









Índices de competição independentes da distância em um fragmento de Mata Atlântica

Bruno Oliveira LAFETÁ^{1*}, Milene Alves dos SANTOS¹, Ivelton Alves PIMENTA¹,
Grazielle Wolff de Almeida CARVALHO¹, Diego dos Santos VIEIRA²,
Heloisia Brenda Xavier RODRIGUES¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, São João Evangelista, MG, Brasil.

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, Brasil.

*E-mail: bruno.lafeta@ifmg.edu.br

Submetido em 27/12/2022; Aceito em 29/08/2023; Publicado em 14/09/2023.

RESUMO: Investigações científicas sobre o comportamento de índices de competição em diferentes estratos de altura são escassas e podem subsidiar o desenvolvimento de planos, manutenção e monitoramento para a recuperação de áreas degradadas e contribuir para o desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a dinâmica de crescimento em povoamentos inequidâneos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de índices de competição independentes da distância no comportamento biométrico de árvores em diferentes estratos de altura em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal. O estudo foi conduzido em uma área de 2,53ha, onde se realizou o inventário com intensidade amostral de 15,81%. Calcularam-se seis índices de competição para árvores contidas nos estratos inferior, médio e superior do fragmento. Os índices cujos menores valores representam maior competição sobre a árvore-objetivo exibiram correlação positiva e se associaram melhor com os atributos biométricos. O comportamento de aspectos biométricos em relação à competitividade da árvore-objetivo foi distinto entre estratos de altura. Conclui-se que, para o local de estudo, o índice de IC2 demonstrou flexibilidade para análises sobre relações entre a competitividade e aspectos biométricos em distintos estratos de altura. Aspectos os biométricos lenhosos aumentam assintoticamente com a redução da competição sobre a árvore-objetivo.

Palavras-chave: altura de árvores; competitividade; comportamento sigmoidal; relação funcional.

Distance-independent competition indices in an Atlantic Forest fragment

ABSTRACT: Scientific investigations on the behavior of competition indices in different height strata are scarce and can subsidize the development of plans, maintenance and monitoring for the degraded area recovery and contribute to the development of future research on growth dynamics in uneven stands. This work aimed to evaluate the influence of distance-independent competition indices on the biometric behavior of trees in different height strata within an Atlantic Forest fragment under forest recovery. This study was conducted in an area of 2.53ha, where inventory was carried out with a sampling intensity of 15.81%. Six competition indices were calculated for trees contained in the lower, middle and upper strata of the fragment. Indices whose lower values represent greater competition on the target tree exhibited a positive correlation and had a better association with the biometric attributes. The behavior of biometric aspects regarding the competitiveness of the target tree was different between height strata. It is concluded that, for the study site, IC2 competition index demonstrated flexibility for analyzing relationships between competitiveness and biometric aspects in different height strata. Woody biometrics aspects increase asymptotically with reduced competition over the target tree.

Keywords: tree height; competitiveness; sigmoidal behavior; functional relationship.

1. INTRODUÇÃO

As florestas são mosaicos de fases estruturais dinâmicos que fornecem serviços ecossistêmicos aproveitáveis direta ou indiretamente pela sociedade (HILL et al., 2016). O conhecimento da interação competitiva entre árvores é essencial para a compreensão da estruturação de uma formação lenhosa e para a definição de estratégias de conservação e manejo florestal sustentável (SIRAMI et al., 2018).

A análise quantitativa da competição entre árvores e sua relação com a estrutura vertical de formações lenhosas reflete a produtividade e a vulnerabilidade de indivíduos em cada estrato de altura (VERSACE et al., 2019). Todavia, as

relações competitivas entre árvores situadas em diferentes estratos de altura não estão completamente elucidadas para florestas naturais (HUI et al., 2019), especialmente, aquelas que se encontram em fase de recuperação.

A estratificação vertical é resultado da competição e seleção de espécies arbóreas em uma comunidade, analisada por meio da distribuição de indivíduos em classes de tamanho (HUI et al., 2019). A diferenciação em estratos de altura ocorre naturalmente em consequência do ritmo de crescimento, adaptação de árvores e disponibilidade de radiação luminosa, que se modifica ao longo do perfil vertical (CAO et al., 2019; FISCHER et al., 2019; THOM; KEETON, 2019).

A competitividade entre árvores é convencionalmente quantificada na forma de índices, que representam um conjunto de características e interações bióticas e abióticas inerentes a uma árvore ou grupo de indivíduos (YANG; HUANG, 2018). Os índices de competição são expressões matemáticas que refletem o grau de supressão de cada árvore em relação àquelas competidoras (MINATTI et al., 2019; SCHONS, 2020).

Os índices de competição podem ser classificados em três categorias, assim descritas: (a) Índices Independentes da Distância (IID) – não exigem a localização das árvores individuais; (b) Índices Dependentes da Distância (IDD) – exigem a localização de cada árvore; e (c) Índices de Competição Semi-dependentes da Distância (ISD) – calculados para as espécies presentes em um raio pré-determinado que varia entre 1 a 9 metros, a partir de uma “árvore-objetivo” (LUSTOSA JUNIOR et al., 2019). Embora haja diferenças operacionais na coleta e processamento de dados para as diferentes categorias de índice, pesquisas têm demonstrado precisões similares de suas relações funcionais com aspectos biométricos.

Os índices de competição independentes da distância são facilmente calculados e exigem menos recursos para a coleta de dados (CURTO et al., 2020; FUKUMOTO et al., 2020), pois assumem que a biometria vegetal exprime todas as relações competitivas envolvidas no crescimento individual. Esses índices podem ainda ser agrupados em duas subcategorias de competitividade, unilateral e bilateral. A competição unilateral representa a concorrência por radiação luminosa e considera que as árvores maiores não são afetadas por aquelas vizinhas menores, enquanto a competição bilateral se refere à disputa, sobretudo, por água e nutrientes, assumindo que os recursos são disputados por todas as árvores vizinhas (SCHONS et al., 2020).

Investigações científicas sobre o comportamento de índices de competição em diferentes estratos de altura são escassas e podem subsidiar o desenvolvimento de planos, manutenção e monitoramento para a recuperação de áreas degradadas e auxiliar futuras pesquisas sobre a dinâmica de crescimento em povoamentos inequidistantes (CASTRO et al., 2014; MA et al., 2017; LUSTOSA JÚNIOR et al., 2019).

Mediante o exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: I – O comportamento de aspectos biométricos lenhosos em relação à competitividade é distinto entre estratos de altura? II – Aspectos biométricos lenhosos exibem tendência de aumento assintótico com a redução da competição sobre a árvore-objetivo? O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de índices de competição independentes da distância no comportamento biométrico de árvores em diferentes estratos de altura em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

O trabalho foi conduzido no município de São João Evangelista – MG, em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, nas coordenadas de 18°33'5,05" Sul e 42°45'50,40" Oeste (Datum Sirgas 2000). O clima da região é do tipo Cwa (temperado chuvoso-mesotérmico) pela classificação do sistema internacional de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 21,2°C e 1.000 mm, respectivamente (CLIMATE-DATA.ORG, 2023).

O fragmento de Mata Atlântica possui 2,53 ha e se encontra em fase de recuperação florestal passiva desde novembro de 2013, classificado em estágio inicial de regeneração segundo a Portaria 392 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2007). A vegetação original, caracterizada por formação Estacional Semidecidual, foi convertida para sucessivos monocultivos de *Coffea arabica* L. por período de aproximadamente 10 anos. Após a remoção dos indivíduos de *C. arabica*, o fragmento foi isolado para a condução da regeneração natural, mantendo, contudo, uma conexão de, aproximadamente, 140 m com um fragmento de vegetação secundária adjacente de 1,52 ha. O tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com o horizonte A proeminente, textura arenosa, relevo ondulado e a 690 m de altitude.

2.2. Coleta e processamento de dados

O inventário florestal foi realizado aos 80 meses após início da recuperação do fragmento de Mata Atlântica. Diante da assimetria de forma e tamanho reduzido do fragmento, optou-se pelo lançamento de 10 parcelas quadradas contíguas de 20 × 20 m (400 m²); equivalente a uma intensidade amostral de 15,81%. A definição dessas parcelas experimentais se baseou na representatividade das condições médias do interior do fragmento, previamente estabelecidas para o monitoramento contínuo e pesquisas relacionadas à análise da competitividade entre árvores (LAFETÁ, et al., 2023). Tal procedimento de amostragem teve o propósito de se evitar, em parte, a necessidade de eventuais correções devido ao efeito de bordadura das parcelas em cálculos de índices de competição que exigem informações de distância entre árvores.

Todos os fustes dos indivíduos arbóreos com circunferência a 1,30 m de altura do solo (CAP, cm) igual ou superior a 10 cm foram mensurados, valor definido de forma empírica. O diâmetro a 1,30 m de altura do solo (DAP, cm) foi calculado pela relação entre (CAP) e o valor de π (3,141592654...). Adotou-se o diâmetro equivalente ($DAP_{EQ} = \sqrt{\sum_{i=1}^n DAP_i^2}$, em que; n = número de fustes da árvore i) para as árvores com bifurcação. A altura dos fustes inventariados (H, m) foi obtida pelo método de superposição de ângulos iguais (SCOLFORO; THIERSCH, 2004). Para a estimativa volumétrica (V, m³) e cálculo do fator de forma, foi empregada a Equação 1 (CETEC, 1995), para mata secundária.

$$V = 0,000074 DAP^{1,707348} H^{1,16873}, R^2 = 0,973 \quad (01)$$

em que; R² = coeficiente de determinação.

Avaliaram-se seis índices de competição independentes da distância conhecidos no setor florestal (Tabela 1). Os índices IC4, IC5 e IC6 assumem como árvores competidoras aquelas de diâmetro maior que a árvore-objetivo e, portanto, representam a competição unilateral. Os demais índices (IC1 a IC3) representam a competição bilateral. Foram consideradas árvores competidoras aquelas presentes na mesma parcela que a árvore-objetivo em estudo.

A análise da estrutura vertical foi realizada com a estratificação arbórea em três estratos de altura: Estrato inferior – compreendeu as árvores com altura (H) menor que a média amostrada (Hm) menos uma unidade de desvio-padrão (s); estrato médio – compreende as árvores com (Hm

– 1s) ≤ H < (Hm + 1s); e estrato superior – compreendeu as árvores com H ≥ (Hm + 1s).

Tabela 1. Índices de competição independentes da distância testados para um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal.
Table 1. Distance-independent competition indices tested for an Atlantic Forest fragment in forest recovery.

Índice	Expressão	Interpretação	Fonte
----- Competição bilateral -----			
IC1	$IC1 = \sum_{j=1}^n \frac{DAP_j}{DAP_i}$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore-objetivo.	Lorimer (1983)
IC2	$IC2 = \frac{DAP_i^2}{\overline{DAP}_j^2}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore-objetivo.	Glover; Hool (1979)
IC3	$IC3 = \frac{DAP_i^2}{q^2}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore-objetivo.	Stage (1973)
----- Competição unilateral -----			
IC4	$IC4 = \sum_{i=1}^{nj} g_j$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore-objetivo.	Stage (1973)
IC5	$IC5 = \sum_{i=1}^{nj} g_j / DAP_i$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore-objetivo.	Lhotka; Loewenstein (2011)
IC6	$IC6 = \frac{DAP_i}{DAP_{max}}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore-objetivo.	Tomé; Burkhardt (1989)

em que: \overline{DAP} = média aritmética de DAP das árvores (cm); q = diâmetro médio quadrático de setor (cm); DAP_{max} = DAP da árvore mais grossa; g_j = área basal das árvores competidoras (m²/ha) com DAP maior que o DAP da árvore-objetivo; i = i-ésima árvore-objetivo e; j = j-ésima árvore competidora.

A seleção dos índices de competição ideais para a representação da competitividade entre árvores se baseou na análise estatística e biológica do coeficiente de correlação de Spearman. A fim de se minimizar problemas com a perda de precisão durante a modelagem, assumiram-se os valores de $|\rho| \geq 0,75$ ($p \leq 0,01$) como critério para a inclusão de índices de competição a serem utilizados como preditores.

Para todo o banco de dados e cada estrato de altura, foram estabelecidas relações funcionais de simples entrada para a estimativa de atributos biométricos (DAP e V) utilizando exclusivamente um índice de competição como variável preditora. A análise de regressão foi realizada por meio do método iterativo de Levenberg-Marquardt, com o ajuste do modelo logístico, $Y = \alpha (1 + \beta \cdot e^{-\gamma \cdot X})^{-1}$; em que Y é o atributo biométrico, X é o índice de competição e α , β e γ são coeficientes do modelo logístico. O coeficiente α representa a assíntota da curva sigmoide. Optou-se pelo modelo logístico em virtude da sua fundamentação biológica, facilidade de interpretação de seus parâmetros e crescente uso no setor florestal.

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com a significância dos coeficientes pelo teste t, média dos desvios absolutos (MDA), raiz quadrada do erro médio (RQEM) e erro padrão residual (S_{yx} , %), calculados com auxílio dos pacotes Metrics (HAMNER; FRASCO, 2023) e stats (R CORE TEAM, 2022) do software R. Menores valores de MDA, RQEM e S_{yx} implicam em melhor desempenho preditivo. O teste de F(H_0) Graybill (1976) foi aplicado para avaliar a identidade de modelos e possibilidade do uso de equação generalista.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foram empregados 1 e 5% de significância em todas as análises. Essas foram efetuadas com auxílio dos softwares Microsoft Excel® e R versão 3.5.2.

3. RESULTADOS

A distribuição percentual de árvores em cada estrato de altura se aproximou de uma distribuição normal, caracterizada pela frequência de 68,26% dos dados contidos no intervalo correspondentes a ± 1 unidade de desvio padrão em relação à média. Os estratos inferior, médio e superior representaram 150 (16,00%), 608 (64,80%) e 180 ind ha⁻¹ (19,20%), respectivamente.

As correlações entre atributos biométricos e índices de competição independentes da distância se encontram na Tabela 2. Em geral, os índices que representam a competitividade bilateral apresentaram forte correlação com os atributos biométricos ($|\rho| > 0,75$; $p \leq 0,01$). Não foram identificadas inconsistências biológicas relacionadas às correlações; árvores com dimensões menores tendem a ser menos competitivas.

Os índices de competição mais correlacionados com os atributos biométricos ($|\rho| > 0,75$) foram designados para as análises estatísticas subsequentes. As equações obtidas com o ajuste do modelo logístico para estimativa biométrica de árvores se encontram nas Tabelas 3 e 4. As equações obtidas para a estimativa de DAP no estrato superior tiveram alguns coeficientes não significativos ($p > 0,01$) com uso dos preditores IC1, IC5 e IC6 (Tabela 3). Para esse mesmo estrato de altura, o ajuste volumétrico com uso do preditor IC6 também resultou em coeficiente não significativo ($p > 0,01$, Tabela 4). Na ausência de significância, esses índices foram desconsiderados das demais análises de representação gráfica.

A precisão das equações biométricas obtidas com o ajuste do modelo logístico oscilou com o uso de diferentes índices de competição. Aquelas equações que contiveram os preditores IC2 e IC6 apresentaram os menores desvios (MDA, RQEM e S_{yx}), com valores próximos entre si. Entretanto, os ajustes pautados no preditor IC6 resultaram em coeficientes não significativos ($p > 0,05$) para a estimativa biométrica das árvores do estrato superior de altura.

Tabela 2. Correlações de Spearman entre atributos biométricos e índices de competição de fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal e diferentes estratos de altura.

Table 2. Spearman correlations between biometric attributes and competition indices of Atlantic Forest fragment in forest recovery and different height strata.

Índice	DAP	Volume	DAP	Volume
---- Generalista ----				
IC1	-0,85**	-0,74**	-0,82**	-0,78**
IC2	0,93**	0,89**	0,84**	0,76**
IC3	0,92**	0,88**	0,82**	0,74**
IC4	-0,46**	-0,36**	-0,31*	-0,27*
IC5	-0,82**	-0,73**	-0,69**	-0,63**
IC6	0,90**	0,82**	0,84**	0,80**
--- Estrato Inferior ---				
IC1	-0,84**	-0,76**	-0,89**	-0,84**
IC2	0,88**	0,85**	0,91**	0,89**
IC3	0,88**	0,85**	0,89**	0,87**
IC4	-0,45**	-0,37**	-0,70**	-0,68**
IC5	-0,79**	-0,72**	-0,82**	-0,80**
IC6	0,90**	0,82**	0,92**	0,88**
-- Estrato Médio --				
IC1	-0,84**	-0,76**	-0,89**	-0,84**
IC2	0,88**	0,85**	0,91**	0,89**
IC3	0,88**	0,85**	0,89**	0,87**
IC4	-0,45**	-0,37**	-0,70**	-0,68**
IC5	-0,79**	-0,72**	-0,82**	-0,80**
IC6	0,90**	0,82**	0,92**	0,88**
-- Estrato Superior --				
IC1	-0,84**	-0,76**	-0,89**	-0,84**
IC2	0,88**	0,85**	0,91**	0,89**
IC3	0,88**	0,85**	0,89**	0,87**
IC4	-0,45**	-0,37**	-0,70**	-0,68**
IC5	-0,79**	-0,72**	-0,82**	-0,80**
IC6	0,90**	0,82**	0,92**	0,88**

**,* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste de correlação de Spearman.

Tabela 3. Coeficientes e estatísticas da qualidade de ajuste do modelo logístico para estimativa do DAP de árvores em função de índice de competição (IC) para um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal em diferentes estratos de altura.

Table 3. Coefficients and statistics of fit quality of the logistic model to DBH estimate of trees as a function of competition index (IC) for an Atlantic Forest fragment in forest recovery in different height strata.

IC	α	β	γ	MDA	RQEM	S _{yx} (%)
----- Generalista -----						
IC1	2,926**	-1,000**	0,013**	1,56	2,05	26,34
IC2	19,753**	3,966**	0,807**	1,19	1,61	20,73
IC3	19,787**	4,097**	1,044**	1,25	1,68	21,58
IC5	3,635**	-0,813**	22,141**	1,75	2,27	29,13
IC6	28,521**	9,625**	3,196**	1,27	1,68	21,59
----- Estrato Inferior -----						
IC1	2,910**	-1,052**	0,019 ^{ns}	0,62	0,76	15,17
IC2	8,835**	2,006**	2,064**	0,60	0,75	14,87
IC3	9,241**	2,038**	2,230**	0,62	0,77	15,37
IC6	10,955**	5,133**	5,340**	0,63	0,73	14,61
----- Estrato Médio -----						
IC1	2,944**	-0,920**	0,012**	1,05	1,36	20,36
IC2	12,626**	2,653**	1,328**	0,96	1,20	17,93
IC3	12,724**	2,647**	1,604**	0,99	1,23	18,35
IC5	3,243**	-0,756**	14,746**	1,22	1,56	23,31
IC6	14,883**	5,179**	4,304**	0,93	1,18	17,61
----- Estrato Superior -----						
IC1	4,631 ^{ns}	-0,912**	0,013 ^{ns}	1,72	2,44	18,10
IC2	21,942**	2,720**	0,578**	1,85	2,26	16,80
IC3	21,264**	3,087**	0,885**	1,96	2,41	17,91
IC5	4,480 ^{ns}	-0,778**	16,427 ^{ns}	2,15	2,81	20,82
IC6	45,236 ^{ns}	7,961*	1,982**	1,47	2,08	15,41

**,* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ^{ns} não significativo 5% de probabilidade pelo teste t. MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = Raiz Quadrada do Erro Médio e; S_{yx} = erro padrão residual.

Devido à maior flexibilidade do preditor IC2 no estabelecimento de relações funcionais para a estimativa biométrica em distintos estratos de altura, selecionaram-se suas equações para as análises de inspeção gráfica. O teste de

identidade de modelos de F Graybill foi significativo ($p \leq 0,01$) tanto para a estimativa de DAP quanto para o volume, indicando ser necessário o ajuste por estrato de altura.

A característica sigmoideal inerente à curva do modelo logístico foi positiva, sendo evidenciada a assíntota superior em todos os ajustes biométricos em função do índice IC2 (Figura 1). Observou-se maior amplitude de variação desse índice no estrato superior de altura (14,20), oscilando de 0,11 a 1,75 e de 0,10 a 4,84 nos estratos inferior e médio, respectivamente. A assíntota tendeu ao aumento no sentido do estrato de altura inferior para o superior (Figura 1, Tabelas 3 e 4).

Tabela 4. Coeficientes e estatísticas da qualidade de ajuste do modelo logístico para estimativa do volume de árvores em função do índice de competição (IC) para um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal em diferentes estratos de altura.

Table 4. Coefficients and statistics of fit quality of the logistic model to volume estimate of trees as a function of the competition index (IC) for an Atlantic Forest fragment undergoing forest recovery in different height strata.

IC	α	β	γ	MDA	RQEM	S _{yx} (%)
----- Generalista -----						
IC2	0,170**	19,617**	0,885**	0,01	0,02	73,60
IC3	0,158**	22,709**	1,316**	0,01	0,02	76,33
IC6	0,208**	107,905**	5,949**	0,01	0,02	74,38
----- Estrato Inferior -----						
IC1	-0,001 ^{ns}	-0,976**	-0,004 ^{ns}	0,00	0,00	37,17
IC2	0,012**	5,246**	2,619**	0,00	0,00	38,54
IC6	0,012**	24,183*	10,059**	0,00	0,00	36,60
----- Estrato Médio -----						
IC1	0,000 ^{ns}	-1,000**	0,000 ^{ns}	0,01	0,01	53,59
IC2	0,056**	8,805**	1,261**	0,00	0,01	46,33
IC3	0,059**	8,842**	1,478**	0,01	0,01	47,48
IC6	0,079**	23,269**	4,757**	0,01	0,01	47,79
----- Estrato Superior -----						
IC1	-0,035 ^{ns}	-1,033**	-0,014 ^{ns}	0,03	0,04	45,18
IC2	0,213**	6,647**	0,495**	0,02	0,03	40,97
IC3	0,186**	8,079**	0,890**	0,02	0,04	42,60
IC5	0,000 ^{ns}	-1,000**	0,026 ^{ns}	0,03	0,04	45,84
IC6	0,328 ^{ns}	29,332**	3,562**	0,02	0,03	38,05

**,* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ^{ns} não significativo 5% de probabilidade pelo teste t. MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = Raiz Quadrada do Erro Médio e; S_{yx} = erro padrão residual.

4. DISCUSSÃO

A competição em ambientes naturais influenciou a biometria das árvores do fragmento florestal. A maioria dos índices de competição avaliados correlacionaram significativamente com o diâmetro e volume individual (Tabela 2). Os índices cujos menores valores representam maior competição sobre a árvore-objeto exibiram correlação positiva, além terem se associados melhor com os atributos biométricos; o inverso exibiu correlação negativa. Face aos inúmeros índices de competição disponíveis na literatura (STAGE; 1973; GLOVER; HOOL, 1979; LORIMER, 1983; TOMÉ; BURKHART, 1989; LHOTKA; LOEWENSTEIN, 2011) e especificidades de formações lenhosas autóctones, sugere-se que a escolha do índice de competição seja baseada em critérios estatísticos, intrínsecos à vegetação, disponibilidade de recursos e laboriosidade da coleta de dados biométricos.

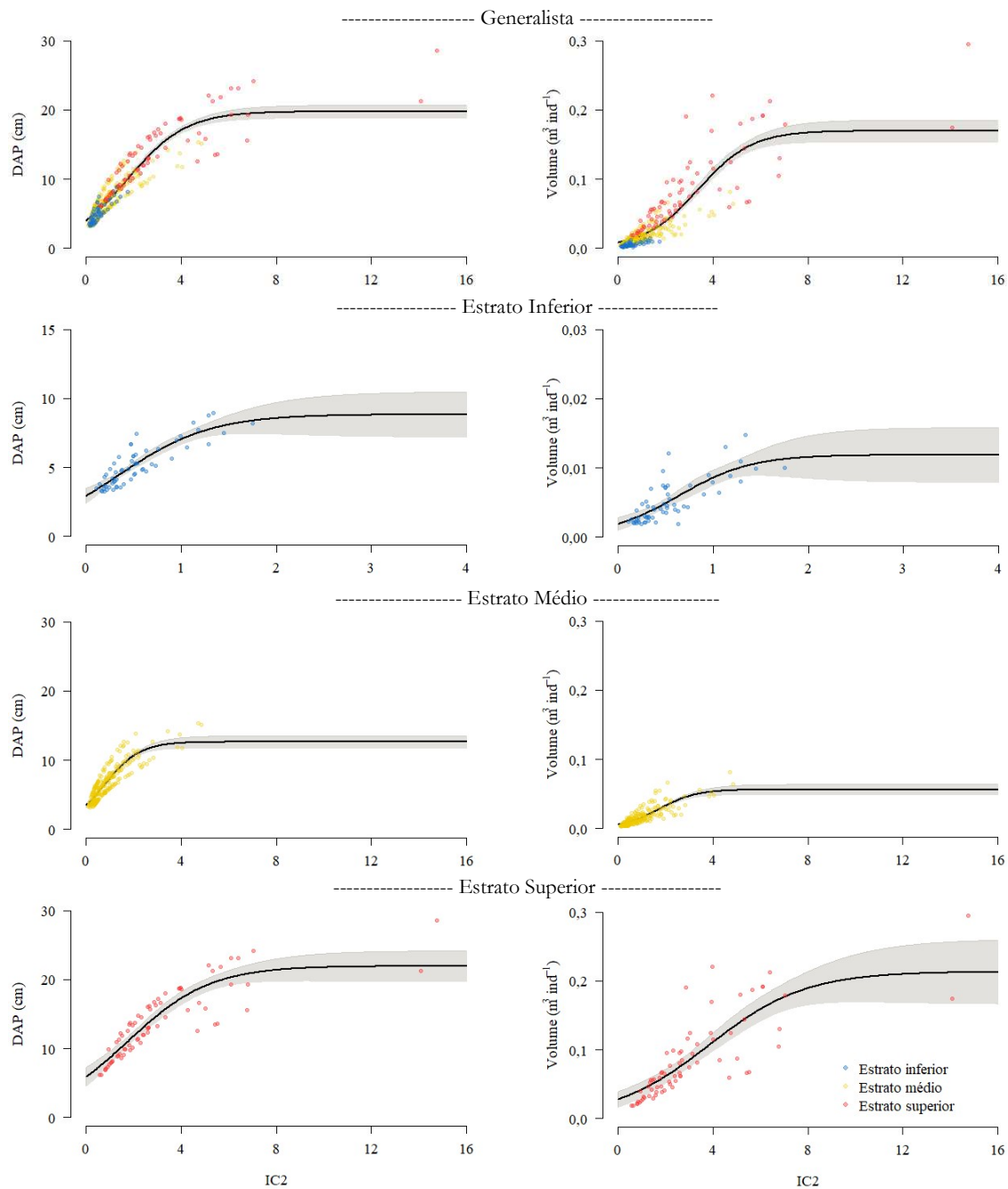


Figura 1. Valores observados e curvas geradas para DAP e volume em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal, considerando todas as árvores inventariadas (Generalista) e por estrato de altura.

Figure 1. Observed values and curves generated for DBH and volume in an Atlantic Forest fragment under forest recovery, considering all inventoried trees (Generalist) and by height stratum.

A compreensão de relações biométricas é fundamental para avaliar processos competitivos em uma floresta. Os resultados demonstraram uma associação significativa de diâmetros menores com fustes mais baixos e de menor volume ($\rho = 0,63$ e $\rho = 0,96$, respectivamente; $p \leq 0,01$). O estrato superior, onde fustes com maiores diâmetros predominaram, conteve a maior fração do volume amostrado (59,96%). Em seqüência, o estrato médio (37,04%) e inferior (3,00%) compuseram as demais proporções. Enfatiza-se que limitações na interceptação de radiação luminosa, principalmente em espécies heliófilas situadas em menores estratos de altura, comprometem a etapa fotoquímica da

fotossíntese e promove a senescência foliar, restringindo a produtividade primária líquida (TAIZ et al., 2017).

A variabilidade encontrada na forma dos fustes pode ter sido consequência de aspectos competitivos inerentes a cada estrato de altura e da diversidade genética encontrada em ecossistemas naturais. Evidenciou-se dois grupos distintos relacionados à forma de fuste, um formado pelo estrato superior com fustes de maior conicidade, e o outro, pelos dois demais estratos de altura; os fatores de forma foram de $0,64 \pm 0,0604$, $0,74 \pm 0,0720$ e $0,74 \pm 0,0538$ nos estratos superior, médio e inferior, respectivamente.

Genericamente, o fator de forma diminuiu com o aumento do diâmetro de fustes inventariados ($\rho = -0,85$, p

$\leq 0,01$). Uma hipótese a se considerar é a de que a intensa competição nos estratos inferiores de altura do fragmento em estágio inicial de regeneração, especialmente por radiação luminosa, possa ter promovido a formação de fustes mais cilíndricos. Esta hipótese corrobora com o relatado também em povoamentos equiâneos, onde se tem fustes mais cilíndricos à medida que se adensa o plantio e se intensifica a competição por radiação luminosa (CAMPOS; LEITE, 2017; TRINDADE et al., 2019).

Apesar dos erros padrões residuais terem sido relativamente altos para a estimativa biométrica por estrato de altura (de 14,61 a 23,31% e 36,60 a 47,48% para as estimativas de DAP e volume, respectivamente), as equações obtidas se mostraram úteis para o entendimento do efeito da competição no crescimento de plantas (Tabelas 3 e 4). Em virtude da complexidade envolvida na representação da competição em florestas naturais (TENZIM et al., 2017; SIRAMI et al., 2018; VERSACE et al., 2019; BIANCHI et al., 2020), a qualidade dos ajustes realizados foi considerada satisfatória.

A significância do teste de identidade de modelos ($p \leq 0,01$) destacou a necessidade de se incorporar informações sobre a dinâmica competitiva no estabelecimento de relações funcionais para a estimativa biométrica por estrato de altura. As equações geradas para o estrato superior de altura apresentaram maiores valores de MDA, RQEM e S_{yx} , provavelmente, devido à heterogeneidade biométrica. Nesse mesmo estrato, também foram encontradas árvores com diâmetro comum aos estratos inferiores, ou seja, desde árvores com fustes mais finos (DAP mínimo de 6,18 cm) quanto mais grossos (DAP máximo de 28,52cm).

O uso do índice de competição IC2 como preditor exclusivo da modelagem permitiu a análise do comportamento biométrico em diferentes níveis de competitividade sobre a árvore-objetivo (Figura 1). Este resultado é um indício de que para o fragmento de Mata Atlântica em regeneração estudado, a representação da competição resumida na forma de um único índice deve considerar a disputa de recursos por todas as árvores vizinhas (competição bilateral) e, não somente, aquelas competidoras maiores que a árvore-objetivo. Tem-se a expectativa de que árvores contidas em ambientes sob regeneração estejam menos sujeitas aos efeitos competitivos por radiação luminosa devido ao menor porte da vegetação, em comparação às florestas em estágios sucessionais mais avançados (HILL et al., 2016; KRŮČEK et al., 2019).

Para as ocasiões em que se verificou valores do índice IC2 em comum entre os três estratos de altura (faixa aproximada de IC2 entre 0,5565 a 1,7491), os valores de DAP foram de $6,6503 \pm 1,3979$ cm, $7,5910 \pm 1,8253$ cm e $8,9432 \pm 1,8775$ cm nos estratos inferior, médio e superior, respectivamente. É conveniente enfatizar que nessa faixa de índice IC2, as árvores do estrato superior apresentaram maior fator de forma e menores robustez, vigor e estabilidade. As razões entre altura e DAP foram de 5:1, 7:1 e 9:1 no sentido do estrato inferior para o superior.

A capacidade em delinear adequadamente a realidade biológica é uma característica indispensável para o emprego de um índice de competição. As equações demonstraram que os atributos biométricos tenderam ao aumento assintoticamente com a redução da competição sobre a árvore-objetivo e de forma diferenciada entre os estratos de altura, isto é, o aumento biométrico tende a se estabilizar

mesmo com ausência de competição (Figura 1). Ressalta-se que o crescimento de árvores isoladas, submetidas à mínima competição, é limitada às características intrínsecas do potencial produtivo do sítio e aspectos genéticos da própria espécie. Logo, o uso de uma equação generalista para delinear o comportamento biométrico em função de índices de competição deve ser visto com bastante cautela, pois a competição sobre uma árvore-objetivo pode, em alguns casos, se destoar conforme o estrato de altura cuja a mesma se encontra.

A estratificação da floresta desempenha um papel crucial na interceptação de luz solar, atividades fotossintéticas e volume lenhoso (MENSAH et al., 2018). A competição unilateral se tornou menos evidente no estrato superior de altura, o qual se espera menor disputa pela interceptação da radiação luminosa (RODRÍGUEZ-RONDEROS et al., 2016). Os índices de competição unilaterais IC5 e IC6 resultaram, inclusive, em assíntotas não significativas nas equações de diâmetro e volume individual para tal estrato de altura (Tabelas 3 e 4).

Neste trabalho, a definição de estratos de altura mostrou-se eficaz para inferir sobre a competição e tendências de crescimento em função do grau de competitividade de árvores em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal. Salienta-se que a estrutura tridimensional arbórea influencia o microclima, habitat, ciclagem de nutrientes, comportamento de fogo, disponibilidade de radiação solar e outras importantes funções do ecossistema (SUMNALL et al., 2017). Deste modo, sugerem-se mais pesquisas envolvendo aspectos relacionados à competição e a estruturação de florestas naturais, que são bases fundamentais para o monitoramento da dinâmica de crescimento e planejamento com vistas ao manejo florestal sustentável.

5. CONCLUSÕES

O comportamento de aspectos biométricos lenhosos em relação à competitividade da árvore objetivo é distinto entre estratos de altura.

Aspectos biométricos lenhosos aumentam assintoticamente com a redução da competição sobre a árvore-objetivo.

Para o local de estudo, o índice de competição independente da distância IC2 demonstrou flexibilidade para análises sobre relações entre a competitividade e aspectos biométricos em distintos estratos de altura. O modelo logístico se mostrou promissor para o entendimento do comportamento de aspectos biométricos em razão da competição em diferentes estratos de altura.

6. REFERÊNCIAS

- BIANCHI, S.; HUUSKONEN, S.; SIIPILEHTO, J.; HYNYNEN, J. Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. e117689, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117689>
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5 ed. Viçosa: Editora UFV, 2017. 636p.
- CAO, L.; COOPS, N. C.; SUN, Y.; RUAN, H.; WANG, G.; DAI, J.; SHE, G. Estimating canopy structure and

- biomass in bamboo forest using airborne LiDAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p. 114-129, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.006>
- CASTRO, R.; SOARES, C.; LEITE, H. G.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G. S.; SILVA, M. O. F. Competição em nível de árvore individual em uma floresta estacional semidecidual. **Silva Lusitana**, v. 22, n. 1, p. 43-66, 2014.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima: São João Evangelista**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/175926/>>. Acesso em: 25 ago 2023.
- CONAMA_Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Portaria nº 392**, de 25 de junho de 2007. Definição de vegetação primária e secundária de regeneração de Mata Atlântica no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=6991>>. Acesso em: 25 ago 2023.
- 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, e118472, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118472>
- FISCHER, R.; KNAPP, N.; BOHN, F. J.; SHUGART, H. H.; HUTH, A. The relevance of forest structure for biomass and productivity in temperate forests: new perspectives for remote sensing. **Surveys in Geophysics**, v. 40, P. 709-734, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09519-x>
- FUKUMOTO, K.; NISHIZONO, T.; KITAHARA, F.; HOSODA, K. Evaluation of individual distance-independent diameter growth models for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) trees under multiple thinning treatments. **Forests**, v. 11, n. 3, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11030344>
- CETEC_Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Desenvolvimento de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas do estado de Minas Gerais e outras regiões do país**. Belo Horizonte: CETEC, 1995. 295p.
- GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1979. <https://doi.org/10.1093/forestscience/25.2.275>
- HAMMER, B.; FRASCO, M. **Metrics**: evaluation metrics for machine learning. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=Metrics>>. Acesso em: 25 ago 2023.
- HILL, S.; LATIFI, H.; HEURICH, M.; MÜLLER, J. Individual-tree and stand-based development following natural disturbance in a heterogeneously structure forest: a LiDAR-based approach. **Ecological Informatics**, v. 38, p. 12-25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.12.004>
- HUI, G.; ZHANG, G.; ZHAO, Z.; YANG, A. Methods of forest structure research: a review. **Current Forestry Reports**, v. 5, p. 142-154, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00090-7>
- KRŮČEK, M.; TROCHTA, J.; CIBULKA, M.; KRÁL, K. Beyond the cones: how crown shape plasticity alters aboveground competition for space and light – evidence from terrestrial laser scanning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 264, p. 188-199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.016>
- LHOTKA, J. M.; LOEWENSTEIN, E. F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 3, p. 770-778, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.008>
- LAFETÁ, B. O.; MADUREIRA, N. F. S.; SANTOS, M. A.; PIMENTA, I. A.; BARBOSA, G. P.; FONTAN, I. C. I.; VIEIRA, D. Raio de competição entre árvores em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 20, n. 47, p. 55-62, 2023. <https://10.18845/rfmk.v20i47.6823>
- LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 6, p. 343-360, 1983. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(83)90042-7)
- LUSTOSA JÚNIOR, I. M.; CASTRO, R. C. O.; GASPAR, R. O.; ARAÚJO, J. B. C. N.; AQUINO, F. G. Competition indexes to evaluate tree growth in a semi-deciduous seasonal forest. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.010716>
- MA, Q.; SU, Y.; TAO, S.; GUO, Q. Quantifying individual tree growth and tree competition using bi-temporal airborne laser scanning data: a case study in the Sierra Nevada Mountains, California. **International Journal of Digital Earth**, v. 11, n. 5, p. 485-503, 2017. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1336578>
- MENSAH, S.; TOIT, B.; SEIFERT, T. Diversity–biomass relationship across forest layers: implications for niche complementarity and selection effects. **Oecologia**, v. 187, p. 783-795, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4144-0>
- MINATTI, M.; SANQUETTA, C. R.; NETTO, S. P.; CORTE, A. P. D. Índices de competição dependentes da distância para *Araucaria angustifolia* em São João do Triunfo – PR. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 3, p. 187-194, 2019. <https://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n3p187-194>
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
- RODRÍGUEZ-RONDEROS, M. E.; BOHRER, G.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A.; POWERS, J. S.; SCHNITZER, S. A. Contribution of lianas to plant area index and canopy structure in a Panamanian forest. **Ecology**, v. 97, n. 12, p. 3271-3277, 2016. <https://doi.org/10.1002/ecy.1597>
- 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, e3275, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.13>
- SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria Forestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285p.
- SIRAMI, E. V.; MARSONO, D.; SADONO, R.; IMRON, M. A. Ideal planting space for merbau (*Intsia bijuga*) forest plantations in Papua based on distance-dependent

- competition. **Biodiversitas**, v. 19, n. 6, p. 2219-2231, 2018. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190630>
- STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development** (Research Paper, No. INT-137). Madison: USDA Forest Service, 1973. <http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.69018>
- SUMNALL, M.; FOX, T. R.; WYNNE, R. H.; THOMAS, V. A. Mapping the height and spatial cover of features beneath the forest canopy at small-scales using airborne scanning discrete return Lidar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 133, p. 186-200, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.002>
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.
- TENZIN, J.; TENZIN, K.; HASENAUER, H. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. **Forestry**, v. 90, p. 367-380, 2017. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw065>
- THOM, D.; KEETON, W. S. Stand structure drives disparities in carbon storage in northern hardwood-conifer forests. **Forest Ecology and Management**, v. 442, p. 10-20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.053>
- 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. <https://doi.org/10.1093/forestscience/35.3.816>
- TRINDADE, R. N. R.; LAFETÁ, B. O.; AGUIAR, V. F.; SILVA, A. G.; FERRARO, A. C.; PENIDO, T. M. A.; VIEIRA, D. S. Morfometria da copa de povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 83-91, 2019. <https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v47n121.08>
- VERSACE, S.; GIANELLE, D.; FRIZZERA, L.; TOGNETTI, R.; GARFI, V.; DALPONTE, M. Prediction of competition indices in a Norway spruce and silver fir-dominated forest using LiDAR data. **Remote Sensing**, v. 11, p. 18, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11232734>
- YANG, Y.; HUANG, S. Effects of competition and climate variables on modelling height to live crown for tree boreal tree species in Alberta, Canada. **European Journal of Forest Research**, v. 137, p. 153-167, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1095-7>

Agradecimentos: Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFMG) - Campus de São João Evangelista-MG por todo apoio logístico e estrutural para a realização do presente trabalho.

Contribuição dos autores: B.O.L – conceituação, metodologia, análise estatística e supervisão; M.A.S. - coleta de dados, metodologia e análise estatística; I.A.P. - coleta de dados e metodologia; G.W.A.C. - supervisão e redação (revisão, edição); D.S.V. - metodologia, validação e redação (revisão); H.B.X.R. - coleta de dados e análise estatística. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Bolsa modalidade Iniciação Científica para o segundo autor, CNPq - Edital IFMG/PRPPG/087/2019/Processo SEI 155626/2020-5.

Revisão por comitê institucional: *Não se aplica.*

Comitê de Ética: *Não se aplica.*

Disponibilização de dados: Os dados do estudo podem ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente, via e-mail.

Conflito de Interesse: Os autores declaram que não existem conflitos de interesse com outros pesquisadores ou instituições.