
S	-0,07070	0,51691	0,36071
Cl	0,15832	0,19896	0,17730
<b>BAL</b>			
P	0,14974	0,33940	0,31632
S	0,58443	0,51131	0,39716
Cl	0,26583	0,14929	0,28652

P, S, Cl e Ex são os grupos Pioneiras, Secundárias, Climácias e Exóticas. BAL é o índice de competição *Basal Area in Larger trees*,

FONTE: o autor (2024).

Comparando os índices de Hegyi e Tomé e Burkhart (TB, ambos possuem o grupo Pioneiras como de maior efeito no grupo Pioneiras, além de ser muito influente no grupo das Climácias. O grupo das secundárias difere em relação aos índices. Para o índice de Hegyi, as climácias são mais influentes, enquanto as secundárias são mais influentes entre si para o índice TB. Essas diferenças estão associadas à forma de como os índices abordam a competição entre árvores. Enquanto o índice de Hegyi calcula uma razão entre diâmetros, o segundo faz a diferença, o que permite a ocorrência de valores negativos e teoricamente considera outros efeitos além da competição entre árvores, como facilitação (TOMÉ; BURKHART, 1989; POMMERENING; SÁNCHEZ-MEADOR, 2018; KUEHNE; WEISKITTEL; WASKIEWICZ, 2019).

O grupo das espécies climácias possui pouco efeito intragrupo, mesmo compondo a maior parte da sua vizinhança (FIGURA 15), com pesos próximos de 0,18 (TABELA 9). Em uma suposição de hipótese nula para o efeito dos grupos, os pesos de cada grupo seriam 1/3, em que, como o grupo das climácias é o mais distante desse valor, é possível que os valores encontrados sejam reflexos de uma baixa competição intragrupo, associada com efeitos similares de competição com os grupos pioneiras e secundárias.

Para o índice BAL, as secundárias foram as mais influentes para todos os grupos. Considerando que foi o grupo de maior ocorrência (FIGURA 15), os pesos encontrados novamente corroboram a hipótese de que índices independentes da distância como BAL são mais afetados pela abundância dos grupos, independente do

grupo da árvore alvo. Todos os índices analisados são negativamente correlacionados com o incremento (TABELA 10), o que significa que o aumento do valor do índice de competição está associado com uma diminuição do incremento diamétrico.

TABELA 10 - CORRELAÇÕES ENTRE INCREMENTO DIAMÉTRICO E ÍNDICE DE COMPETIÇÃO ANTES E DEPOIS DE APLICAÇÃO DOS PESOS PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.

Índice	Original	Ponderado
Hegyí	-0,3674	-0,5370
Tomé e Burkhart	-0,4185	-0,5789
BAL	-0,3685	-0,5447

BAL é o índice de competição *Basal Area in Larger trees*.

FONTE: o autor (2024).

O efeito da competição por grupo já é estudado em diversas regiões, como América do Norte (STADT *et al.*, 2007), Europa (MIINA; PUKKALA, 2002; POMMERENING; LEMAY; STOYAN, 2011), América do Sul (ORELLANA; VANCLAY, 2018) e Oceania (VANCLAY, 2006). Nos casos da Europa e América do Norte os efeitos de competição são muitas vezes calculados diretamente para cada espécie, dada a baixa quantidade de espécies arbóreas das florestas. Na Oceania e América do Sul a formação de grupos se faz necessária, porém diferentes metodologias de classificação de espécies dificultam a comparação dos resultados entre trabalhos.

Na pesquisa de Orellana e Vanclay (2018), realizado também em Floresta Ombrófila Mista, esses autores definiram grupos de i) Espécies exigentes de luz; ii) Espécies tolerantes ao sombreamento; e iii) coníferas, composto exclusivamente de *A. angustifolia*. Os critérios de definição dos grupos i) e ii) dependeram de uma classificação anterior baseada em Alder *et al.* (2002), que utiliza o diâmetro no percentil 95% e o incremento médio de cada espécie. Os autores encontraram que há diferença de magnitude da competição entre os grupos formados.

#### 4.2.2 Grupos Alométricos

Os pesos dos grupos alométricos (TABELA 11) mostram o impacto de cada um no crescimento diamétrico. Uma vez que foram cinco grupos gerados, a condição

de igualdade de efeito em cada grupo implicaria em pesos de  $1/5 = 0,2$  para cada grupo.

De maneira geral, as menores árvores (grupos A e B) são as de maior peso entre si, tanto para índices dependentes quanto independentes de distância. A partir do grupo C, de árvores com razão  $Q_i > 1$ , os maiores grupos passam a ter maiores pesos na ponderação dos índices.

TABELA 11 - VETORES DE PESOS DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.

	A	B	C	D	E
<b>Hegyí</b>					
A	0,31065	0,32715	0,29529	0,06120	-0,00004
B	0,24254	0,20568	0,16477	-0,45631	-0,99978
C	0,17090	0,18088	0,09033	-0,04077	-0,00004
D	0,23970	0,18417	0,30326	-0,01703	-0,00012
E	0,03620	0,10212	0,14634	0,42469	0,00002
<b>Tomé e Burkhart</b>					
A	0,25710	0,37059	-0,31466	0,10032	0,01258
B	0,37242	0,17372	0,12606	0,09399	0,14340
C	0,13925	0,22827	0,28959	0,30131	0,08968
D	0,18688	0,15452	-0,12181	-0,22564	0,75429
E	0,04435	0,07291	0,14789	0,27874	0,00005
<b>BAL</b>					
A	-0,21455	0,38507	0,40896	0,00002	0,10389
B	0,52337	0,29726	0,26046	0,75193	0,10389
C	0,10157	0,15751	0,12474	0,13061	-0,11520
D	0,06824	0,11151	0,11651	0,05121	-0,22725
E	0,09227	0,04865	0,08933	-0,06622	-0,44977

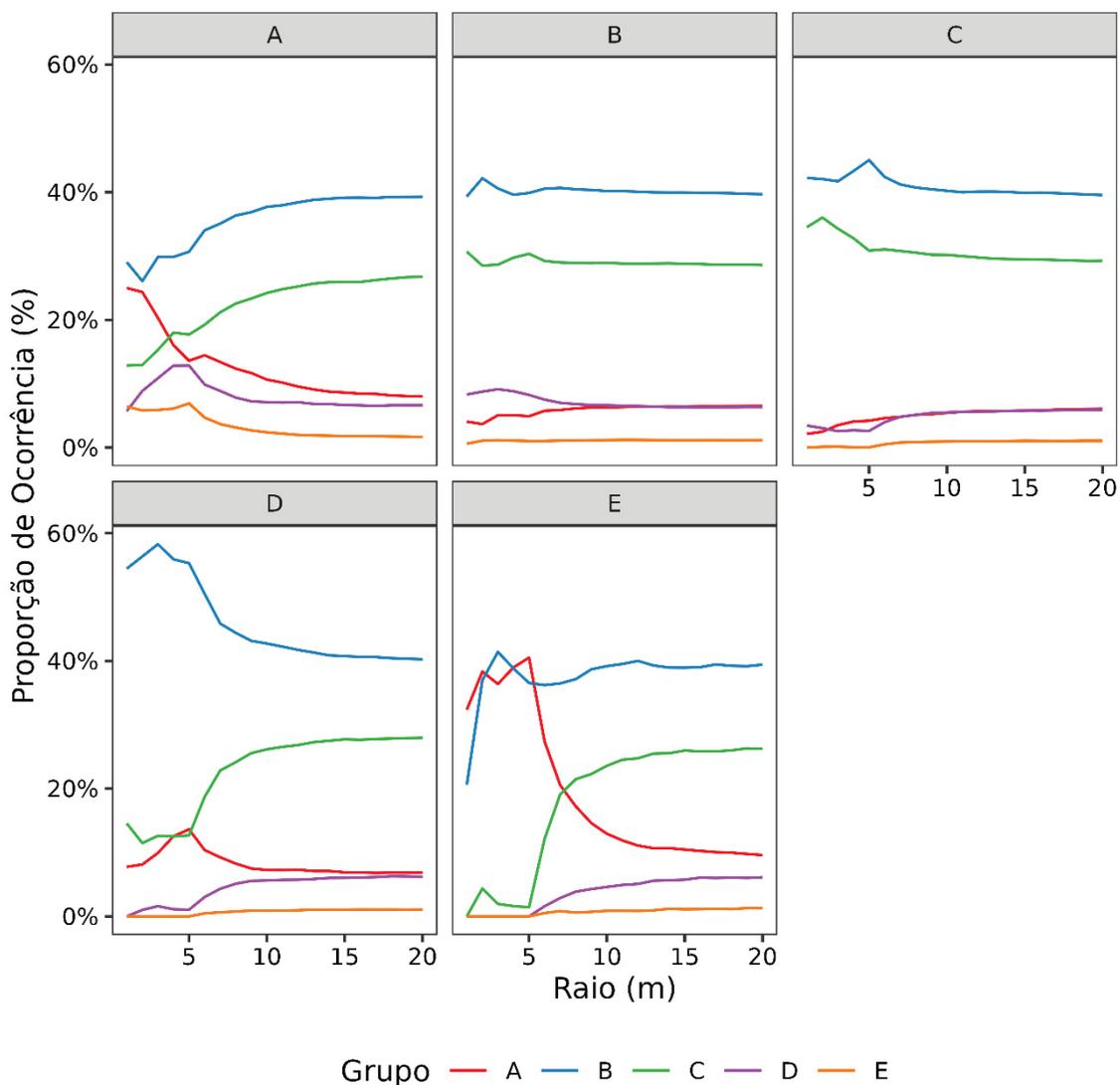
A, B, C, D e E são os grupos alométricos formados, onde A é o grupo de menor razão  $Q_i$ , e E o de maior razão. BAL é o índice de competição *Basal Area in Larger trees*.

FONTE: o autor (2024).

O grupo das maiores árvores (grupo E) teve peso relevante apenas para o grupo D dos índices Hegyi e Tomé e Burkhart, sem pesos elevados para o índice BAL. Pelo comportamento da proporção de ocorrência no grupo E (FIGURA 16), não existem indivíduos do grupo D até uma distância de aproximadamente 5 m, com um pequeno aumento após essa distância. Tal comportamento conduz à hipótese de que o grupo E possui elevado efeito inibitório sobre o grupo imediatamente inferior, corroborando com o peso de 0,42469 obtido após decomposição para o índice de Hegyi. De maneira análoga, o grupo D foi evidentemente influente no grupo E, com

peso de 0,75429 para o índice de Tomé e Burkhart. A função objetivo não convergiu adequadamente para o conjunto de pesos do grupo E para o índice de Hegyi, muito embora diferentes valores iniciais e algoritmos de otimização tenham sido testados.

FIGURA 16 - PROPORÇÃO DE OCORRÊNCIA DE GRUPOS VIZINHOS EM RELAÇÃO AO GRUPO DA ÁRVORE ALVO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.



FONTE: ao autor (2024).

Para todos os grupos, há predomínio do grupo B na vizinhança na distância de 20 m de qualquer árvore da área de estudo. Com exceção do grupo E, o B foi também o de maior proporção nas distâncias de até 5 m. Ainda assim, a distribuição de pesos entre os grupos da TABELA 11 não confere ao grupo B os maiores valores

em todos os casos, o que descarta a possibilidade de obtenção de pesos sem sentido na otimização, ou de ótimos locais.

O grupo A tem uma proporção consideravelmente alta de árvores dos grupos D e E à distâncias de até aproximadamente 7 m, e de forma análoga, o grupo E possui predominantemente árvores pequenas (grupos A e B) nas suas imediações. O mesmo comportamento foi encontrado por Pommerening e Särkkä (2013), onde os autores apontam uma correlação negativa entre diâmetros de pares de árvores para pequenas distâncias, ocasionado pela ocorrência predominante de árvores pequenas nas imediações de árvores grandes.

Os índices ponderados apresentaram ganho substancial na correlação com o incremento diamétrico, com valores iguais às ponderações nos grupos ecológicos (TABELA 10). Os mesmos valores encontrados para duas metodologias de grupos diferentes é indício de que há um limite para o quanto os índices de competição são capazes de explicar o crescimento de florestas nativas (KAHRIMAN *et al.*, 2018)

TABELA 12 - CORRELAÇÕES ENTRE INCREMENTO DIAMÉTRICO ANTES E DEPOIS DE APLICAÇÃO DOS PESOS PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.

Índice	Original	Ponderado
Hegyí	-0,3674	-0,5370
TB	-0,4185	-0,5789
BAL	-0,3685	-0,5447

FONTE: o autor (2024).

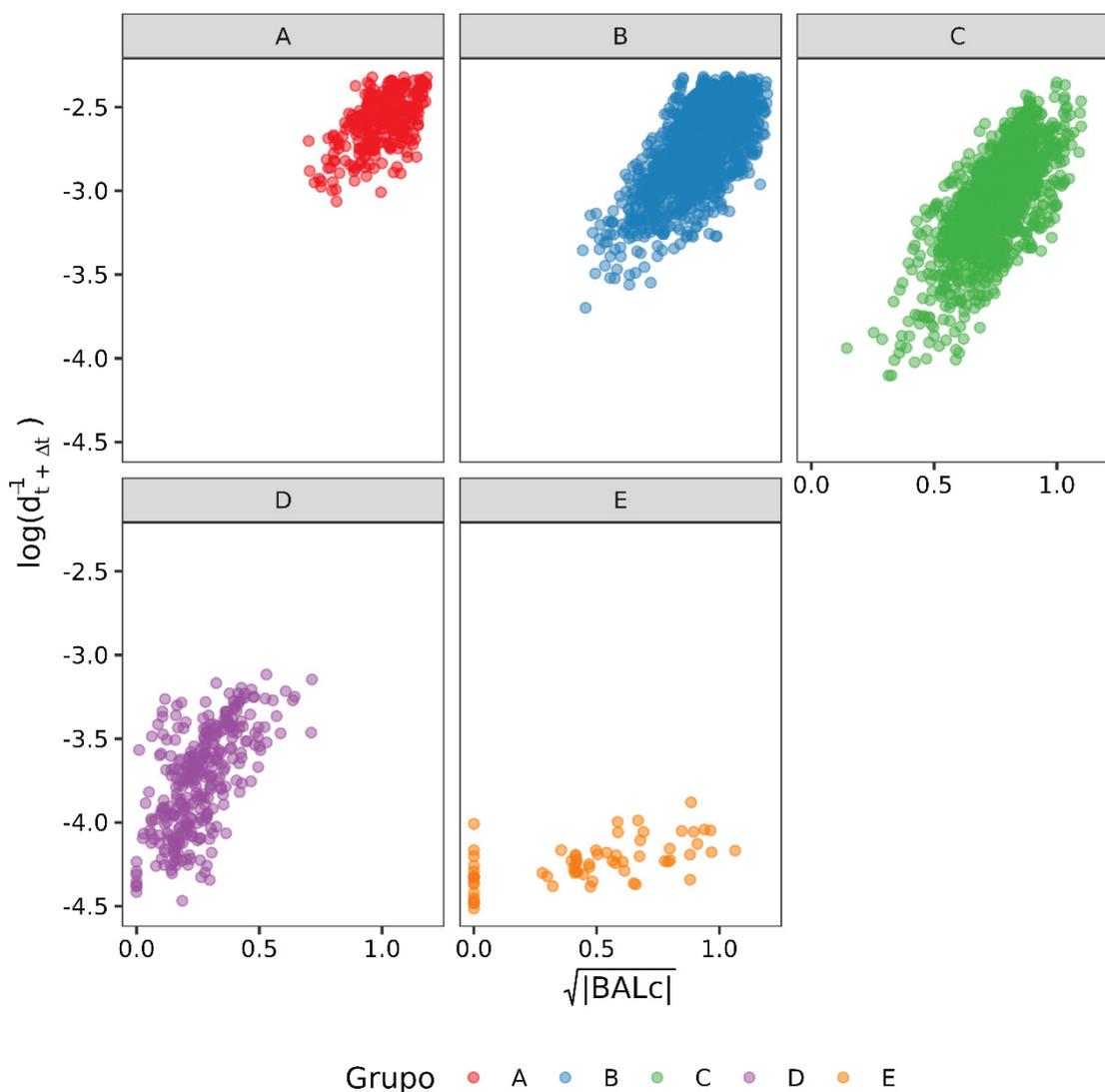
#### 4.3 CRESCIMENTO DIAMÉTRICO

Após a obtenção dos pesos, foi ajustado o modelo para prognose do diâmetro como função dos índices ponderados e dos grupos formados. O modelo final utilizado foi o mesmo para ambos os grupos testados, no entanto, foi particularmente adequado para os grupos alométricos. Por isso, essa seção inicia-se pelos resultados acerca desses grupos e depois apresenta os resultados dos grupos ecológicos, ordem essa contrária à apresentada na seção anterior.

### 4.3.1 Grupos Alométricos

A melhor relação linear encontrada está apresentada na FIGURA 17.  $|BALc|$  é o módulo do índice de competição  $BAL$  ponderado. O módulo é necessário, pois a ponderação torna negativo alguns valores do índice para o grupo E, em que a tomada dos valores absolutos mantém a relação linear. Pela Figura 8, percebe-se uma diferença da inclinação para o grupo E, o que sugere uma interação entre grupo e  $|BALc|$ .

FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE O LOGARITMO NATURAL ( $\log$ ) DO INVERSO DO DIÂMETRO FUTURO E RAIZ QUADRADA DO MÓDULO DO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO  $BAL$  PONDERADO PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO.



FONTE: o autor (2024).

Na FIGURA 17, diâmetros menores (grupos A, B e C) resultaram em valores maiores para  $\log(d_{t+\Delta t}^{-1})$ , e de forma contrária, maiores valores de  $\sqrt{|BALc|}$  refletiram em maiores valores da variável  $BALc$ . Como a variável  $BALc$  é ponderada com pesos, cuja soma é igual a 1, os valores serão diferentes do índice  $BAL$ , sem ponderação.

A FIGURA 17 também evidencia uma tendência de mudança dos pontos da diagonal superior direita para a diagonal inferior esquerda com o avanço dos grupos, o que está de acordo com a própria definição dos grupos de indivíduos, pois o aumento do diâmetro de cada grupo acarreta uma diminuição do  $BAL$ .

A Equação 15 apresenta o modelo final de forma compacta, isto é, sem a discriminação de todos os parâmetros do modelo. Os efeitos do índice estão agrupados em parênteses para facilitar o entendimento e a separação dos efeitos. O modelo final é composto pelo efeito quadrático do índice de competição, efeito de grupo e interação entre grupos e índice de competição.

$$\ln(d_{t+\Delta t}^{-1}) = \left( \sqrt{|BALc|} + |BALc| \right) + Grupo + Grupo \left( \sqrt{|BALc|} + |BALc| \right) \quad (15)$$

$$d_{t+\Delta t} = \frac{1}{e^{(\sqrt{|BALc|} + |BALc|) + Grupo + Grupo(\sqrt{|BALc|} + |BALc|)}}$$

Em que  $d_{t+\Delta t}$  é o diâmetro futuro, em cm;  $BALc$  é o índice de competição  $BAL$  ponderado, e  $Grupo$  é a variável categórica que representa os grupos.  $\ln$  é o logaritmo natural.

O efeito do índice foi significativo tanto de forma linear quanto quadrática. A análise de variância do modelo (TABELA 13) reforça a necessidade de uso tanto do termo quadrático quanto do efeito de grupo no modelo. A ausência de significância dos parâmetros referentes aos grupos é indício de que possuem comportamento similar com o grupo de referência (A) e entre si, bem como iniciam do mesmo intercepto (-4,9331). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo foi de 0,8084. Apesar da relação aparentemente linear (FIGURA 17), o acréscimo de um termo quadrático na Equação 15 ( $\sqrt{|BALc|}^2 = |BALc|$ ) foi relevante para o ajuste, especialmente para o grupo E (TABELA 14).

Na interação entre  $BALc$  e Grupos, há significância apenas entre  $BALc$  e o grupo E, tanto para o efeito linear quanto quadrático de  $BALc$ . Em contrapartida, há

comportamento similar da parábola ajustada aos dados entre os quatro primeiros grupos. Essa proximidade entre os grupos também é notada na FIGURA 17, pela inclinação semelhante entre os grupos.

TABELA 13 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS COMPONENTES DO MODELO DE CRESCIMENTO ESCOLHIDO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.

Fonte de Variação	F	p-valor
<i>Intercepto</i>	1068172,2633	p < 0,001
$\sqrt{ BALc }$	17659,5052	p < 0,001
$ BALc $	20,6241	p < 0,001
<i>Grupo</i>	986,6359	p < 0,001
<i>Grupo</i> $\times$ $\sqrt{ BALc }$	139,3220	p < 0,001
<i>Grupo</i> $\times$ $ BALc $	14,7323	p < 0,001

FONTE: o autor (2024).

TABELA 14 - ESTIMATIVAS E TESTES DE HIPÓTESE MARGINAIS DOS PARÂMETROS DO MODELO AJUSTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	t	p-valor
<i>Intercepto</i>	-4,9331	0,5423	-9,0967	p < 0,001
$\sqrt{ BALc }$	3,9422	1,1174	3,5281	p < 0,001
$ BALc $	-1,5793	0,5718	-2,7621	p < 0,010
<i>B</i>	-0,1164	0,5592	-0,2081	p = 0,835
<i>C</i>	0,1843	0,5533	0,3332	p = 0,739
<i>D</i>	0,7818	0,5444	1,4360	p = 0,151
<i>E</i>	0,5895	0,5429	1,0859	p = 0,278
<i>B</i> $\times$ $\sqrt{ BALc }$	0,0158	1,1593	0,0136	p = 0,989
<i>C</i> $\times$ $\sqrt{ BALc }$	-0,8558	1,1572	-0,7395	p = 0,460
<i>D</i> $\times$ $\sqrt{ BALc }$	-2,2701	1,1671	-1,9451	p = 0,052
<i>E</i> $\times$ $\sqrt{ BALc }$	-3,7456	1,1243	-3,3316	p < 0,001
<i>B</i> $\times$ $ BALc $	0,0578	0,5975	0,0967	p = 0,923
<i>C</i> $\times$ $ BALc $	0,5212	0,6073	0,8581	p = 0,391
<i>D</i> $\times$ $ BALc $	1,2360	0,7880	1,5685	p = 0,117
<i>E</i> $\times$ $ BALc $	1,6278	0,5875	2,7708	p < 0,010

t é o valor calculado para o teste t. BAL é o índice de competição *Basal Area in Larger trees*. A, B, C, D e E são os grupos alométricos.

FONTE: o autor (2024).

A TABELA 15 reúne os parâmetros de variância estimados para cada grupo. A variância do grupo D, por exemplo, é 5 vezes superior ao grupo E. Tal resultado corrobora com a dispersão dos grupos apresentada na FIGURA 17.

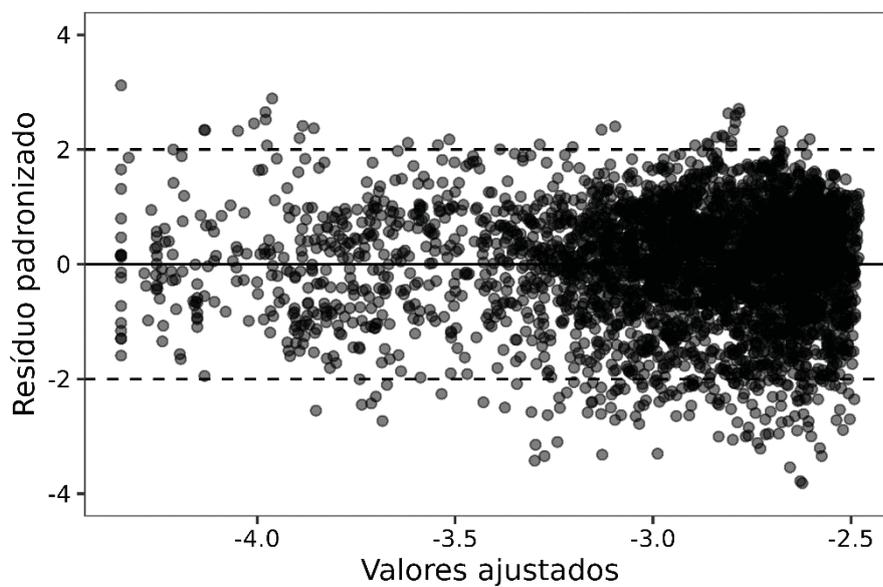
TABELA 15 - VARIÂNCIAS ESTIMADAS PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO A PARTIR DO ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS GENERALIZADOS.

Grupo	Erro Padrão	Variância
A	0,1298	0,0168
B	0,1696	0,0288
C	0,2073	0,0430
D	0,2418	0,0585
E	0,1074	0,0115

FONTE: o autor (2024).

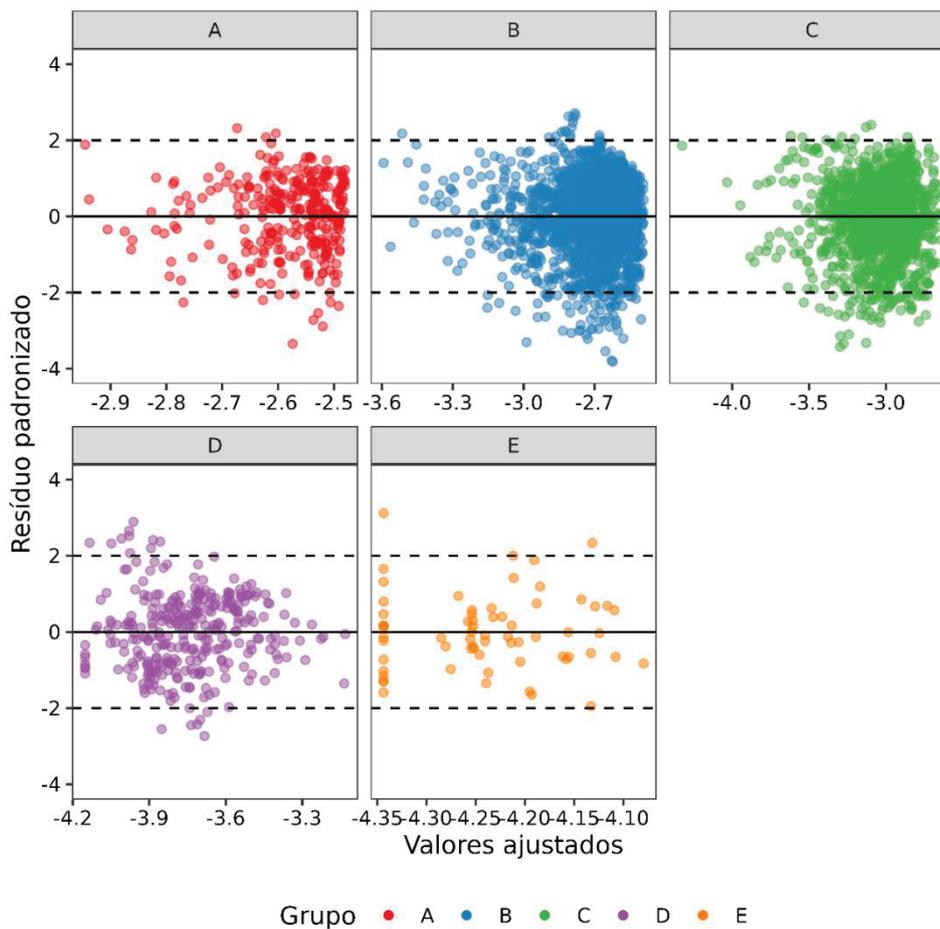
Os resíduos padronizados (FIGURA 18) não apresentaram tendência clara de superestimativa ou subestimativa na sua dispersão quando comparados com os valores estimados, em que apenas 4,6% excederam dois desvios padrões. A dispersão também foi homogênea dentro de cada grupo (FIGURA 19). Embora tenham variâncias diferentes, os resíduos padronizados possuem composição similar mesmo para uma grande variedade de espécies e indivíduos da área. Tal comportamento reforça a necessidade de uma estrutura de variância que acomode diferentes dispersões entre os grupos.

FIGURA 18 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.



FONTE: o autor (2024).

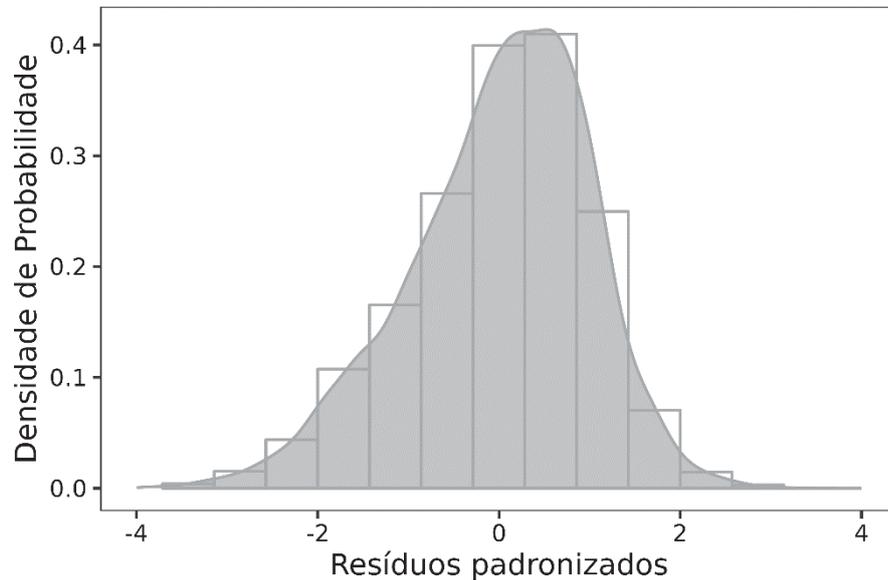
FIGURA 19 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO SEPARADO POR GRUPO ALOMÉTRICO.



FONTE: o autor (2024).

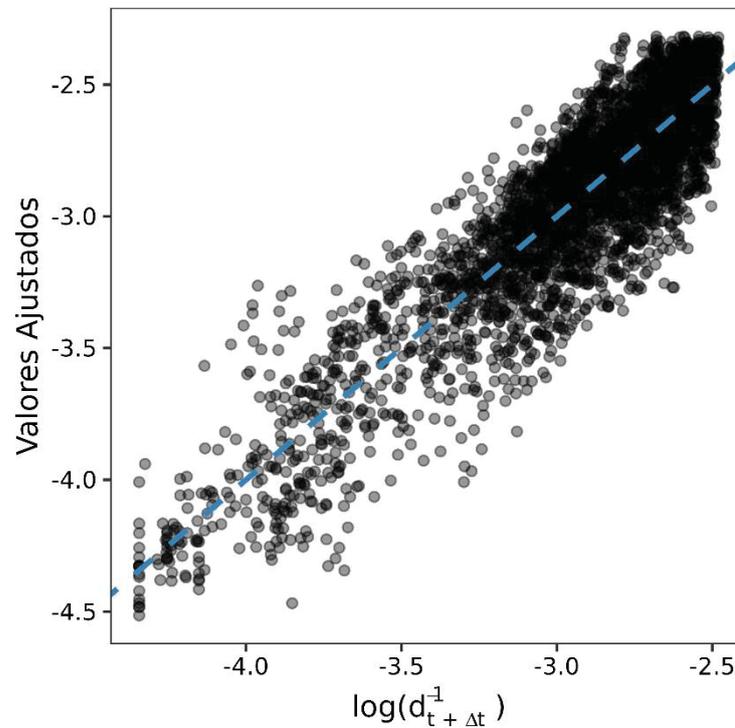
Os resíduos possuem distribuição aproximadamente simétrica (FIGURA 20), e não rejeitam a hipótese de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a um nível de significância de 1%. A comparação entre valores preditos e observados (FIGURA 21) não revela tendências de estimativa, mostrando boa dispersão de valores preditos ao longo do suporte da variável observada. Os valores limitados no canto superior direito da FIGURA 21 se referem ao limite de inclusão de uma árvore no censo, 10 cm, que resulta em um ponto limite de  $\log(10^{-1}) = -2,3$ .

FIGURA 20 - HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO ADOTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS.



FONTE: o autor (2024).

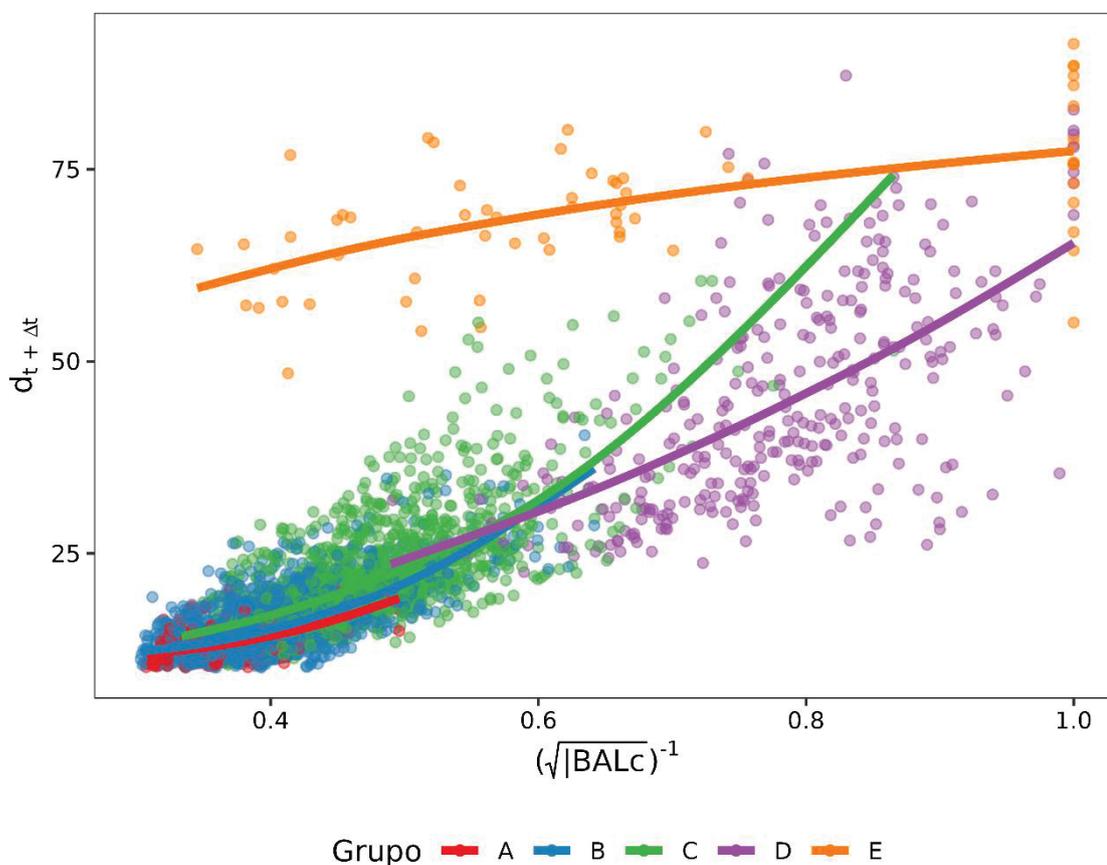
FIGURA 21 - VALORES OBSERVADOS VERSUS PREDITOS PELO MODELO DE CRESCIMENTO AJUSTADO PARA OS GRUPOS ALOMÉTRICOS. A LINHA TRACEJADA REPRESENTA A RETA 1:1.



FONTE: o autor (2024).

Os valores preditos na escala original do diâmetro futuro foram obtidos via *bootstrap* paramétrico (FIGURA 22) (FARAWAY, 2016), em que cada ponto predito na escala original é a média de 5000 amostras *bootstrap* retransformadas. É notável a diferença na dispersão dos diâmetros na escala original. A alta variabilidade é um problema comum em dados florestais (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019), em que o emprego combinado da transformação logarítmica inversa do diâmetro, aliada à estrutura de variâncias, foi oportuno para modelar com precisão similar a produção ao longo da amplitude diamétrica da floresta.

FIGURA 22 - CURVAS AJUSTADAS DO MODELO DE CRESCIMENTO PROPOSTO PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO NA ESCALA ORIGINAL DA VARIÁVEL RESPOSTA (DIÂMETRO FUTURO).



FONTE: o autor (2024).

O modelo construído neste estudo resultou em erros que variaram de 10% a 25% para prever o diâmetro futuro (TABELA 16). Assim como evidenciado pela FIGURA 22, o grupo D apresentou o maior erro quadrático médio (REQM), seja na escala da variável resposta ou percentual. O grupo E das maiores árvores, no entanto, proporcionalmente teve menor taxa de erro em relação ao grupo A das menores árvores. De uma maneira geral, o aumento do diâmetro médio do grupo incorreu em um aumento do erro quadrático médio dos grupos.

TABELA 16 - RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (REQM) DAS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO FUTURO PARA CADA GRUPO ALOMÉTRICO.  $d$  É O DIÂMETRO MÉDIO DO GRUPO.

Grupo	$d$	REQM (cm)	REQM (%)
A	13,44	1,80	13,40
B	15,54	2,83	18,25
C	22,00	5,11	23,21
D	44,37	11,09	24,99
E	69,99	7,18	10,25
Geral	20,83	4,88	23,42

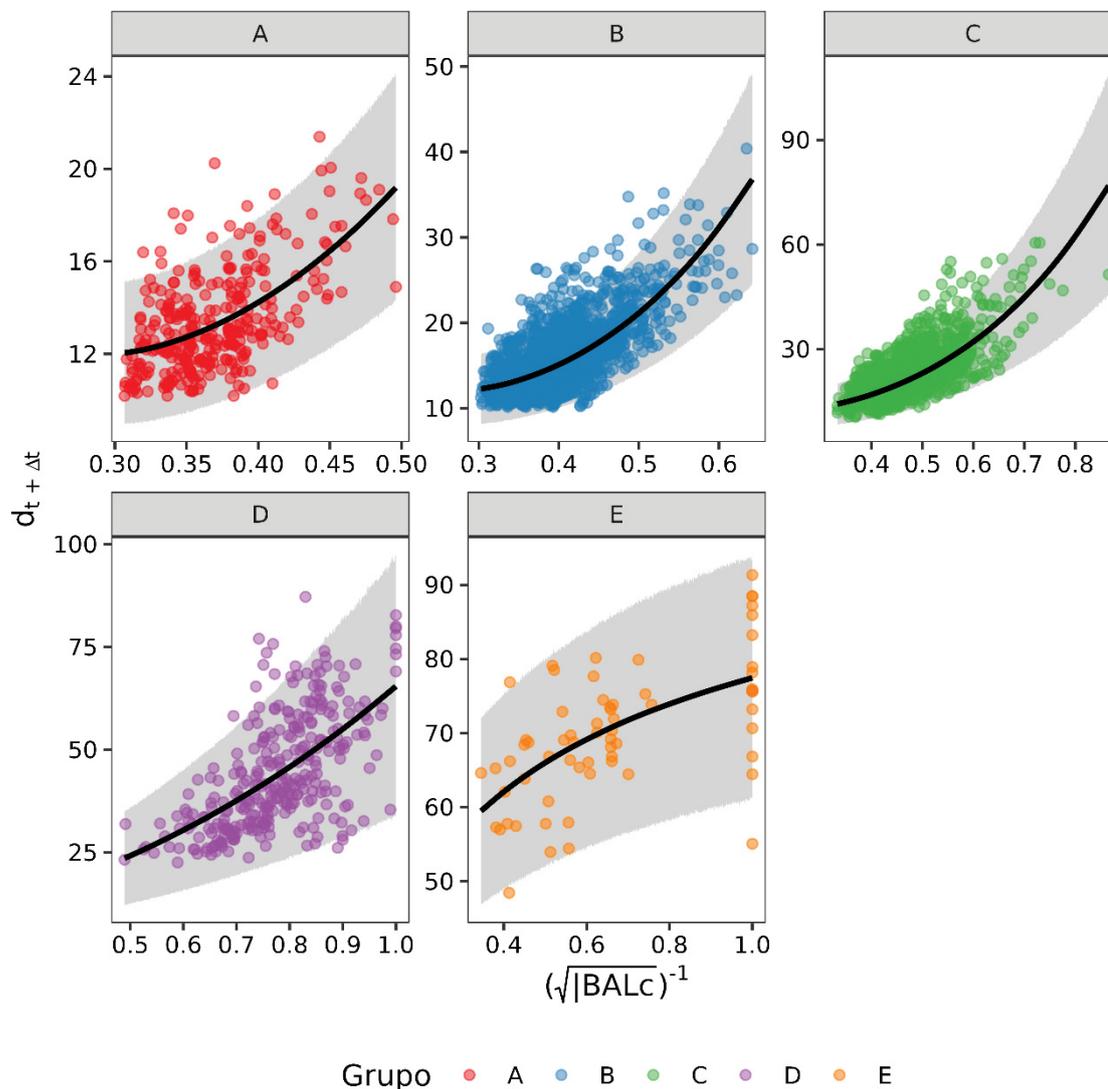
$d$  é o diâmetro medido à 1,3 m acima do nível do solo. REQM é a raiz do erro quadrático médio. A, B, C, D e E são os grupos alométricos.

FONTE: o autor (2024).

A variação do erro com o aumento ou diminuição de uma variável florestal também foi notada por outros autores. Orso *et al.* (2020) encontraram na mesma área de estudo variações na precisão das estimativas de incremento diamétrico, sendo que incrementos próximos de zero resultaram em erros próximos de 100%, enquanto incrementos maiores possuíam erros em torno de 25%.

As estimativas de diâmetro futuro separadas por grupo podem ser visualizadas na FIGURA 23, bem como os intervalos de predição na escala original a partir do *bootstrap* paramétrico. A matriz de variâncias especificada resultou em amplitudes de intervalos condizentes com a variabilidade de cada grupo, conforme se pode observar nas diferentes amplitudes no eixo das ordenadas da FIGURA 23.

FIGURA 23 - INTERVALOS DE PREDIÇÃO NA ESCALA DA VARIÁVEL RESPOSTA PARA O MODELO DE CRESCIMENTO POR GRUPO DE DIÂMETRO QUADRÁTICO MÉDIO.



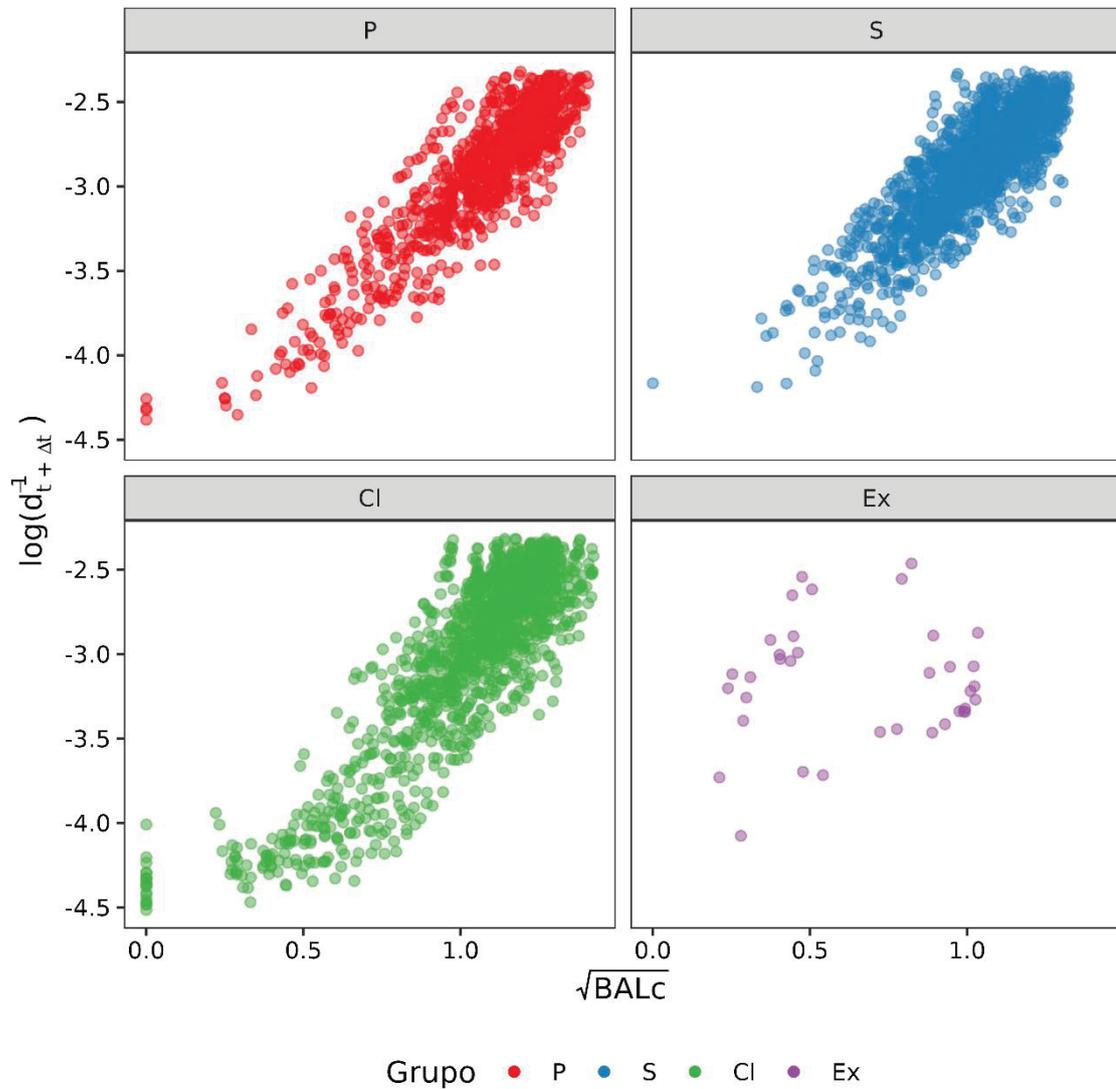
FONTE: o autor (2024).

#### 4.3.2 Grupos ecológicos

A relação entre  $\log(d_{t+\Delta t}^{-1})$  e  $\sqrt{BALc}$ , embora aproximadamente linear, não possui diferenças entre os grupos ecológicos, à exceção do grupo das espécies exóticas (FIGURA 24). Os grupos das espécies pioneiras e climáticas possui dispersão com tendência levemente quadrática ou exponencial.

Diferentemente dos grupos alométricos, não foi observado valor negativo para o índice  $BALc$ . Entre as espécies nativas, cada grupo possui amplitudes similares, tanto no eixo das ordenadas quanto no das abcissas.

FIGURA 24 - RELAÇÃO ENTRE O LOGARITMO DO INVERSO DO DIÂMETRO FUTURO E RAIZ QUADRADA DO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO BAL PONDERADO PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO.



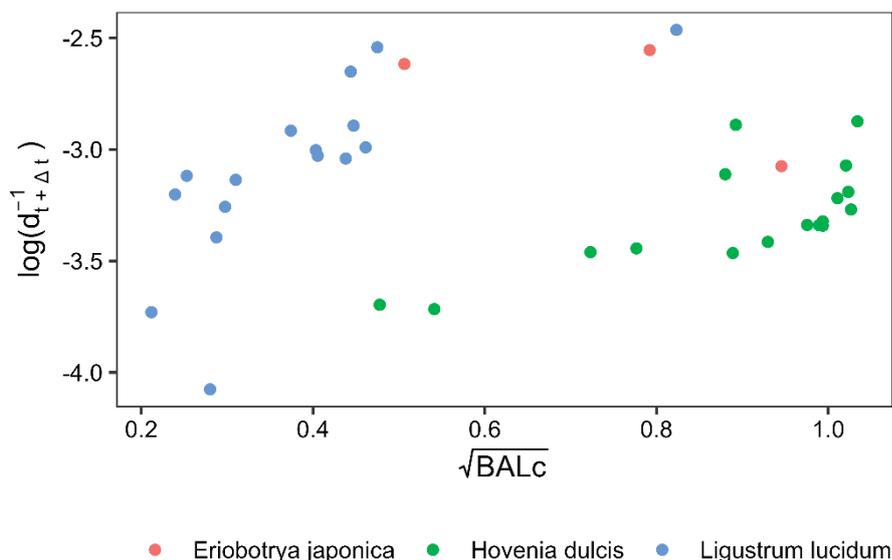
FONTE: o autor (2024).

O grupo das espécies exóticas apresentou comportamento distinto das espécies nativas, com grande variabilidade intragrupo. Isso evidencia diferentes comportamentos e estratégias adotadas por cada espécie exótica para sua permanência em um determinado local.

Na FIGURA 25, mostra-se o comportamento das espécies que compõem o grupo das exóticas, sendo notável a diferença entre as espécies *L. lucidum* e *H. dulcis*. Além da diferença na Figura 16, também em campo é perceptível as diferentes

localizações de cada espécie, onde cada uma tende a ocupar regiões diferentes da área de estudo.

FIGURA 25 - DISPERSÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO DE CRESCIMENTO PARA CADA ESPÉCIE DO GRUPO DAS ESPÉCIES EXÓTICAS.



FONTE: o autor (2024).

A análise de variância (TABELA 17) mostra que todos os fatores são significativos no modelo. Não houve efeito dos grupos no intercepto do modelo (TABELA 18), e o efeito quadrático do índice foi significativo apenas para os grupos Secundária e Exóticas, ainda que a relação não se tenha mostrado adequada para o último grupo (FIGURA 24 e FIGURA 25). Apesar de apresentar tendência de aparentemente não-linear, o grupo das climácicas não teve parâmetros significativos.

TABELA 17 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS COMPONENTES DO MODELO DE CRESCIMENTO ESCOLHIDO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.

Fonte de Variação	F	p-valor
$\sqrt{ BALc }$	11523,8334	$p < 0,001$
$ BALc $	11,7029	$p < 0,001$
Grupo	111,2349	$p < 0,001$
Grupo $\times$ $\sqrt{ BALc }$	34,1297	$p < 0,001$
Grupo $\times$ $ BALc $	6,8560	$p < 0,001$

FONTE: o autor (2024).

TABELA 18 - ESTIMATIVAS E TESTES DE HIPÓTESE MARGINAIS DOS PARÂMETROS DO MODELO AJUSTADO AOS GRUPOS ECOLÓGICOS.

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	t	p-valor
<i>Intercepto</i>	-4,5973	0,0628	-73,1562	p < 0,001
$\sqrt{BALc}$	1,5000	0,1384	10,8369	p < 0,001
<i>BALc</i>	0,0700	0,0751	0,9309	p = 0,352
<i>S</i>	-0,0605	0,1055	-0,5730	p = 0,567
<i>Cl</i>	-0,0787	0,0785	-1,0026	p = 0,316
<i>Ex</i>	0,6032	0,4110	1,4677	p = 0,142
$S \times \sqrt{BALc}$	0,4995	0,2268	2,2026	p < 0,050
$Cl \times \sqrt{BALc}$	-0,0933	0,1782	-0,5237	p = 0,601
$Ex \times \sqrt{BALc}$	1,5702	1,4813	1,0600	p = 0,290
$S \times BALc$	-0,3192	0,1204	-2,6520	p < 0,010
$Cl \times BALc$	0,1427	0,1001	1,4256	p = 0,154
$Ex \times BALc$	-2,3667	1,1260	-2,1019	p < 0,050

t é o valor calculado para o teste t. BAL é o índice de competição *Basal Area in Larger trees*. S, Cl e Ex são os grupos ecológicos.

FONTE: o autor (2024).

O modelo aplicado para os grupos ecológicos explicou aproximadamente 75% da variabilidade de  $\log(d_{t+\Delta t}^{-1})$ . As variâncias estimadas (TABELA 19) mostram que os grupos possuem variância similar entre espécies nativas, e as exóticas apresentaram variância aproximadamente quatro vezes maior que as pioneiras e secundárias.

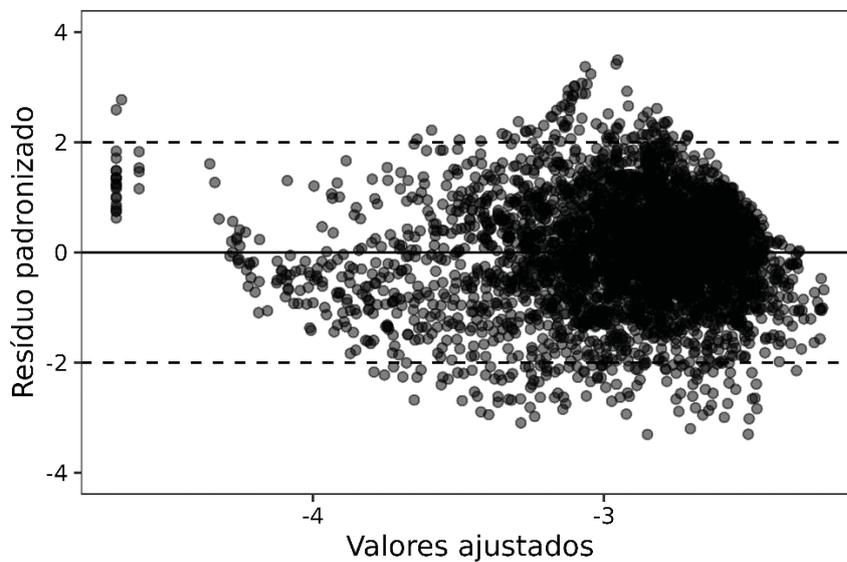
TABELA 19 - VARIÂNCIAS ESTIMADAS PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO A PARTIR DO ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS GENERALIZADOS.

Grupo	R <sup>2</sup>	Erro Padrão	Variância
P	0,7537	0,1854	0,0344
S		0,1773	0,0314
Cl		0,2577	0,0664
Ex		0,3461	0,1198

FONTE: o autor (2024).

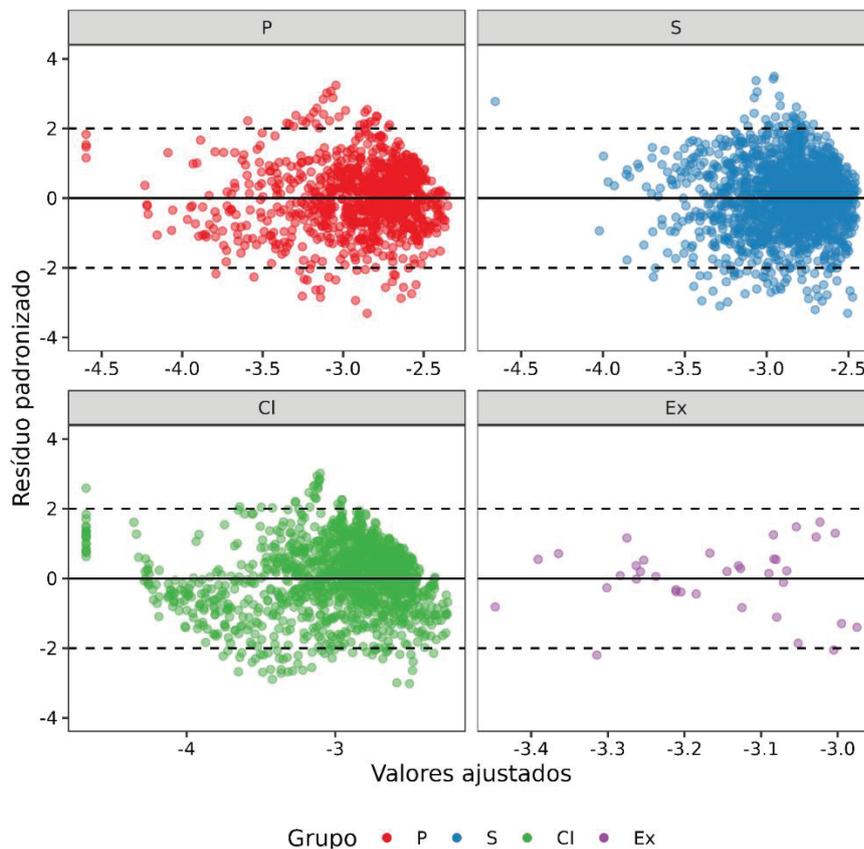
A distribuição dos resíduos (FIGURA 26 e FIGURA 27) mostram uma tendência ao longo das estimativas, especialmente causada pelo grupo das espécies climáticas, que apresentaram comportamento diferente do linear. O modelo proposto não foi capaz de descrever corretamente a relação apresentada na FIGURA 24 para esse grupo, bem como para o grupo das espécies exóticas.

FIGURA 26 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.



FONTE: o autor (2024).

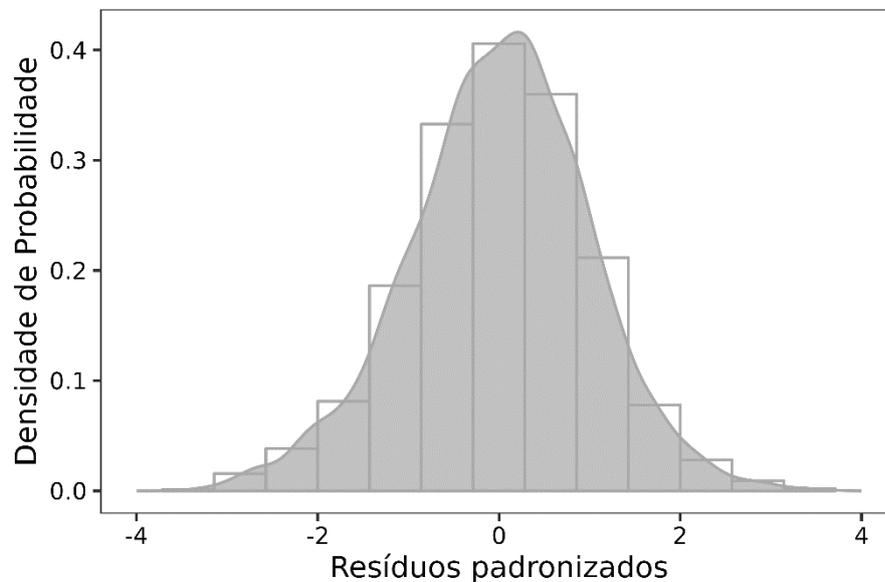
FIGURA 27 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS E VALORES AJUSTADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO TESTADO SEPARADO POR GRUPO ECOLÓGICO.



FONTE: o autor (2024).

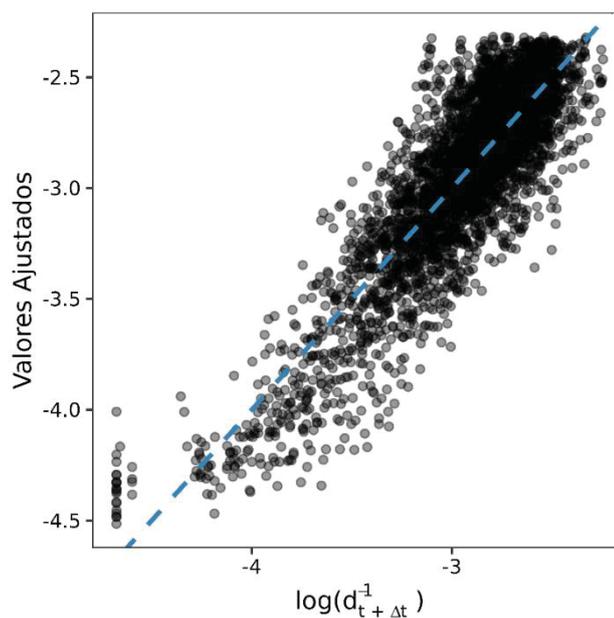
Os resíduos do modelo são normalmente distribuídos (FIGURA 28). Porém, foram tendenciosos na estimativa, em comparação com os valores observados (FIGURA 29).

FIGURA 28 - HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS DO MODELO DE CRESCIMENTO ADOTADO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS.



FONTE: o autor (2024).

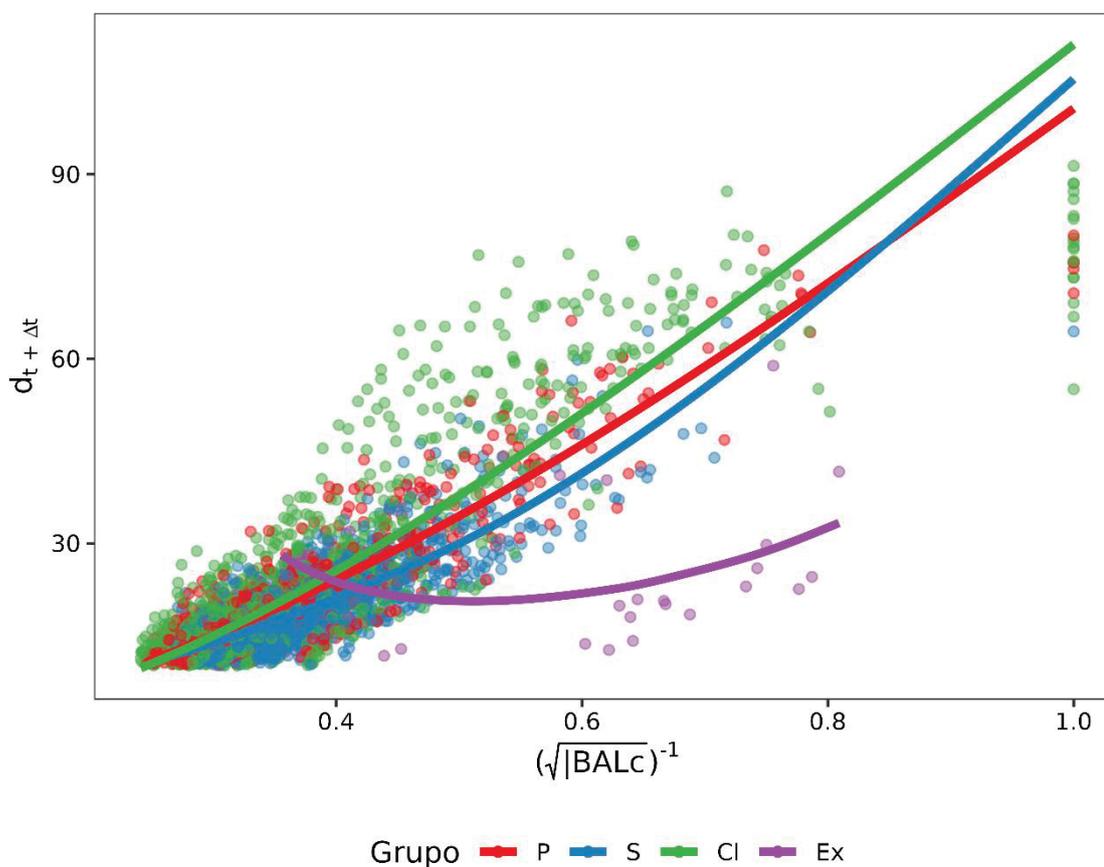
FIGURA 29 - VALORES OBSERVADOS VERSUS PREDITOS PELO MODELO DE CRESCIMENTO PARA OS GRUPOS ECOLÓGICOS. A LINHA TRACEJADA REPRESENTA A RETA 1:1.



FONTE: o autor (2024).

Em concordância com a FIGURA 24, a FIGURA 30 mostra a relação entre variáveis na escala original do diâmetro futuro. Os grupos de espécies nativas não são bem definidos entre si para essa combinação de variáveis, sendo oportuno apenas para diferenciar o grupo exótico dos demais.

FIGURA 30 - CURVAS AJUSTADAS DO MODELO DE CRESCIMENTO PROPOSTO PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO NA ESCALA ORIGINAL DA VARIÁVEL RESPOSTA.



FONTE: o autor (2024).

Como esperado, o erro quadrático médio (REQM) foi maior nos grupos climáticas e exóticas, tanto na escala da variável resposta quanto em termos percentuais (TABELA 20). Os intervalos de predição da variável na escala original (FIGURA 31) mostram superestimativa do diâmetro futuro médio para os três grupos de espécies nativas.

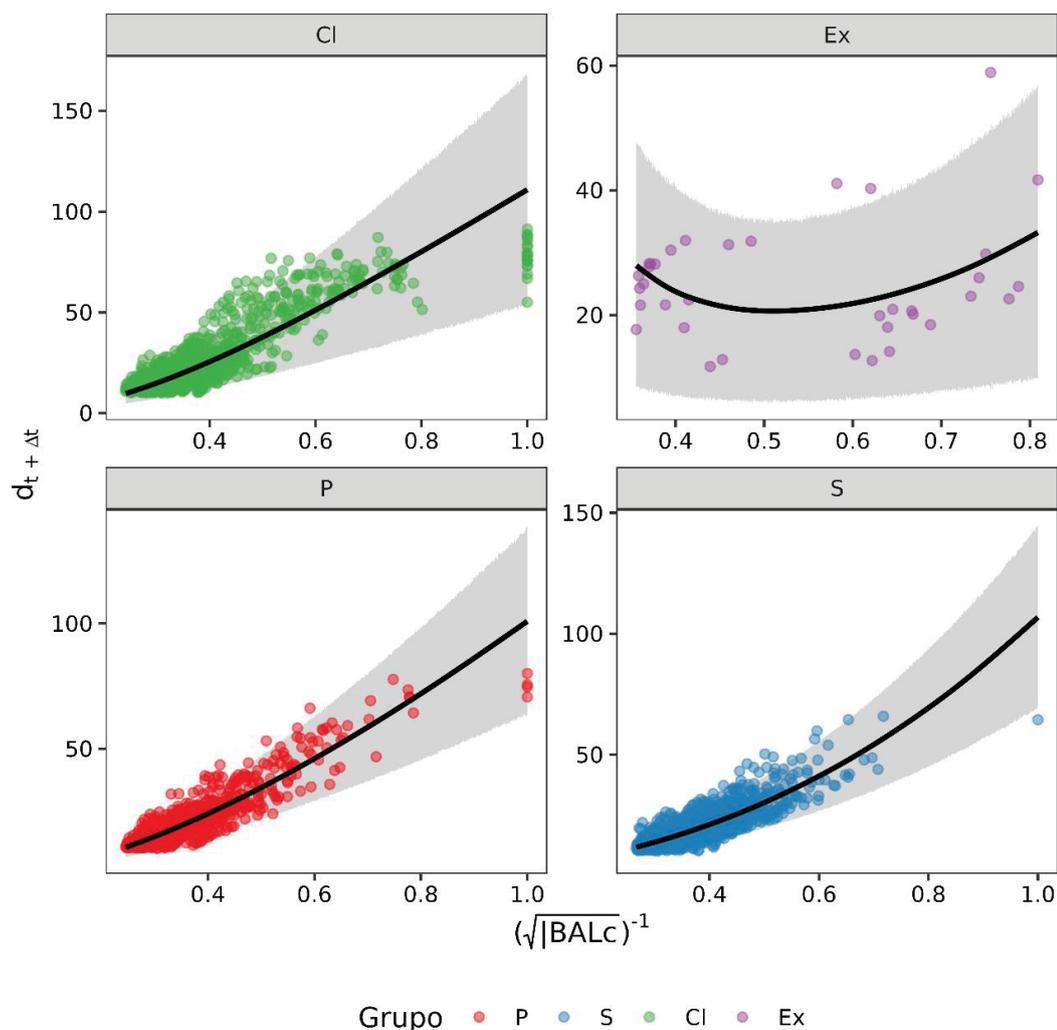
TABELA 20 - RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (REQM) DAS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO FUTURO PARA CADA GRUPO ECOLÓGICO DE DIÂMETRO QUADRÁTICO MÉDIO. D É O DIÂMETRO MÉDIO DO GRUPO.

Grupo	d	REQM (cm)	REQM (%)
P	20,40	4,54	22,28
S	18,75	3,86	20,59
Cl	23,56	7,91	33,59
Ex	25,17	8,95	35,58
Geral	20,83	5,76	27,66

d é o diâmetro medido a 1,3 m acima do solo. P, S, Cl e Ex são os grupos ecológicos.

FONTE: o autor (2024).

FIGURA 31 - INTERVALOS DE PREDIÇÃO NA ESCALA DA VARIÁVEL RESPOSTA PARA O MODELO DE CRESCIMENTO POR GRUPO ECOLÓGICO.



P, S, Cl e Ex são os grupos ecológicos.

FONTE: o autor (2024).

A ponderação dos índices de competição a partir de pesos levou tanto para uma melhoria na correlação com o crescimento diamétrico, quanto permite uma interpretação facilitada do efeito de cada grupo. Entretanto, tal interpretação se torna menos clara à medida que o número de grupos aumenta, uma vez que a contribuição relativa de cada grupo diminui com o aumento do número de grupos.

A obtenção dos pesos como um problema de maximização não é a única forma de solução dos parâmetros. Assim como na abordagem de Orellana (2014), pode-se fazer uso da análise de regressão, embora os valores encontrados não sejam tão diretamente interpretáveis, e a inclusão da restrição da otimização não seja um problema trivial. Além disso, uma vez que todas as operações são lineares e contidas em um subespaço vetorial, seria teoricamente possível encontrar solução analítica para o problema como uma adaptação do problema de mínimos quadrados, mas tal solução não foi encontrada em diversas tentativas prévias.

A modelagem em nível de árvores individuais frequentemente busca incorporar variáveis que são de difícil ou onerosa medição na floresta, como diâmetro de copa ou índice de área foliar, além da obrigatoriedade de realização de inventários espaçados em vários anos. A metodologia proposta nesta pesquisa traz ganhos também nesse ponto, pois permite a inclusão dos grupos em um modelo matemático, isto é, além da maneira usual de ajuste de modelos por grupo. E, se caso a informação de espécies não seja bem definida, o método também se adequa para grupos formados a partir de variáveis quantitativas, de fácil medição na floresta.

O modelo de produção do DAP futuro fez uso somente do índice de competição ponderado como variável independente. Os resultados do ajuste indicaram que o índice de competição BAL é bom representante da competição sofrida por uma dada árvore. A transformação da variável dependente também foi oportuna para a linearização da relação entre as variáveis, e merece ser explorada com mais detalhes em trabalhos que envolvam modelos de árvores individuais.

## 5 CONCLUSÕES

A inclusão da informação de grupos nos índices de competição fornece resultados de maior poder de interpretação acerca da influência da competição entre grupos alométricos ou espécies. O uso de pesos em cada grupo via decomposição linear dos índices de competição é uma alternativa eficaz para melhorar o desempenho dos índices de competição comumente utilizados em modelos de crescimento ao nível de árvore individual.

Para a classificação em grupos ecológicos, há clara diferenciação das influências exercidas entre os grupos de espécies. Entretanto, o modelo proposto para esses grupos não é capaz de descrever adequadamente a relação entre o diâmetro futuro e os índices de competição ponderados.

A metodologia de grupos alométricos é capaz de relacionar o efeito de árvores de diferentes tamanhos na composição da competição, e permitir relacionar a competição de cada grupo com as proporções de ocorrência nas imediações de cada grupo.

A relação entre o logaritmo do inverso do diâmetro futuro e raiz quadrada do índice de competição *BAL* ponderado possibilita a separação dos grupos alométricos.

Os dois métodos de formação de grupos de espécies ou indivíduos conduziram para diferentes capacidades de avaliar a competição e para modelar o crescimento em diâmetro das árvores. Portanto, a abordagem utilizada para a formação de grupos é uma etapa crucial para a obtenção de resultados relevantes em estudos com florestas naturais de elevada variabilidade de espécies.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de agrupamentos podem resultar em diferentes interpretações sobre a influência dos grupos na vizinhança, portanto sugere-se aplicar a ponderação para outros métodos de formação de grupo, em especial a metodologia de Alder *et al.* (2002), que possui diversas aplicações na Floresta Ombrófila Mista.

A maximização da correlação não é a única forma de cálculo dos pesos, e outros métodos estatísticos podem ser utilizados e testados, como regressão ou outras formas analíticas para a solução. Além disso, outras variáveis dendrométricas podem ser utilizadas para relacionar o índice de competição além do incremento diamétrico.

## REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, Y. **DINÂMICA DE ESPÉCIES ARBÓREAS EM DIFERENTES AMBIENTES DE UM REMANESCENTE DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**. 2018. tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná, 2018.
- ALDER, D. **Development of growth models for applications in Guyana**. [s.l: s.n.]. 1995. Disponível em: <<http://www.bio-met.co.uk/pdf/guyana1.pdf?PHPSESSID=fd2dc9b61df393dbd0047a463b511e86>>.
- ALDER, D.; OAVIKA, F.; SANCHEZ, M.; SILVA, J. N. M.; VAN DER HOUT P.; WRIGHT, H. L. A comparison of species growth rates from four moist tropical forest regions using increment-size ordination. **International Forestry Review**, v. 4, n. 3, p. 196–205, 2002.
- Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 9–18, 2013.
- BAYAT, M.; BETTINGER, P.; HASSANI, M.; HEIDARI, S. Ten-year estimation of Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) volume increment in natural forests: A comparison of an artificial neural networks model, multiple linear regression and actual increment. **Forestry**, v. 94, n. 4, p. 598–609, 1 out. 2021.
- BURTON, P. J. Some limitations inherent to static indices of plant competition. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 23, p. 2141–2152, 1993.
- CONDÉS, S.; PRETZSCH, H.; RÍO, M. del. Species admixture can increase potential tree growth and reduce competition. **Forest Ecology and Management**, v. 539, n. February, 2023.
- CUNHA, T. A. DA; FINGER, C. A. G. Competição assimétrica e o incremento diamétrico de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Amazônia ocidental. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 9-18, 2013.
- CURTIS, R. O. Stand Density Measures: An Interpretation. **Forest Science**, v. 16, n. 4, p. 403–414, 1970.
- CURTO, R. D. A.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; CANETTI, A.; PÉLLICO-NETTO, S. Effectiveness of competition indices for understanding growth in an overstocked stand. **Forest Ecology and Management**, v. 477, n. May, p. 118472, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118472>.
- DEL RÍO, M.; PRETZSCH, H.; ALBERDI, I.; BIELAK, K.; BRAVO, F.; BRUNNER, A.; CONDÉS, S.; DUCEY, M. J.; FONSECA, T.; VON LÜPKE, N.; PACH, M.; PERIC, S.; PEROT, T.; SOUIDI, Z.; SPATHELF, P.; STERBA, H.; TIJARDOVIC, M.; TOMÉ, M.; VALLET, P.; BRAVO-OVIEDO, A. Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives. **European Journal of Forest Research**, v. 135, n. 1, p. 23–49, 2016.

DELLA-FLORA, J. B.; DURLO, M. A.; SPATHELF, P. Modelo de incremento para árvores singulares - *Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 1, p. 165–177, 2004.

DIGGLE, P. **Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns**. CRC Press, 2013.

EK, A. R.; MONSERUD, R. A. **Forest: A model for simulating the growth and reproduction of mixed species forest stands**. 1975.

FARAWAY, J. J. **Extending the linear model with R**. 2. ed.: CRC Press, 2016. p. 411  
 FITZMAURICE, G. M.; LAIRD, N. M.; WARE, J. H. Applied longitudinal analysis. : John Wiley & Sons, 2012. p. 1309

FLETCHER, R. **Practical methods of optimization**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2000. 487 p.

FORRESTER, D. I. Linking forest growth with stand structure: Tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition. **Forest Ecology and Management**, v. 447, n. May, p. 139–157, 2019.

GOURLET-FLEURY, S.; BLANC, L.; PICARD, N.; SIST, P.; DICK, J.; NASI, R.; SWAINE, M. D.; FORNI, E. Grouping species for predicting mixed tropical forest dynamics: looking for a strategy. **Annals of Forest Science**, v. 62, n. 8, p. 785–796, 2005.

GOURLET-FLEURY, S.; HOULLIER, F. Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. **Forest Ecology and Management**, v. 131, p. 269–289, 2000.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. Em.: 1974, Stockholm. (J. Fries, Org.) **Growth Models for tree and stand simulation**. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974. p. 74–90.

HUI, G.; WANG, Y.; ZHANG, G.; ZHAO, Z.; BAI, C.; LIU, W. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p. 49–58, 2018.

KAHRIMAN, A.; SAHIN, A.; SONMEZ, T.; YAVUZ, M. A novel approach to selecting a competition index: the effect of competition on individual tree diameter growth of Calabrian pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1-10, 2018.

KARIUKI, M.; ROLFE, M.; SMITH, R. G. B.; VANCLAY, J. K.; KOOYMAN, R. M. Diameter growth performance varies with species functional-group and habitat characteristics in subtropical rainforests. **Forest Ecology and Management**, v. 225, p. 1–14, 2006.

KUEHNE, C.; WEISKITTEL, A. R.; WASKIEWICZ, J. Comparing performance of contrasting distance-independent and distance-dependent competition metrics in predicting individual tree diameter increment and survival within structurally-

heterogeneous, mixed-species forests of Northeastern United States. **Forest Ecology and Management**, v. 433, p. 205–216, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.002>.

LORIMER, C. G. Tests of age-dependent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 6, p. 343–360, 1983.

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; SILVA, L. C. R. S. Behavior of the hypsometric relationship of *Araucaria angustifolia* in the forest course of the faculty of forest-Federal University of Paraná, Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira** (Brazil), n. 56, p. 5–16, 2008.

MCTAGUE, J. P.; WEISKITTEL, A. R. Individual-tree competition indices and improved compatibility with stand-level estimates of stem density and long-term production. **Forests**, v. 7, n. 10, 2016.

MIINA, J. Residual variation in diameter growth in a stand of Scots pine and Norway spruce. **Forest Ecology and Management**, v. 58, p. 111–128, 1993.

MIINA, J.; PUKKALA, T. Application of ecological field theory in distance-dependent growth modelling. **Forest Ecology and Management**, v. 161, p. 101–107, 2002.

MONSERUD, R. A.; EK, A. R. Plot edge bias in forest stand growth simulation models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 4, n. 4, p. 419–423, 1974.

NASCIMENTO, R. G. M. **Modelagem e simulação do crescimento e produção de floresta tropical manejada na Amazônia oriental**. 2016. tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná, 2016.

OBOITE, F. O.; COMEAU, P. G. Competition and climate influence growth of black spruce in western boreal forests. **Forest Ecology and Management**, v. 443, p. 84–94, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.017>.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PÉLLICO NETTO, S.; VANCLAY, J. K. A distance-independent individual-tree growth model to simulate management regimes in native *Araucaria* forests. **Journal of Forest Research**, v. 22, n. 1, p. 30–35, 2017.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PÉLLICO NETTO, S.; VANCLAY, J. K. Predicting the dynamics of a native *Araucaria* forest using a distance-independent individual tree-growth model. **Forest Ecosystems**, v. 3, p. 1–11, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s40663-016-0071-x>.

ORELLANA, E. **Sucessão florestal, regimes de manejo e competição avaliados por modelos de árvore individual em um fragmento de floresta de Araucária**. 2014. tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná, 2014.

ORELLANA, E.; VANCLAY, J. K. Competition and dominance between angiosperms and *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze in the Atlantic Forest in southern Brazil.

**Forest Ecology and Management**, v. 425, n. March, p. 119–125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.022>.

ORSO, G. A.; MALLMANN, A. A.; PELISSARI, A. L.; BEHLING, A.; FIGUEIREDO FILGO, A.; MACHADO, S. A. How competition indices behave at different neighborhood coverages and modifications in a natural araucaria forest in southern Brazil. **Cerne**, v. 26, n. 2, p. 293–300, 2020.

PAWLIKOWSKI, N. C.; COPPOLETTA, M.; KNAPP, E.; TAYLOR, A. H. Spatial dynamics of tree group and gap structure in an old-growth ponderosa pine-California black oak forest burned by repeated wildfires. **Forest Ecology and Management**, v. 434, p. 289–302, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.016>.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Additivity of tree biomass components using ratio estimate. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, p. 31, 2019.

PENG, C. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. **Forest Ecology and Management**, v. 132, p. 259–279, 2000.

PICARD, N.; KÖHLER, P.; MORTIER, F.; GOURLET-FLEURY, S. A comparison of five classifications of species into functional groups in tropical forests of French Guiana. **Ecological Complexity**, v. 11, p. 75–83, 2012.

PICARD, N.; MORTIER, F.; ROSSI, V.; GOURLET-FLEURY, S. Clustering species using a model of population dynamics and aggregation theory. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 2, p. 152–160, 2010.

POMMERENING, A. Approaches to quantifying forest structures. **Forestry**, v. 75, n. 3, p. 305–324, 2002.

POMMERENING, A.; LEMAY, V.; STOYAN, D. Model-based analysis of the influence of ecological processes on forest point pattern formation-A case study. **Ecological Modelling**, v. 222, p. 666–678, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.10.019>.

POMMERENING, A.; SÁNCHEZ-MEADOR, A. J. Tamm review: Tree interactions between myth and reality. **Forest Ecology and Management**, v. 424, n. April, p. 164–176, 2018.

POMMERENING, A.; SÄRKKÄ, A. What mark variograms tell about spatial plant interactions. **Ecological Modelling**, v. 251, p. 64–72, 2013.

POMMERENING, A.; STOYAN, D. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, n. 7, p. 1723–1739, jul. 2006.

PRETZSCH, H.; DEL RÍO, M.; SCHÜTZE, G.; AMMER, C.; ANNIGHÖFER, P.; AVDAGIC, A.; BARBEITO, I.; BIELAK, K.; BRAZAITIS, G.; COLL, L.; DRÖSSLER, L.; FABRIKA, M.; FORRESTER, D. I.; KURYLYAK, V.; LÖF, M.; LOMBARDI, F.; MATOVIC, B.; MOHREN, F.; MOTTA, R.; DEN OUDEN, J.; PACH, M.; PONETTE,

Q.; SKRZYSZEWSKI, J.; SRAMEK, V.; STERBA, H.; SVOBODA, M.; VERHEYEN, K.; ZLATANOV, T.; BRAVO-OVIEDO, A. Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, And the effect increases with water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 373, p. 149–166, 2016.

PUKKALA, T.; KOLSTRÖM, T. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. **Silva Fennica**, v. 21, n. 1, p. 55–67, 1987. Disponível em: <http://www.silvafennica.fi/article/5306>.

REIS, L. P.; SOUZA, A. L.; MAZZEI, L.; REIS, P. C. M.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, L. F.; RUSCHEL, A. R. Prognosis on the diameter of individual trees on the eastern region of the amazon using artificial neural networks. **Forest Ecology and Management**, v. 382, p. 161–167, 2016.

SCHONS, C. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANTOS, T. L.; NASCIMENTO, R. G. M. Índices De Competição Em Nível De Árvore Individual Para Espécies Da Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1–14, 2020.

STADT, K. J. et al. Evaluation of competition and light estimation indices for predicting diameter growth in mature boreal mixed forests. **Annals of Forest Science**, v. 64, n. 5, p. 477–490, 2007.

STAGE, A. R. **PROGNOSIS MODEL FOR STAND DEVELOPMENT**. Research Paper, USDA Forest Service, 1973.

SUN, Z. et al. Hegyi competition index decomposition to improve estimation accuracy of *Larix olgensis* crown radius. **Ecological Indicators**, v. 143, n. July, p. 109322, 2022.

SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetatio**, v. 75, n. 1–2, p. 81–86, 1988.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-Dependent Competition Measures for Predicting Growth of Individual Trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816–831, 1989.

TRAUTENMÜLLER, J. W. **Correlações e estimadores de biomassa acima do solo em florestas no sul do Brasil**. 2019. Tese - Universidade Federal do Paraná, 2019.

VANCLAY, J. K. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. **Forest Ecology and Management**, v. 42, p. 143–168, 1991.

VANCLAY, J. K. et al. Spatially explicit competition in a mixed planting of *Araucaria cunninghamii* and *Flindersia brayleyana*. **Annals of Forest Science**, v. 70, p. 611–619, 2013.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Wallingford: CAB International, 1994.

VANCLAY, J. K. Spatially-explicit competition indices and the analysis of mixed-species plantings with the Simile modelling environment. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 295–302, 2006.

VATRAZ, S.; ALDER, D.; SILVA, J. N. M. a Autocorrelação Temporal Do Incremento Em Diâmetro E As Diferenças De Crescimento Entre Grupos De Espécies Em Uma Floresta Ombrófila Densa. **Revista Brasileira De Biometria**, v. 36, n. 2, p. 56–73, 2018.

VATRAZ, S.; SILVA, J. N. M.; ALDER, D. Competição versus incremento de árvores em floresta ombrófila densa no estado do Amapá - Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1118–1127, 2018.

WEINER, J. Asymmetric Competition in Plant Populations. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 11, p. 360–364, 1990.

WEINER, J. Neighbourhood Interference Amongst Pinus Rigida Individuals. **Journal of Ecology**, v. 72, p. 183–195, 1984.

WEINER, J. Variation in the performance of individuals in plant populations. Em: DAVY, A. J.; HUTCHINGS, M. J.; WATKINSON, A. R. (Eds.). **Plant Population Ecology**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988. p. 59–81.

WEISKITTEL, A. R. et al. **Forest growth and yield modelling**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

WHITMORE, T. C. Canopy gaps and the two major groups of forest trees. **Ecology**, v. 70, n. 3, p. 536-538, 1989.

WU, H. I. et al. Ecological field theory: A spatial analysis of resource interference among plants. **Ecological Modelling**, v. 29, p. 215–243, 1985.

## APÊNDICE 1 – LISTA DE ESPÉCIES PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO

TABELA 21 - LISTA DE ESPÉCIES PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO.

Espécie	N	d	Grupo ecológico
<i>Aegiphila brachiata</i> Vell.	3	21,67	P
<i>Allophylus edulis</i> (A. St.-Hil., Cambess. & A. Juss.) Radlk.	363	13,73	CI
<i>Allophylus semidentatus</i> (Miq.) Radlk.	79	12,41	CI
<i>Annona rugulosa</i> (Schltdl.) H.Rainer	101	14,52	P
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	329	62,43	CI
<i>Asteraceae</i>	1	10,38	
<i>Banara parvifolia</i>	9	20,22	CI
<i>Banara tomentosa</i> Clos	15	16,75	CI
<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth) O.Berg	60	18,84	CI
<i>Bougainvillea glabra</i> Choisy	3	16,31	Ex
<i>Calyptranthes concinna</i> DC.	10	16,59	CI
<i>Campomanesia guaviroba</i> (DC.) Kiaersk.	92	15,75	CI
<i>Campomanesia guazumifolia</i> (Cambess.) O.Berg	10	16,37	CI
<i>Campomanesia xanthocarpa</i> (Mart.) O.Berg	74	17,67	CI
<i>Casearia decandra</i> Jacq.	30	14,44	CI
<i>Casearia lasiophylla</i> Eichler	17	13,10	CI
<i>Casearia obliqua</i> Spreng.	383	16,55	CI
<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	1466	15,33	S
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	184	31,23	P
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	3	45,51	Ex
<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	1	13,08	P
<i>Chionanthus filiformis</i>	1	19,74	CI
<i>Cinnamodendron dinisii</i>	76	26,32	CI
<i>Cinnamomum amoenum</i> (Nees & Mart) Kosterm.	3	22,21	S
<i>Cinnamomum glaziovii</i> (Mez) Kosterm	1	50,90	CI
<i>Cinnamomum sellowianum</i> (Nees at Mart) Kosterm.	1	31,67	S
<i>Cinnamomum vesiculosum</i>	6	25,58	CI
<i>Citharexylum solanaceum</i>	2	21,44	CI
<i>Citronella gongonha</i> (Mart.) R.A.Howard	236	13,91	S
<i>Citronella paniculate</i> (Mart.) R.A.Howard	34	20,56	CI
<i>Clethra scabra</i> Pers.	218	21,60	P
<i>Coutarea hexandra</i> (Jacq.) K.Schum.	106	18,72	S
<i>Cryptocarya aschersoniana</i> Mez	4	26,56	CI

<i>Cupania vernalis</i> Cambess.	228	13,75	CI
<i>Cybistax antisiphilitica</i> (Mart.) Mart.	4	19,22	S
<i>Dahlstedtia floribunda</i> (Vogel) M.J. Silva & A.M.G. Azevedo	64	20,90	P
<i>Dalbergia</i> sp.	2	11,52	P
<i>Dalbergia brasiliensis</i> Vogel	45	18,61	S
<i>Dasyphyllum brasiliense</i> (Spreng.) Cabrera	16	23,47	P
<i>Drimys brasiliensis</i> Miers	5	20,23	CI
<i>Duranta vestita</i> Cham.	10	12,23	P
<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	4	17,20	Ex
<i>Erythrina falcata</i> Benth.	18	30,03	S
<i>Erythrina speciosa</i> Andrews	3	12,04	S
<i>Erythroxylum deciduum</i> A.St.-Hil.	23	19,30	P
<i>Escallonia bifida</i> Link & Otto	8	13,21	P
<i>Eugenia chlorophylla</i> O.Berg	32	28,67	CI
<i>Eugenia involucrate</i> DC.	6	14,08	CI
<i>Eugenia</i> sp,	1	12,80	
<i>Eugenia uniflora</i> L.	68	16,80	CI
Fabaceae	1	10,98	
<i>Guettarda uruguensis</i> Cham. & Schltld.	1	12,61	CI
<i>Gymnanthes klotzschiana</i> Müll.Arg.	454	15,24	S
<i>Handroanthus albus</i> (Cham.) Mattos	2	18,21	S
<i>Hovenia dulcis</i> Thunb.	32	23,75	Ex
<i>Ilex brevicuspis</i> Reissek	14	19,11	CI
<i>Ilex dumosa</i> Reissek	12	16,59	S
<i>Ilex paraguariensis</i> A.St.-Hil.	22	20,02	CI
<i>Ilex theezans</i> Mart. ex Reissek	1	10,66	S
<i>Inga marginata</i> Willd.	4	22,92	S
<i>Inga sessilis</i> (Vell.) Mart.	2	18,92	S
<i>Jacaranda puberula</i> Cham.	457	16,64	S
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	5	30,47	CI
<i>Lamanonia ternata</i> Vell.	60	21,73	P
<i>Lippia brasiliensis</i> (Link) T.R.S.Silva	1	37,31	CI
<i>Laplacea fruticosa</i> (Schrad.) Kobuski	3	12,32	S
<i>Ligustrum lucidum</i> W.T.Ait.	103	18,81	Ex
<i>Lithraea brasiliensis</i> Marchand	60	19,15	P
<i>Lonchocarpus nitidus</i> (Vogel) Benth.	3	14,81	S
<i>Luehea divaricata</i> Mart.	785	19,87	P
<i>Machaerium Brasiliense</i> Vogel	68	16,45	S

<i>Machaerium paraguariense</i> Hassl.	93	19,44	P
<i>Machaerium stipitatum</i> Vogel	52	23,33	S
<i>Magnolia champaca</i> (L.) Baill. ex Pierre	2	23,28	Ex
<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	212	20,61	CI
<i>Monteverdia gonoclada</i> (Mart.) Biral	9	16,57	S
<i>Monteverdia aquifolium</i> (Mart.) Biral	1	12,35	CI
<i>Monteverdia evonymoides</i> (Reissek) Biral	7	14,40	CI
<i>Mollinedia clavigera</i> Tul.	5	11,84	CI
<i>Moquiniastrum polymorphum</i> (Less.) G. Sancho	110	25,65	P
<i>Myrceugenia acutiflora</i> (Kiaersk.) D.Legrand & Kausel	6	11,50	CI
<i>Myrceugenia miersiana</i> (Gardner) D.Legrand & Kausel	8	13,15	CI
<i>Myrceugenia myrcioides</i> (Cambess.) O.Berg	1	10,76	CI
<i>Myrcia hatschbachii</i> D.Legrand	247	21,28	CI
<i>Myrcia selloi</i> (Spreng.) N.Silveira	6	11,60	CI
<i>Myrcia palustris</i> DC.	15	14,95	CI
<i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC.	188	14,91	S
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	26	20,09	P
<i>Myrsine gardneriana</i> A.DC.	47	12,69	P
<i>Myrsine umbellate</i> Mart.	2	11,41	P
<i>NI</i>	42	11,93	
<i>Nectandra lanceolata</i> Nees	154	26,97	S
<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez	11	16,39	CI
<i>Ocotea bicolor</i> Vattimo-Gil	187	21,24	CI
<i>Ocotea diospyrifolia</i> (Meisn.) Mez	1	64,59	CI
<i>Ocotea nutans</i> (Nees) Mez	285	20,31	CI
<i>Ocotea puberula</i> (Rich.) Nees	350	29,09	S
<i>Ocotea pulchella</i> (Nees & Mart.) Mez	3	16,79	S
<i>Ocotea sp</i>	1	10,60	
<i>Oreopanax fulvum</i> Marchal	47	16,19	CI
<i>Picramnia excelsa</i> Kuhl. ex Pirani	1	14,51	CI
<i>Picramnia parvifolia</i> Engl.	3	16,84	CI
<i>Picrasma crenata</i> (Vell.) Engl.	29	17,32	S
<i>Pimenta pseudocaryophyllus</i> (Gomes) Landrum	9	16,64	CI
<i>Pinus taeda</i> L.	3	61,16	Ex
<i>Piptocarpha axillaris</i> (Less.) Baker	14	25,29	P
<i>Pittosporum undulatum</i> Vent.	2	16,33	Ex
<i>Prunus brasiliensis</i> (Cham. & Schtdl.) D.Dietr.	46	27,72	S
<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	2	12,51	S

<i>Randia ferox</i> (Cham. & Schltldl.) DC.	3	12,19	CI
<i>Roupala montana</i> Aubl.	29	25,32	CI
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	36	18,44	P
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	422	19,91	P
<i>Scutia buxifolia</i> Reissek	13	20,78	CI
<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng.	2	12,76	CI
<i>Senna macranthera</i> (DC. ex Collad.) H.S.Irwin & Barneby	2	12,25	S
<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby	2	25,94	Ex
<i>Sloanea lasiocoma</i> K.Schum.	34	30,75	CI
<i>Sloanea hirsuta</i> (Schott) Planch. ex Benth.	8	34,07	S
<i>Solanum</i> sp.	1	12,41	P
<i>Solanum pseudoquina</i> A.St.-Hil.	51	14,23	P
<i>Solanum sanctae-catharinae</i> Dunal	54	14,63	P
<i>Styrax leprosus</i> Hook. & Arn.	70	19,16	S
<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman	7	22,02	S
<i>Symplocos tetrandra</i> Mart.	89	19,86	S
<i>Symplocos uniflora</i> (Pohl) Benth.	11	16,56	S
<i>Vitex megapotamica</i> (Spreng.) Moldenke	10	15,16	CI
<i>Xylosma ciliatifolia</i> (Clos) Eichler	5	13,06	S
<i>Xylosma pseudosalzmanii</i> Sleumer	33	13,41	S
<i>Zanthoxylum kleinii</i> (R.S.Cowan) P.G.Waterman	54	20,97	S
<i>Zanthoxylum petiolare</i> A.St.-Hil. & Tul.	37	17,35	S
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	14	16,75	S

N é o número de indivíduos em todo o fragmento, d é o diâmetro médio da espécie. P – Pioneiras, S – Secundárias, CI – climácias, Ex – Exóticas.