

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Gracielle Maria Pereira Reis

**PRODUÇÃO, MORFORMETRIA E ESTRUTURA VERTICAL DE UM
POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

São João Evangelista

2021

Gracielle Maria Pereira Reis

**PRODUÇÃO, MORFOMETRIA E ESTRUTURA VERTICAL DE UM
POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof Dr Bruno Oliveira Lafetá

São João Evangelista

2021

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

R375p Reis, Gracielle Maria Pereira.
Produção, morfometria e estrutura vertical de um povoamento de eucalipto / Gracielle Maria Pereira Reis.– 2021.
23f.: il.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2021.

1. Competição. 2.Dossel. 3. Altura. 4. Índices Morfométricos.
I. Reis, Gracielle Maria Pereira. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* SJE. IV. Título.

634.97342

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

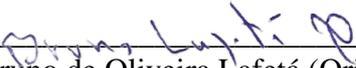
GRACIELLE MARIA PEREIRA REIS

**PRODUÇÃO, MORFOMETRIA E ESTRUTURA VERTICAL DE UM
POVOAMENTO DE EUCALIPTO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovada em 10/04/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Bruno de Oliveira Lafetá (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista



Prof. Me. Ivan Costa Ilhéu Fontan (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista



Prof^ª. Dr^ª. Gabriela Paranhos Barbosa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista

**Tamires Mousslech
Andrade Penido**  Assinado de forma digital por
Tamires Mousslech Andrade Penido
Dados: 2021.04.13 18:42:38 -03'00'

Ma. Tamires Mousslech Andrade Penido
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – *Campus* Diamantina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que sempre esteve me abençoando e protegendo. Aos meus pais, Gaspar e Enedina, que sempre foram um exemplo de amor, carinho, cuidado e dedicação, e mesmo a distância, se mantiveram presentes em cada uma de minhas conquistas. Aos meus irmãos, Edigar, Everaldo e Evandro, que estiveram do meu lado, me aconselhando e me ajudando, em especial minha irmã gêmea, Gleyce, minha companheira de caminhada. Aos meus padrinhos, Antônio e Vicência, e minha querida Tia, Aparecida, que me colocou em suas orações, e por todo carinho e contribuição em minha formação e os demais familiares. Ao Fábio, que sempre contribuiu para amenizar minhas dores e multiplicar minhas alegrias nessa jornada.

Agradeço aos meus amigos, que fazem minha vida mais divertida, me ajudando a enfrentar cada desafio, em especial ao Luis Carlos, Michele, Gabriel, Carla e Ana Carolina.

Aos professores, que nunca mediram esforços para me ajudar, em especial ao ao Prof. Bruno Lafeté, por toda a ajuda e dedicação ao longo do curso, nessa tão importante etapa e pela amizade, e Prof. Ivan Fontan, que me deu a primeira oportunidade de participar de um projeto.

Por fim agradeço ao Instituto Federal de Minas Gerais, pela oportunidade e por todo conhecimento adquirida ao longo dessa jornada, e a todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para minha formação.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a distribuição de índices morfométricos da copa em diferentes classes de altura em um povoamento de eucalipto. O trabalho foi conduzido em um talhão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden de 11,6 hectares, que foi instalado em outubro de 2014 sob arranjo espacial $3 \times 3\text{m}$ ($1.111 \text{ árvores ha}^{-1}$). Aos 61 meses de idade foi realizado o inventário florestal, sendo lançada uma parcela experimental retangular de $100 \times 80\text{m}$ (8.000m^2 , equivalente a uma intensidade amostral de 6,90%). Calcularam-se índices morfométricos de cada uma das árvores, baseados no tamanho e na morfologia da árvore e as estimativas de volume comercial com casca foram obtidas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall (1933) linearizado. Para a análise da distribuição morfométricas contemplou três estratos de altura, inferior, médio e superior. Dentre as funções de densidade de probabilidade (f.d.p.) analisada, optou-se pela função de Weibull e a qualidade de ajuste foi avaliada de acordo com os valores da Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), Média Absoluta dos Erros (MAE) e critérios de informação de Akaike (AIC). Foi adotado o nível de significância de 1% em todas as análises, que foram efetuadas com o auxílio do R versão 3.5.2. Os menores valores para formal de copa, grau de esbeltes, índice de abrangência e índice de saliência, foram pronunciados no estrato superior altura. O estrato inferior de altura, apresentou a heterogeneidade dos índices morfométricos da copa e fuste no povoamento. Esses índices podem ser empregados para análise da vitalidade de árvores e produção em povoamento de eucalipto. As árvores de *Eucalyptus grandis* sob dossel investem em extensão lateral de copa para interceptação de radiação solar. Pode observar os indícios de competição, devido aos baixos valores de diâmetro a altura do peito e maiores valores de formal de copa, grau de esbeltez e índices de saliência.

Palavras-chave: Competição. Dossel. Altura. Índices Morfométricos.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the distribution of canopy morphometric indices in different height classes in an eucalyptus stand. The work was carried out in an 11.6 hectare *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden plot, which was installed in October 2014 under a 3×3 m spatial arrangement (1,111 trees ha⁻¹). At 61 months of age, the forest inventory was carried out, and a rectangular experimental plot of 100×80 m (8,000 m², equivalent to a sampling intensity of 6.90%) was launched. Morphometric indices were calculated for each of the trees, based on the size and morphology of the tree, and estimates of commercial volume with bark were obtained by adjusting the linearized Schumacher and Hall (1933) model. For the analysis of the morphometric distribution, it included three strata of height, lower stratum, middle stratum and upper stratum. Among the probability density (fdp) functions analyzed, we opted for the Weibull function and the quality of fit was evaluated according to the values of the Mean Root Error (RQEM), Absolute Mean of Errors (MAE) and criteria Akaike Information System (AIC). The significance level of 1% was adopted in all analyzes, which were carried out with the aid of R version 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018). The lowest values for formal canopy, degree of slenderness, coverage index and salience index, were pronounced in the upper stratum height. The lower stratum of height, presented the heterogeneity of the morphometric indices of the crown and stem in the stand. These indexes can be used to analyze the vitality of trees and production in eucalyptus stands. *E. grandis* trees under canopy invest in lateral canopy extension for interception of solar radiation. You can observe the evidence of competition, due to the low values of diameter at the height of the chest and higher values of formal crown, degree of slimmness and salience indexes.

Keywords: Competition. Canopy. Height. Morphometric Indices.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3 RESULTADOS.....	12
4 DISCUSSÃO.....	15
5 CONCLUSÕES.....	20

1 INTRODUÇÃO

As variáveis biológicas como a altura, diâmetro, copa, qualidade da madeira, área basal e volume são indicadores do desenvolvimento de um plantio. Diversas características das árvores vêm sendo utilizadas para busca maiores informações relacionadas ao plantio e condução. Dentre essas propriedades, pode-se citar a copa, como um importante órgão, que pode ser correlacionado com altura e diâmetro do indivíduo (SANQUETTA et al., 2014). Considera-se a copa, como um órgão da árvore composto por um conjunto de folhas, que tem a função principalmente de produção de energia, através da fotossíntese. Elas captam a energia da luz do sol, transformando-a em energia química (NUTTO, 2001).

Dessa forma o conhecimento do contorno da copa das árvores em povoamentos florestais é muito relevante para um maior aproveitamento de técnicas que levam a uma melhor produção florestal. O diâmetro da copa, medida do comprimento entre as linhas de projeção dos pontos mais extremos da copa, é uma variável básica que possibilita adquirir outras características da árvore (DURLO; DENARDI, 1998). Essas informações permite o desenvolvimento de estudos dendométricos e morfológicos. A forma da copa, também, é uma propriedade que está relacionada com a produtividade por unidade de área, podendo ser utilizada para esse fim. A utilização desses dados, permite a tomada de decisão silviculturais referentes ao plantio, colheita e condução da floresta, de forma mais segura e eficiente, projetando o que a área necessita naquele momento (MEUNIER, 2014).

Além disso, a morfometria da copa é utilizada para determinar relações interdimensionais, definir o espaço ocupado por cada árvore, implicações sobre a estabilidade, a vitalidade e produtividade das mesmas. Permite também observar e entender a dinâmica de crescimento florestal, bem como as competições por espaço das árvores (DURLO; DENARDI, 1998).

De acordo com Orellana e Koehler (2008), algumas características dimensionais são muito pertinentes para a determinação morfométrica da copa sendo elas a Proporção de Copa (PC), Índice de Saliência (IS), Índice de Abrangência (IA), Grau de Esbeltez (GE) e Formal de Copa (FC). Essas características, podem ser facilmente correlacionadas com o diâmetro à altura do peito (DAP), sendo uma medida comum e de fácil obtenção a campo, que pode ser utilizada como variável independente em equações de regressão.

É importante observar que diferentes estratos de altura de uma floresta, apresenta características diversas, sendo imprescindível a análise adequada de cada um deles. Geralmente é chamado de estrutura vertical e através dessa estratificação é possível a análise estrutural da floresta e a quantificação do volume de madeira. A obtenção da altura pode ser feita através de método diretos e indiretos e os que estimam as alturas através de equações, sendo mais conhecidas as relações hipsométricas (CAMPOS; LEITE, 2017). As relações hipsométricas, bastante valorizadas no inventário florestal, são aquelas estabelecidas por meio da regressão das alturas das árvores em função do diâmetro.

Portanto é possível perceber que a dinâmica de crescimento vegetal, está intimamente ligada ao cálculo da produção vegetal, que pode ser acompanhada por fórmulas matemáticas, permitindo avaliar a contribuição de diferentes órgãos no crescimento das plantas. Dessa forma, podemos observar o papel da copa das árvores no seu crescimento e desenvolvimento (PEIXOTO; PEIXOTO, 2009).

Dessa forma, é possível integrar a morfometria da copa, com características desejáveis para uma produção madeireira e determinar a melhor forma de condução para a floresta, admitindo sempre suas particularidades e observando seu desenvolvimento interno, com o objetivo de um melhor produto final.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a distribuição de índices morfométricos da copa em diferentes classes de altura em um povoamento de eucalipto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em um talhão comercial de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden de 11,6 hectares, proveniente de um projeto de fomento florestal situado em área do município de Peçanha, no Vale do Rio Doce em Minas Gerais – Brasil. O clima da região segundo o sistema internacional de Köppen (KÖPPEN, 1936) é do tipo Cwa, mesotérmico úmido (verão quente e chuvoso). As médias anuais de temperatura e precipitação são de 20,4°C (médias variando de 17,3°C em julho a 23,1°C em janeiro) e 1.339 mm (médias variando de 13 mm agosto a 287 mm em dezembro), respectivamente. Os dados climáticos foram oriundos de registros anuais de 1982 a 2012, disponibilizados gratuitamente por Climate-data.org (<http://es.climate-data.org/>).

O talhão foi instalado em outubro de 2014 sob arranjo espacial 3 × 3m (1.111 árvores ha⁻¹), em área com histórico de uso e ocupação por povoamentos de eucalipto.

Realizaram-se operações de coveamento (covas de 30 × 30 × 30cm) e fertilização em covetas laterais, sendo aplicado no plantio 500g de NPK 6:30:6 por coveta e, em cobertura (12 meses após o plantio), 700g de NPK 6:10:29 por coveta. Os controles de formiga e matocompetição foram efetuados com isca formicida Dinagro-S[®] e herbicida glifosato (produto comercial Scout WG – Monsanto) conforme recomendações do próprio fabricante, respectivamente.

Aos 61 meses de idade foi realizado o inventário florestal, sendo lançada uma parcela experimental retangular de 100 × 80m (8.000m², equivalente a uma intensidade amostral de 6,90%) no interior do talhão, sob as coordenadas de 18°36'35,36'' de latitude Sul e 42°36'25,46'' de longitude Oeste (Datum WGS84). Assumiu-se uma bordadura dupla (duas fileiras de plantio) para o lançamento da parcela experimental.

O inventário consistiu na medição do diâmetro com casca à 1,30 m de altura (DAP, cm), altura total (HT, m) e altura de inserção da copa (HIC – altura do primeiro galho vivo, caracterizado pela presença de folhas, m) de todos os fustes. O DAP e as alturas foram tomadas com suta mecânica e hipsômetro eletrônico Haglof, respectivamente. Foram calculados o comprimento da copa (L, m), definido como a diferença entre HT e HIC e o diâmetro da copa (DC, m), que é a média dos diâmetros da copa, obtida da medição de quatro raios nas direções entre linhas de plantio e entre plantas através da projeção vertical da copa, usando fita métrica.

Calcularam-se índices morfométricos de cada uma das árvores, baseados no tamanho e na morfologia da árvore, segundo Durlo e Denardi (1998) e Sterba (1991): Proporção de Copa (PC, %), Formal de Copa (FC) e Área de Copa (AC, m²). Esses índices foram assim expressos:

$$PC = 100 L/HT; FC = DC/L; GE = HT/DAP; IA = DC/HT; IS = DC/DAP \text{ e } AC = (\pi DC^2)/4,$$

em que: L: Comprimento da Copa; HT: Altura Total e DC: Diâmetro da Copa.

As estimativas de volume comercial com casca foram obtidas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall (1933) linearizado. Foi utilizada a seguinte equação volumétrica, fornecida pela empresa florestal: $Ln(V) = -9,585026 + 1,815283 Ln(DAP) + 0,959898 Ln(HT)$.

A análise da distribuição morfométrica contemplou três estratos de altura, assim definidos: 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 $(Hm - 1s) \leq H < (Hm + 1s)$; e estrato superior – compreenderá as árvores

com $H \geq (H_m + 1s)$. Os índices morfométricos foram submetidos à análise estatística descritiva (média, coeficiente de variação e, pelo método dos momentos, assimetria e curtose). Calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os índices morfométricos e o volume.

Os dados foram agrupados em classes biométricas regulares, empregando a fórmula de Sturges (1926) para a definição do número de classes. A definição da função densidade de probabilidade (f.d.p.) foi realizada por meio de análise exploratória, sendo testadas previamente o desempenho das funções Logística de dois parâmetros, Cauchy, Normal, Log-normal e Weibull de dois parâmetros. Optou-se pela função Weibull de dois parâmetros em virtude de sua flexibilidade para assumir diferentes formas e assimetrias, moldando diversas tendências de distribuição, desde exponencial até a normal (BAILEY; DELL, 1973) e facilidade de ajustamento (DIAMANTOPOULOU et al., 2015).

Para cada estrato de altura, ajustou-se a função Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança, usando-se a metodologia de otimização de Nelder e Mead (1965):

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma}$$

em que:

$f(x)$ = função densidade de probabilidade Weibull;

x = centro de classe biométrica, $x \geq 0$; e

γ e β = parâmetros de forma e escala, respectivamente.

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com os valores da Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), Média Absoluta dos Erros (MAE) e critério de informação de Akaike (*Akaike Information Criterion*, AIC). Menores valores de RQEM, MAE e AIC implicam em maior qualidade preditiva. A aderência das funções aos dados foi avaliada pelo teste Kolmogorov-Smirnov (GIBBONS; SUBHABRATA, 1992). Trata-se de um teste que compara a frequência acumulativa estimada com a frequência observada. O ponto de maior divergência entre as distribuições é o valor da estatística de teste (d_n). Complementarmente, realizou-se a análise gráfica entre valores observados e estimados pelas equações obtidas.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foi adotado o nível de significância de 1% em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

3 RESULTADOS

A média de altura foi de $21,51 \pm 1,34$ m. A amostra totalizou 837 árvores em 8.000m^2 , sendo distribuídos 103, 633 e 101 indivíduos nos estratos inferior, médio e superior. As médias de DAP, proporção de copa e área de copa tenderam ao aumento no sentido do estrato inferior para aquele superior (Tabela 1). O estrato superior apresentou os menores valores para o formal de copa, grau de esbeltez, índice de abrangência e índice de saliência. As maiores variabilidades foram encontradas nas árvores do estrato inferior, especialmente, para a proporção de copa ($CV = 68,63\%$). O índice morfométrico de menor variabilidade em todos os estratos de altura foi o índice de abrangência. A assimetria mais negativa foi verificada para o formal de copa das árvores do estrato superior. Todos os índices morfométricos exibiram distribuição em cume (leptocúrtica).

Tabela 1 – Estatística descritiva de índices morfométricos de eucalipto em diferentes estratos de altura

Estrato	Média	CV (%)	Assimetria	Curtose
----- DAP (cm) -----				
Inferior	12,3119	26,2517	0,1049	2,3340
Médio	16,1405	15,0005	-0,5179	3,7738
Superior	18,6792	10,6486	-0,0029	2,6258
----- Proporção de copa (%) -----				
Inferior	4,8891	68,6287	3,1917	17,0388
Médio	4,7333	31,4883	1,1883	8,4555
Superior	5,1840	28,8551	3,6960	19,3194
----- Formal de copa -----				
Inferior	3,2434	46,8118	0,6284	2,8954
Médio	2,6457	43,4559	3,2237	21,2886
Superior	2,2962	20,6476	-0,8178	3,8364
----- Grau de Esbeltez -----				
Inferior	1,6492	28,7618	0,8623	2,7661
Médio	1,3742	16,5277	2,2562	12,2255
Superior	1,2562	10,7605	0,5071	2,6974
----- Índice de abrangência -----				
Inferior	0,1248	21,1663	1,0979	5,5070

Médio	0,1123	12,3181	0,1399	3,8594
Superior	0,1134	9,9001	-0,2885	2,4134
----- Índice de saliência -----				
Inferior	0,2079	39,5952	1,1423	3,6270
Médio	0,1539	19,6071	1,8217	9,7720
Superior	0,1420	12,2329	0,3533	3,2841
----- Área de copa (m ²) -----				
Inferior	4,5053	41,6342	1,3387	5,5208
Médio	4,7235	25,0733	0,5041	3,9825
Superior	5,4949	19,8530	-0,0537	2,3762

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

CV = coeficiente de variação.

A estimativa volumétrica contida no estrato superior foi 2,4 vezes maior do que aquela do inferior, representando 16,76% do total inventariado (Tabela 2). Árvores com maior grau de esbeltez e índice de saliência tenderam a exibir menores volumes em todos os estratos de altura. O DAP e grau de esbeltez se correlacionaram fortemente com o volume ($|r| \geq 0,83$), sobretudo, no estrato superior. Todas as correlações foram significativas no estrato médio. No estrato inferior, o formal de copa e índice de saliência exibiram as correlações mais fortes com o volume das árvores.

Tabela 2 – Correlações entre índices morfométricos e volume comercial com casca de eucalipto em diferentes estratos de altura

Variável	Estrato		
	Inferior	Médio	Superior
DAP	0,9811**	0,9890**	0,9962**
Proporção de copa	0,1128 ^{ns}	0,3923**	-0,0110 ^{ns}
Formal de copa	-0,4201**	-0,3463**	0,1213 ^{ns}
Grau de Esbeltez	-0,8396**	-0,8840**	-0,9642**
Índice de abrangência	-0,2065 ^{ns}	0,1280**	0,3142**
Índice de saliência	-0,7357**	-0,6646**	-0,5881**
Área de copa	-0,1165 ^{ns}	0,2733**	0,3412**
Volume (m ³ ha ⁻¹)	14,9950	165,8003	36,3904

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

** , ns = significativo ($p \leq 0,01$) e não significativo pelo teste t ($p > 0,01$).

Para o estrato superior, maiores estimativas volumétricas estiveram relacionadas a menores valores do grau de esbeltez e índice de saliência, além de maiores DAP, índice de abrangência e área de copa.

Apenas os ajustes realizados com a função Weibull para DAP, proporção de copa, formal de copa e área de copa apresentaram aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,01$). Os valores médios da estatística de teste dn foram de 0,4800 para o estrato inferior, de 0,4925 para o médio e de 0,4975 para o superior (Tabela 3). Os ajustes apresentaram poucos desvios, com baixos valores de RQEM e MAE (Tabela 3). Obteve-se maiores valores do parâmetro de escala nas equações geradas para o estrato superior.

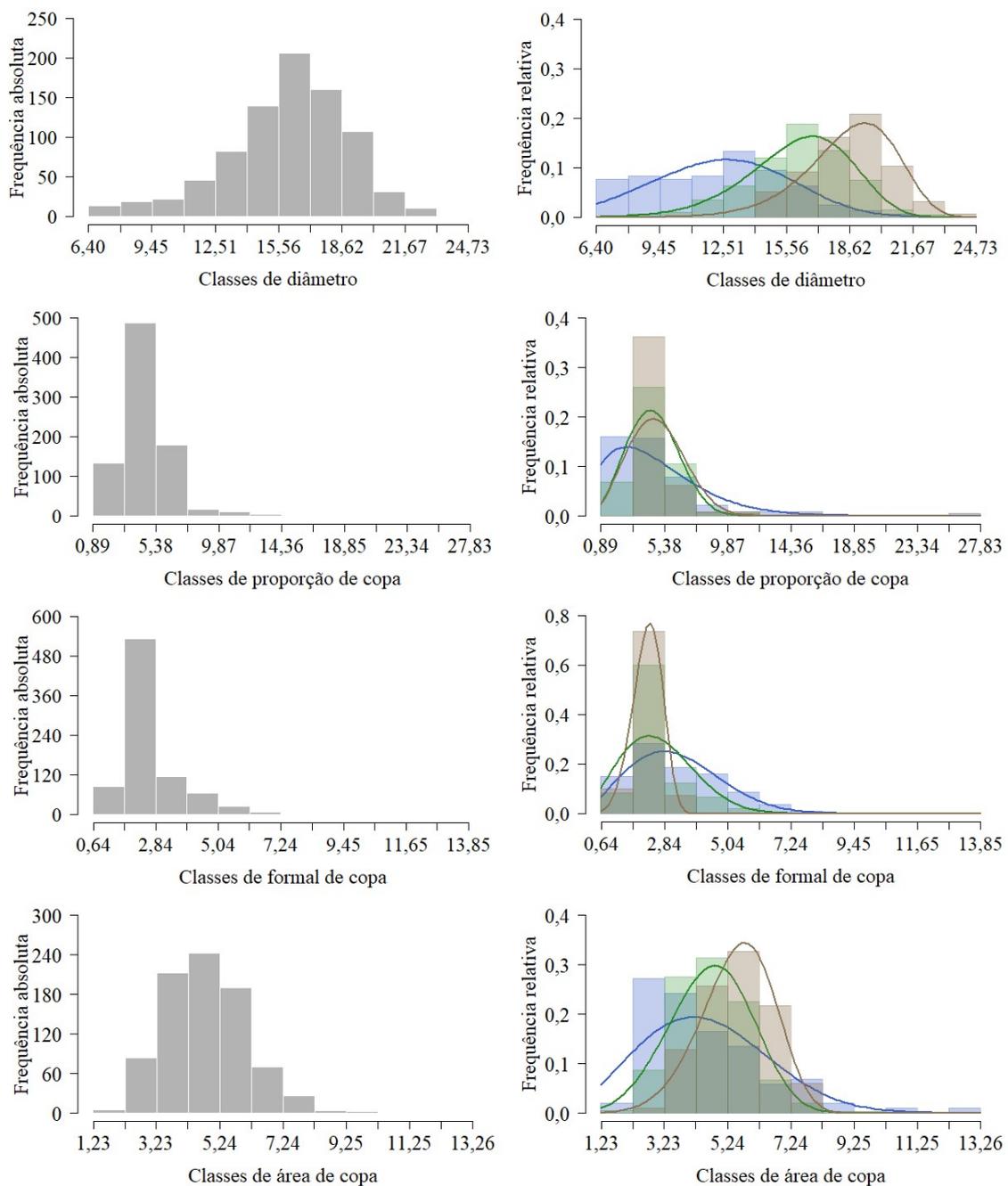
Tabela 3 – Coeficiente e qualidade de ajuste da função Weibull usada para a estimativa da frequência relativa de índices morfométricos de eucalipto em diferentes estratos de altura

Estrato	γ	β	RQEM	MAE	AIC	Dn
----- DAP -----						
Inferior	4,1478	13,5759	0,09	0,07	541,51	0,60 ^{ns}
Médio	7,5430	17,1616	0,06	0,04	2929,46	0,64 ^{ns}
Superior	10,0571	19,5555	0,07	0,06	437,39	0,43 ^{ns}
----- Proporção de copa -----						
Inferior	1,5219	5,3903	0,13	0,07	504,05	0,63 ^{ns}
Médio	2,7730	5,1642	0,14	0,10	2469,61	0,50 ^{ns}
Superior	2,6864	5,4628	0,25	0,13	398,52	0,60 ^{ns}
----- Formal de copa -----						
Inferior	2,2317	3,6957	0,09	0,08	377,18	0,29 ^{ns}
Médio	2,2677	2,9968	0,11	0,05	1924,70	0,50 ^{ns}
Superior	5,0110	2,4412	0,27	0,24	145,90	0,67 ^{ns}
----- Área de copa -----						
Inferior	2,4625	5,1498	0,10	0,07	422,63	0,40 ^{ns}
Médio	4,0600	5,1877	0,03	0,03	2076,14	0,33 ^{ns}
Superior	5,5013	5,9891	0,03	0,03	315,95	0,17 ^{ns}

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

^{ns} = não significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,01$); γ = parâmetro de forma; β = parâmetro de escala; RQEM = raiz quadrada do erro médio; MAE = média absoluta dos erros; AIC = critério de informação de Akaike e; dn = estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov.

As distribuições de frequências absolutas do DAP, proporção de copa, formal de copa e área de copa seguiram o formato de sino (Figura 1). As curvas obtidas para o estrato superior (exceto para a proporção de copa) foram assimétricas negativas, com cauda do lado esquerdo maior que a do lado direito e cumes proeminentes. A variabilidade desses índices morfométricos no estrato inferior (Tabela 1), também, foi confirmada visualmente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 1 – Frequência absoluta de todas as árvores amostradas à esquerda e frequência relativa de árvores em diferentes classes de diâmetro (cm), proporção de copa (%), formal de copa e área de copa (m^2) nos estratos inferior (azul), médio (verde) e superior (marrom) de altura de um povoamento de eucalipto à direita.

4 DISCUSSÃO

A heterogeneidade dos índices morfométricos da copa e fuste no povoamento de eucalipto foi mais pronunciada no estrato inferior de altura (Tabela 1). Os índices que se fundamentaram apenas em dimensões da copa (proporção de copa, formal de copa e área de copa) foram aqueles de maior variabilidade, demonstrando a plasticidade fenotípica de árvores situadas abaixo do dossel, sujeitas ao sombreamento. Mudanças na dimensão, forma e posição da copa advêm de fatores genéticos, aspectos ecológicos do genótipo, e condições ambientais de sítio, como a competição por luz, nutrientes, água e espaço (MAIRE et al., 2013; HOFMAN et al., 2016, OLIVIER et al., 2016). Não é difícil encontrar desuniformidade biométrica de plantas em classes de menor tamanho, mais propensas à influência competitiva (REIS et al., 2016).

As árvores do estrato superior expressaram dominância e tenderam a exibir maior proporção de copa e menor formal de copa, sendo que essas características tem influência para maior volume individual no estrato. As copas mais altas recebem mais radiação solar direta, essencial para a atividade fotossintética e eficiência de uso da iluminação para a produção de biomassa e madeira. De acordo com Santana et al. (2014), maiores proporções de copa são fundamentais para melhor exploração de sítio e, posterior, produtividade do povoamento.

O terço basal da copa das árvores do estrato médio sofreu limitação da radiação solar direta. A disponibilidade de mais radiação solar à medida em que árvores aproximaram do dossel reduziu a intensidade da desrama natural, resultando em maior proporção de copa, intensificação da fotossíntese e produção volumétrica individual. O fenômeno de desrama natural é conhecido em diversas espécies de eucalipto, ocorrendo em ramos com baixa atividade fotossintética e sujeitos a intensa respiração (TAIZ et al., 2017).

Enquanto as copas do estrato superior se encontram diretamente expostas à radiação solar as copas dos estratos médio e inferior recebem predominantemente a radiação difusa, o que pode ter contribuído para que as plantas desses estratos apresentassem menor proporção de copa. Caso as menores árvores mantivessem a mesma proporção de copa do estrato superior, a intensificação respiratória limitaria, ainda mais, sua produção volumétrica esperada (MENALLED; KELTY, 2001; TRINDADE et al., 2019). Restrições de produtividade primária líquida ocorrem devido a limitação de radiação luminosa, que compromete a etapa fotoquímica da fotossíntese e promove a senescência foliar (TAIZ et al., 2017). É conveniente ressaltar que a radiação solar interceptada por uma copa é influenciada pelo horário, características

ecofisiológicas, declividade, declinação solar, presença de nuvens e a arquitetura de ramos. Segundo Mattos et al. (2020), a interceptação de radiação solar está diretamente relacionada a área projetada de copa na direção da radiação incidente.

Diante da intensa competição por radiação solar sob dossel, árvores do estrato inferior investiram no crescimento em área de copa e altura total, aumentando valores do formal de copa, grau de esbeltez, índice de abrangência e índice de saliência. Estas árvores tiveram fustes mais finos, com menor robustez, vigor e estabilidade. Aumentos do grau de esbeltez são rotineiramente associados a disponibilidade decrescente de luminosidade (TRINDADE et al., 2019), indício de que o vegetal direciona fotoassimilados preferencialmente para o crescimento em altura e fototropismo (HUNT et al., 2006).

Os maiores índices de abrangência e de saliência foram encontrados nas árvores do estrato inferior. Este fato, provavelmente, foi consequência de uma resposta morfológica de otimização da distribuição da folhagem para melhor interceptação da radiação luminosa (URIA-DIEZ; P0OMMERENING, 2017). Trata-se de uma característica de espécies de rápido crescimento e exigentes de luz quando sujeitas a ecossistemas úmidos e sombreados (HUNT et al., 2006; MAMASHITA et al., 2015). Nas ocasiões em que se define a aplicação de desbaste seletivo por baixo, ambos os índices podem ser utilizados para auxiliar a seleção de árvores suprimidas e dominadas.

Os estratos superior e inferior representaram 12,07 e 12,31% das árvores amostradas, respectivamente. As árvores contidas nesses estratos tiveram o diâmetro de copa 20,79 e 14,20 vezes, em média, maior que seu DAP, respectivamente. Nesta mesma sequência, a relação da altura com o diâmetro da copa foi de 8:1 para 9:1. Os valores destas relações estão de acordo com observado por Trindade et al. (2019), para povoamentos de eucalipto em diferentes arranjos espaciais e aos 59 meses.

Os índices de abrangência e de saliência se correlacionaram com o diâmetro de copa, com $r = 0,87$ ($p \leq 0,01$) e $r = 0,38$ ($p \leq 0,01$). Mais volume individual nos estratos médio e superior foram associados a maiores valores do índice de abrangência. Por outro lado, o DAP foi fortemente correlacionado com volume ($r \geq 0,98$, $p \leq 0,01$) e devido sua relação inversa na expressão matemática do índice de saliência, notou-se maiores volumes associados a menores valores deste índice (Tabela 2).

O DAP, formal de copa, grau de esbeltez, índice de saliência permitiram a realização de inferências sobre a vitalidade e intensa competição entre árvores, correlacionando significativamente ($p \leq 0,01$) com o volume no estrato inferior. Por outro

lado, as árvores do estrato médio representam características morfométricas que prevalecem em um povoamento e teve todos os índices morfométricos correlacionados com o volume.

A maior área de copa encontrada foi de 12,25m², de uma árvore do estrato inferior com DAP de 11cm e altura total de 16,30m. Ressalta-se que essa área de copa foi 1,36 vez maior que a área útil do próprio arranjo espacial de plantio, indicativo de que a mesma está sob competição. A área da copa de toda a amostra correspondeu a 5.000m² ha⁻¹, equivalente a aproximadamente 50% de solo sombreado. Nesse sentido, regimes de desbastes pelo diâmetro podem ser empregados a partir do índice de saliência, que informa o espaço de crescimento necessário às árvores remanescentes (TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

O estrato inferior exibiu uma razão entre área de copa e volume (580,0589 m² ha⁻¹: 14,9950 m³ ha⁻¹) de 1,7 e 2,0 vezes maior que os estratos médio e superior, respectivamente. Por conseguinte, árvores sob dossel tenderam a exibir menor produção volumétrica por unidade de área de copa, indicativo de menor eficiência de uso da radiação solar. Tais resultados sugerem que árvores dominantes (estrato superior) podem se tornar ainda mais dominantes sobre aquelas suprimidas (estrato inferior), corroborando com Campos et al. (2013), Maire et al. (2013) e Otto et al. (2014). Binkley et al. (2002) relataram que 25% das maiores árvores em um povoamento de *E. saligna* no Havaí concentraram, aproximadamente, 50% do uso de água no talhão e 60% do estoque de crescimento.

Os índices morfométricos expressaram diferentes tendências do estoque de crescimento biométrico entre os estratos de altura do povoamento de eucalipto. A competição no estrato inferior limitou a produção volumétrica individual, representando 6,90% da produção total amostrada aos 61 meses idade (Tabela 2). Apesar do menor valor madeireiro agregado por árvore, a produção do estrato inferior mostrou ser de grande relevância na totalização volumétrica a ser colhida, principalmente, para extensas áreas de cultivo.

De acordo com Hunt et al., 2006, a posição inicial do dossel influencia particularidades competitivas subsequentes de um vegetal. Do ponto de vista silvicultural, é recomendável a práticas de replantio para substituição de mudas mortas ou danificadas após plantio, porém essa estratégia deve ser planejada com cautela para o alcance de povoamentos mais produtivos. O sucesso de replantios tardios pode ser comprometido devido ao sombreamento proveniente daquelas árvores já estabelecidas em unidades de

manejo. Espera-se menores perdas de rendimento volumétrico individual nas ocasiões cujo replantio é realizado logo após o plantio propriamente dito.

As distribuições absolutas com formato de sino estão coerentes com o esperado para formações lenhosas equiâneas (CAMPOS; LEITE, 2017). A avaliação de modelos de distribuição biométrica deve considerar aspectos de natureza qualitativa (realismo biológico) e quantitativa (estatística). Para tanto, a f.d.p. Weibull de dois parâmetros foi adequada para as estimativas da frequência relativa de árvores em diferentes classes de DAP, proporção de copa, formal de copa e área de copa, apresentando aderência da função à estrutura dos dados em diversos estratos de altura (frequências esperadas e observadas similares sob ponto de vista estatístico).

Face à dificuldade em se modelar a biometria da copa, sobretudo, de árvores de estratos inferiores de altura sujeitas a intensa competição, a qualidade dos ajustes foi considerada satisfatória (Tabela 3). Considera-se, ainda, que nas condições limitadas de recurso compartilhado, a plasticidade morfológica e fisiológica é importante para a minimização de efeitos da competição intraespecífica e sobrevivência vegetal (HUNT et al., 2006). Tal plasticidade é essencial para a sobrevivência vegetal em diversas condições de ambientais e/ou de cultivo.

As estatísticas dos ajustes mostraram que os parâmetros de forma e escala não foram tendenciosos, confirmado pela análise gráfica (Figura 1). A função Weibull se mostrou um eficiente modelo probabilístico, capaz de representar com precisão a realidade. Os maiores valores do parâmetro de forma denotaram assimetria negativa, similar ao observado por Bailey e Dell (1973). Diferentes comportamentos da distribuição de índices morfométricos entre os estratos de altura foram comprovados. É importante salientar que, em alguns casos, também foi observado o mesmo valor de índices morfométricos para árvores em diferentes estratos de altura. Logo, o planejamento de desbastes empregando um único índice morfométrico deve ser visto com atenção. Recomenda-se o uso de um conjunto de índices para definições técnicas.

A morfometria da copa se mostrou eficaz para inferir sobre os efeitos da competição em povoamentos de eucalipto. Informações da distribuição hipsométrica de árvores dispostas em arranjos regulares permitem a análise da competição por radiação solar. Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para a compreensão de efeitos competitivos na morfologia de árvores e sua relação com a produtividade. Encoraja-se o desenvolvimento de futuras pesquisas que contemplem a análise estrutural

hipsométrica em diferentes densidades de plantios para a análise de interação de aspectos espaciais e disponibilidade de radiação solar na produtividade vegetal.

5 CONCLUSÕES

A morfometria da copa pode ser empregada para análise da vitalidade de árvores e produção em povoamentos de eucalipto.

Árvores do estrato superior de altura de *E. grandis* apresentam menores valores do grau de esbeltez, além de maiores proporções e áreas de copa.

Árvores de *E. grandis* sob dossel investem em extensão lateral de copa para interceptação de radiação solar. Baixos valores de diâmetro a altura do peito e maiores de forma de copa, grau de esbeltez e índice de saliência são indícios de competição em povoamento de eucalipto.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V. C. L. et al. Influência de três sistemas de amostragem na estimativa da relação hipsométrica e do volume de árvores em um fragmento de Mata Atlântica. **Scientia Forestalis**. Piracicaba (SP). n.70, p.31-37, 2006.
- BAILEY, R. L.; DELL, T. T. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BARNARD, H.; FOWNES, J. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**, v. 5, p. 58-67, 2002.
- CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J., -P.; BAUERLE, W. L.; BINKLEY, D.; MAIRE, G. L. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 14-20, 2013.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. 636p.
- DIAMANTOPOULOU, M. J.; ÖZÇELİK, R.; CRESCENTE-CAMPO, F.; ELER, Ü. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods. **Biosystems Engineering**, v. 133, p. 33-45, 2015.
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998.
- GIBBONS, J.D.; SUBHABRATA, C. **Nonparametric statistical inference**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1992. 544p. (Statistics: Textbook and Monograph, 31).
- HOFMAN, J.; BARTHOLOMEUS, H.; JANSSEN, S.; CALDERS, K.; WUYTS, K.; WITTENBERGHE, S. van; SAMSON, R. Influence of tree crown characteristics on the local PM₁₀ distribution inside an urban street canyon in Antwerp (Belgium): a model and experimental approach. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 20, p. 265-276, 2016.
- HUNT, M. A.; BATTAGLIA, M.; DAVIDSON, N. J.; UNWIN, G. L. Competition between plantation *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in northeastern Tasmania. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 260-274, 2006.
- KÖPPEN, W. **Das geographische system der klimate**. Berlin: Gerbrüder Bornträger, 1936. 44 p.
- MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; CHRISTINA, M.; PONZONI, F. J.; GONÇALVES, J. L. M.; BOUILLET, J. -P.; LACLAU, J. -P. Tree and stand light use efficiencies over a

full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 31-42, 2013.

MAMASHITA, T.; LAROCQUE, G. R.; DESROCHERS, A.; BEAULIEU, J.; THOMAS, B. R.; MOSSELER, A.; MAJOR, J.; SIDDEERS, D. Short-term growth and morphological responses to nitrogen availability and plant density in hybrid poplars and willows. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 81, p. 88-97, 2015.

MATTOS, E. M.; BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 463, 118038, 2020.

MENALLED, F. D.; KELTY, M. J. Crow structure and biomass allocation strategies of three juvenile tropical tree species. **Plant Ecology**, Oxford, v. 152, p. 1-11, 2001.

NELDER, J. A. AND MEAD, R. A simplex method for function minimization. **Computer Journal**, 7:308–313, 1965.

NUTTO, L.; Manejo do crescimento diamétrico de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. baseado na árvore individual. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 2, p. 9-25, 2001.

OLIVIER, M.; ROBERT, S.; FOURNIER, R. F. Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. **Forest Ecology and Management**, v. 374, p. 20-32, 2016.

OTTO, M. S. G.; HUBBARD, R. M.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Dominant clonal *Eucalyptus grandis* × *urophylla* trees use water more efficiently. **Forest Ecology and Management**, v. 328, p. 117-121, 2014.

PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. Dinâmica do crescimento vegetal: princípios básicos. **Tópicos em ciências agrárias**, p. 38, 2009.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.

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.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. In: VALE, A. B. DO; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Org.). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa - MG: SIF, 2014. p. 161-186.

SANQUETTA CR, ARCE JE, MELLO AA, SILVA EQ, BARTH N FO, MATOSKI SLS. Produção de Madeira livre de nós em povoamentos de *Pinus taeda* em função da densidade de plantio. **Cerne** 2003; 9(2): 129-140.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

STERBA, H. **Forstliche Ertragslehre**. Wien: Universität für Bodenkultur, 1991. 160p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 633-638, 2005.

TRINDADE, R. N. R.; LAFETÁ, B. O.; AGUIAR, V. F.; SILVA, A. G.; FERRARO, A. C.; PENIDO, T. M. A.; VIEIRA, D. S. Crown morphometry of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake stands in different planting spacing. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 83-91, 2019.

URIA-DIEZ, J.; POMMERENING, A. Crown plasticity in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a strategy of adaptation to competition and environmental factors. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 356, p. 117-126, 2017.