Morfometria da copa de povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake em diferentes espaçamentos de plantioCrown morphometry of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake stands in different planting spacing

Rosália Nazareth Rosa Trindade¹, Bruno Oliveira Lafetá^{1*},
Vinícius Faúla Aguiar¹, Aderlan Gomes da Silva¹, Ana Carolina Ferraro¹,
Tamires Mousslech Andrade Penido² e Diego dos Santos Vieira²

Resumo

A morfometria da copa de árvores e suas relações com o espaço e o tempo subsidiam a tomada de decisões sobre a densidade plantas e intervenções silviculturais em povoamentos florestais. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do espaçamento inicial de plantio e da idade na morfometria da copa de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. O experimento foi estabelecido em blocos ao acaso, com três repetições, em esquema de parcelas subdivididas no tempo. Os tratamentos principais foram constituídos por quatro espaçamentos de plantio (T1: 3,0 x 0,5 m; T2: 3,0 x 1,0 m; T3: 3,0 x 1,5 m e T4: 3,0 x 2,0 m) e os secundários, quatro idades (24, 37, 48 e 59 meses). Calcularam-se os seguintes índices morfométricos: Porcentagem de Copa (PC), Formal de Copa (FC), Grau de Esbeltez (GE), Índice de Abrangência (IA) e Índice de Saliência (IS). O IA foi o único atributo morfométrico que interagiu com os espaçamentos e idades. A PC, IA e IS tenderam a diminuir ao longo do tempo. O FC e GE se mantiveram estatisticamente estáveis entre 24 e 59 meses de idade. As árvores do espaçamento 3,0 x 2,0 m expressaram menores GE, IS e, na idade de 59 meses, IA, implicando em menor competição intraespecífica e mais resistência às intempéries do tempo. O espaçamento de plantio e a idade influenciam a morfometria da copa de árvores de eucalipto.

Palavras-chave: Densidade de plantio, eucalipto, índices morfométricos, plasticidade da copa.

Abstract

The canopy morphometry and its relationships with space and time subsidize decision-making on plant density and silvicultural interventions in forest stands. The aim of this work was to evaluate the effect of planting density and age on the canopy morphometry of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. The experiment was established in a randomized three blocks design, split plot scheme in time. The main treatments consisted of four planting spacing (T1: 3,0 x 0,5 m; T2: 3,0 x 1,0 m; T3: 3,0 x 1,5 m e T4: 3,0 x 2,0 m).at four ages (24, 37, 48 e 59 meses). The following morphometric indexes were calculated: Canopy Proportion (CP), Canopy Formal (CF), Slenderness Rate (SR), Range Index (RI) and Saliency Index (SI). RI was the only morphometric attribute that interacted with spacing and age. CP, RI and SI tended to decrease over time. CF and SR remained statistically stable between 24 and 59 months of age. The trees of the spacing 3.0 x 2.0 m expressed lower SR, SI and, at the age of 59 months, RI, implying less intraspecific competition and more resistance to the weather. Planting spacing and age influenced the morphometry of the canopy of eucalyptus trees.

Keywords: Planting density, eucalypt, morphometric indexes, canopy plasticity.

INTRODUÇÃO

O sucesso de um empreendimento florestal requer planejamento adequado da cadeia produtiva (MARTINS et al., 2009). A escolha do espaçamento inicial, ou da densidade de árvores por unidade área, deve ser feita conforme o uso final da madeira (LEITE et al., 2006). Embora exista uma estreita associação do dossel com a produtividade, o comportamento morfométrico da copa ao longo do tempo e sob diferentes espaçamentos de plantio ainda é pouco compreendido (OLIVIER et al., 2016, PEER et al., 2017; PRETZCH et al., 2015).

1. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG. Belo Horizonte / MG, Brasil. * Autor Correspondente: bruno.lafeta@ifmg.edu.br

2. Faculdade de Ciências Agrárias – FCA, Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri – UFJM. Diamantina / MG, Brasil.

Geralmente, as intervenções silviculturais se baseiam na manipulação da competição ou dos fatores que a influenciam para orientar o desenvolvimento das árvores (PEER et al., 2017; SILVEIRA et al., 2015). Inicialmente, busca-se um espaçamento de plantio que possibilite o máximo crescimento a um menor custo (MARTINS et al., 2009). Plantios mais densos apresentam árvores menores, maior volume total por hectare e menor sobrevivência com o aumento da idade (LEITE et al., 2006; MARTINS et al., 2009). A estagnação do crescimento tende a ocorrer mais cedo à medida em que se adensa o plantio, possibilitando a intensificação de cultivos (LEITE et al., 2006).

O inventário florestal contínuo é o procedimento tradicionalmente adotado no monitoramento do desenvolvimento de florestas, usado em avaliações da dinâmica de crescimento e prognósticos de produção. A maioria dos inventários tem como propósito a quantificação de madeira, sendo levantadas características biométrica de caule. Apesar de pouco explorada, a morfometria da copa fornece subsídios para estimativas volumétricas e de biomassa (ORELLANA; KOEHLER, 2008; TONINI; ARCO-VERDE, 2005). Essa subutilização pode ser atribuída à indisponibilidade de dados, laboriosidade de medição ou de pesquisas que demonstrem seu potencial uso silvicultural. Para viabilizar o levantamento morfométrico, tem se testado diferentes relações interdimensionais com variáveis independentes rotineiramente obtidas durante a amostragem, como o diâmetro do caule e a altura total (COSTA et al., 2016; ROMAN et al., 2009). Além dessa abordagem, a coleta e aplicação de métricas da copa podem ser viabilizadas com o emprego das novas tendências para a execução de inventários, como o uso de fotografias aéreas de alta resolução e tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) (HOLM et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2012; STABEN et al., 2016).

A copa é um componente funcional da árvore, interface entre a vegetação e a atmosfera. O desenvolvimento da copa é uma expressão do padrão espacial para aquisição de recursos (URIA-DIEZ; POMMERENING, 2017) e responsável pela conversão da energia radiante em química através da fotossíntese (TONINI; ARCO-VERDE, 2005). Mudanças no seu tamanho, forma e posição ocorrem devido a fatores genéticos, características ecológicas do genótipo, e condições ambientais de sítio, como a competição por luz, água nutrientes e espaço (HOFMAN et al., 2016; OLIVIER et al., 2016). Como exemplo, espécies de rápido crescimento e exigentes de luz intensificam a fotossíntese em ecossistemas úmidos pela otimização da distribuição da folhagem para melhor interceptação da radiação luminosa (MAMASHITA et al., 2015).

A morfometria da copa permite compreender a dinâmica de crescimento florestal, na presença ou não de interações espaciais competitivas (URIA-DIEZ; POMMERENING, 2017). Os índices morfométricos mais conhecidos são a proporção de copa, índice de saliência, índice de abrangência, grau de esbeltez e formal de copa (DURLO; DENARDI, 1998). Estes índices podem auxiliar a marcação de desbastes, reconstituição de espaço ocupado por planta e em inferências sobre a competição, estabilidade e vigor de árvores (DURLO; DENARDI, 1998; ORELLANA; KOEHLER, 2008; TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

A concorrência por fatores de crescimento, como espaço, em nível de dossel é uma característica estruturante em ecossistemas florestais; dependendo do arranjo espacial, maiores espaçamentos favorecem a extensão lateral da copa de árvores (SEIDEL et al., 2016). Essa modulação morfológica, ou plasticidade, é uma estratégia que favorece o acúmulo de biomassa individual em ambientes menos competitivos (PEER et al., 2017). O tamanho da copa pode determinar o crescimento da árvore (PRETZCH et al., 2015). Todavia, copas maiores podem aumentar a susceptibilidade a perda de água por transpiração e danos por ventos, impactar negativamente a colheita, qualidade e custo da madeira (SEIDEL et al., 2016). O excesso de galhos prejudica o processamento da madeira, reduzindo sua capacidade produtiva e aumentando o risco de acidentes, principalmente, no desgalhamento semimecanizado com motosserra.

Mediante o exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do espaçamento inicial de plantio e da idade na morfometria da copa de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido a 22°13' de latitude Sul e 54°48' de longitude Oeste (Datum Sirgas 2000), no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus de São João Evangelista. O clima da região é o temperado chuvoso-mesotérmico, do tipo Cwa pela classificação do sistema internacional de Köppen (Köppen, 1936), com inverno seco e verão chuvoso. As médias

anuais de temperatura e precipitação são de 19,1 °C (médias mensais de 15,1 °C em julho a 21,7 °C em fevereiro) e 1360 mm (médias mensais de 7,7 mm em agosto a 315,2 mm em dezembro), respectivamente. Os dados climáticos foram oriundos de registros anuais de 1961 a 1990, disponíveis no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia.

O experimento foi instalado em maio de 2012 utilizando-se um híbrido de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake sobre Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com o horizonte A proeminente, textura arenosa, relevo plano e a 1097 m de altitude. Adotou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com três repetições, em esquema de parcelas subdivididas no tempo. Os tratamentos principais foram constituídos por quatro espaçamentos de plantio (T1: 3,0 × 0,5 m – 6667 plantas ha⁻¹; T2: 3,0 × 1,0 m – 3333 plantas ha⁻¹; T3: 3,0 × 1,5 m – 2222 plantas ha⁻¹ e T4: 3,0 × 2,0 m – 1667 plantas ha⁻¹, e os secundários, quatro idades (24, 37, 48 e 59 meses). Cada unidade experimental foi definida por quatro linhas de plantio com 7 plantas, totalizando 28 indivíduos, dos quais 10 foram mensurados, por ter sido adotada a bordadura simples.

O inventário florestal contínuo (IFC) 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 indivíduos. 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.

Também se avaliaram os índices morfométricos, baseados no tamanho e na morfologia da árvore, segundo Durlo e Denardi (1998) e Sterba (1991): Porcentagem de Copa (PC), Formal de Copa (FC), Grau de Esbeltez (GE), Índice de Abrangência (IA) e Índice de Saliência (IS). Esses índices foram assim expressos: $PC = 100L / Ht$; $FC = Dc / L$; $GE = Ht / DAP$; $IA = Dc / Ht$; e $IS = Dc / DAP$.

A transformação proposta por Box e Cox (1964), que usa o método da máxima verossimilhança, foi aplicada apenas aos dados de formal de copa com o propósito de atender às premissas de normalidade segundo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias por Bartlett. O valor do parâmetro de transformação lambda (λ) de Box-Cox foi de -1,39. Realizaram-se análises de variância (teste F), regressão e correlação linear de Pearson (r).

Testaram-se modelos de regressão polinomial de primeiro, segundo e terceiro grau pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para a estimação dos índices morfométricos. A seleção dos melhores modelos para as análises gráficas subsequentes se embasou na significância dos parâmetros pelo teste t, teste de falta de ajuste (lack of fit), menor erro padrão da estimativa percentual (S_{yx} , %) e maior coeficiente de determinação ajustado (R^2).

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio dos softwares Excel® e R versão 3.3 (R CORE TEAM, 2017), por meio dos pacotes estatísticos MASS e stats, com significância de 1 e 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância, para os índices morfométricos, se encontra na Tabela 1. Os espaçamentos de plantio (tratamentos principais) influenciaram apenas o grau de esbeltez ($p \leq 0,01$) e índice de saliência ($p \leq 0,05$). Observou-se efeito estatístico significativo das idades inventariadas (tratamentos secundários) ($p \leq 0,01$) nesses dois índices morfométricos e na proporção de copa. A interação entre espaçamentos de plantio e idades inventariadas foi verificada apenas para o índice de abrangência. Em geral, os coeficientes de variação foram baixos e evidenciaram a precisão experimental.

Independentemente da idade, as médias do formal de copa não foram influenciadas pelos espaçamentos de plantio. A média desse formal foi de $0,47 \pm 0,13$, indicativo de copa esbelta ($FC < 1$) conforme Orellana e Koehler (2008) e Silveira et al. (2015). Indivíduos menores em altura tiveram maior formal de copa ($r = -0,29$; $p \leq 0,01$); o DAP não se correlacionou com o formal de copa ($r = -0,08$; $p > 0,05$). Para árvores com mesmo diâmetro de copa, as mais produtivas por unidade de projeção de copa são aquelas com menor formal, uma vez que apresentam maior manto de copa (DURLO; DENARDI, 1998). Por este motivo, o índice tem sido recomendado na escolha de árvores para desbaste seletivo (DURLO; DENARDI, 1998, SILVEIRA et al., 2015), sobretudo em povoamentos cujo objetivo é a produção madeireira, que requerem maior tempo de rotação e determinadas intervenções silviculturais, como o desbaste (LEITE et al., 2006).

Tabela 1. Resumo da análise de variância dos índices morfométricos da copa de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

Table 1. Summary of variance analysis for the morphometric indexes of the canopy of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* trees.

F.V.	G.L.	Q.M.				
		PC	FC	GE	IA	IS
Blocos	2	17,4100	0,0047	0,1299	0,0008	0,0083
Espaçamentos (e)	3	37,3800 ^{ns}	0,4772 ^{ns}	0,7941 ^{**}	0,0004 ^{ns}	0,0104 [*]
Resíduo a	6	42,7500	0,3888	0,0286	0,0004	0,0017
CV _{exp} (a)		20,54	25,51	11,08	15,25	19,91
Idade (i)	3	424,4000 ^{**}	0,3858 ^{ns}	0,1013 ^{**}	0,0180 ^{**}	0,0201 ^{**}
e x i	9	9,9000 ^{ns}	0,6705 ^{ns}	0,0140 ^{ns}	0,0010 ^{**}	0,0005 ^{ns}
Resíduo b	24	13,4000	0,3597	0,0090	0,0002	0,0003
CV _{exp} (b)		11,52	26,65	6,22	9,34	8,57

^{ns}, ^{*}, ^{**} não significativo, significativo a 5% de probabilidade e significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. PC = proporção de copa; FC = formal de copa; GE = grau de esbeltez; IA = índice de abrangência; IS = índice de saliência; e CV_{exp} = coeficiente de variação experimental.

O formal de copa oscilou entre os espaçamentos, porém tendeu à estabilidade ao longo do tempo para as diferentes densidades de plantio. Wink et al. (2012) também não verificaram mudanças significativas do formal de copa em plantações florestais de *Eucalyptus* sp. com 20, 44 e 240 meses. Portanto, é um índice cujo uso para a marcação de desbastes mistos e sistemáticos deve ser visto com cautela, já que sofre influência do material genético e sítio (DURLO; DENARDI, 1998).

Constatado o efeito dos espaçamentos e das idades inventariadas pela análise de variância, procedeu-se com a regressão (Tabela 2). As equações contidas nesta tabela não apresentaram falta de ajuste ($p > 0,01$), denotando adequabilidade dos modelos polinomiais testados para elucidar o comportamento dos índices morfométricos. Os dados do grau de esbeltez não possibilitaram o ajuste dos modelos testados utilizando a idade como variável preditora. As equações para estimar o índice de abrangência nos espaçamentos 3,0 × 1,0, 3,0 × 1,5 e 3,0 × 2,0 m exibiram os maiores coeficientes de determinação ajustado ($\bar{R}^2 \geq 0,7$). As relações funcionais estabelecidas para o índice

Tabela 2. Equações selecionadas para estimar os índices morfométricos da copa de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em função da idade (I, meses) e espaçamento entre plantas (E, m).

Table 2. Equations selected to estimate the morphometric indexes of the canopy of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* trees related to age (I, months) and spacing between plants (E, m).

Índice	Equações	$\bar{R}^2$	S _{yx}
PC	$PC = 47,8578^{**} - 0,3812^{**} I$	0,55	13,99
IS	$IS = 0,3103^{**} - 0,0025^{**} I$	0,37	20,27
IA _{E0,5}	$IA = 0,1930^{**} - 0,0014^{*} I$	0,42	16,00
IA _{E1,0}	$IA = 0,3713^{**} - 0,0104^{**} I + 0,0001^{*} I^2$	0,72	11,96
IA _{E1,5}	$IA = 0,3647^{**} - 0,0092^{**} I + 0,0001^{*} I^2$	0,83	11,19
IA _{E2,0}	$IA = 0,5233^{**} - 0,0154^{**} I + 0,0001^{**} I^2$	0,96	8,09
GE	$GE = 2,2813^{**} - 0,9318^{**} E + 0,2189^{*} E^2$	0,67	10,23
IS	$IS = 0,2608^{**} - 0,0437^{**} E$	0,20	22,76
IA _{I24}	$IA = 0,1401^{**} - 0,0441^{**} E$	0,57	11,18
IA _{I59}	$IA = 0,1222^{**} - 0,0111^{*} E$	0,29	8,47

* significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; S_{yx} = erro padrão da estimativa (%); PC = proporção de copa (%); IS = índice de saliência; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez; E = espaçamento entre plantas (m); I = idade (meses).

de saliência foram menos precisas ($\bar{R}^2 < 0,40$ e $S_{yx} > 20\%$), porém úteis para avaliar tendências desse índice relacionadas ao espaçamento (com distância fixa entre linhas de 3 m e entre plantas variando de 0,5 a 3,0 m) e à idade (de 24 a 59 meses) em povoamentos de eucalipto.

Os dados morfométricos não possibilitaram o ajuste do modelo polinomial de terceiro grau, apresentando falta de ajuste ($p \leq 0,01$). Os índices que contemplaram variáveis dendrométricas como DAP e altura total foram influenciados pelo espaçamento de plantio e/ou idade. Este fato, decorre da forte correlação de ambas as variáveis dendrométricas com a densidade de plantas, idade, volume e acúmulo de biomassa; motivos as quais são frequentemente utilizadas na modelagem do crescimento e produção florestal.

A proporção de copa foi menor com o envelhecimento do povoamento, resultado da elevação da altura de inserção do primeiro galho vivo ($r = -0,86$, $p \leq 0,01$) e do crescimento em altura ($r = -0,75$; $p \leq 0,01$). Indivíduos maiores tiveram menor proporção de copa. A velocidade do crescimento apical foi menor que a velocidade de mortalidade dos ramos próximos a base da copa (desrama natural). Essa dinâmica de crescimento é conhecida e relaciona-se à tendência temporal de inversão da proporção de biomassa da copa em relação àquela do tronco, povoamentos mais antigos possuem maior volume e mais biomassa de tronco do que de copa e vice-versa (SANTANA et al., 2014).

A proporção de copa foi inferior a 50%, alcançando 26% na idade de 59 meses com tendência de redução além da última idade inventariada (Figura 1). Além disso, a densidade de plantio não provocou mudanças significativas desse índice no híbrido estudado. No caso de florestas energéticas, que utilizam espaçamentos superadensados e curtas rotações, menores proporções de copa podem facilitar e aumentar a eficiência da colheita florestal.

Figura 1. Índices morfométricos da copa de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em função da idade. Em que: PC = proporção de copa (%); FC = formal de copa; GE = grau de esbelteiz; IS = índice de saliência; IA = índice de abrangência; E = espaçamento entre plantas (m) e barra de erro = uma unidade de desvio padrão.

Figure 1. Morphometric indexes of the canopy of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* trees related to age. Where: PC = canopy ratio (%); FC = canopy formal; GE = degree of slenderness; IS = salience index; IA = coverage index; E = spacing between plants (m) and error bar = one unit of standard deviation.

Os índices de abrangência e de saliência tenderam a diminuir ao longo do tempo, corroborando com Wink et al. (2012). Indivíduos menores em altura estiveram associados a maiores índices de abrangência ($r = -0,72$; $p \leq 0,01$) e de saliência ($r = -0,66$; $p \leq 0,01$). Nas ocasiões em que se define a aplicação de desbaste seletivo por baixo, ambos os índices podem ser usados como critério auxiliar para a seleção de árvores suprimidas e dominadas. As maiores razões DC/HT e DC/DAP nos primeiros anos de cultivo, seguidas de declínio, podem ser uma adaptação morfométrica necessária

para o estabelecimento e rápido crescimento do híbrido. Segundo Santana et al. (2014), a maior proporção de biomassa da copa no início do cultivo é essencial para melhor exploração do sítio e, posterior, acúmulo de biomassa de tronco. Quando se prevê regimes de desbaste pelo diâmetro, o segundo índice pode indicar o espaço de crescimento necessário às árvores remanescentes (TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

O índice de abrangência se correlacionou com o diâmetro de copa ($r = 0,43$, $p \leq 0,01$) e o de saliência, não ($r = -0,06$; $p > 0,05$). O crescimento relativo do tronco foi mais acelerado que o da copa, o que já era esperado. As árvores de 24 e 59 meses de idade tiveram uma copa 26 e 17 vezes, em média, maior que seu DAP, respectivamente. Neste mesmo período, a relação da altura com o diâmetro da copa foi de 5:1 para 9:1. Caso mantivesse a proporção de copa ao longo da rotação, as taxas de respiração poderiam se intensificar e diminuir a produção final esperada de madeira (MENALLED; KELTY, 2001).

O comportamento do índice de abrangência ao longo da idade se diferenciou entre os espaçamentos (Figura 1). Verificou-se uma redução linear no plantio mais adensado e não linear nos demais espaçamentos. A redução desse índice com o crescimento e aumento da dimensão interior do povoamento já foi relatada por Wink et al. (2012). A taxa de variação do índice de abrangência foi maior no espaçamento $3,0 \times 2,0$ m e menor, no $3,0 \times 0,5$ m. Tal fato pode ser consequência da competição por recursos de crescimento, que se intensifica com a idade e menor área útil por planta (FERRAZ et al., 2016).

Aos 24 meses de idade, o índice de abrangência aumentou com a ampliação do espaçamento (Figura 2). Pautando-se nas premissas de que o espaço é um fator estruturante de dossel e que o aumento do espaço útil por planta favorece a extensão lateral de copas (SEIDEL et al., 2016), uma hipótese que deve ser considerada é a de que a limitação espacial tenha prejudicado o crescimento da copa em diâmetro ($r = 0,89$; $p \leq 0,01$), reduzindo o valor do índice com a densidade de plantio. Aos 24 meses de idade, observou-se a sobreposição de copas no espaçamento $3,0 \times 0,5$ m.

Apenas aos 59 meses notou-se que o índice de abrangência reduziu nos maiores espaçamentos. Neste caso, a altura total se correlacionou com o espaçamento entre plantas ($r = -0,77$; $p \leq 0,01$), mas o diâmetro da copa não ($r = -0,03$; $p > 0,05$). Nas medições anteriores tanto altura total, quanto

Figura 2. Índices morfométricos da copa de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em função do espaçamento entre plantas. Em que: PC = proporção de copa (%); FC = formal de copa; GE = grau de esbeltez; IS = índice de saliência; IA = índice de abrangência; I = idade (meses) e barra de erro = uma unidade de desvio padrão.

Figure 2. Morphometric indexes of the canopy of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* trees related to spacing between plants. Where: PC = canopy ratio (%); FC = canopy formal; GE = degree of slenderness; IS = salience index; IA = coverage index; I = age (months) and error bar = one unit of standard deviation.

diâmetro de copa tiveram correlação significativa ($r > 0,75$; $p \leq 0,01$). O crescimento desproporcional da altura em relação ao diâmetro da copa já foi relatado para povoamentos homogêneos aos 7 anos de idade nas espécies *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Carapa guianensis* Aubl., *Tabebuia avellanedae* Lorentz ex Griseb e *Hymenaea courbaril* L. por Tonini e Arco-Verde (2005).

À medida que ampliou o espaçamento, o DAP aumentou e o grau de esbeltez diminuiu, evidenciando que houve maior crescimento em diâmetro que em altura. Plantios mais densos apresentaram fustes mais finos ($r = 0,76$; $p \leq 0,01$), resultando em menor robustez e vigor. A correlação entre a altura e o DAP foi significativa ($r = 0,82$; $p \leq 0,01$), de modo que diâmetros menores estiveram associados a menores alturas. Houve a necessidade de mais espaço para o crescimento das árvores conforme adensou o plantio. Maiores valores do grau de esbeltez indicam menor estabilidade e maior competitividade pelos recursos do meio (DURLO; DENARDI, 1998). O grau de esbeltez e índice de saliência também podem ser usados como indicativo de competição intraespecífica por espaço, que se intensifica quando ocorre o entrelaçamento de copas (ROMAN et al., 2009).

As árvores do espaçamento $3,0 \times 2,0$ m expressaram menores grau de esbeltez, índice de saliência e, na idade de 59 meses, índice de abrangência. Verificou-se copas mais estreitas nos indivíduos menores em diâmetro ($r = -0,21$; $p \leq 0,05$) e em altura ($r = -0,48$; $p \leq 0,01$) contidos nesse espaçamento. Este resultado implicou em uma menor competição intraespecífica e mais resistência às intempéries do tempo. Como a competição por luz ocorre em nível de folhagem (URIA-DIEZ; POMMERENING, 2017), a disponibilidade de área útil por planta e a plasticidade da copa permitiram melhor interceptação do recurso e desenvolvimento do fuste.

Neste trabalho, a morfometria da copa mostrou-se eficaz para inferir sobre a competição, vigor e estabilidade de árvores em povoamentos de eucalipto. Desse modo, sugere-se mais pesquisas envolvendo índices morfométricos da copa e a aplicação de tratamentos silviculturais, simulações de desbaste e escolha de variáveis preditoras na modelagem ecofisiológica do crescimento e produção, que são bases fundamentais do planejamento das atividades florestais.

CONCLUSÕES

O espaçamento de plantio e a idade influenciam a morfometria da copa de árvores em povoamentos de eucalipto.

A proporção de copa e os índices de abrangência e de saliência diminuem ao longo do tempo.

O formal de copa e grau de esbeltez mantêm estáveis entre 24 e 59 meses de idade.

O grau de esbeltez e o índice de saliência aumentam à medida que adensa o espaçamento inicial de plantio.

Nas condições estudadas, o índice de abrangência é o único atributo morfométrico da copa que interage com o espaçamento de plantio e a idade.

A morfometria da copa pode ser empregada no monitoramento do crescimento e da produção em povoamentos de eucaliptos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – campus São João Evangelista pelo apoio e infraestrutura para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Society**, London, v. 26, p. 211-252, 1964.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D. Influência da posição social nas relações morfométricas de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 225-234, 2016.

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.

- FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilizes with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, Amsterdam, v. 47, p. 861-876, 2016.
- 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**, Amsterdam, v. 20, p. 265-276, 2016.
- HOLM, S.; NELSON, R.; STÅHL, G. Hybrid three-phase estimators for large-area forest inventory using ground plots, airborne LiDAR and space LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 197, p. 85-97, 2017.
- KÖPPEN, W. **Das geographische system der klimate**. Berlin: Gerbrüder Bornträger, 1936. 44 p.
- LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006.
- MAMASHITA, T.; LAROCQUE, G. R.; DESROCHERS, A.; BEAULIEU, J.; THOMAS, B. R.; MOSSELER, A.; MAJOR, J.; SIDDERS, 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.
- MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.
- 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.
- OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, L. M. T.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. A.; ARCEBI JUNIOR, F. W. Application of LiDAR to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 175-184, 2012.
- 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**, Amsterdam, v. 374, p. 20-32, 2016.
- ORELLANA, E.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 229-237, 2008.
- PRETZCH, H.; BIBER, P.; UHL, E.; DAHLHAUSEN, J.; RÖTZER, T.; CALDENTY, J.; KOIKE, T.; CON, T. van; CHAVANNE, A.; SEIFERT, T.; TOIT, B.; FARNDEN, C.; PAULEIT, S. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, Amsterdam, v. 14, p. 466-479, 2015.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 473-480, 2009.
- 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.
- SEIDEL, D.; RUZICKA, K.; PUETTMANN, K. Canopy gaps the shade of Douglas-fir crowns in the western Cascades, Oregon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 363, p. 31-38, 2016.
- SILVEIRA, B. D.; FLORIANO, E. P.; NAKAJIMA, N. Y.; HOSOKAWA, R. T.; ROSOT, N. C.; GRACIOLI, C. R. Relação da morfometria e competição com o crescimento de *Trichilia claussenii* em um fragmento de floresta semidecidual, RS. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 373-382, 2015.
- STABEN, G. W.; LUCIEER, A.; EVANS, K. G.; SCARTH, P.; COOK, G. D. Obtaining biophysical measurements of wood vegetation from high resolution digital aerial photography in tropical and arid environments: Northern Territory, Australia. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 52, p. 204-220, 2016.

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

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.

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.

PEER, T.; VERHEYEN, K.; KINT, V.; CLEEMPUT, E. van; MUYS, B. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 385, p. 1-9, 2017.

WINK, C.; MONTEIRO, J. S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e sua relação com o diâmetro das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 57-67, 2012.

Recebido em: 23/12/2017

Aceito em: 26/06/2018