**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dinâmica do crescimento em plantios mistos de *Eucalyptus globulus* e
*Acacia mearnsii***

Gustavo Martins Soares

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2015**

Gustavo Martins Soares
Engenheiro Florestal

**Dinâmica do crescimento em plantios mistos de *Eucalyptus globulus* e
*Acacia mearnsii***

Orientadora:
Profa. Dra. **LUCIANA DUQUE SILVA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Soares, Gustavo Martins

Dinâmica do crescimento em plantios mistos de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* / Gustavo Martins Soares. - - Piracicaba, 2015.
215 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Acácia-negra 2. Eucalipto 3. Plantios mistos 4. Produtividade 5. Modelagem
I. Título

CDD 634.9734
S676d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A minha família

Pelo exemplo de vida, confiança e amizade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me fornecer sabedoria e estar ao meu lado em todos os momentos dessa caminhada;

À prof^{ra}. Dra. Luciana Duque Silva, por ter me recebido de braços abertos nessa etapa, pela confiança, pela valiosa orientação e incentivo para superar todos os desafios e por ter propiciado as condições para execução e elaboração deste trabalho;

Aos meus pais, Gustavo e Carmem, pelas ajudas na hora de tomar as decisões importantes, pelo companheirismo, confiança, amizade, pelo total apoio nessa fase da minha vida e pelos sacrifícios ao longo da vida, que eu sei que não foram poucos. Sem vocês eu não chegaria aqui;

Ao meu irmão Gabriel, pela amizade, confiança, pelas conversas divertidas, por ser meu melhor amigo e por ser o melhor irmão que alguém poderia ter;

Ao meu tio Camilo, por toda a ajuda que me possibilitou avançar nos meus estudos e por ter servido de inspiração para entrar na Universidade;

Aos meus avós Juca e Terezinha (*“in memoriam”*) e Mário e Aparecida (*“in memoriam”*), por me ensinarem valores muito importantes. E por participações grandiosas em minha vida, como a ajuda em minha formação e até mesmo pequenos atos, como levar leite ou buscar um pão fresquinho bem cedinho.

Ao programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), pela possibilidade de cursar o mestrado;

Ao Prof. Dr. Helio Garcia Leite e Dr. Daniel Binoti, pelos grandes ensinamentos e ajudas que contribuíram para a execução desse trabalho;

Ao Me Jackson Brilhante, por ter propiciado as condições para a execução e elaboração do trabalho;

Ao técnico florestal da TANAGRO S.A., Herick Teikowski, pela amizade, companheirismo e ajuda nas empreitadas de campo;

Aos funcionários e amigos da TANAGRO S.A. da regional de Piratini, Daniel, Márcio, Vinicius, André, Jorge, Rudinho, Vagner e outros, pela ajuda imensurável nas coletas de campo;

Aos amigos do Woodnese de Viçosa – MG, pela amizade e pelos momentos de descontração;

Aos amigos da República Oi Vizinhas de Viçosa – MG, em especial, Toninho e Gabriel, pelos momentos de descontração, pela hospedagem e pela ajuda em diversos momentos;

Aos companheiros da República Lesma Lerda P.G., pelas conversas, amizades, dividirem a TV quando eu queria assistir a novela e por dividirem a pizza “sequinha” da tia Sola;

Ao meu grande amigo Fábio de Cataguases – MG, pelo companheirismo e pelas conversas aleatórias nos momentos de folga;

Aos amigos do LEFS e da ESALQ, em especial, Alexandre, Carlos, Luana, Mateus, Murilo, Pedro (Trufa), Stevan (Cabelo), Tátima e Thiago, pela amizade, por todo suporte, pela ajuda e por todo companheirismo em diversos momentos, desde campo, laboratório, R.U., lanches e etc;

Aos companheiros de academia, pelos momentos de desestresse.

A todos vocês, meu sincero, **MUITO OBRIGADO!**

“Nunca se esqueça de quem é, porque é certo que o mundo não se esquecerá. Faça disso sua força. Assim não poderá ser nunca sua fraqueza. Arme-se com esta lembrança, e ela nunca poderá ser usada para magoa-lo”.

Tyrion Lannister

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Acácia-negra	19
2.2 Eucalipto	21
2.3 Plantios Mistos	23
2.3.1 Biomassa Florestal	23
2.3.2 Produtividade	26
2.4 Modelos de crescimento e produção	36
2.5 Classificação da Capacidade Produtiva	40
2.6 Relação Hipsométrica	42
2.7 Modelos de Distribuição Diamétrica (MDD)	43
2.8 Redes Neurais Artificiais (RNA)	45
3 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 Características da Área	49
3.2 Delineamento experimental	49
3.3 Crescimento e produção	50
3.4 Modelos de Distribuição Diamétrica (MDD)	56
3.5 Redes Neurais Artificiais (RNA)	57
3.6 Biomassa	58
3.7 Índice de Área Foliar (IAF)	60
3.8 Análise Estatística	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Crescimento	63
4.1.1 Altura	63
4.1.2 DAP	67
4.1.3 Volume	70
4.1.4 Mortalidade	84
4.2 Biomassa	85
4.2.1 Folhas	85
4.2.2 Galhos	87
4.2.3 Lenho	89
4.2.4 Total	90
4.3 Índice de Área Foliar (IAF)	95
4.4 Modelagem	98

4.4.1	Modelo Volumétrico	98
4.4.2	Modelos de Crescimento.....	99
a	Altura	99
b	DAP.....	105
c	Volume Individual	110
4.4.3	Modelos de Produção.....	119
4.4.4	Relação Hipsométrica	128
4.4.5	Classificação da capacidade produtiva	144
4.4.6	Modelagem da Distribuição Diamétrica (MDD)	151
4.4.7	Redes Neurais Artificiais (RNA)	166
5	CONCLUSÕES	173
	REFERÊNCIAS	175
	ANEXOS	207

RESUMO

Dinâmica do crescimento em plantios mistos de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii*

O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica do crescimento em consórcios de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* e suas interações. O experimento foi instalado no ano de 2005, em duas fazendas localizadas no município de Piratini – RS, onde foram plantadas as espécies *Eucalyptus globulus* (E) e *Acacia mearnsii* (A), em monocultivo (100%E e 100%A) e consorciadas em linhas simples (50%E:50%A – LS) e em linhas duplas (50%E:50%A – LD). Para avaliarmos os efeitos dos consórcios no crescimento das espécies, os tratamentos foram analisados nos anos de 2006, 2007, 2008, 2010 e 2013; no ano de 2014 foi realizada a cubagem pelo método de Smalian e a determinação da biomassa de folhas, galhos, lenho e total e do índice de área foliar (IAF) pelo método destrutivo. A classificação da capacidade produtiva das espécies foi realizada pelo método da curva-guia em função da altura dominante (Hd) e idade. Foram testados três diferentes modelos de crescimento, seis modelos de equações hipsométricas e o modelo de Clutter para a estimação e predição da produtividade por unidade de área. Além disso, foi realizada a modelagem da distribuição diamétrica a partir da estimação dos parâmetros da função densidade de probabilidade (*f.d.p.*) Weibull de dois parâmetros e testado o emprego das redes neurais artificiais (RNA) para a estimação da altura. A acácia-negra teve seu crescimento em altura beneficiado pelo consórcio, já para o eucalipto não foi possível observar vantagens no crescimento em altura. O DAP para ambas espécies foi influenciado pelos consórcios, positivamente para a acácia-negra e negativamente para o eucalipto, diferenças que são explicadas pelas variações dos espaçamentos proporcionadas ao se manter o espaçamento convencional de plantio das espécies nos tratamentos consorciados. O volume individual teve alta correlação com o DAP (0,92). A produtividade da acácia-negra nos consórcios foi superior a 50% a da monocultura, o que não ocorreu para o eucalipto. As produtividades totais dos consórcios foram iguais estatisticamente as das monoculturas. Os sistemas consorciados foram eficazes em diminuir a mortalidade da acácia-negra. Quando analisada a compartimentalização da biomassa individual acima do solo e o IAF, não foram encontradas diferenças significativas entre os modelos de consórcio e as monoculturas. A classificação da capacidade produtiva das espécies pelo método da curva-guia mostrou-se eficiente, sendo capaz de classificar os tratamentos em diferentes sítios de produção, demonstrando a relação das variáveis do povoamento com a capacidade produtiva dos locais. O único modelo, de crescimento e de relação hipsométrica, que foi capaz de estimar as variáveis com precisão foi o de Chapman-Richards e o $H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$, respectivamente. O modelo de Clutter foi indicado tanto para os modelos de consórcio quanto para os monocultivos. A *f.d.p.* Weibull de dois parâmetros captou de forma precisa a distribuição dos diâmetros e o sistema de equações proposto para a recuperação dessa distribuição pode ser empregado nas diferentes situações de manejo testadas. As RNA possuem potencial de uso para a estimação da altura em monocultivos de eucalipto e acácia-negra, bem como nos consórcios entre essas espécies, gerando estimativas precisas e com pequena tendenciosidade.

Palavras-chave: Acácia-negra; Eucalipto; Plantios mistos; Produtividade; Modelagem

ABSTRACT

Growth dynamics in a mixed-plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*

The objective of this study was to evaluate the growth dynamics in a mixed-species plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* and their interactions. The experiment was installed in 2005, on two farms in municipality of Piratini – RS, where was planted the species *Eucalyptus globulus* (E) and *Acacia mearnsii* (A), in monoculture and mixed in simple lines (50%E:50%A – LS) and double lines (50%E:50%A – LD). To evaluate the effects of mixed-plantings in the growth of the species, the treatments was analysed in 2006, 2007, 2008, 2010 and 2013; in 2014 was realized the volume evaluation by the Smalian method and the determining of the biomass of leaves, twigs, wood and total and the leaf area index (LAI) by the destructive method. The site index of each species was realized by the guide-curve method in function of the dominant height (Hd) and ages. Three different growth models, six different height-diameter models and the Clutter model to estimate and predict the productivity per unit area, were tested. Moreover, modeling the diametric distribution as of the estimation of the parameters of the probability density function two parameters Weibull and the use of the artificial neural network (ANN) for the height estimate was tested. The black wattle had their height growth benefited for the mixed-plantations, for eucalyptus was not observed advantages in height growth. The DBH was influenced by the mixed-plantings for both species, positively to the black wattle and negatively for eucalyptus, differences that are explained by variations in spacing provided to keep the conventional spacing of planting the species in the intercropping treatments. The individual volume had high correlation with DBH (0,92). The productivity of black wattle in the mixed-plantings was higher than 50% of monoculture, which did not occur for eucalyptus. The total productivity of mixed-plantings were statistically equal the monocultures. Mixed-plantings were effective in reducing mortality of black wattle. When analyzing the compartmentalization of the individual above-ground biomass and the IAF, there were no significant differences between the mixed-plantings models and monocultures. The site index classification of the species using the guide-curve method was effective, being able to classify out the treatments at different production indexes, showing the relation between the stand variables and productive capacity of local. The only model of growth and height-diameter ratio, which was able to estimate the variables with accuracy was the Chapman-Richards and $H \sim \int (DBH, Hd, AS, Age)$, respectively. The Clutter model was indicated both for the models of mixed-plantings as for the monocultures. The probability density function two parameters Weibull represented accurately the distribution of diameters and the system of equations proposed for the recovery of this distribution can be used in different management situations tested. The ANN have potential use for the estimation of height in eucalyptus and black wattle monocultures and in mixed-plantations with these species, with accurate and little bias estimates.

Keywords: Black wattle; Eucalyptus; Mixed-plantations; Productivity; Modeling

1 INTRODUÇÃO

As plantações florestais estão em constante crescimento, visto que hoje a área ocupada por plantios florestais no Brasil é de aproximadamente 7,6 milhões de hectares (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2014). Onde, 72% desse valor é referente a área de plantios de eucaliptos; 20,7% referente a área de plantios de pinus e 7,3% é referente a outras espécies, incluindo acácia, seringueira, paricá, teca e outras. Dessas outras espécies, o gênero acácia (*Acacia mearnsii* e *Acacia mangium*) representa uma área de 146.903 ha de florestas plantadas do país.

A grande utilização do eucalipto é facilmente explicada devido ao seu crescimento satisfatório em solos de baixa fertilidade natural, condição de muitos solos brasileiros; pela conjugação de melhoramento genético e aprimoramento das práticas de manejo, notadamente em termos de preparo do solo, fertilização e controle de plantas daninhas (STAPE, 2005); e ao fato de ser utilizado como matéria-prima para uma gama imensa de produtos florestais, tornando o Brasil um dos líderes mundiais em produtividade das plantações florestais.

No mundo são plantadas mais de 1.000 espécies do gênero acácia, principalmente as: *Acacia auriculiformis*, *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium* e *Acacia mearnsii* (HARWOOD, 2014), compreendendo um total de 3,5 milhões de ha de florestas plantadas em mais de 70 países na Ásia, África e América do Sul, em monocultivos comerciais, sistemas agroflorestais e pequenas propriedades. Mais de 2 milhões de ha são plantados no sudeste asiático, principalmente no Vietnã, com mais de 1 milhão de ha, abastecendo as indústrias de celulose e papel, bem como o mercado de madeira sólida. Na África do Sul e Brasil a produção é voltada para a produção de celulose e tanino (MIDGLEY, 2014), na China (300 mil ha) as acácias são plantadas para a produção de madeira e recuperação ambiental (ZHONG; PINYOPUSAREK, 2014).

A expansão dos plantios florestais com espécies exóticas no Brasil ocorre em consequência da evolução de toda uma estrutura industrial voltada para o fabrico de uma imensa gama de produtos que tem como base a matéria prima florestal, como, celulose e papel, carvão vegetal, lenha industrial, serrados, laminados, painéis reconstituídos (chapas e aglomerados), tanino e borracha; e também pelo melhor desempenho dessas espécies para essas finalidades. Dentre as espécies mais plantadas no país, o eucalipto e o pinus possuem as maiores produtividades médias de madeira, sendo 39 m³/ha/ano e 31 m³/ha/ano (IBÁ, 2015), respectivamente, e quando o produto de maior interesse é o tanino, a acácia-negra é a espécie

mais utilizada no Brasil, pois possui uma concentração de 27% de tanino em base seca para a casca (SHERRY, 1971; MAESTRI et al., 1987), valor esse superior ao encontrado para outras espécies, como, 6,03% para o coco (BRÍGIDA; ROSA, 2003), 7,04 ~ 10,38% para a aroeira, 3,21 ~ 11,07% para o angico-branco (MONTEIRO et al., 2005), 18,51% para o angico-vermelho, 10,62% para o angico cangalha (TRUGILHO et al., 1997), 18,11% para a jurema-vermelha, 17,74% para a jurema-preta (PAES et al, 2006), dentre outras. Além dessa elevada concentração da substancia na casca da acácia-negra, ela é de alta qualidade, o que aumenta o interesse pelo uso da espécie para a finalidade.

A região do estado do Rio Grande do Sul, onde se realizou esse estudo, é uma das poucas áreas no Brasil onde o *Eucalyptus globulus* apresenta um desenvolvimento satisfatório, verificando-se baixa taxa de mortalidade e pouca tortuosidade no tronco. Essa espécie é muito cultivada em regiões subtropicais e do mediterrâneo, onde se tem invernos chuvosos e temperaturas relativamente baixas, representando cerca de 22% de todo o eucalipto plantado no mundo, principalmente em Portugal, Espanha, Chile e Uruguai; pois possui um grande valor comercial, pelo seu alto teor de celulose e baixo teor de lignina.

A acácia-negra tem um papel de grande importância no estado do Rio Grande do Sul, onde estão plantadas cerca de 103 mil ha de florestas dessa espécie. Produzindo aproximadamente 184 mil toneladas de casca e 1,55 milhões de metros cúbicos de cavaco de madeira de acácia negra (ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS - AGEFLOR, 2015), e segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE em 2013 foi o estado responsável pela produção de toda a casca de acácia-negra do Brasil, devido principalmente à elevada adaptação as condições climáticas da região. Atualmente cerca de 60% das plantações de acácia-negra do estado do Rio Grande do Sul pertencem a pequenos produtores, responsáveis dessa forma por grande parte do abastecimento de empresas que a utilizam como fonte de matéria prima, para a produção de extratos vegetais (taninos) e cavacos de madeira utilizados nas indústrias de celulose. Segundo a Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2003), considerando-se os coeficientes técnicos apenas da produção primária (a nível de propriedade rural) que vai do preparo do solo, plantio, tratos culturais, descascamento, derrubada e corte das árvores e baldeio da madeira e casca, a acácia-negra gera mais de 10 mil empregos diretos. Esse mercado engloba mais de 45 municípios no estado do Rio Grande do Sul, tendo os municípios de Piratini e Montenegro como os mais produtivos (IBGE, 2013); e de acordo com dados da AGEFLOR (2015), mais de 35 mil famílias estão envolvidas com a atividade em seus minifúndios.

Visto a importância das duas culturas para o país e principalmente no estado do Rio Grande do Sul, desenvolver modelos de consórcio entre essas espécies traz ao produtor maior oportunidade e redução de riscos, pois ele passa a ter uma maior diversificação da produção, já que os produtos oriundos da acácia-negra e do eucalipto possuem um mercado já consolidado na região.

Diante da crescente preocupação ambiental acerca dos monocultivos, a interação entre as duas espécies poderá trazer à área cultivada uma menor necessidade de adubações nitrogenadas, devido à maior disponibilidade desse elemento no solo em função da capacidade da acácia-negra em fixar nitrogênio. A espécie cobre rapidamente o solo com uma serapilheira rica nesse nutriente, diminuindo a relação C/N do material, aumentando a ciclagem dos nutrientes e a fertilidade do solo. Além disso, os consórcios têm a capacidade de melhorar a agregação do solo, aumentar o teor de matéria orgânica e promover condições ecofisiológicas favoráveis ao crescimento das árvores.

Estudos anteriores constataram que os consórcios entre *Eucalyptus glubulus* e *Acacia mearnsii* foram mais produtivos do que suas monoculturas, em outros casos não foram encontradas vantagens no crescimento dos consórcios e até mesmo situações onde uma espécie suprimiu o crescimento da outra. Assim diversos modelos de plantio vêm sendo testado com o uso de espécies produtivas fixadoras e não fixadoras de nitrogênio, e segundo alguns autores ao invés de se testar diferentes proporções de espécies, o mais interessante é focar os esforços, por exemplo, quando as espécies são plantadas na proporção de 1:1 (50%E:50%A), a que a biomassa do tronco das espécies, o produto de maior interesse, atinge os maiores valores, e então testar diferentes formas de se plantar essas espécies, sempre focado na otimização da colheita do consórcio.

Mesmo com o avanço da modelagem do crescimento e da produção florestal no Brasil, percebe-se a necessidade de aprimoramento dessa ferramenta, com a inclusão de novas técnicas, e ainda o avanço para outras culturas florestais, bem como para plantios consorciados; proporcionando aos manejadores informações cada vez mais precisas sobre vários aspectos de suas florestas, como a estimação e predição da produtividade, a idade ótima de corte e de intervenções silviculturais, como o desbaste; além de informações sobre a adaptação das espécies em determinados sítios e também sobre os arranjos mais adequados em consórcios com espécies produtivas; fomentando assim, tanto empresas do setor, quanto pequenos e médios produtores rurais.

Dessa forma, formulou-se as seguintes hipóteses:

- I. O crescimento do *Eucalyptus globulus* e da *Acacia mearnsii* será superior nos consórcios do que em suas monoculturas;
- II. A produtividade total por unidade de área nos consórcios será maior do que nos monocultivos;
- III. As espécies possuem as mesmas tendências de crescimento nos modelos de consórcio e no monocultivo, não sendo necessário o ajuste de diferentes modelos de crescimento.

Com base nas hipóteses, definiu-se os seguintes objetivos:

- Objetivo geral: Avaliar a dinâmica do crescimento em consórcios de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* e suas interações.
- Objetivos específicos:
 - a. Avaliar as influências dos modelos de produção no crescimento, mortalidade, alocação de biomassa, no índice de área foliar (IAF) e na idade técnica de corte (ITC);
 - b. Classificar a capacidade produtiva para ambas espécies, a fim de gerar a variável índice de sítio;
 - c. Testar diferentes modelos de crescimento em DAP, Altura, Volume individual, produtividade por unidade de área, equações de relação hipsométrica; bem como, modelar a distribuição diamétrica das espécies e aplicar as Redes Neurais Artificiais (RNA) para estimação da altura no experimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Acácia-negra

Acacia mearnsii De Wild. pertence à família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Mimosoideae, é originária do sudeste da Austrália, ocorrendo principalmente entre as latitudes 34 - 44° sul e longitudes de 140 - 151° leste de Greenwich, e em altitudes que variam do nível do mar até 1.070 m (BOLAND et al., 1984). Os nomes comuns, acácia-negra no Brasil, aramo-negro no Chile e Argentina e “black wattle” na Austrália e África do Sul, fazem referência à coloração escura da casca e folhagem (MOCHIUTTI, 2007 apud KANNEGIESSER, 1990).

Ocorre, naturalmente no sudeste da Austrália, em topografia montanhosa suave a moderada, localizando-se preferencialmente, em encostas de exposição leste e sul. Apresenta bom crescimento em solos moderadamente profundos, bem drenados e de textura média. Devido ao seu sistema radicular superficial desenvolve-se bem mesmo em solos rasos, mas torna-se muito susceptível aos ventos fortes, podendo tombar com facilidade.

Segundo a EMBRAPA (2003), na região de origem cresce em zonas onde a temperatura média do mês mais quente varia entre 25° e 28° C e a temperatura média do mês mais frio varia de 0° a 5° C. A espécie não cresce com vigor em áreas com ocorrência de muitos dias seguidos com temperaturas que excedem 40° C. Na região de sua distribuição natural, ocorrem de 10 a 40 geadas por ano, mas seu crescimento é reduzido quando cultivada em regiões de geadas fortes e muito numerosas; e a precipitação média anual varia de 625 a 1000 mm, com 100 a 180 dias de chuva por ano. Não apresenta bom desenvolvimento quando submetida a período prolongado de estiagem no primeiro ano de implantação.

Apareceu no cenário econômico por volta de 1868, quando foi transportada de seu habitat natural, a Austrália, para a África do Sul, como planta de crescimento rápido e produtora de lenha. Vinte anos mais tarde, sua casca começava a ser empregada como substância tanante, para curtimento de couros (OLIVEIRA, 1968).

No Brasil, o estado que mais a cultiva é o Rio Grande do Sul, cuja primeira plantação foi feita pelo Sr. Júlio Carlos Lohmann, de Estrela - RS, que em 1928 cultivou um pequeno mato no lugar denominado Chacrinha, iniciando em 1930 plantações em maior escala. Antes, em 1918, o Sr. Alexandre Bleckmann plantou aproximadamente 700 árvores em terras da Companhia Geral de Indústrias, no município de São Leopoldo. (OLIVEIRA, 1968)

Desde então, a cultura da acácia negra passou a desempenhar um importante papel no setor florestal no estado do Rio Grande do Sul, onde, de acordo com o IBGE (2013) se encontram 100% dos plantios brasileiros. Schneider et al. (2000) destacam que é uma sólida atividade econômica e que tem trazido benefícios e prosperidade para vários municípios e milhares de famílias, de acordo com o IBGE (2013) a espécie é cultivada em 49 municípios e por mais de 35 mil famílias (AGEFLOR, 2015).

As plantações de acácia-negra têm características multifuncionais, tendo uma ação recuperadora de solos de baixa fertilidade, permitem consórcios com espécies florestais, espécies agrícolas e com animais, e de suas árvores além da madeira, é possível o uso da casca para fins industriais. É uma espécie pioneira de vida curta, que cobre rapidamente o solo, cobertura essa que é rica em nitrogênio, diminuindo assim a relação C/N do material, tendo o potencial de aumentar a ciclagem de nutrientes (BINKLEY et al., 1992; FORRESTER et al., 2005), a fertilidade dos solos (GARAY et al., 2004), a produção de biomassa (FORRESTER et al., 2010; RICHARDS et al., 2010), o sequestro de carbono (RESH et al., 2002; FORRESTER et al., 2006b), melhorar a disponibilidade de nitrogênio mineral (VOIGTLAENDER et al., 2012), enquanto fornece outros benefícios através da diversificação de produtos (KHANNA, 1997; MONTAGNINI, 2000).

Inúmeros consórcios foram relatados da acácia-negra com cultivos agrícolas no primeiro ano de plantio, principalmente em pequenas propriedades no Rio Grande do Sul, como milho, mandioca, melancia e fumo, dependendo da região (Granja, 1979), o que de acordo com Schneider et al. (2001) é um fator de relevância da espécie ao ser cultivada por pequenos produtores, pois aumenta a rentabilidade do investimento.

A acácia-negra é a principal fonte de casca para a indústria de taninos vegetais em nível mundial, utilizados principalmente no curtimento de peles. A partir dos taninos também são produzidos adesivos para chapas de madeira e floculantes para tratamento de água, além de outros produtos como dispersantes, resinas, quelantes e conservantes (MOCHIUTTI, 2007 apud SIMON, 2005), no Brasil essa produção é especialmente oriunda de plantações de acácia-negra (MORA et al., 2001), existem, contudo, outras espécies como o quebracho (*Schinopsis spp.*) (PAES et al., 2006), *Stryphnodendron adstringens* (Martius) Coville, *Dimorphandra mollis* Benth., *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenam, *Psidium guajava* L. e *Myracrodruon urundeuva* (Engl.) Fr. All. (TEIXEIRA et al., 1990; BRANDÃO, 1992; RODRIGUES et al., 1992; MAGALHÃES et al., 1997; CALDEIRA et al., 1998; SANTOS et

al., 2002), que são utilizadas em menor escala. Além disso a madeira da acácia-negra pode ser empregada na indústria de celulose e papel, seu principal destino, e na produção de compensados de madeira; além do seu uso como lenha e carvão (STEIN; TONIETTO, 1997), apresentando também o alto poder calorífico (KANNEGIESSER, 1990), tendo as pontas de troncos, galhos e árvores mortas aproveitadas para a última função apresentada.

Segundo Mochiutti (2007) a madeira ganhou espaço no mercado com sua utilização para aglomerados e celulose, tendo grande valorização com a instalação em 1995 de indústrias processadoras e exportadoras de cavacos. De acordo com Higa (1996) a produção média de madeira aos oito anos é de 200 m³/ha, já Stein e Tonietto (1997) relatam uma produção de madeira de 175 st/ha, Mora (2002) cita a produção de madeira na ordem de 22,8 a 31,4 st/ha/ano e de acordo com a EMBRAPA (2003) a amplitude de produtividade gira em torno dos 10 a 25 m³/ha/ano.

2.2 Eucalipto

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, tem sua origem na Austrália, exceto pelas espécies *E. urophylla* e *E. deglupta* que ocorrem em ilhas na Oceania fora da Austrália. Atualmente, têm-se de 600 a 700 espécies já identificadas, com diferentes exigências quanto à fertilidade de solo, tolerância a geadas e a seca, possibilitando seu plantio em mais de 100 países, todos com importância econômica (CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS - CIFLORESTAS, 2014)

No Brasil, os plantios de florestas começaram há mais de um século. Em 1903, o pioneiro Navarro de Andrade trouxe mudas de Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB, 2015), e segundo a EMBRAPA (2002), com o objetivo suprir as necessidades de lenha, postes e dormentes das estradas de ferro, na região Sudeste. Na década de 50, passou a ser usado como matéria prima no abastecimento das fábricas de papel e celulose. A década de 70 foi marcada pela política de incentivos fiscais para o reflorestamento, que começaram ainda na década de 60. Com esses incentivos foi possível ampliar consideravelmente o estoque de madeira nesses plantios (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA, 2009). Esse período foi considerado um marco na silvicultura brasileira dado os efeitos positivos que gerou no setor. (EMBRAPA, 2002)

A indústria, ainda emergente naquela época, por sua vez, não parou de investir em novas pesquisas e tecnologias, que transformaram o Brasil em líder na produção de celulose de fibra curta, (ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - FLORESTAR, 2015), detendo desta forma uma das melhores tecnologias na silvicultura do eucalipto, atingindo em alguns locais cerca de 60m³/ha/ano de produtividade, em rotações de sete anos (SFB, 2015), possuindo uma média de 39 m³/ha/ano (IBÁ, 2015). Por outro lado, nota-se que, dada as introduções de melhor material genético, associado a um bom manejo florestal, novos patamares de produtividade vêm sendo obtidos pelas empresas florestais que plantam eucaliptos. Por exemplo, o uso de clones nas florestas de eucaliptos é uma tecnologia que vai levar a uma ampliação dos ganhos de produtividade no setor. (EMBRAPA, 2002)

O eucalipto é aplicado em diferentes processos e com diversas finalidades, como produção de celulose e papel, painéis de madeira, serrados e outros produtos sólidos, carvão, lenha industrial, madeira tratada, cavacos de madeira e outros produtos como o óleo essencial em produtos de limpeza, alimentícios, perfumes e remédios e o mel (IBÁ, 2014). Além dos setores industriais, existe grande consumo de madeira, em pequena escala, que não é devidamente quantificado, mas que quando somado representa significativa parcela do consumo total. Trata-se do consumo doméstico de madeira, principalmente como lenha (IPEF, 2005).

Dentre as diversas espécies de eucalipto já catalogadas existe uma que possui grande valor comercial pelo alto teor de celulose e baixo teor de lignina e que têm sido amplamente cultivadas em regiões de inverno chuvoso e temperaturas relativamente baixas, ocupando cerca de 22% da área total de *Eucalyptus* no mundo, sendo muito plantada em Portugal, Chile e Espanha (XAVIER et al., 2007 apud ELDRIDGE et al., 1994) e Uruguai, que se trata do *Eucalyptus globulus*. Porém, no Brasil, essa espécie praticamente não é plantada, apenas em alguns locais no estado do Rio Grande do Sul, devido ao seu baixo rendimento, causado principalmente pela sua difícil adaptação aos climas tropicais (ROSA, 2003), mas devido as suas características madeireiras ela tem sido hibridizada com outras climaticamente mais adaptadas, visando aumentar o rendimento de celulose e reduzir o teor de lignina. (XAVIER et al., 2007). Segundo Repetti (1992) o crescimento dessa espécie é variável, de acordo com as condições de solo e clima, podendo atingir uma produtividade de 40 m³/ha/ano.

O *Eucalyptus globulus* também é conhecido vulgarmente como árvore-da-febre, gomeiro-azul (CUNHA et al., 2003), comeiro-azul, eucalipto, mogno-branco, eucalipto-limão

(LORENZI; MATOS, 2002; CRUZ, 1965), e é a espécie mais cultivada em regiões subtropicais e do Mediterrâneo (PATIL et al., 2014). Segundo Braga (1971) foi a primeira espécie de eucalipto introduzida no Brasil, em 1855.

Na indústria de pasta para papel de fibra curta, é conhecida a importância crescente das pastas de *Eucalyptus* spp. para a fabricação de uma vasta gama de papéis de impressão, escrita, sanitários e domésticos. As pastas de *Eucalyptus globulus* são consideradas de primeira qualidade e comercialmente competitivas (SANTOS et al., 2004), a sua madeira é constituída por fibras de comprimento curto e muito homogêneo, que se caracterizam por uma grande suavidade, um elevado volume específico do papel, uma excelente rigidez, uma grande estabilidade dimensional e fortes resistências em húmido. Além das excelentes características papeleras da fibra, esta espécie em Portugal é considerada de crescimento rápido; e de alto rendimento fabril e permite ainda um baixo consumo de produtos químicos no processo de produção (grupo PORTUCEL SOPORCEL, 2011).

2.3 Plantios Mistos

2.3.1 Biomassa Florestal

Biomassa é a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. E biomassa florestal é toda a biomassa que existe na floresta, ou apenas na sua fração arbórea (SANQUETTA, 2002).

Os estudos de biomassa florestal são realizados com objetivos variados, como para quantificar a ciclagem de nutrientes, a fixação de carbono e propriamente para avaliar o desenvolvimento da floresta; em qualquer uma dessas situações, esses estudos são de grande importância para a tomada de decisões de gestão de recursos florestais (BEHLING, 2014).

Segundo Kramer e Kozlowski (1979), o acúmulo de biomassa é afetado pelos fatores que afetam a fotossíntese e a respiração, como a disponibilidade de luz, temperatura, concentração de CO₂, umidade e fertilidade do solo e doenças, além de fatores internos, incluindo a idade das folhas, forma da copa das árvores, o comportamento estomático, o teor de clorofila e o acúmulo de hidratos de carbono.

As florestas acumulam biomassa através da fotossíntese, e esse acúmulo é diferente em cada local onde ela é medida, variação essa causada por diversos fatores ambientais e por fatores de cada planta (SOARES et al., 2009). Segundo Roy e Ravan (1996) a distribuição da

biomassa em ecossistemas florestais deriva da condição da vegetação, do tipo, da sua estrutura e localização; para Vieira et al. (2008) ela deriva da arquitetura da floresta, da densidade e do volume da madeira; já Silveira et al. (2008) destacaram que a soma dos componentes; biomassa viva acima do solo, biomassa morta acima do solo e biomassa abaixo do solo; resulta na biomassa total do material vegetal.

A alocação da biomassa nos diferentes componentes da árvore (raízes, tronco, galhos, folhas) apresenta grandes mudanças com a idade da planta, bem como depende das condições do sítio, densidade do povoamento e da espécie utilizada (MOCHIUTTI, 2007). Dessa forma, a avaliação do crescimento em biomassa florestal é importante tanto para as indústrias do setor florestal, quanto para os silvicultores que dependem da venda da biomassa (BEHLING, 2014).

A avaliação do potencial produtivo de um sítio pela quantificação da biomassa é uma estratégia fundamental no manejo e planejamento das indústrias de base florestal (REIS et al., 1985; PEREIRA, 1990); e dessa forma o conhecimento sobre a alocação de biomassa é importante para o entendimento dos processos de ciclagem de nutrientes e é importante para definições das estratégias de manejo (SANTANA et al., 2008).

Diante da crescente preocupação ambiental, a sustentabilidade dos plantios comerciais têm sido questionada e a busca por técnicas de manejo florestal que promovam benefícios ao meio ambiente mostra-se como uma tendência no ramo da silvicultura (JOHNSON; CURTIS, 2001), e devido a isso, diversos autores têm estudado e demonstrado as vantagens de crescimento para os consórcios contendo espécies produtivas não-fixadoras de N com espécies produtivas fixadoras de N e discutindo as interações que podem ser responsáveis para que isso aconteça (BINKLEY et al., 1992, 2000; DEBELL et al., 1997; FORRESTER et al., 2006; KHANNA, 1997, 1998; BAUHUS et al., 2000).

O papel da diversidade de espécies no funcionamento do ecossistema é uma questão muito importante e vem atraindo atenção crescente ao longo da última década (LACLAU, 2012). Os plantios mistos apresentam o potencial de aumentar a produção de biomassa e sequestro de carbono (DEBELL et al., 1985; PARROTA, 1999; KAYE et al., 2000; RESH et al., 2002; BINKLEY et al., 2003; BAUHUS et al., 2004) enquanto fornece outros benefícios incluindo o aumento da fertilidade do solo e da ciclagem de nutrientes (BINKLEY et al., 1992a; MONTAGNINI, 2000); e ainda podem funcionar como um sistema silvicultural que

proporciona uma maior diversificação de produtos (EWEL, 1986; KEENAN et al., 1995; MONTAGNINI et al., 1995; DEBELL et al., 1997).

Contudo, segundo Couto et al. (2004), em sistemas mais complexos, como os agrossilvipastoris, a avaliação da produção e alocação de biomassa é mais complexa, devido as interações entre as espécies ao longo do tempo e ao maior número de componentes envolvidos, os autores ainda ressaltam que essas avaliações são indispensáveis para as atividades de manejo sustentável, em relação as práticas silviculturais aplicadas durante o cultivo e colheita do sistema, sobretudo visando um melhor aproveitamento pelas diferentes espécies dos recursos inerentes ao sítio.

Um possível aumento da produção em plantios mistos quando comparados com suas monoculturas tem sido observado para florestas (BALIEIRO et al., 2002, FORRESTER et al., 2004; DeBELL et al., 1985). Apesar de uma provável influência nos resultados devido ao efeito de amostragem (FRIDLEY, 2001), a maior parte dos estudos sugerem que a interação interespecífica aumentou a produção de biomassa total através de um aumento da disponibilidade e uso e/ou uma maior eficiência no uso dos recursos na produção de biomassa quando comparada com a monocultura (RICHARDS, et al., 2010; CARDINALE, et al., 2011).

Em um trabalho conduzido no Hawaí, Debell e Harrington (1993) e Debel et al. (1997), estudaram a produção de biomassa do eucalipto no sistema consorciado com *Albizia* spp., espécie fixadora de N, e os resultados indicaram que a biomassa total aos 10 anos em um consórcio contendo 50% de *Eucalyptus saligna* e 50% de *Albizia falcataria* (L.) Fosferb, foi 30% maior do que o plantio puro de eucalipto fertilizado e 10% maior que a biomassa total dos plantios puros de leguminosa.

De acordo com Balieiro et al. (2002) o *Eucalyptus grandis* W. Hill produziu 1,6 e 6,8 vezes mais matéria seca total do que a *Pseudosamanea guachapele* nos plantios puros e mistos, respectivamente e a absorção de nutrientes pelo *Pseudosamanea guachapele* representou 77,4 e 38,8% do total absorvido pelos *Eucalyptus grandis* nos plantios puros e mistos, respectivamente. Baseado na capacidade de uso dos nutrientes, as espécies leguminosas tiveram uma maior capacidade de absorção de nutrientes e menor capacidade de converter nutrientes em biomassa do que os eucaliptos. Nos consórcios com *Pseudosamanea*

guachapele, o eucalipto melhorou sua capacidade de uso dos nutrientes sem diminuir a produtividade.

No estudo realizado por Viera et al. (2011) foi verificado um aumento significativo na produção de biomassa de copa (folhas e galhos) de *Acacia mearnsii*, quando em consórcio com *Eucalyptus urograndis* (50E:50A), em relação ao seu cultivo monoespecífico. Em trabalho realizado na Austrália, Forrester et al. (2010) encontrou que a produção de biomassa acima do solo em monocultivos e plantios mistos de *E. globulus* e *A. mearnsii*, foi significativamente superior no cultivo misto (50E:50A) (123,2 Mg/ha, sendo: 58,3 Mg/ha de *E. globulus* e 64,9 Mg/ha de *A. mearnsii*), do que no monocultivo do eucalipto (66,6 Mg/ha) e de acácia-negra (78,0 Mg/ha).

Mesmo quando plantios consorciados com espécies fixadoras de N não produzem aumento de produtividade de biomassa aérea, eles promovem outros benefícios como o incremento de matéria orgânica no solo (MOS) e disponibilidade de nitrogênio mineral nas camadas superficiais do solo, reduzindo o risco de danos por pragas e um aumento da variedade de produtos florestais (GARAY et al., 2004; SIDDIQUE et al., 2008). Dessa forma, muitos autores têm demonstrado as vantagens de crescimento para os consórcios de eucalipto com espécies leguminosas e discutindo as interações que podem ser responsáveis para que isso aconteça (BAUHUS et al., 2000; FORRESTER et al., 2006b).

2.3.2 Produtividade

O plantio misto entre espécies fixadoras de Nitrogênio (N) com eucalipto pode favorecer o crescimento e a produtividade dos povoamentos, principalmente devido ao fato de que as espécies da família Fabaceae (leguminosae) provocam melhorias nos atributos químicos do solo, por meio de uma disponibilização de N ao sistema, pela morte e decomposição de raízes finas e, deposição e decomposição da serapilheira (VEZZANI, 1997; FORRESTER et al., 2006a). Ainda, os plantios mistos podem oferecer melhorias na estrutura do solo, devido à diferenciação na ocupação do solo, entre os sistemas radiculares; aumentar o teor de MOS, devido a formação de uma camada de serapilheira composta por maior diversidade de agentes decompositores; e ainda, promover condições ecofisiológicas favoráveis ao crescimento das árvores (GAMA-RODRIGUES, 1997; MENDONÇA et al., 2008).

Existe uma estreita relação entre o abastecimento de N e o aumento da biomassa (LARCHER, 2004), com isso, o N é requerido em grandes quantidades pelas plantas

superiores (BARROS et al., 1990; KHANNA, 1990) e a sua disponibilidade habitualmente limita a produção florestal (RAISON et al., 1987,1992). Grande parte dos organismos não conseguem utilizar o N_2 diretamente da atmosfera, pois necessitam de uma grande quantidade de energia para quebrar a ligação tripla entre os átomos de N (BOTKIN; KELLER, 1995). Para o ecossistema terrestre, na falta de fertilizações nitrogenadas, a fixação biológica de N_2 pela bactéria do gênero *Rhizobium* sp. que vivem em nódulos ou raízes de leguminosas, é a fonte mais importante de N para os organismos vivos (Figura 1), representando um exemplo interessante de mutualismo e/ou simbiose, onde as duas espécies se beneficiam; a leguminosa fornece abrigo e alimento para a bactéria e, recebe o nitrogênio em uma forma assimilável (nitrato e amônio) para a produção de seus aminoácidos e proteínas (VANDERMEER, 1989; BINKLEY; GIARDINA, 1997; MARTINS et al., 2003).

Figura 1 - Ciclo do nitrogênio
Fonte: Martins (2003)

Quando o suprimento de nitrogênio pela mineralização da matéria orgânica e pelas deposições atmosféricas não são suficientes para atender às necessidades das árvores, adições suplementares de nitrogênio, por meio de fertilização mineral ou orgânica - via fixação biológica de nitrogênio (FBN) por leguminosas, podem constituir uma alternativa interessante (COELHO, 2007; BINKLEY et al., 2000; FORRESTER et al., 2006).

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) é uma alternativa tecnológica para aumentar a produtividade agropecuária, minimizar a emissão dos gases de efeito estufa (GEE),

contribuindo para atenuar os efeitos das mudanças climáticas, reduzir o custo da produção, pois a adubação nitrogenada é um dos fatores que mais oneram o custo de produção e mais contribuem para a emissão de GEE na agricultura (BRASIL, sem data).

No Brasil, o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura, também denominado Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), tem a finalidade de organizar o planejamento das ações a serem realizadas para adoção das tecnologias sustentáveis de produção selecionadas para responder aos compromissos assumidos pelo país de redução de emissão de GEE no setor agropecuário (BRASIL, 2012).

O Programa ABC incentiva a adoção dessas tecnologias com capacidade de mitigar emissões de GEE's. A aplicação dessa técnica viabilizará a expansão da adoção da FBN em 5,5 milhões de hectares (BRASIL, 2012).

Numerosos estudos na literatura relatam que o plantio misto de eucalipto e espécies arbóreas fixadoras de N aumenta a produtividade das espécies envolvidas, estando tal fato atrelado às interações ecofisiológicas que ocorrem entre as espécies consorciadas (LACLAU et al., 2008; BOUILLET et al., 2008), pois as espécies que são incapazes de fixar o nitrogênio podem adquiri-lo através dessas associações, devido a atividade de células microbianas (FORRESTER, 2007), contudo, podemos observar que alguns estudos demonstraram ausência de interação entre as espécies, e até mesmo situações em que uma espécie prejudicou o desenvolvimento da outra (KHANNA, 1997; BAUHUS et al., 2000; BALIEIRO et al., 2002; FORRESTER et al., 2006; JESUS; DIAS, 1988; DEBELL et al., 1997; HUNT et al., 1999; PARROTA, 1999). Essa grande variabilidade nos resultados observados dificulta qualquer predição quanto a combinação de espécies e quais tratamentos poderiam apresentar maiores ganhos em produtividade (KLEINPAUL et al., 2010). Estes trabalhos evidenciam a atualidade do tema e sua importância na evolução tecnológica da silvicultura, tanto do ponto de vista econômico-social, como ambiental (COELHO, 2007).

Uma outra variável que possui relação com a produtividade das florestas é o índice de área foliar (IAF) que é definido por Watson (1974) como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2), estando também relacionado com a evapotranspiração de ecossistemas florestais, a interceptação de luz e chuva, transpiração,

fotossíntese, respiração da planta e respiração heterotrófica do solo (através da serapilheira) (LANG; MCMURTRIE, 1992; LE MAIRE et al., 2012).

Segundo Favarin (2002), a fixação de carbono pelas plantas depende da interceptação da radiação e sua conversão em energia química, portanto o IAF pode ser considerado um parâmetro indicativo de produtividade em uma floresta. Dessa forma, a caracterização do IAF é importante em estudos de nutrição, competição, relações solo-água-planta, acúmulo de matéria seca, produção, maturação e qualidade da cultura, e vários outros. Atua como um parâmetro chave para modelos globais e regionais da biosfera por expressar as trocas gasosas e energia da planta (PAIVA, 2009). Tem um papel importante em modelos que calculam a evapotranspiração (SOARES et al., 1997) e produtividade de florestas (VARGAS et al., 2002; STAPE et al., 2004; RODRÍGUEZ et al., 2009).

Behling (2014) ao avaliar o IAF de monocultivos de acácia-negra encontrou um valor médio de 5,35, com um valor mínimo de 3,25 e máximo de 9,10; encontrou ainda uma correlação de 0,76 com a altura total, 0,78 com o volume da copa, 0,77 com a biomassa de galhos, 1,00 com a biomassa de folhas e 0,74 com a biomassa total.

Richards et al. (2010), observaram que a concentração de N foliar aumentou significativamente para as espécies consorciadas com leguminosas arbóreas fixadoras de N em relação às monoculturas de espécies não fixadoras. Os autores sugerem que esse efeito decorre do aumento da taxa de fotossíntese e da eficiência do uso dos recursos do sítio florestal. Outro fator importante na disponibilidade de N no sistema é a sua entrada pela água da chuva que, segundo Balieiro et al. (2007), é intensificada pela espécie leguminosa.

Em sítio com baixos níveis de N aplicados via fertilização os consórcios foram mais produtivos do que as monoculturas de ambas espécies (FORRESTER et al, 2004), contudo, o mesmo não ocorreu em altos níveis de N fertilizado, pois o eucalipto suprimiu a acácia-negra, demonstrando que em baixa disponibilidade de N as espécies fixadoras de N contribuíram para o crescimento da espécie associada (BINKLEY, 1983, 2003; DeBELL et al., 1987; BEETS; MADGWICK, 1988; BINKLEY et al, 1992b, 2003), comportamento similar ocorreu em baixos níveis de fosforo (P), mas o crescimento relativo do *Eucalyptus globulus* foi ainda maior nos consórcios em altos níveis de P. Contudo, as espécies fixadoras de N podem competir fortemente por P e dessa forma reduzir o efeito da maior disponibilidade N no crescimento do eucalipto, então a habilidade de responder a esse aumento na disponibilidade

de N bem como as taxas de fixação de N podem ser mantidas ou aumentadas pela adição de P via fertilização (BINKLEY et al., 1992a; KHANNA, 1998).

Duas vastas revisões de literatura sobre plantios mistos – realizada por Piotto (2008) e Richards et al. (2010) – revelaram que, em geral, as misturas de espécies florestais são mais produtivas do que as monoculturas e que os plantios mistos podem ser fundamentais para satisfazer a necessidade econômica por meio de rotações sortidas e, ainda, fornecer benefícios ecológicos aos sítios de plantio. Na revisão realizada por Richards et al. (2010) os autores utilizaram de uma imensa gama de estudos que envolviam consórcios com espécies leguminosas arbóreas e discutiram acerca dos resultados encontrados, desde as taxas de mineralização do N, passando pela produção e decomposição de serapilheira, até a eficiência no uso dos nutrientes; já Piotto (2008), apesar de também utilizarem vários estudos, o autor discutiu o efeito dos consórcios no incremento anual em altura e DAP, e para isso fez-se uso de uma meta-análise, utilizada para combinar diferentes estudos independentes e medir se o efeito dos tratamentos é grande, moderado, pequeno, ou não significativamente diferente de zero (GUREVITCH et al., 1992).

Silva (2007), em estudo realizado com plantios monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* no Brasil, com 29 meses de idade em espaçamento de 3,0 m × 3,0 m, verificou que o *Eucalyptus grandis* no plantio misto não apresentou diminuição ou aumento no crescimento em área basal em relação ao seu monocultivo. Kleinpaul (2008), também não observou diferença no crescimento em diâmetro de colo, aos dez meses de idade, em monoculturas e plantios mistos de *E. urograndis* e *Acacia mearnsii*, em espaçamento de 4,0 m × 1,5 m.

Em estudo realizado na Austrália, Forrester et al. (2004) observaram que o crescimento inicial da *A. mearnsii* é maior do que o *Eucalyptus globulus* em consórcio. Os autores observaram que os diâmetros de eucalipto foram significativamente maiores em consórcios do que em monoculturas, aos quatro anos de idade, sendo que essas diferenças aumentaram com o tempo, quando Forrester et al. (2010), analisaram um povoamento aos 15 anos de idade, observaram que no cultivo misto (50%E:50%A) o diâmetro à altura do peito (*A. mearnsii* = 14,1 cm e *E. globulus* = 15,0 cm) foi significativamente superior à monocultura do eucalipto (11,8 cm) e da acácia-negra (11,7 cm).

Segundo Forrester et al. (2004) os consórcios entre *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* foram mais produtivos do que as monoculturas, sendo que a produtividade do eucalipto atingiu 80% daquela apresentada por sua monocultura, porém com a metade do número de árvores. Neste mesmo trabalho os autores observaram que a *Acacia mearnsii* apresentou maior crescimento em altura no consórcio com o *Eucalyptus globulus* do que com plantas da própria espécie, principalmente a partir dos cinco anos de idade do povoamento. A maior produção de madeira nos plantios mistos confirma as observações feitas por Binkley et al. (1992) e Debell et al. (1997), de que a maior produção de biomassa para *Eucalyptus saligna* ocorre em plantios mistos.

No estudo proposto por Balieiro et al. (2002) o *Eucalyptus grandis* apresentou crescimento superior do que a *Pseudosamanea guachapele* em todos os sistemas de plantio (puros ou mistos), sendo que a média da altura, diâmetro do fuste, volume de madeira e biomassa total não foram significativamente diferentes entre os tratamentos. Estes mesmos autores afirmam que a produtividade do eucalipto nos consórcios não foi significativamente diferente daquela observada em sua monocultura, considerando que nos consórcios haviam metade do número de árvores da monocultura, e o maior incremento por planta nos consórcios pode ser atribuído ao efeito de plantios consorciados entre eucalipto e espécies fixadoras de N. Os autores destacam ainda que pelo menos parte dessa vantagem pode ser atribuída à maior interceptação de luz pelas plantas de eucalipto nos consórcios, como consequência de seu domínio sobre a leguminosa *Pseudosamanea guachapele*.

No trabalho de Vezzani et al. (2001), embora o eucalipto consorciado tenha sido favorecido pelo maior suprimento de N da acácia-negra, possuindo no consórcio 96 g/planta de N, enquanto que na monocultura continha 79 g/planta de N, analisando-se folhas e galhos, não foram observados resultados significativos quanto ao crescimento em altura das plantas. Silva (2007), avaliando plantios monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, com 29 meses de idade, também não verificou influência significativa do consórcio no crescimento em altura. O mesmo foi verificado por Kleinpaul (2008), aos dez meses de idade, em monoculturas e plantios mistos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii*.

Quando Passos (1990) acompanhou o comportamento inicial do *Eucalyptus grandis* em plantio consorciado com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), testando diferentes números de fileiras de feijão entre as linhas de eucalipto, variando de 2 a 5 fileiras; e concluiu que no

sistema consorciado as árvores de eucalipto apresentaram maiores valores para DAP, altura, volume cilíndrico e de biomassa (lenho, casca, galho, folha e total) do que em sua monocultura; já para o feijão o sistema com três fileiras foi o mais produtivo; e ainda segundo o autor o sistema proporcionou já no primeiro ano lucro ao produtor rural. Beltrame et al. (2007) ao utilizarem o feijão guandu (*Cajanus cajan*) na restauração de florestas tropicais concluíram que a leguminosa auxiliou de maneira geral o desenvolvimento das espécies florestais, reduzindo a mortalidade e aumentando a área basal e altura média das árvores.

Parrota (1999) ao consorciar o *Eucalyptus robusta* (E) com as leguminosas *Leucaena leucocephala* (L) e *Casuarina equisetifolia* (C), com os tratamentos 100%E, 100%L, 100%C, 50%C:50%E, 50%E:50%L e 50%C:50%L. Para *Leucaena*, o DAP variou entre 5,8 - 7,6 cm aos quatro anos de idade e entre 7,5 - 8,0 cm aos 7,5 anos; e os tratamentos não foram significativamente diferentes ao longo destes períodos, o DAP do eucalipto variou de 10,0 - 11,0 cm aos quatro anos, e entre 12,9 - 14,0 cm aos 7,5 anos, sem diferenças significativas entre os entre os tratamentos, para a *Casuarina* variou entre 7,7 - 10,0 cm aos quatro anos e foram significativamente superior no tratamento misto com o eucalipto do que na monocultura; aos 7,5 anos, o DAP variou entre 11,4 - 14,0 cm sem diferenças significativas entre os tratamentos. A média de altura das árvores aos quatro anos variou de 8,4 - 9,7 m, 9,4 - 10,9 m, e 9,7 - 12,0 m para *Leucaena*, *Eucalyptus*, *Casuarina*, respectivamente. Nesta idade, o *Eucalyptus* e *Casuarina* no consórcio, foram significativamente superiores do que em suas monoculturas.

Paulo et al. (2001) estudaram a produtividade do café apoatã (*Coffea canéfora*) em consórcio com as leguminosas, mucuna-anã (*Stizolobium deeringeanum* Bort.) crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), crotalária espectabilis (*Crotalaria spectabilis* Roth.), guandu (*Cajanus cajan* L. Millsp.) e soja IAC-9 (*Glycine max* L. Merrill), e uma testemunha para o café; e concluíram que os sistemas consorciados com a soja, a mucuna-anã e a crotalária espectabilis não diminuiu a produção do café.

Contudo, segundo Forrester et al. (2006c) um plantio misto bem sucedido é aquele em que a produtividade das espécies envolvidas aumenta em relação ao seu monocultivo. Mas é difícil prever a combinação de espécies e sítios que poderiam apresentar esses benefícios (KLEINPAUL et al., 2012) ou restrições ao crescimento, devido às características intrínsecas que cada espécie apresenta, nos diferentes sítios (VIERA et al., 2011).

No entanto, várias questões ainda necessitam ser avaliadas como: o arranjo de disposição das plantas (BOUILLET et al., 2013), as proporções ótimas de cada espécie, a dinâmica do crescimento para os consórcios de espécies não-fixadoras de nitrogênio com espécies fixadoras de nitrogênio (COELHO et al., 2007), por quanto tempo a leguminosa arbórea fixará nitrogênio nos povoamentos mistos e se as interferências silviculturais podem influenciar na dinâmica de fixação de nitrogênio conforme a idade do povoamento (VIERA et al., 2013).

Ainda pouco se sabe sobre as melhores combinações de plantios mistos e o potencial desses sistemas para a produção agrícola (KLEINPAUL et al., 2010), dessa forma, diversos modelos de plantio (arranjos) têm sido testados quando são estudados os consórcios entre espécies produtivas fixadoras e não fixadoras de N, sendo uma alternativa para se atingir a sustentabilidade desses plantios contendo duas espécies de grande capacidade produtiva; como exemplo podemos citar os arranjos implantados no Congo e no Brasil por Bouillet et al. (2013) e no Brasil por Le Maire et al. (2012), que foram: 100% *Acacia mangium*, 100% *Eucalyptus* spp., 100% *Eucalyptus* spp. + adubação nitrogenada, 25% *Acacia mangium*: 100% *Eucalyptus* spp., 100% *Eucalyptus* spp. : 50% *Acacia mangium*, 100% *Eucalyptus* spp. : 100% *Acacia mangium*, 50% *Acacia mangium* : 50% *Eucalyptus* spp., por BINI et al. (2013) foram testados, no Brasil, o 100% *Acacia mangium*, 100% *Eucalyptus grandis*, 100% *Eucalyptus grandis* + adubação nitrogenada, 50% *Acacia mangium* : 50% *Eucalyptus grandis*, por Laclau et al. (2012) e Voigtlaender et al. (2012) que utilizaram o 100% *Acacia mangium*, 100% *Eucalyptus grandis*, 50% *Acacia mangium* : 50% *Eucalyptus grandis*, Bristow et al. (2006), na Austrália, implantou os: 100% *Eucalyptus pellita*, 100% *Acacia peregrina*, 75% *Eucalyptus pellita* : 25% *Acacia peregrina*, 50% *Eucalyptus pellita* : 50% *Acacia peregrina*, 25% *Eucalyptus pellita* : 75% *Acacia peregrina*; Kleinpaul (2008) e Viera et al. (2011), ambos no estado do Rio Grande do Sul no Brasil, aplicaram os arranjos: 100% *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, 100% *Acacia mearnsii*, 75% *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*: 25% *Acacia mearnsii*, 50% *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* : 50% *Acacia mearnsii*, 25% *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* : 75% *Acacia mearnsii*, Vezzani et al. (2001) também no Rio Grande do Sul testou o 100% *Eucalyptus saligna*, 100% *Acacia mearnsii*, 50% *Eucalyptus saligna* : 50% *Acacia mearnsii*. Khanna (1997) e Forrester et al. (2004), utilizando as mesmas espécies empregadas no estudo corrente, porém na Austrália, utilizaram os arranjos: 100% *Eucalyptus globulus*, 100% *Acacia mearnsii*, 75% *Eucalyptus globulus* : 25% *Acacia mearnsii*, 50% *Eucalyptus globulus* : 50%

Acacia mearnsii, 25% *Eucalyptus globulus* : 75% *Acacia mearnsii*, outros autores, como Parrota et al. (1999), Baliero et al. (2007), Binkley (2003), Mendonça et al. (2008) e Coelho et al. (2007); utilizaram esses mesmos arranjos citados acima, com diferentes espécies nos consórcios.

Apesar de toda essa variação nos arranjos, segundo Forrester et al. (2005) com base em estudos publicados sobre plantios mistos, o arranjo 50%:50% foi o mais ou um dos mais produtivos, quando se visava alcançar uma produtividade elevada para ambas espécies, por isso segundo os autores a seleção de proporções de espécies é um fator menos crítico quando comparado com as diferentes formas de plantar as espécies ou com os diferentes sítios; observado isso indicaram que para pesquisas futuras é mais interessante aplicar essa mesma proporção, explorando mais recursos ao examinar as diferentes formas de se plantar as espécies envolvidas e replicando os testes em diferentes sítios; Dobner Júnior et al. (2009) pensando em diferentes modelos de plantio avaliou o efeito da cobertura de *Pinus taeda* na proteção contra geadas no crescimento de plantas jovens de *Eucalyptus dunni*. Tendo isso em mente é importante pensar em arranjos que visem também a facilidade de colheita, pois nesse tipo de consorcio temos que as espécies envolvidas possuem grande capacidade produtiva.

Dentre os diversos fatores que podem influenciar a produção florestal, o espaçamento exerce um papel fundamental no estabelecimento, condução da floresta e custos de produção, uma vez que podem influenciar a taxa de crescimento das árvores, a qualidade da madeira, a idade de corte, bem como práticas de implantação, manejo e colheita (BALLONI; SIMÕES, 1980). A seleção do espaçamento inicial afeta a ocupação do sítio, o tamanho médio da tora e qualidade da madeira, fator chave do componente da economia da plantação (PINKARD; NIELSEN, 2001).

Quando Schneider et al. (2000) estudaram o crescimento da acácia-negra em diferentes espaçamentos concluíram que, o crescimento em DAP (cm) e altura total (m) foi diretamente proporcional ao tamanho do espaçamento; a altura dominante (m) não sofreu influência do espaçamento e o crescimento em área basal (m²/ha), volume com casca (m³/ha) e o peso de casca verde (Kg/ha) foram inversamente proporcionais ao tamanho do espaçamento. Outros estudos para a acácia-negra ainda indicaram que quanto menor o espaçamento maior a produção de madeira e casca por hectare em menor idade, porém com menor diâmetro médio por árvore, menor densidade da madeira e menor teor de tanino na casca (SCHNEIDER et al.,

2000; SIMON, 2005), e que maiores densidades de plantio também provocam maior mortalidade de plantas em idades mais jovens (SCHNEIDER et al., 2005).

Reiner et al. (2011) avaliou o crescimento e a produção de *Eucalyptus dunni* submetidos a diferentes espaçamentos, e concluíram que o crescimento em altura (m) não foi influenciado pelos diferentes espaçamentos, já o DAP (cm) foi influenciado, apresentando valor significativamente superior no espaçamento mais amplo, esse mesmo comportamento foi observado no volume individual médio das plantas ($\text{m}^3/\text{indivíduo}$); contudo quando observaram a produção por unidade de área (m^3/ha), o resultado foi inversamente proporcional ao tamanho do espaçamento, ou seja, com o espaçamento mais adensado sendo significativamente superior aos demais. Resultados semelhantes foram encontrados por Berger et al. (2002) para o *Eucalyptus saligna*.

Em resumo, Campos et al. (1990), Schneider (1993), dentre outros confirmam a influência do espaçamento entre árvores sobre as características de crescimento (volume, diâmetro e/ou altura) e sobrevivência dos povoamentos. Já é consagrado, com poucas contestações, que espaçamentos reduzidos produzem diâmetros menores, sendo que, em termos de produção total por área, estes apresentam maior área basal e volume por hectare. O contrário ocorre em maiores espaçamentos.

De acordo com Oliveira Neto et al. (2003), o espaçamento a ser utilizado deve ser selecionado em função do produto desejado, uma vez que, em espaçamentos amplos a produção de matéria seca da parte aérea e, principalmente, de madeira por árvore é elevada, em razão de seu maior crescimento diamétrico, enquanto que em espaçamentos reduzidos corre maior produção de biomassa por unidade de área, devido ao maior número de indivíduos.

O espaçamento, além de influenciar no crescimento e produtividade, é um dos fatores que mais interferem na uniformidade do plantio, visto que podem causar o aumento da competição por recursos (FORD, 1975; NILSSON et al., 2002; THOMAS; WEINER, 1986); reduzindo a uniformidade entre árvores e aumentando a quantidade de árvores dominadas, as quais possuem menor eficiência de utilização dos recursos do meio comparadas com às árvores dominantes (BINKLEY et al., 2002), dessa forma a decisão de adotar um determinado espaçamento e arranjo de plantio depende do conjunto de fatores de natureza ambiental, silvicultural e econômico-financeira (ZOBEL, 1987). A densidade de plantio é uma variável

de grande interesse, em virtude da constante introdução de novas espécies, procedências e clones, bem como devido à expansão de novos projetos florestais em sítios distintos (STAPE, 1995)

Diversos estudos mostraram que a redução do espaçamento aumenta significativamente o número de árvores dominadas, reduzindo a sobrevivência e podendo resultar em perdas de produtividade (MORA, 1986; SCHONAU, 1984; SILVA, 2006; STAPE, 1995); nesse sentido Hakamada (2012) concluiu que a produtividade florestal se mostrou positivamente correlacionada com a uniformidade de plantio e que para um determinado sítio, a produtividade aumenta com o aumento da uniformidade de tamanho das árvores; Silva (2005) concluiu que a uniformidade do plantio diminuiu com a redução do espaçamento

2.4 Modelos de crescimento e produção

O crescimento das árvores se dá pelo crescimento do caule, dos ramos e das raízes, que podem ser designados genericamente como eixos. Portanto, uma árvore cresce por meio do alongamento ou engrossamento dos eixos ou pela ramificação na copa ou nas raízes, que é a formação de novos eixos a partir dos já existentes. Alongamento e engrossamento são processos aditivos de crescimento e ocorrem em locais específicos dos eixos, os meristemas. O crescimento causado pelos meristemas apicais é chamado crescimento primário, enquanto o promovido pelo câmbio é o secundário. Portanto o crescimento em altura, o aumento das dimensões da copa e do sistema radicular é resultado do crescimento primário, já o aumento do diâmetro do tronco, dos ramos e raízes, que traz como consequência o crescimento em volume e massa lenhosa, é resultado do crescimento secundário (BATISTA et al., 2004).

Em termos florestais, o crescimento pode ser definido, como sendo a mudança em um atributo do povoamento, dentro de um período de tempo estabelecido. Logo, crescimento é o conceito biológico da taxa de produção e a produção é o total acumulado de um determinado intervalo de tempo. Tal crescimento é definido na literatura como incremento corrente anual (ICA) e corresponde ao valor do incremento volumétrico no período de um ano (DEMOLINARI, 2006), suas curvas são um importante indicador da taxa decréscimo de uma floresta, mostrando a idade onde a taxa de crescimento é máxima.

O crescimento é resultado da interação de duas forças opostas. O componente positivo, mais fortemente manifestado no desenvolvimento de um organismo, representa a tendência natural para a multiplicação exponencial. Esse componente é associado com o potencial

biótico, atividade fotossintética, absorção de nutrientes, metabolismo construtivo, anabolismo, etc. O componente oposto representa as restrições impostas pelos fatores externos (competição, limitação de recursos, respiração e estresse) e internos (mecanismos auto regulatórios, e o envelhecimento). Esses fatores que afetam negativamente o crescimento tem sido referido como resistência ambiental, o metabolismo destrutivo, catabolismo, respiração, e assim por diante (ZEIDE, 1993).

O manejo dos recursos florestais exige dos gestores florestais a tomada de decisão considerando os mais variados elementos de ordem técnica, ambiental, social, política e principalmente econômica. Este fato originou diversos estudos com o intuito do desenvolvimento de técnicas e ferramentas para auxiliar os gestores florestais na tomada de decisão (BINOTI, 2012).

O uso de modelos matemáticos tem uma longa tradição na área florestal. Desde o início do plantio de florestas manejadas, surgiu o desejo de influenciar e prognosticar o crescimento com o fim de dominar a produção. Esse desejo tem as suas raízes nas circunstâncias especiais da produção florestal (GOMES, sem data).

É interesse do profissional ligado ao manejo de florestas quantificar e prognosticar, com confiabilidade, o estoque de suas florestas. A quantificação do crescimento e da produção é de fundamental importância no planejamento florestal, pois fornece informações que subsidiam a tomada de decisões relacionadas ao manejo, as quais são baseadas em informações sobre condições de recursos florestais atuais e futuros (MELO, 2014).

Além de garantir maior eficiência na coleta de dados para o ajustamento de modelos, é importante definir claramente o tipo de modelo mais apropriado para uma situação particular, e para isso é preciso estabelecer a diferença entre modelos empíricos e modelos mecanísticos. Modelo empírico consiste em polinômios ou outro tipo de relações funcionais estabelecidas de maneira empírica (CAMPOS; LEITE, 2009). Modelo mecanístico é construído com base em pressuposições e, ou, conhecimentos biológicos (CLUTTER et al., 1983) ou com base em processos de crescimento (VANCLAY, 1994).

Ao se escolher um modelo de crescimento e produção o manejador florestal deve levar em conta o tipo de informação pretendida, o nível de detalhamento necessário e o tipo de dados disponíveis (NASCIMENTO, et al., 2010).

Segundo Strack (1984), modelos são abstrações e simplificações de processos com o fim de descrever e estimar os seus resultados finais, bem como seu transcurso. De todas as técnicas de modelagem, a formulação matemática, quando passível de utilização, é a menos restritiva (RODRIGUEZ, 2010).

Dijkstra (1984), ressalta que as outras alternativas apresentam limitações piores, e lista alguns dos problemas que podem às vezes ocorrer quando se usam recursos matemáticos para modelar um problema real: possibilidade de omissão de relações importantes; tamanho e complexidade; simplificação excessiva das relações consideradas; e no outro extremo, detalhamento excessivo dessas relações. Todavia, essas desvantagens podem ser encaradas positivamente, pois geralmente são detectadas nos próprios modelos e expõem as pressuposições feitas pelo tomador de decisões (RODRIGUEZ, 2010).

Existem diversos tipos de modelos capazes de prever o crescimento e a produção, como os modelos de árvores individuais, distribuição diamétrica e os modelos em nível de povoamento. Esses últimos também são conhecidos como modelos do tipo povoamento total, não explicam diretamente a variação do tamanho das árvores dentro do povoamento, eles estimam o crescimento, e, ou, a produção a partir de atributos em nível de povoamento, tem como melhores representantes os modelos de densidade variável, além dos tipos empírico e normal (CAMPOS; LEITE, 2009).

Estes modelos podem ser divididos conforme as suas relações funcionais, isto é, os modelos podem estimar a produção em função da idade $Y = f(I)$, idade e sítio $Y = f(I, S)$ ou ainda, idade, sítio e área basal $Y = f(I, S, B)$ (NASCIMENTO et al., 2010).

As relações funcionais do tipo $Y = f(I)$ podem ser usadas em povoamentos homogêneos, isto é, onde não houver variações significativas de densidade e capacidade produtiva. As relações funcionais do tipo $Y = f(I, S)$ já resultam em estimativas mais consistentes, permitindo avaliar o efeito da capacidade produtiva. Já as relações do tipo $Y = f(I, S, B)$ resultam em informações mais detalhadas, pois são diferenciadas por índice de local e densidade inicial. Porém, é importante ressaltar que a simples consideração de várias variáveis não garante consistência quanto aos seus efeitos, é necessário que o conjunto de relações funcionais seja compatível e consistente (CAMPOS; LEITE, 2009). Três propriedades às quais são desejadas em um modelo foram descritas por Levins (1996), precisão, exatidão e generalidade. Normalmente uma dessas condições não são totalmente

atendidas, embora um nível muito aceitável pode ser atingido com as duas remanescentes. De acordo com Burkhart (1997), no caso dos modelos tradicionais, uma maior importância deve ser dada para a precisão, enquanto a generalização é a menos importante.

Segundo Nascimento (2010), entre os modelos mais empregados para estimar a produção por unidade de área podem ser citados o de Chapman-Richards (1961), o de Schumacher (1939) e o de Clutter (1963).

O modelo de Chapman-Richards é uma expressão matemática de uma hipótese essencial relativa a causa do fenômeno do crescimento, de modo que os parâmetros do modelo pelo menos tenham uma interpretação bruta fisiológica ou biológica, e é como qualquer modelo, representa uma versão idealizada ou simplificada do fenômeno real (PIENAAR, 1973).

Segundo Zeide (1993) a marca registrada do modelo de Chapman-Richards é sua flexibilidade, e um dos principais motivos disso é, o fato de apresentarem um ponto de inflexão com localização proporcional ao valor máximo atingido pela variável a ser modelada (BROWN; ROTHERY, 1993).

O modelo de crescimento e produção do tipo povoamento total mais difundido no Brasil é o modelo de Clutter, e constitui de um sistema de equações para prognosticar o volume corrente e futuro, taxa de crescimento volumétrico e em área basal e área basal futura. Este é um modelo do tipo povoamento total, de densidade variável, compatível, explícito e consistente. É do tipo povoamento total porque a variável estimada é o volume por unidade de área, independentemente da classe de tamanho da árvore. É do tipo densidade variável porque permite estimar a produção para diferentes níveis de área basal inicial. Tem características compatíveis, pois a equação de crescimento quando integrada fornece a equação de produção, e a derivada desta resulta na equação de crescimento. Trata-se de um modelo explícito, porque a produção em volume é calculada diretamente. É consistente, pois as estimativas podem ser obtidas projetando-se a área basal ano a ano, ou diretamente de um para qualquer outro ano, com intervalos irregulares e, ainda, porque, ao estimar a produção em área basal para uma mesma idade, resulta em valores idênticos àqueles observados (CAMPOS; LEITE, 2009).

A equação logística (VERHULST, 1838) é provavelmente a mais famosa equação em ecologia (ZEIDE, 1993), e oferece uma maneira conveniente de restringir predições para o intervalo (0, 1), e fornece uma distribuição (binária) realista dos erros (VANCLAY, 1994). O

ponto de inflexão corresponde à metade do tamanho final e a taxa de crescimento diminui linearmente com o tamanho. Apesar de suas premissas insustentáveis e a falta de precisão (ZEIDE, 1989), a equação logística é ainda muito utilizada em pesquisas (ZEIDE, 1993).

2.5 Classificação da Capacidade Produtiva

O manejo de povoamentos equiâneos exige conhecimento sobre seus três elementos essenciais: a classificação de terras e da capacidade produtiva; prescrições; e predição de estoques de colheita (DAVIS; JOHNSON, 1987). Portanto, a classificação da capacidade produtiva está presente em dois dos três elementos essenciais ao manejo florestal (OLIVEIRA et al., 2008).

A capacidade produtiva, ou qualidade do local, pode ser definida como o potencial para produção de madeira ou outro tipo de produto de determinado local, para determinada espécie ou clone, podendo ser expressa de modo empírico em alta, média e baixa, ou por meio de algum índice quantitativo, como o índice de sítio (CAMPOS; LEITE, 2009), tendo influências das condições ambientais existentes (clima e solo) e técnicas silviculturais empregadas, sendo um indicador da produtividade potencial (LEITE et al., 2011).

Para quantificar a capacidade produtiva de povoamentos equiâneos, o método mais usual em manejo florestal é a determinação de índices de local, estimados em função de dados de altura e idade das árvores. Esse método tem se tornado popular, principalmente porque quantifica a capacidade produtiva do local, através de uma expressão numérica, e não apenas o descreve de forma qualitativa e, portanto, subjetiva (HUSCH et al., 1993).

Tanto para florestas naturais quanto para as plantadas, as curvas de índice de sítio são normalmente utilizadas para descrever o desenvolvimento em altura dominante (FLEWELLING, 2001), ou seja, relacionar a altura dominante com a idade das árvores (CAMPOS et al., 1985). Segundo Nanang (1999), os silvicultores tem se interessado na especificação e estimação de curvas de índice de sítio recentemente, que constitui um método prático e consistente de avaliação da qualidade do local, pois todos os fatores ambientais são refletidos de modo interativo no crescimento em altura, a qual também está relacionada com o volume (CAMPOS; LEITE, 2009) e não é afetada significativamente pela densidade do povoamento (HUSCH et al., 2003; CARMEAN, 1975); para Flewelling (2001), a densidade afeta o crescimento em altura, só que acredita-se que esse efeito é geralmente pequeno e usualmente não é considerado no desenvolvimento de curvas de índice de sítio.

Índices de local são utilizados como inputs em modelos de crescimento e produção (CLUTTER, 1963). Nesses modelos é assumido que o crescimento depende da idade, do grau de ocupação da área (geralmente área basal) e da capacidade produtiva, expressa pelo índice de local. A partir destes modelos é possível simular o crescimento do povoamento com ou sem intervenções de desbaste (GÖRGENS et al., 2007), para isso, é necessário definir um modelo que represente a relação da altura com a idade, bem como definir o comportamento da família de curvas geradas pelo modelo (DIAS, et al., 2005).

Embora a modelagem do crescimento e da produção florestal tenha avançado significativamente no Brasil, principalmente para plantios comerciais de pinus e eucalipto, percebe-se a necessidade de estudos sobre o crescimento de povoamentos comerciais, visando ao aprimoramento da modelagem do crescimento e da produção florestal, para proporcionar aos manejadores informações precisas sobre a época correta de colheita ou de intervenções como desbastes, além de informações sobre a adequação de espécies e, ou, procedências para determinadas localidades, entre outros (DEMOLINARI et al., 2007).

Schneider e Silva (1980) efetuaram a classificação de sítios de *Acacia mearnsii*, sendo definidos cinco índices de sítio, numa amplitude de 12 m a 20 m, com intervalo de 2 m entre classes, na idade de referência de 5 anos, para a região de ocorrência no estado do Rio Grande do Sul.

As curvas geradas podem se diferenciar em anamórficas e polimórficas, disjuntas e não-disjuntas. Dados de alturas/idade originados de parcelas permanentes e dados de análise de tronco podem ser utilizados na construção de curvas anamórficas e polimórficas. Porém, dados de parcelas temporárias geralmente só podem ser utilizados para construção de curvas anamórficas (CLUTTER et al., 1983).

Existem vários estudos sobre a classificação da capacidade produtiva, mediante a construção de curvas de índice de local. Nesses estudos, é possível verificar que, na maioria das vezes, as classificações são feitas pelo método da curva-guia, com dados de parcelas permanentes ou de análise de tronco (OLIVEIRA et al., 1998); segundo Nanang (1999) esse método tem-se tornado muito popular.

Em síntese, a estimativa do índice de sitio assim como o mapeamento dos sítios clarifica as possibilidades e riscos para o manejo de florestas, servindo como base para o planejamento de curto e longo prazo, seja local ou regional (SCOLFORO, 1992).

2.6 Relação Hipsométrica

Nos inventários florestais a medição do DAP é muito mais fácil de ser realizada em comparação à altura, por isso muitos pesquisadores têm estudado a relação que há entre o diâmetro e a altura, denominada relação hipsométrica, com o interesse em diminuir o custo e o tempo de coleta de dados de altura no campo (JORGE et al., 2009).

Os inventários florestais são tradicionalmente conduzidos a medir a altura total de apenas algumas árvores em cada parcela, método esse proposto por Ker e Smith (1957). A altura das árvores restantes é estimada por meio das equações hipsométricas, geralmente geradas por meio de análises da regressão, relacionando a altura total com o DAP (ANDRADE et al., 2011), podendo assim serem usadas na determinação de alturas dominantes, para o cálculo de volumes de árvores ou de povoamentos, bem como do cálculo da produtividade do sítio (VANCLAY, 1994).

Segundo Souza (2006) e Colbert et al. (2002), a medição das alturas das árvores é uma tarefa onerosa e sujeita a grandes erros, por isso a relação hipsométrica é empregada, e estão reduzindo o tempo e o custo do levantamento de dados no inventário florestal (ZANON, et al., 1996).

A relação hipsométrica não apresenta uma relação biológica bem definida, tal como altura e idade ou diâmetro e idade, havendo grande variabilidade em altura para um mesmo diâmetro em sítio e idade diferentes (CHAPMAN; MEYER, 1949).

Segundo Leite et al. (2003) existem dois erros nos inventários florestais, os de amostragem e os de não-amostragem. Os erros de amostragem são controláveis, sendo dependente, por exemplo, do método de amostragem e do tamanho das amostras. Por outro lado, os erros de não-amostragem são de difícil identificação. São várias as fontes deste segundo tipo de erro, dentre elas o uso de equações inadequadas para estimar a altura das árvores.

Vários modelos de relação hipsométrica são citados na literatura florestal, porém esses devem ser analisados e testados para uma melhor precisão e eliminação de erro (JORGE et al., 2009). Segundo Finger (1992), para se obter um modelo matemático para descrever a relação hipsométrica, devem-se testar vários modelos e selecionar aquele de melhor ajuste, segundo o critério de seleção usado e de acordo com Drapper e Smith (1966) as melhores equações

devem ser escolhidas com base nas estatísticas de coeficiente de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$); erro padrão da média em percentagem ($S_{yx}\%$) e na distribuição de resíduos.

Os modelos mais simples empregam somente a variável independente DAP. Esse tipo de modelo nem sempre resulta em estimativas precisas, uma vez que a altura das árvores é dependente também da capacidade produtiva do lugar, entre outros fatores (CAMPOS; LEITE, 2009), segundo Arcangeli et al. (2013), precisam ser definidos para cada parcela e em cada medição, mas podem fornecer modelos com menor imparcialidade, porém muitas vezes é impraticável por ser muito dispendioso. Porém, como a relação hipsométrica é influenciada pela idade, sítio, densidade, tamanho da copa e espécie (LOETSCH et al., 1973, 1982; FINGER, 1992; SCOLFORO, 1997), a inclusão de variáveis do povoamento, como a altura dominante, o índice de local e a idade, podem resultar em estimativas de altura mais precisas (CAMPOS; LEITE, 2009), permitindo diferenciar a altura total de árvores de mesmo DAP, em locais com capacidade produtiva diferentes (LEITE et al., 2003).

Muitas outras formas funcionais de equação hipsométrica são mencionadas na literatura especializada, tais como, alguns exemplos encontrados em Curtis (1967), Campos (1979), Lopes et al. (1998), Knowe (1994), Nigh e Love (1999), Jayaramam e Lappi (2001), Eerikainen (2003), Pereira (2000), Sadiq e Smith (1983), Arabatzis e Burkhart (1992), Zakrzewski e Ter-Mikaeian (1994), Garcia (1998), Batista et al. (2001), Caldeira et al. (2002), Andrade et al. (2011), Leite et al. (2003).

2.7 Modelos de Distribuição Diamétrica (MDD)

Para o manejo adequado de um povoamento florestal o conhecimento da sua estrutura é fundamental. Esta consiste na distribuição de espécies e dimensões das árvores em relação a uma unidade de área, resultado dos hábitos de crescimento das espécies, das condições ambientais e práticas de manejo (BARTOSZECH et al., 2004).

Como o próprio nome sugere, modelos de distribuição diamétrica (MDD) estimam o número de árvores por hectare por classe de diâmetro nas idades presente e futura. O emprego a partir daí, de uma equação de volume, de *TAPER*, ou de razão volumétrica, permite estimar a produção por classe, sendo significativos para situações em que há interesse em multiprodutos da madeira, auxiliando assim, na tomada de decisão sobre intervenções a serem realizadas no povoamento, como desbaste, desrama e colheita (CAMPOS; LEITE, 2009), bem como permitir uma análise econômica mais precisa (BURKHART et al., 1981; BAILEY;

DELL, 1973; UMAÑA, 1997), visto que quase a totalidade dos coeficientes operacionais das operações de colheita e transporte são influenciados pelas dimensões das árvores (CLUTTER et al., 1983) e também fornecem informações úteis para a comparação entre as parcelas (SANQUETTA et al., 2014).

Segundo Clutter et al. (1983), esses modelos permitem estimar o crescimento e a produção por classe de tamanho (diâmetro) e tem como característica comum o uso de uma função de densidade de probabilidade (*f.d.p.*). São utilizadas na área florestal para descrever a estrutura diamétrica do povoamento (MALTAMO et al., 2000), e definem a probabilidade associada com cada valor da variável em estudo, ou da classe de diâmetro nesse caso particular, ou, ainda, ela descreve a distribuição de frequência relativa e, ou, absoluta dos vários tamanhos de árvores (CAMPOS; LEITE, 2009). De acordo com Machado et al. (2000) o estudo da distribuição diamétrica, derivada de apropriadas funções de densidade de probabilidade, tornou-se um relevante aspecto no planejamento das atividades florestais, além de ser uma ferramenta eficaz para prever o crescimento da árvore.

Diversos tipos de distribuições são usados para descrever a estrutura diamétrica de um povoamento, entre os quais destacam: distribuição gama (NELSON, 1964), log-normal (BLISS; RENKER, 1965), beta (CLUTTER; BENNETT, 1977), Johnson's S_B (HAFLEY; SCHUREUDER, 1977) e distribuição Weibull (WEIBULL, 1951).

Desde que utilizada no setor florestal por Bailey e Dell (1973), a função Weibull tem sido amplamente difundida e utilizada na área florestal (CLUTTER; ALLISON, 1974; HAFLEY; SCHREUDER, 1977; MATNEY; SULLIVAN, 1982), e está se tornando muito popular para descrever as distribuições diamétricas (NAGEL; BIGING, 1995; BIGIND et al., 1994; GEROLD, 1988; SHIVER, 1988; ZUTTER et al., 1986; SHIFLEY; LENTZ, 1985; LITTLE, 1983; BAILEY; DELL, 1973) devido à sua flexibilidade e capacidade de ajustar várias distribuições desde o J invertido até uma normal (NAGEL; BINGIND, 1995; BAILEY; DELL, 1973).

Segundo Guimarães (1994) e Eisfeld et al. (2005), a função Weibull apresenta superioridade na descrição da estrutura diamétrica de povoamentos florestais, quando comparada com as demais funções.

Nessas aplicações, os parâmetros da distribuição Weibull são, geralmente, derivados de características do povoamento através de análises de regressão; essa técnica, contudo, pode

causar viés na estimativa dos parâmetros. Segundo Campos e Leite (2009) o método mais eficiente para o ajustamento da função Weibull é o da máxima verossimilhança. Outras alternativas são os métodos: momentos (FRAZIER, 1981), percentis, *simulated annealing* (ABBASI et al., 2006), redes neurais artificiais (ABBASI et al., 2008), regressão não-linear e aproximação linear.

Conhecendo a estrutura diamétrica de um povoamento, será possível avaliar melhor o comportamento da espécie a ser trabalhada, face aos vários fatores que possam vir a interferir em seu crescimento, favorecendo o manejo da mesma, considerando que todo manejo e atividades de exploração comercial provocam alterações na estrutura diamétrica (BARTOSZECH et al., 2004).

2.8 Redes Neurais Artificiais (RNA)

O manejo de florestas equiâneas tem como objetivo principal obter produtos madeireiros, além de serviços ambientais de forma sustentável. Para explorar de maneira eficiente o recurso florestal madeireiro, é necessário conhecer o estoque em crescimento e de colheita através da medição e estimação de características das árvores e da área na qual elas estão plantadas (BINOTI, 2012).

Muitos métodos são utilizados para quantificar o volume de madeira atual e futuro em povoamentos florestais e recentemente, resultados satisfatórios têm sido obtidos ao empregar Redes Neurais Artificiais (RNA) ao invés de modelos de regressão (GUAN; GERTNER, 1991a, 1991b, 1995; GORDON, 1998; DIAMANTOPOULOU, 2005; BINOTI et al., 2009; GÖRGENS et al., 2009; BINOTI, 2010; LEITE et al., 2010).

Vários modelos de regressão linear e não linear são usados para a predição do volume, porém, devido ao viés detectado nas pressuposições dos mínimos quadrados e valores relativamente elevados nos erros das estimativas, as RNA estão sendo usadas como um procedimento alternativo para a análise da regressão (DIAMANTOPOULOU, 2005). As RNA estão se tornando uma ferramenta muito popular de estimação, desde que não necessitem de suposições sobre a forma do modelo ajustado (DOWLA; ROGERS, 1995; GURNEY, 1999).

RNA's são redes de neurônios artificiais, ou seja, uma RNA é um sistema computacional paralelo ("camadas") constituído de várias unidades de processamento simples ("neurônios artificiais"), conectadas entre si, de uma maneira específica para desempenhar uma determinada tarefa (BULLINARIA, 2014), sendo aproximações brutas das redes e neurônios

encontrados no cérebro humano (BULLINARIA, 2014), tendo a capacidade de aprendizagem (armazenamento do conhecimento experimental) e generalização (disponibilização para o uso) de informações (BRAGA et al., 2000; HAYKIN, 2001; BINOTI, 2010), devido ao processamento paralelo e em razão da massiva conectividade dos elementos de processamento (“neurônios artificiais”) dispostos em uma ou mais camadas (BRAGA et al., 1998) e interligados entre si por um grande número de conexões, formando a rede (“sistema”) (BRAGA et al., 2000). Estas conexões geralmente são associadas a pesos que armazenam o conhecimento representado pela rede e ponderam a entrada recebida por cada neurônio da rede (BRAGA et al., 2000).

Segundo Binoti (2014) uma RNA terá sempre uma camada de entrada e uma camada de saída, mas pode ter uma ou mais camadas intermediárias ou ocultas. A camada de entrada recebe as informações do problema e as transmite para as demais camadas, seu número de neurônios depende das variáveis de entrada, ou seja, um neurônio para cada variável quantitativa ou numérica e um neurônio para cada classe de cada variável qualitativa ou categórica. A camada de saída é responsável pela resposta final da rede. A função das camadas ocultas é extrair características dos dados para auxiliar na resolução do problema, e sua quantidade é, geralmente, definida por tentativa e erro, um número inicial a ser testado consiste na metade do número de neurônios da camada de entrada.

O neurônio artificial (Figura 2) recebe as entradas ($x_1, x_2, \dots, x_n$) de outros neurônios ou do ambiente externo (se for um neurônio da camada de entrada) ponderada pelos pesos sinápticos ($w_1, w_2, \dots, w_n$), estas entradas são multiplicadas pelos seus respectivos pesos e estes produtos somados (combinação linear), resultando em um único valor (u) que passa por uma função de ativação ($f(u)$) gerando a resposta do neurônio (y), conforme a figura. Fazendo analogia ao neurônio biológico, as entradas correspondem aos dendritos, os pesos às sinapses, o combinador linear e a função de ativação correspondem ao processamento do corpo celular e a saída ao axônio (BINOTI, 2014).

Figura 2 - Estrutura de um neurônio artificial - adaptado de BINOTI (2014), onde “x” refere-se as variáveis de entrada, “w” aos pesos sinápticos, “u” o resultado da combinação linear entre “x” e “w”, “f(u)” a função de ativação e “y” a resposta final do neurônio

As RNA's permitem ainda uma maior acurácia na estimação da produção, dando maior suporte a tomada de decisão (PENG; WEN, 1999; CASTELLANOS et al., 2007), e ainda possuem a capacidade de extrair características não explícitas de um conjunto de informações que lhes são fornecidas como exemplos (KOVÁCS, 1996).

Os estudos na área de RNA se justificam por diversas propriedades úteis e capacidades como: tolerância a falhas e ruídos, aprendizagem e generalização a partir de dados de treinamento, paralelismo massivo que as tornam muito eficientes, uniformidade de análise e projeto, analogia neurobiológica, mapeamento entrada-saída, não linearidade, capacidade de modelar diversas variáveis, capacidade de modelagem com variáveis categóricas (qualitativas), além das numéricas (quantitativas) (BRAGA et al., 2000; HAYKIN, 2001; BULLINARIA, 2014). E por esses motivos, em alguns casos, as RNA têm apresentado desempenho superior aos modelos de regressão (BINOTI, 2012).

Em uma RNA, a solução do problema inicia-se com a aprendizagem (ou treinamento), onde um conjunto de exemplos, geralmente denominado conjunto de treinamento, é apresentado para a rede que extrai as características necessárias para representar a informação contida nos dados e gerar a resposta para o problema. Após a fase de aprendizagem a rede

está pronta para aplicações posteriores, caso tenha a capacidade de generalizar, ou seja, gerar respostas coerentes para dados não conhecidos (BRAGA et al., 2000).

A inclusão de características do povoamento nos modelos hipsométricos, como índice de local e idade, pode resultar em estimativas mais precisas e um maior realismo biológico, tornando a equação aplicável em diferentes locais. As principais dificuldades para a inclusão dessas características são a modelagem e quantificação das influências sobre a variável a ser estimada (altura total), pois as relações apresentam características não lineares ou valores qualitativos (categóricos) como, por exemplo, o tipo de solo que são incluídas em regressões como variáveis binárias, podendo ocasionar um aumento na complexidade de modelagem (BINOTI, 2012).

Uma opção é o emprego de modelos que incluem menor número de variáveis e o ajuste dos mesmos precedido de uma pré-estratificação com base nas variáveis categóricas. Ocorre que nem sempre é possível ter amostragem eficiente em todos os estratos, por questão de tempo e, principalmente, de custos. Então uma abordagem alternativa para a modelagem das relações hipsométricas, consiste no uso de RNA (BINOTI, 2012).

A modelagem da altura de povoamentos florestais com RNA se enquadra na tarefa de aprendizagem denominada aproximação de funções. Esta tarefa consiste em treinar uma rede neural capaz de aproximar a função desconhecida $f(x)$ que descreve o mapeamento dos pares de entrada-saída $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ de um conjunto de n exemplos de treinamento (JAIN et al., 1996). O treinamento, também denominado de aprendizagem, consiste no ajuste dos parâmetros da rede a partir de dados de treinamento (exemplos) a fim de desempenhar uma determinada tarefa (HAYKIN, 2001; BRAGA et al, 2007).

Para manejar uma floresta equiânea é necessário um domínio sobre os seus três elementos essenciais, que são a classificação de terras, o estabelecimento de prescrições e a prognose. Dessa maneira, qualquer pesquisa específica em uma dessas áreas contribui para um melhor manejo florestal (BINOTI, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características da Área

O experimento foi instalado em um delineamento em blocos casualizados (DBC) no ano de 2005, em duas fazendas (Santa Maria e Camboatá), localizadas no município de Piratini – RS. O clima da região, segundo Köppen é classificado como subtropical, tipo Cfa, com temperatura média do mês mais frio entre -3° e 18°C e temperatura do mês mais quente superior a 22°C, a precipitação pluviométrica anual é em torno de 1400 mm, a umidade relativa do ar de 75 a 85% e a insolação anual 2400 horas. (MORENO, 1961).

Figura 3 - Local do Estudo

3.2 Delineamento experimental

No experimento foram plantadas as espécies *Eucalyptus globulus* (E) e *Acacia mearnsii* (A); onde cada muda, independentemente da espécie, recebeu 50 g de adubo organomineral (N-P-K 04-12-08); em quatro tratamentos utilizando parcelas quadradas (30 m x 30 m), com distintos arranjos, sendo estes: *Eucalyptus globulus* no espaçamento 3 m x 2 m (56 árvores) + *Acacia mearnsii* no espaçamento 3 m x 1,5 m (68 árvores), plantados em linha simples (50%E:50%A - LS), *Eucalyptus globulus* no espaçamento 3 m x 2 m (56 árvores) + *Acacia mearnsii* no espaçamento 3 m x 1,5 m (68 árvores), plantados em linha dupla (50%E:50%A - LD), a monocultura da *Acacia mearnsii* no espaçamento 3 m x 1,5 m (136 árvores) (100%A) e a monocultura do *Eucalyptus globulus* no espaçamento 3 m x 2 m (112 árvores) (100%E), espaçamentos esses utilizados nos plantios comerciais de cada uma das espécies na região. Foi utilizada bordadura externa dupla, e as parcelas foram distribuídas em

blocos casualizados, sendo dois blocos em cada uma das fazendas, e no bloco continha uma repetição de cada tratamento.

3.3 Crescimento e produção

Para avaliarmos os efeitos dos consórcios e da densidade dos tratamentos no desenvolvimento em: altura, diâmetro a altura do peito (DAP) e volume com casca foram coletados dados ao longo do desenvolvimento do experimento. Nos inventários foram determinados o DAP e a altura total de 56 árvores de eucalipto e 68 árvores de acácia negra em cada tratamento consorciado, e nas monoculturas foram medidas 112 e 136 árvores de eucalipto e acácia negra, respectivamente, nos anos de 2006, 2007, 2008, 2010 e 2013; que correspondem às idades 12, 24, 36, 60 e 96 meses.

Após o último inventário, as parcelas foram classificadas em 5 (cinco) classes diamétricas, nas parcelas consorciadas essa mesma classificação foi realizada para ambas espécies. Foram então cubadas, no ano de 2014, pelo método de Smalian, 2 (duas) árvores por classe de diâmetro. Para a cubagem foi adotado o comprimento da secção de 1 m e o diâmetro mínimo considerado para o eucalipto foi de 8 cm e para a acácia-negra 6 cm.

Figura 4 - Cubagem

Com base nos dados coletados na cubagem rigorosa, os volumes foram calculados de acordo com a metodologia de Smalian:

$$V = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) L = \left[\frac{\left(\frac{\pi D_1^2}{40000} \right) + \left(\frac{\pi D_2^2}{40000} \right)}{2} \right] * L$$

em que:

V = volume do tronco, em metros cúbicos;

g_i = área seccional, dada por $g_i = \frac{\pi D_i^2}{40000}$, em metros quadrados;

D_1 e D_2 = diâmetros nas extremidades 1 e 2 do tronco, em centímetros;

L = comprimento do tronco, em metros.

O volume da ponta foi calculado de acordo com a fórmula do volume do cone:

$$V_{ponta} = \frac{\pi * r^2 * H}{3} = \frac{\left[\frac{\pi * \left(D_{com}/2 \right)^2 * (H_{ponta} * 100)}{3} \right]}{1000000}$$

em que:

V_{ponta} : volume da ponta da árvore, em metros cúbicos;

r = raio do diâmetro comercial, dado por $r = \frac{D_{com}}{2}$, em centímetros;

D_{com} = diâmetro comercial, em centímetros;

H_{ponta} = Altura da ponta da árvore, em metros.

Para se estimar o volume de cada árvore para cada parcela; foi adotado o modelo de Schumacher e Hall (1933):

$$Vol = \beta_0 * Ht^{\beta_1} * DAP^{\beta_2} + \varepsilon$$

em que:

Vol = volume da árvore, em metros cúbicos;

Ht = altura total da árvore, em metros;

DAP = diâmetro a altura do peito da árvore, em centímetros;

β_i = parâmetros da regressão;

ε = erro aleatório.

Porém, para facilitar o ajuste e corrigir problemas estatísticos relacionados as pressuposições básicas da regressão, o modelo foi ajustado na sua forma linear.

$$\ln(Vol) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Ht) + \beta_2 \ln(DAP) + \ln\varepsilon$$

em que:

Vol = volume da árvore, em metros cúbicos;

Ht = altura total da árvore, em metros;

DAP = diâmetro a altura do peito da árvore, em centímetros;

β_i = parâmetros da regressão;

ln = logaritmo neperiano;

ε = erro aleatório.

Modelos esses que foram ajustados, por meio do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e após ajustadas as equações, foi procedida à análise de variância da regressão (ANOVA).

Para o *Eucalyptus globulus* e para a *Acacia mearnsii* foram modeladas equações de regressão de modo a se obter as curvas que irão descrever o crescimento para DAP em função da idade [$DAP \sim f(I)$], altura total em função da idade [$H \sim f(I)$], volume individual em função da idade [$Vol \sim f(I)$] e a produção por hectare das parcelas também função da idade [$Prod(m^3/ha) \sim f(I)$]. Modelos esses que descreveram então, o comportamento dessas variáveis ao longo do tempo. Para isso foram testados para cada variável, três modelos de regressão:

Modelo de Schumacher & Hall

$$\ln X = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{Idade} \right) \rightarrow X = e^{\beta_0 + \beta_1 * (1/Idade)}$$

Modelo Logístico

$$X = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 * e^{(-\beta_2 * Idade)})}$$

Modelo de Chapman – Richards

$$X = \beta_0 * (1 - e^{(-\beta_1 * Idade)})^{\beta_2}$$

em que:

X = variável em estudo: altura total (H), em metros; diâmetro a altura do peito (DAP), em centímetros; volume individual (Vol), em metros cúbicos; e produção da parcela (m³/ha), em metros cúbicos por hectare;

β_i = parâmetros da regressão;

ln = logaritmo neperiano;

e = base dos logaritmos neperianos;

Idade = idade, em meses;

ε = erro aleatório.

Para descrever a produção por hectare (m³/ha), foi testado o modelo de Clutter (1963).

$$LnB_2 = LnB_1 * (I_1/I_2) + \alpha_0 * (1 - \frac{I_1}{I_2}) + \alpha_1 * \left[\left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) * S_1 \right] + ln\varepsilon$$

$$LnVol_2 = \beta_0 + \beta_1 * 1/I_2 + \beta_2 * S_1 + \beta_3 * LnB_2 + ln\varepsilon$$

em que:

α_i e β_i = parâmetros das regressões;

B₁ = área basal na idade atual, em metros quadrados;

B₂ = área basal na idade futura, em metros quadrados;

I₁ = idade atual, em meses;

I₂ = idade futura, em meses;

S₁ = índice de sítio, em metros;

Vol₂ = Produção na idade futura, em metros cúbicos por hectare;

ln = logaritmo neperiano;

ε = erro aleatório.

A estimação dos parâmetros do modelo de Clutter foi feita pelo método de mínimos quadrados em dois estágios (MQ2E). O MQ2E consiste em duas aplicações sucessivas do método dos mínimos quadrados ordinários (MQO). No primeiro estágio estimam-se os parâmetros da equação reduzida, que é formada pela variável endógena em função de todas as demais variáveis exógenas no sistema. No segundo estágio, utilizam-se os valores estimados (ao invés dos observados) da variável endógena, obtidos no primeiro estágio, para estimar, mediante substituição no modelo original, as equações estruturais (FILGUEIRAS; CARVALHO, 2004; GUJARATI, 2004).

Todos esses modelos foram aplicados para cada tratamento e posteriormente foram comparados através do histograma de frequência dos erros percentuais, do coeficiente de

determinação ajustado ($\bar{R}_{\hat{y}y}^2$) (para os modelos lineares), coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$) (para os modelos não-lineares), o erro padrão do resíduo (S_{yx}), a raiz quadrada do erro médio (RQEM), o BIAS, a significância dos parâmetros da regressão e o teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002), que consiste em uma regra decisória construída com base na estatística F proposta por Graybill (1976); dessa forma podemos observar qual modelo se ajustou melhor aos dados e então determinar qual tratamento foi melhor em relação aos demais.

Adicionalmente foram ajustadas as relações hipsométricas [$H \sim f(DAP)$], para cada tratamento, a fim de verificar a relação entre as alturas das árvores e seus DAP. Tal procedimento é conhecido por reduzir os custos do inventário florestal, porém pode diminuir a precisão das estimativas das alturas, dessa forma a realização desse ajuste vai permitir verificar a eficiência desses modelos. Foram selecionados 6 (seis) modelos de regressão, sendo 3 (três) deles contendo apenas a variável DAP, modelos da classe 1, e outros três modelos, classe 2, inserindo as variáveis do povoamento idade, altura dominante (Hd) e área seccional (AS), para isso a Hd foi calculada para cada parcela, medição e espécie, sendo definida como a média das alturas das 5 (cinco) árvores de maior DAP.

Modelo de Stoffels

$$H = e^{\beta_0 + \beta_1 * \ln DAP} \therefore \ln H = \beta_0 + \beta_1 * \ln(DAP)$$

Modelo de Curtis

$$H = e^{\beta_0 + \beta_1 * (1/DAP)} \therefore \ln H = \beta_0 + \beta_1 * 1/DAP$$

Modelo da Linha Reta

$$H = \beta_0 + \beta_1 * DAP$$

$$H \sim \int (DAP, Idade) \rightarrow \text{Proposto por CALDEIRA et al. (2002)}$$

$$\log H = \beta_0 + \beta_1 * 1/DAP + \beta_2 * 1/Idade + \beta_3 * 1/(DAP * Idade)$$

$H \sim \int (DAP, Hd) \rightarrow$ Proposto por CAMPOS et al. (1984)

$$\ln H = \beta_0 + \beta_1 * 1/DAP + \beta_2 * \ln Hd$$

$H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade) \rightarrow$ Proposto por SCOLFORO et al. (1993)

$$\ln H = \beta_0 + \beta_1 * \ln Hd + \beta_2 * 1/Idade + \beta_3 * \ln AS + \beta_4 * 1/(Idade * DAP)$$

em que:

H = altura total da árvore, em metros;

DAP = diâmetro a altura do peito da árvore, em centímetros;

Hd = altura dominante, em metros;

Idade = idade, em meses;

AS = área seccional, em metros quadrados;

β_i = parâmetros da regressão;

ln = logaritmo neperiano;

e = base dos logaritmos neperianos;

log = logaritmo na base 10;

ε = erro aleatório.

O passo seguinte foi avaliar os modelos estimados, utilizando os mesmos parâmetros utilizados para avaliar os modelos de crescimento. Um procedimento iterativo foi utilizado para ajustar os modelos não lineares aos dados observados, onde um valor inicial é fornecido aos parâmetros.

Foram confeccionadas as curvas de incremento médio anual (IMA) e de incremento corrente anual (ICA), para cada espécie nos tratamentos empregados, com a finalidade de verificar possíveis influências dos arranjos adotados na idade técnica de corte, que é aquela que IMA é máximo, e, nesta idade, este incremento é igual ao ICA, ou seja, IMA=ICA (CAMPOS; LEITE, 2009).

Os tratamentos foram também classificados em diferentes classes de produção, para ambas espécies, utilizando-se o método da curva-guia; verificando-se possíveis influências no valor da variável índice de sítio devido aos arranjos testados, além disso essa variável gerada é utilizada como *input* no modelo de Clutter.

A mortalidade final das árvores também foi avaliada, demonstrando assim a competitividade para cada tratamento.

3.4 Modelos de Distribuição Diamétrica (MDD)

A recuperação da distribuição de diâmetros futura se dá pela estimação dos parâmetros da função densidade de probabilidade (*fdp*) em função de características do povoamento como idade, densidade, índice de local, diâmetro mínimo e diâmetro máximo, dentre outras.

Para estimar então a frequência diamétrica por parcela foi utilizada a *fdp* Weibull de dois parâmetros, cuja relação funcional é:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}}, & \text{para } x \leq \infty \\ 0, & \text{para outros valores de } x \end{cases}$$

Já a sua forma cumulativa é definida por:

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

em que:

β = parâmetro de escala;

γ = parâmetro de forma;

x = centro da classe de diâmetro, sendo $x \geq 0$, $\beta > 0$ e $\gamma > 0$;

e = base dos logaritmos neperiano.

A função foi ajustada aos dados de distribuição diamétrica observada de cada parcela e espécie em todas as medições. Os dados foram agrupados em classes com intervalos regulares de 1 cm de amplitude. Para cada ajuste, o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para testar a hipótese de nulidade de que os diâmetros observados seguissem a distribuição Weibull estimada pelo método da máxima verossimilhança, em nível de 1% de probabilidade. Nas situações em que o teste foi significativo, ou seja, indicou que houve diferença entre os diâmetros observados e a distribuição Weibull, empregou-se o método da aproximação linear, descrita por Campos e Leite (2009), para obter os parâmetros de escala (β) e de forma (γ).

A redistribuição teórica dos diâmetros por classe ou recuperação da distribuição diamétrica foi realizada por meio da alternativa tradicional de correlacionar parâmetros da função com características do povoamento. Essa correlação foi feita através de regressões lineares e não-lineares, ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários e o Método dos Mínimos Quadrados Não-Lineares, respectivamente.

A forma dos modelos estatísticos do sistema utilizado foram:

$$Hd = \theta_0 * (1 - e^{(-\theta_1 * Idade)})^{\theta_2} * \varepsilon$$

$$q = \theta_0 + \theta_1 * Idade + \theta_2 * Hd + \theta_3 * N + \varepsilon$$

$$DAPmax = \theta_0 + \theta_1 * Idade + \theta_2 * Hd + \varepsilon$$

$$\ln(\gamma) = \theta_0 + \theta_1 * \ln(N) + \theta_2 * \ln(DAPmax) + \theta_3 * \ln(DAPmax - q) + \ln\varepsilon$$

$$\ln(\beta) = \theta_0 + \theta_1 * \ln(q) + \theta_2 * \ln(\gamma) + \ln\varepsilon$$

$$\ln N_2 = \theta_0 + \theta_1 * q + \theta_2 * \ln N_1 + \theta_3 * IS + \ln\varepsilon$$

em que:

Hd = altura dominante, em metros;

q = diâmetro quadrático, em centímetros;

DAPmax = diâmetro a altura do peito máximo, em centímetros;

S = índice de sítio, em metros;

γ = parâmetro de forma da função Weibull;

β = parâmetro de escala da função Weibull;

Idade = idade, em meses;

N_1 = número de árvores sobreviventes por hectare na idade atual;

N_2 = número de árvores sobreviventes por hectare na idade futura;

θ = parâmetros das regressões;

ln = logaritmo neperiano;

ε = erro aleatório.

Feito isso, a distribuição diamétrica foi projetada a partir de uma distribuição em uma idade atual para uma idade futura, partindo-se sempre de uma distribuição inicial observada.

A redistribuição teórica dos diâmetros foi avaliada através do desempenho do sistema de equações gerado, considerando os mesmos critérios até então utilizados para a seleção de modelos e de análises gráficas que se fizeram necessárias.

Dessa forma podemos observar o comportamento da distribuição diamétrica das espécies, tanto nos consórcios quanto nas monoculturas; avaliando possíveis influências dos arranjos empregados nessa distribuição, e ainda foram estudadas as relações entre parâmetros dessas distribuições e as características de cada tratamento.

3.5 Redes Neurais Artificiais (RNA)

Paralelamente foi testado o emprego das Redes Neurais Artificiais (RNA) para modelar a altura, usando como variáveis categóricas os blocos, os tratamentos e as espécies e como

variáveis contínuas a Idade, DAP, Altura, Altura Dominante – Hd, DAP médio, DAP máximo, DAP mínimo, Altura média – Hmédia, Altura máxima – Hmáxima, Altura mínima – Hmínima, Área Seccional – AS e Índice de Sítio – S.

O treinamento e a avaliação das redes foram feitos no sistema NeuroForest – hipsometric. As melhores RNA foram selecionadas com base na correlação entre a altura observada e a altura estimada pelas redes ($R_{\hat{y}y}$), o erro padrão do resíduo (S_{yx}), o BIAS (envieçamento das estimativas), a raiz quadrada do erro médio (RQEM) e o histograma de frequência dos erros percentuais; dessa forma podemos observar qual modelo se ajustou melhor aos dados.

3.6 Biomassa

Para determinar a massa de folhas, galhos vivos e mortos e lenho das árvores, foi selecionada aleatoriamente 1 (uma) das 2 (duas) árvores abatidas para a cubagem por classe de diâmetro em cada tratamento.

Para se determinar a biomassa das folhas, foi pesado todo o conjunto de folhas, por terço da copa (PU(c)), para isso determinou-se que a copa começava a partir do primeiro galho vivo, e com a árvore já abatida mediu-se a distância desse ponto até o final da copa, dividindo esse valor em 3 (três) compartimentos de mesmo comprimento, tendo assim os terços inferior, médio e superior. Visando obter a biomassa (PS(c)); foi então retirada uma amostra de peso conhecido, para cada terço (por volta de 100g) (PU(a)), essas amostras então foram levadas em laboratório para secarem em estufa com circulação de ar à temperatura de 65°C, até atingirem peso constante (PS(a)).

Figura 5 - Separação das folhas para pesagem

A mesma rotina foi realizada para a determinação da biomassa de galhos vivos e mortos, porém, a amostra que foi levada ao laboratório era composta de galhos localizados em diferentes posições da copa da árvore

Dado isso, a biomassa foi calculada com a seguinte expressão (SILVA, 1983; FERREIRA, 1984; PEREIRA, 1990; MOLICA, 1992; SOARES, 1995):

$$PS(c) = \frac{PU(c) * PS(a)}{PU(a)}$$

sendo:

PS(c) = biomassa, em quilogramas;

PU(c) = peso de matéria úmida total de folhas, galhos vivos e mortos, em quilogramas;

PU(a) = peso de matéria úmida da amostra levada ao laboratório, em quilogramas;

PS(a) = peso de matéria seca da amostra, em quilogramas.

Para a biomassa do lenho, foram retirados discos de madeira de 2,5 cm de espessura no DAP das árvores; foram retiradas, de cada disco, pequenos corpos de prova, de aproximadamente 2 cm de espessura, para a determinação em laboratório, da densidade básica média da madeira de cada árvore amostrada, segundo a norma analítica NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Dessa forma, a biomassa do lenho e casca foi calculada com a seguinte expressão (VITAL et al., 1985; FINKE HERRERA, 1989; SOUZA, 1989):

$$PS(c) = Vol * DBMT$$

sendo:

PS(c) = biomassa da madeira, em quilogramas;

Vol = volume de madeira, em metros cúbicos;

DBMT = densidade básica média da madeira, em quilogramas por metros cúbicos;

Figura 6 - Retirada do disco

Figura 7 - Pesagem do lenho

3.7 Índice de Área Foliar (IAF)

O IAF foi determinado de duas formas, sendo o método direto ou “destrutivo” e o método indireto, o primeiro é importante para se ter uma medida real do dossel foliar a partir de uma amostragem representativa em função do tamanho e tipo de planta, porém, como esse método é normalmente inviável quando realizados em uma quantidade maior de árvores, foi então empregado o segundo método, utilizando o equipamento LAI-2000 (LICOR, 1992).

O LAI-2000 utiliza um sensor de luz que mede, simultaneamente, a radiação difusa em cinco bandas angulares distintas (0-130, 16-280, 32-430, 47-580 e 61-740), porém essas estimativas por meio de medidas óticas não conseguem distinguir os tecidos fotossinteticamente ativos (elementos verdes), de outros da planta, como os galhos, ramos e tronco (STENBER et al., 2003; DOVEY; du TOIT, 2006). Para isso então é utilizado a nomenclatura Índice de Área das Plantas (IAP) (BATTAGLIA et al., 1998; CHERRY et al., 1998; KALA'CSKA et al., 2005; ARIAS et al., 2007; ROUPSARD et al., 2008; CUNNINGHAM et al., 2009).

As medições com o LAI-2000 ocorreram em áreas a céu aberto e abaixo do dossel da floresta; foram então realizadas 2 (duas) medições, sob o dossel, por parcela, sendo que cada medida obtida foi a partir de 11 (onze) repetições ao longo das linhas de plantio, e para cada medição, foi utilizado 1 (um) ponto em área a céu aberto. O posicionamento do sensor foi realizado de acordo com as condições topográficas da área de trabalho e de forma que evidencie bem as condições de cada tratamento.

Para a estimativa do IAF pelo método destrutivo, foram coletadas 3 (três) folhas (4^a, 5^a e 6^a folha à partir da gema apical) em cada terço da copa das árvores previamente selecionadas para a estimativa da biomassa. Essas folhas, ainda frescas, foram escaneadas e as imagens foram utilizadas para a obtenção da área foliar (AF) através do software ImageJ 1.46r desenvolvido pelo Wayne Rasband National Institutes of Health dos Estados Unidos da América. Dessa forma, com base no peso úmido total de folhas de cada terço e no peso úmido das amostras de folhas coletadas em campo, estimou-se a AF para a biomassa total de folhas, obtendo assim o IAF.

3.8 Análise Estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o software R-project. Inicialmente, os testes de homogeneidade de variâncias de Bartlett's e Levene's; e de normalidade dos erros de Shapiro – Wilk e Kolmogorv – Sminorv, foram aplicados às variáveis para a validação das pressuposições da análise da variância (ANOVA). Quando elas não foram aceitas, os dados foram transformados de acordo com a metodologia de Box-Cox (BOX; COX, 1964).

Quando todos os pressupostos foram aceitos, as variáveis foram submetidas a ANOVA em nível de significância de 5%, seguindo o modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + b_i + t_j + e_k + (t * e)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

sendo:

Y_{ijk} = valor observado na parcela que recebeu o i-ésimo bloco, no j-ésimo tratamento, na k-ésima espécie;

μ = constante inerente a toda população;

b_i = efeito devido ao i-ésimo bloco;

t_j = efeito do j-ésimo tratamento;

e_k = efeito devido a k-ésima espécie;

ε_{ijk} = efeito dos fatores não controlados do i-ésimo bloco, no j-ésimo tratamento, na k-ésima espécie.

Quando o teste F da ANOVA mostrou que houveram diferenças significativas entre os tratamentos e entre as espécies no consórcio, as médias das variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Crescimento

4.1.1 Altura

O crescimento em altura da acácia-negra ao completar 96 meses de idade (8 anos) diferiu significativamente ($p < 0,05$) entre os tratamentos testados, já para o eucalipto nem todos os tratamentos diferiram significativamente dos demais, como podemos observar na Figura 8. A acácia-negra apresentou um crescimento em altura significativamente maior nos plantios consorciados, principalmente no tratamento onde as espécies foram plantadas em linha simples (50%E:50%A – LS); o eucalipto apresentou um crescimento em altura superior no tratamento consorciado com as espécies plantadas em linha dupla (50%E:50%A – LD), diferindo significativamente do tratamento 50%E:50%A – LS.

Figura 8 - Comportamento da variável altura (m) nas diferentes situações de estudo

A acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LS (13,96 m) foi 6% maior do que sua monocultura (13,23 m), e no tratamento 50%E:50%A – LD (13,43 m) foi 2% superior; já o eucalipto foi 1% superior no tratamento 50%E:50%A – LD (13,56 m) quando comparado com o 100%E (13,37), e o tratamento 50%E:50%A – LS (13,17) foi 3% inferior. Visto isso a acácia-negra teve seu crescimento beneficiado pelo consórcio, nos dois tratamentos consorciados, já para o eucalipto não é possível afirmar que houveram interações positivas ou negativas interespecíficas ou intraespecíficas que favorecessem o crescimento em altura.

Na Figura 9 se encontra o efeito dos tratamentos no crescimento médio em altura ano a ano; e é possível observar que no tratamento 50%E:50%A - LS o crescimento da acácia-negra foi superior ao do eucalipto em todo o ciclo, o que explica o menor desenvolvimento dessa espécie nesse tratamento, pois, o eucalipto é intolerante a sombra, e segundo Viera et al. (2013) em um sistema consorciado, devem-se escolherem espécies fixadoras de N com menor

crescimento em altura e que sejam tolerantes a certo grau de sombreamento e em estudo realizado por Balieiro et al. (2002) onde se testou o plantio misto entre *Eucalyptus grandis* e a leguminosa *Pseudosamanea guachapele*, segundo os autores uma das razões com que levou ao eucalipto a alcançar uma produtividade (m^3/ha) no sistema consorciado que não diferiu estatisticamente a da sua monocultura, isso considerando que havia a metade do número de árvore, foi a maior interceptação de luz pelos indivíduos de eucalipto no consorcio, isso como consequência do seu domínio sobre a guachapele (leguminosa em questão); contudo esses trabalhos não utilizaram duas espécies com grande capacidade produtiva, como no estudo corrente, dessa forma para se atingir uma alta produtividade, tanto da espécie produtiva fixadora de N, quando da espécie produtiva não fixadora de N, o ideal seria utilizar espécies que possuam dinâmicas de crescimento em altura compatíveis. Já no tratamento 50%E:50%A – LD a acácia-negra apresentou maior desenvolvimento em altura nos anos iniciais do plantio, e somente a partir dos 48 meses de idade o crescimento do eucalipto foi superior, o que explica a não significância do crescimento em altura quando comparado com o tratamento 100%E, pois dessa forma a competição interespecífica foi elevada nesse tratamento nas idades iniciais, influenciando negativamente o eucalipto, resultado semelhante foi encontrado por Forrester et al. (2004), porém, nesse estudo, a *Acacia mearnsii* teve um desenvolvimento superior até os 60 meses de idade.

Figura 9 - Efeito dos tratamentos no crescimento médio ano a ano da altura (m); sendo cada linha referente a uma idade, variando de 12 meses a 96 meses

Uma possível estratificação do dossel em plantios mistos poderia não apenas reduzir a competição por luz mas também aumentar a quantidade de luz interceptada, comparada com a monocultura, para a espécie menos tolerante a sombra (VANDERMEER, 1989; KELTY, 1992), no caso em questão o eucalipto, e segundo Forrester et al. (2005) a redução da competição por luz foi importante para a sobrevivência e crescimento da espécie intolerante a sombra; porém como observamos, essa estratificação do dossel no presente estudo acabou prejudicando o desenvolvimento do eucalipto, devido a competição por luz, principalmente até os 48 meses de idade. De acordo com essas informações estes autores concluíram que em um consórcio as espécies implantadas devem possuir dinâmicas de crescimento em altura compatíveis, de forma com que a espécie menos tolerante a sombra não seja muito superada em altura e seja suprimida pela espécie a ela associada, e também de forma que não permita que a espécie fixadora de N se desenvolva em uma posição muito baixa no dossel, pois caso isso ocorra não apenas seu crescimento será comprometido, mas também levará a uma redução na fixação biológica de N. Na maior parte dos estudos realizados com o intuito de se analisar os plantios mistos, a espécie fixadora de N participa do processo como uma espécie

secundária, com o objetivo principal de fornecer suporte ou melhorar as condições de desenvolvimento da espécie não fixadora de N; porém no estudo corrente ambas espécies apresentam capacidade produtiva e são visadas economicamente, por isso aqui são buscadas formas de se beneficiar o desenvolvimento, tanto da acácia-negra, quanto do eucalipto.

Ainda de acordo com a Figura 9 é possível observar que o tratamento que apresentou o menor crescimento em altura foi o 100%A, seu valor atingido aos 96 meses (18,08 m) foi próximo ao alcançado pelo eucalipto no tratamento 50%E:50%A – LD aos 72 meses (18,04 m), e o que apresentou maior valor foi o 50%E:50%A – LD para o eucalipto, contudo o 100%E apresentou valores muito próximos, além disso é possível observar que essa espécie, no geral, apresentou maiores valores de altura do que a acácia-negra, resultado esse também encontrado por Forrester et al. (2004).

Viera et al. (2013) concluíram que o crescimento em altura não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, aos 6 meses e aos 18 meses de idade para ambas espécies testadas (*Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii*), Kleinpaul (2008) verificou o mesmo comportamento, onde aos 10 (dez) meses de idade, o crescimento em altura das árvores não foi influenciado pela presença ou ausência de outra espécie florestal (*Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii*), Vezzani et al. (2001) também não encontraram diferença significativa no crescimento em altura de *Eucalyptus saligna* e *Acacia mearnsii*, entre os tratamentos testados aos 45 meses de idade e concluíram que embora o eucalipto no consórcio tenha sido favorecido pela maior disponibilidade de nitrogênio provindo da acácia, possuindo no consórcio 96 g/planta de N, enquanto que na monocultura continha 79 g/planta de N, analisando-se folhas e galhos, essa disponibilidade não acarretou em maior crescimento das plantas.

Silva (2007) também não encontrou diferenças significativas no crescimento em altura do eucalipto em um consórcio entre *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* com 29 meses de idade, já Forrester et al. (2004), a exemplo do estudo corrente, encontraram diferenças significativas no crescimento em altura, tanto para o *Eucalyptus globulus* quanto para a *Acacia mearnsii* em um povoamento com 11 anos, a partir do 24º mês.

Em uma vasta revisão bibliográfica realizada por Piotto (2008), o autor concluiu que os plantios mistos não influenciam na taxa de crescimento em altura das espécies não fixadoras de N, sendo que muitas das espécies avaliadas o efeito encontrado nessa taxa foi negativo,

contudo, segundo o autor, o crescimento em altura não é a variável ideal para explorar os benefícios dos consórcios, por essa variável não ser muito afetada pela competição.

4.1.2 DAP

O crescimento em DAP para ambas espécies, ao longo do ciclo de 96 meses, diferiu estatisticamente entre os tratamentos testados, como podemos observar na Figura 10 sendo que esse crescimento foi maior nos tratamentos 50%E:50%A – LS e 100%E, para a acácia-negra e para o eucalipto, respectivamente

Para a acácia-negra, o tratamento 50%E:50%A – LS (11,7 cm), obteve o maior valor médio para o DAP, sendo 15% superior ao valor alcançado pela monocultura da espécie (10,19 cm), já o 50%E:50%A – LD (10,96 cm) foi 8% superior ao 100%A, mostrando que o consórcio foi benéfico para o crescimento da acácia-negra; para o eucalipto o tratamento 50%E:50%A – LD (10,58 cm), que apresentou um valor 9% inferior ao tratamento 100%E (11,59), e o 50%E:50%A – LS (9,6 cm) atingiu um valor 17% inferior ao tratamento 100%E.

Figura 10 - Comportamento da variável DAP (cm) nas diferentes situações de estudo

Essas diferenças no crescimento para o DAP são explicadas pela variação no espaçamento dentro dos tratamentos para cada espécie, para a acácia-negra plantar o eucalipto na mesma área aumenta a área útil de cada planta, pois a acácia-negra foi plantada no espaçamento de 3m x 1,5m e o eucalipto foi plantado no espaçamento de 3m x 2m, dessa forma, no tratamento 50%E:50%A – LS a área útil de crescimento para a acácia-negra foi maior, proporcionando assim um maior espaço para seu desenvolvimento; o tratamento mais adensado para o desenvolvimento da acácia-negra foi o 100%A; o oposto ocorre para o eucalipto, pois o tratamento 50%E:50%A – LS é o que mais restringe o espaço de crescimento dessa espécie, pois as linhas de acácia-negra que estão ao lado das linhas de eucalipto são plantadas de forma mais adensada, no tratamento 50%E:50%A – LD o espaço

de crescimento é menos reduzido pois são duas linhas de cada espécie plantadas em sequência, e o tratamento 100%E é o que possui a maior área disponível para o crescimento em DAP.

Na Figura 11 é possível observar o efeito dos tratamentos, ano a ano, no crescimento médio do DAP para ambas espécies. A exemplo do que aconteceu com a altura, no tratamento 50%E:50%A – LS a acácia-negra apresentou maiores valores para o DAP quando comparada ao eucalipto ao longo de todo o ciclo; chegando a um valor médio de 16,38 cm aos 96 meses de idade, enquanto o eucalipto atingiu apenas 12,82 cm de DAP, esse tratamento foi o responsável por fornecer maior espaço para o desenvolvimento da acácia-negra e o menor para o eucalipto. No tratamento 50%E:50%A – LD, nos três primeiros anos a acácia-negra apresentou maiores valores para a variável em questão, após esse período, ambas espécies mantiveram valores semelhantes para o DAP. Em relação as monoculturas, o tratamento 100%A foi o que apresentou os menores valores da variável para a acácia-negra, pois foi o tratamento mais limitante quanto a espaço para essa espécie, atingindo um valor médio de 14,19 cm ao final do ciclo, segundo Schneider et al. (2000) o crescimento do DAP para a *Acacia mearnsii* é diretamente proporcional ao tamanho do espaçamento, atingindo no espaçamento 3m x 2m um valor de 16,4 cm e no espaçamento 3m x 1,33m um valor de 14,1 cm, ambos aos 96 meses de idade; o tratamento 100%E apresentou, no geral, ao longo do ciclo, os maiores valores de DAP para o eucalipto, atingindo um valor médio de 17,33 cm aos 96 meses de idade, isso devido a maior área de crescimento disponível para a espécie, quando comparada com os demais tratamentos, devido à ausência de linhas de acácia-negra; e também pela elevada taxa de mortalidade nessa situação de estudo.

Como observado por Forrester et al. (2004) e no presente estudo, o crescimento inicial da *Acacia mearnsii* (até os 48 meses de idade), nos consórcios, foi maior que o do *Eucalyptus globulus*.

Figura 11 - Efeito dos tratamentos no crescimento médio ano a ano do DAP (cm); sendo cada linha referente a uma idade, variando de 12 meses a 96 meses

Viera et al. (2011), ao contrário do estudo corrente, não encontrou diferenças significativas no DAP, tanto da *Acacia mearnsii* quanto do *Eucalyptus urograndis*, nos tratamentos testados, aos 18 meses de idade; Kleinpaul (2008), em estudo semelhante ao citado anteriormente, concluiu que o DAP das árvores, aos 10 meses de idade, não foi influenciado pela presença ou ausência de outra espécie florestal em consórcio; Silva (2007) ao testar consórcios de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, aos 29 meses de idade, não observou diminuição ou aumento no crescimento em área basal dos consórcios em relação ao seu monocultivo.

Forrester et al. (2004) observaram que os DAP, tanto da *Acacia mearnsii* quanto do *Eucalyptus globulus* foram significativamente maiores nos consórcios do que nas monoculturas, aos 4 anos de idade, e estas diferenças aumentaram com o tempo, até os 11 anos de idade. Forrester et al. (2010), ao analisar o povoamento com 15 anos de idade, observou que no tratamento 50%E:50%A o DAP das espécies foram superiores aos de suas respectivas monoculturas.

Para o DAP, Piotto (2008) concluiu que no geral, as espécies fixadoras de N possuem um efeito positivo na taxa de crescimento diamétrico das espécies não fixadoras de N, em contraste, as espécies fixadoras de N demonstraram um decréscimo nessa taxa de crescimento na mesma situação, e por isso concluiu que dentre as possíveis interações positivas que podem acontecer nos consórcios, a produção competitiva é a menos importante, pois as espécies fixadoras de N são as únicas que não são favorecidas pelo processo de facilitação; o que demonstra que a competição interespecífica é maior do que a intraespecífica para as espécies.

4.1.3 Volume

Nesta seção serão apresentadas as informações referentes ao volume individual médio ($\text{m}^3/\text{árvore}$) das espécies nos tratamentos testados, a produtividade média por hectare (m^3/ha) de cada espécie nos tratamentos e a produtividade total (m^3/ha) de cada tratamento, ou seja, considerando nos consórcios a soma da produtividade das duas espécies testadas.

O desenvolvimento do volume individual médio ao longo do ciclo diferiu estatisticamente ($p < 0,05$) entre os tratamentos para ambas espécies no estudo, como podemos constatar na Figura 12. O tratamento 50%A:50%E – LS foi o responsável por apresentar os maiores valores para o volume individual médio para a acácia-negra ($0,1094 \text{ m}^3/\text{árvore}$) e o menor valor para o eucalipto ($0,0682 \text{ m}^3/\text{árvore}$), o tratamento 50%E:50%A – LD para ambas espécies apresentou valores intermediários para o volume individual, sendo $0,0999 \text{ m}^3/\text{árvore}$ e $0,0857 \text{ m}^3/\text{árvore}$, para a acácia-negra e para o eucalipto, respectivamente; para a acácia-negra o tratamento 100%A ($0,0815 \text{ m}^3/\text{árvore}$) foi o que apresentou os menores valores e o tratamento 100%E ($0,1095 \text{ m}^3/\text{árvore}$) foi o que apresentou o maior valor para o eucalipto.

Figura 12 - Comportamento da variável Volume (m^3) nas diferentes situações de estudo

Ainda de acordo com a Figura 12 é possível notar que nos tratamentos consorciados o volume individual médio dos indivíduos da acácia-negra foi superior ao do eucalipto, apenas o tratamento 100%E apresentou valor significativamente maior para a variável. É possível também notar que para ambas espécies o DAP teve maior influência na produção volumétrica dos indivíduos, como pode ser observado na Figura 13 e na Tabela 1.

Figura 13 - Correlograma entre as variáveis: Idade (meses), Altura (m), DAP (cm) e volume individual ($\text{m}^3/\text{árvore}$)

Tabela 1 - Matriz de correlação entre as variáveis: Idade (meses), Altura (m), DAP (cm) e volume individual ($\text{m}^3/\text{árvore}$)

Variáveis	Idade (meses)	Vol ($\text{m}^3/\text{árvore}$)	DAP (cm)	Altura (m)
Idade (meses)	1,00	-	-	-
Vol ($\text{m}^3/\text{árvore}$)	0,69	1,00	-	-
DAP (cm)	0,73	0,92	1,00	-
Altura (m)	0,83	0,81	0,93	1,00

Forrester et al. (2010) utilizando as mesmas espécies aqui testadas aos 15 anos de idade, encontraram que o volume individual médio do *Eucalyptus globulus* no consórcio 50%E:50%A foi superior e diferente estatisticamente ao de sua monocultura, resultando este o oposto do encontrado no estudo corrente, já para a *Acacia mearnsii* os autores encontraram, à

semelhança do estudo corrente, que o volume individual médio atingido no consórcio foi superior ao alcançado na monocultura, porém estes foram estatisticamente iguais.

Na Figura 14 aonde temos o efeito dos tratamentos ano a ano para o volume individual, podemos observar que o desenvolvimento da acácia-negra nos consórcios foi consideravelmente superior ao desenvolvimento do eucalipto ao longo de todo o ciclo, no tratamento 50%E:50%A – LS as espécies atingiram um valor médio de 0,218 m³ e 0,129 m³ aos 96 meses de idade, respectivamente para a acácia-negra e para o eucalipto, no tratamento 50%E:50%A – LD a acácia-negra atingiu 0,206 m³ e o eucalipto 0,186m³ aos 96 meses de idade.

Figura 14 - Efeito dos tratamentos no crescimento médio ano a ano do Volume (m³); sendo cada linha referente a uma idade, variando de 12 meses a 96 meses

Para a acácia-negra, a monocultura (100%A) foi o tratamento menos produtivo, atingindo um valor médio de 0,165 m³/árvore aos 96 meses. Quando olhamos o volume individual médio ao final do ciclo (Figura 12) o tratamento 50%E:50%A – LS apresentou um valor 34% superior ao 100%A e o 50%E:50%A – LD foi 23% superior. Já para o eucalipto como comentado anteriormente a monocultura (100%E) apresentou o maior valor para a

produção individual, dessa forma, o tratamento 50%E:50%A – LS apresentou 62% do volume individual alcançado pelo 100%E, e o 50%E:50%A – LD, 78%.

Para termos as informações referentes a produtividade média por hectare das espécies foi considerado que os consórcios continham a metade do número de árvores da espécie, comparado com sua monocultura.

A produtividade média por hectare de ambas espécies ao final do ciclo, não diferiu estatisticamente ($p > 0,05$) entre os tratamentos consorciados, ou seja, a produtividade do tratamento 50%E:50%A – LS foi igual estatisticamente ao 50%E:50%A – LD para ambas espécies; já as monoculturas, 100%A e 100%E, alcançaram valores superiores e diferiram estatisticamente ($p < 0,05$) dos consórcios para as espécies, como podemos confirmar na Figura 15.

Figura 15 - Comportamento da variável Volume por unidade de área (m³/ha) nas diferentes situações de estudo

Com esperado, a produtividade por unidade de área de cada uma das espécies nos consórcios foi menor do que em sua respectiva monocultura, devido ao fato de possuírem a metade do número de indivíduos plantados. Dessa forma, se não houver nenhum tipo de interação nos tratamentos consorciados (positivas e/ou negativas) a produtividade nos consórcios deverá ser 50% da atingida em sua monocultura, caso haja o predomínio de interações positivas, como a redução da competitividade também conhecida como complementaridade ou por princípio da produção competitiva; que segundo Keltly e Cameron (1995) ocorre quando a competição interespecífica por um recurso limitante é menor que a competição nas monoculturas, e ocorre frequentemente quando existe um compartilhamento de recursos acima (luz) e abaixo do solo (água e/ou nutrientes), o que leva a uma separação dos nichos e a um uso mais eficiente dos recursos do solo, e a facilitação, que de acordo com

Vandermeer (1989) ocorre quando uma espécie possui um efeito positivo sobre a outra, por exemplo, quando uma espécie fixadora de N aumenta o crescimento de outra não fixadora; espera-se que a produtividade das espécies nos consórcios seja superior a 50% do valor atingido em sua respectiva monocultura e por último, caso haja o predomínio de interações negativas, como a competição; que segundo Vandermeer (1989) ocorre quando duas ou mais espécies, ou populações, interagem de forma que pelo menos uma exerce um efeito negativo sobre outra, afetando o crescimento e podendo levar à morte; espera-se que a produção das espécies nos consórcios atinjam valores abaixo de 50% do atingido em suas monoculturas.

Dado isso, de acordo a Figura 15, observa-se que para a acácia-negra os consórcios foram benéficos, pois, o tratamento 50%E:50%A – LS (97,97 m³/ha) apresentou uma produtividade média ao longo do ciclo de 72% da atingida no tratamento 100%A (136,11 m³/ha) e o tratamento 50%E:50%A – LD (90,93 m³/ha) apresentou um valor 67%; como discutido anteriormente, diversos fatores contribuíram para que isso ocorresse, como o crescimento superior em altura dessa espécie em todo o ciclo no tratamento com as espécies plantadas em linhas simples, e até os 36 meses de idade no tratamento com linhas duplas; ao maior espaço disponível de crescimento diamétrico para a acácia-negra nos consórcios, e também devido a diminuição considerável da mortalidade das árvores nos consórcios, pois é sabido que a *Acacia mearnsii* possui um sistema radicular muito superficial, com ausência de raiz pivotante, e devido a isso com o passar dos anos a sua estabilidade diminui, causando muitas quedas, já nos consórcios, o *Eucalyptus globulus* serviu como quebra vento, diminuindo muito a queda dessas árvores.

Já para o eucalipto no tratamento 50%E:50%A – LS (37,92 m³/ha) a produtividade atingida foi apenas 36% da observada no 100E (106,00 m³/ha), e o tratamento 50%E:50%A – LD (41,51 m³/ha) atingiu 39% dessa produtividade. A espécie, *Eucalyptus globulus*, não conseguiu ter um desenvolvimento considerável na região, e como comentado anteriormente competiu fortemente com a acácia-negra por luz, principalmente nos primeiros anos de ciclo, inclusive atingindo menores alturas nesse período, e nos consórcios atingiu menores valores para o crescimento diamétrico devido ao menor espaço disponível para o desenvolvimento das árvores.

Com isso, observa-se que dentre as possíveis interações positivas que podem estar presentes, a produção competitiva foi a mais importante, devido as variações causadas pelo espaçamento de plantio e pela diferente região do solo explorada pelas raízes das espécies,

com a acácia-negra explorando as regiões mais superficiais; visto que o eucalipto que poderia se beneficiar pela maior disponibilidade de N provinda da acácia-negra (facilitação) não apresentou ganhos em produtividade; além disso, para a acácia negra, indo ao oposto encontrado por Piotto (2008), com a competição interespecífica sendo menor do que a intraespecífica; e para o eucalipto, observamos uma inversão dessa situação.

Forrester et al. (2004) utilizando as mesmas espécies aqui testadas aos 11 anos de idade encontraram que o *Eucalyptus globulus* no consórcio atingiu 80% da produtividade alcançada em sua monocultura, demonstrando grandes vantagem para esta espécie quando cultivada em consórcio, porém esse resultado foi muito diferente do encontrado no presente estudo, o que pode ser explicado pela adaptação da espécie ao local de cultivo, pois, mesmo sendo uma das poucas regiões do Brasil em que essa espécie consegue ter um desenvolvimento satisfatório, possuindo um inverno chuvoso e com baixas temperaturas, é também uma região com ocorrência de geadas e uma amplitude térmica elevada, fatores esses desfavoráveis ao desenvolvimento do *Eucalyptus globulus*. Forrester et al. (2010) avaliando a mesma floresta, porém, com 15 anos, assim como aqui encontrado, o *Eucalyptus globulus* em sua monocultura foi mais produtivo do que no consórcio, porém, essas produtividades foram estatisticamente iguais, o mesmo comportamento foi encontrado para a *Acacia mearnsii*.

Kleinpaul (2008) ao avaliar um plantio consorciado de *Eucalyptus urograndis* com *Acacia mearnsii* aos 10 meses de idade, encontrou resultados semelhantes ao presente estudo, pois a produtividade das espécies em suas respectivas monoculturas foi maior e estatisticamente diferente da produtividade alcançada por cada uma delas em um sistema consorciado 50%E:50%A – LS.

Já em estudo realizado por Balieiro et al. (2002) testando o consórcio entre *Eucalyptus grandis* e a leguminosa *Pseudosamanea guachapele*, a produtividade (m^3/ha) do eucalipto, aos 10 anos de idade, no consórcio foi estatisticamente igual a produtividade alcançada em sua monocultura; já para a leguminosa a produtividade na monocultura foi superior estatisticamente a alcançada no plantio misto, isso considerando que para ambas espécies no consórcio haviam 1.666 árvores/ha e na monocultura 3.333 árvores/ha.

Na Figura 16 podemos ver o comportamento da produtividade ano a ano durante o ciclo e podemos tirar algumas informações importantes. Observamos a baixa produtividade média do eucalipto nos consórcios, principalmente no tratamento 50%E:50%A – LS, aonde atingiu

uma produtividade média de 67,27 m³/ha aos 96 meses, e a acácia-negra nesse mesmo tratamento atingiu 62,41 m³/ha ainda aos 36 meses de idade. No tratamento 50%E:50%A – LD o eucalipto atingiu aos 96 meses, 79,53 m³/ha, sendo, 18% superior a produção atingida no tratamento anterior, mas ainda assim, foi consideravelmente inferior a produtividade alcançada pela acácia-negra, que ainda aos 48 meses de idade já havia atingido uma produtividade de 87,37 m³/ha.

Entre as monoculturas, a acácia-negra apresentou maiores valores de produtividade ao longo de todo o ciclo, atingindo aos 96 meses de idade um valor médio de 235,59 m³/ha e o eucalipto um valor de 207,66 m³/ha.

Figura 16 - Efeito dos tratamentos no crescimento médio ano a ano do Volume por unidade de área (m³/ha); sendo cada linha referente a uma idade, variando de 12 meses a 96 meses

Para a acácia-negra, a idade técnica de corte (ITC) não foi alterada quando se consorciou-a com o eucalipto, como podemos verificar na Figura 17, onde estão presentes as curvas do incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA), situando-se entre os meses 60 e 72. O tratamento 50%E:50%A – LS apresentou seu IMA máximo aos 60 meses de idade e foi equivalente a 24,19 m³/ha/ano com o IMA da rotação atingindo o valor

de 19,03 m³/ha/ano, o tratamento 50%E:50%A – LD também teve seu IMA máximo aos 60 meses de idade, e foi igual a 23,18 m³/ha/ano, apresentando um IMA da rotação de 17,79 m³/ha/ano; e a monocultura (100%A) teve seu IMA máximo na mesma idade dos tratamentos anteriores, equivalente a 34,69 m³/ha/ano com um IMA de todo o ciclo equivalente a 27,27 m³/ha/ano.

Mochiutti (2007) avaliou no período de 3 aos 4 anos de idade um plantio puro de *Acacia mearnsii* e encontrou que o máximo ICA ocorre aos 4 anos de idade (48 meses), o que não vai de encontro com o observado no presente estudo, como podemos observar nos gráficos abaixo esse ápice situou-se aos 36 meses de idade; já em relação ao IMA, o autor encontrou um valor de 27 m³/ha/ano, valor este semelhante ao encontrado no tratamento 100%A.

Figura 17 - Curvas de Incremento Médio Anual x Incremento Corrente Anual para a *Acacia mearnsii*, em a) tem-se o tratamento 50%E:50%A - LS, em b) o tratamento 50%A:50%A - LD e em c) o 100%A

Para o eucalipto também não foram encontradas diferenças na ITC (Figura 18), situando-se entre o 60º e o 72º meses de idade, o tratamento 50%E:50%A – LS foi o tratamento em que essa espécie apresentou a menor produtividade, alcançando um IMA máximo na idade de 60 meses de 9,47 m³/ha/ano e um IMA da rotação de 7,50 m³/ha/ano; no

tratamento 50%E:50%A – LD a ITC se encontrou praticamente aos 72 meses de idade, e alcançando seu IMA máximo aos 60 meses de idade, atingindo um valor de 10,21 m³/ha/ano, o IMA da rotação desse tratamento foi igual a 7,83; a monocultura de eucalipto (100%E) apresentou valores consideravelmente superiores aos dos consórcios, com o IMA máximo aos 60 meses de idade atingido foi de 26,63 m³/ha/ano e o IMA da rotação de 19,60 m³/ha/ano.

Figura 18 - Curvas de Incremento Médio Anual x Incremento Corrente Anual para o *Eucalyptus globulus*, em a) tem-se o tratamento 50%E:50%A - LS, em b) o tratamento 50%A:50%A - LD e em c) o 100%E

Ainda em relação a monocultura do eucalipto (Figura 18 - c) podemos observar um comportamento atípico da curva de ICA, pois após o 72º mês de idade essa curva volta a cruzar a curva de IMA por duas vezes, curva essa que atingiu dois picos, um aos 60 meses de idade, como o valor de 26,63 m³/ha/ano e outro aos 84 meses de idade, com um valor de 26,13 m³/ha/ano.

A produtividade do eucalipto em todos os sistemas testados no estudo encontrou-se abaixo da média nacional, que de acordo com a BRACELPA (2014) e com a IBÁ (2015) gira em torno de 44 m³/ha/ano e 39 m³/ha/ano, respectivamente; e segundo o Serviço Florestal Brasileiro (2015) existem algumas regiões no Brasil atingindo cerca de 60 m³/ha/ano em

rotações de 7 anos, contudo, esse valor não é uma média regional; e menor do que a produtividade média encontrada para a acácia-negra. Segundo o Eng. Glêison Santos de uma empresa do setor florestal, a produtividade média dos plantios de eucalipto na empresa em questão, na região do estudo corrente, é de 43 m³/ha/ano (informação pessoal)¹, apresentando uma superioridade considerável ao valor encontrado de 19,60 m³/ha/ano. O uso de genótipos mais adaptados à região de estudo, como o *Eucalyptus benthamii* e o *Eucalyptus dunnii* poderiam fornecer resultados muito melhores aos aqui atingidos pelo *Eucalyptus globulus* para a região.

Em áreas com baixo potencial produtivo, onde há poucos estudos sobre o desenvolvimento das espécies utilizadas em consórcios, é de grande importância que se tenha o conhecimento técnico-científico em relação as características dos sistemas de cultivo consorciados, para que se possa aumentar a produtividade de ambas espécies envolvidas.

Importante, além de tudo discutido até o momento, é saber acerca da produtividade total dos plantios consorciados, ou seja, considerando em conjunto a produção do *Eucalyptus globulus* e da *Acacia mearnsii*, para assim avaliarmos o potencial produtivo desse tipo de sistema.

Estatisticamente não houveram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as produtividades totais médias dos tratamentos aqui testados ao longo do ciclo, como podemos verificar na Figura 19, que contém os valores médios da produtividade total dos tratamentos ao longo do ciclo. Esse resultado demonstra que o produtor rural, independentemente do sistema adotado, não perderia em produção; contudo, é importante ressaltar que a monocultura de acácia-negra (136,11 m³/ha) foi o tratamento mais produtivo, porém este apresentou praticamente o mesmo valor encontrado para o 50%E:50%A – LD (135,90 m³/ha), que foi o segundo mais produtivo dos tratamentos, e a monocultura de acácia-negra foi apenas 2,7% superior ao 50%E:50%A – LD (132,43 m³/ha/ano), esse sistema consorciado foi o que o eucalipto demonstrou melhor desenvolvimento; a monocultura do eucalipto, apesar das diferenças não terem sido significativas, apresentou um valor menor do que os demais tratamentos (106,00 m³/ha/ano), valor esse 22,12% inferior ao tratamento 100%A.

¹ Eng. Glêison Santos. Mensagem recebida por gustavo.m.soares@usp.br em 11 abril. 2015

Figura 19 - Comportamento da produtividade total média (m³/ha) dos tratamentos

Quando observamos a Figura 20, que contém comportamento médio da produtividade ano a ano durante o ciclo de cada de tratamento, notamos que, os tratamentos 50%E:50%A – LS, 50%E:50%A – LD e o 100%A, tiveram um comportamento semelhante em praticamente todo o ciclo, tendo a monocultura de acácia-negra apresentando valores consideravelmente superiores nos 24°, 36°, 48° e 60° meses de idade o que contribuiu para que sua produtividade total média fosse a maior (Figura 19), apesar de que esse tratamento atingir apenas o terceiro maior valor de produtividade aos 96 meses de idade (235,59 m³/ha); observou-se que o tratamento com as espécies plantadas em linha simples foi o mais produtivo ao final do ciclo (245,60 m³/ha), e o 50%E:50%A – LD (242,10 m³/ha) bem próximo, com ambos tratamentos consorciados sendo mais produtivos que o 100%A a partir do 72° mês de idade; já o tratamento 100%E ficou abaixo dos demais em todo o ciclo de cultivo, atingindo aos 96 meses de idade uma produtividade de 207,66 m³/ha.

Figura 20 - Efeito dos tratamentos na produtividade total por unidade de área (m³/ha) dos tratamentos; sendo cada linha referente a uma idade, variando de 12 meses a 96 meses

Em estudo realizado por Viera et al. (2011) em um plantio consorciado entre *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* o volume total de madeira com casca produzida nos plantios mistos, a exemplo do que ocorreu no corrente estudo, não diferiu estatisticamente do produzido nas monoculturas, porém isso, aos 18 meses de idade. Vezzani et al. (2001) encontrou resultado semelhante para o *Eucalyptus saligna*, onde volume total de madeira produzida no consórcio com a *Acacia mearnsii* não diferiu estatisticamente de sua monocultura aos 45 meses de idade, já para a acácia-negra, o volume total de madeira produzida no consórcio, foi superior e diferente estatisticamente da produtividade atingida em sua monocultura.

Em estudo realizado por Kleinpaul (2008), quando comparadas as produtividades totais do consórcio 50%E:50%A – LS com as monoculturas, o autor também encontrou que a monocultura da *Acacia mearnsii* foi o tratamento mais produtivo, porém este foi diferente estatisticamente dos demais, seguido pelo consórcio, o qual foi igual estatisticamente a monocultura do *Eucalyptus urograndis*.

Dado as informações divulgadas por Forrester et al. (2004, 2010) e levando em consideração as informações disponibilizadas, conclui-se que a produtividade total do consórcio foi superior as atingidas pelas monoculturas, porém tal resultado não foi analisado pelos autores.

Segundo Forrester et al. (2010) nem sempre os consórcios vão ser mais produtivos do que as monoculturas, porém tem a capacidade de aumentar a produção de biomassa ou madeira, podem aumentar a fertilidade do solo ou a disponibilidade de nutrientes (PARROTA, 1999; KAYE et al., 2000; FORRESTER et al., 2005; HANDA et al., 2005), intensificam o sequestro de carbono (KAYE et al., 2000; FORRESTER et al., 2006a), facilitam o controle de riscos e a proteção contra pragas e doenças (EWEL, 1986; FAO, 1995; MONTAGNINI, 2000) e aumentam a eficiência no uso da água (FORRESTER et al., 2004).

E o sucesso dos plantios mistos depende dos atributos de cada uma das espécies e dos fatores inerentes ao sítio (FORRESTER et al., 2005b), o que afeta o balanço das interações positivas e negativas entre as espécies consorciadas (BOYDEN et al., 2005). Em sítio com baixos níveis de N aplicados via fertilização os consórcios foram mais produtivos do que as monoculturas de ambas espécies (FORRESTER, et al, 2004), contudo, o mesmo não ocorreu em altos níveis de N fertilizado, pois o eucalipto suprimiu a acácia-negra, demonstrando que em baixa disponibilidade de N as espécies fixadoras de N contribuíram para o crescimento da espécie associada (BINKLEY, 1983, 2003; DeBELL et al., 1987; BEETS; MADGWICK, 1988; BINKLEY et al, 1992b, 2003), comportamento similar ocorreu em baixos níveis de fósforo (P), mas o crescimento relativo do *Eucalyptus globulus* foi ainda maior nos consórcios em altos níveis de P. Contudo, as espécies fixadoras de N podem competir fortemente por P e dessa forma reduzir o efeito da maior disponibilidade N no crescimento do eucalipto, então a habilidade de responder a esse aumento na disponibilidade de N bem como as taxas de fixação de N podem ser mantidas ou aumentadas pela adição de P via fertilização (BINKLEY et al., 1992a; KHANNA, 1998).

Contudo, os sistemas consorciados para o pequeno/médio produtor são muito interessantes, primeiramente como observamos não haveriam perdas de produtividade por essa escolha, e também pela maior diversificação de sua produção, pois nesse tipo de sistema é possível extrair de sua floresta a casca e a madeira da acácia-negra e a madeira do eucalipto, esta por sua vez, pode ter múltiplos destinos, caso o produtor faça o uso de desbastes, podendo dessa forma atingir o mercado de energia, celulose e madeira serrada. Além disso,

como comentado anteriormente, a espécie de eucalipto utilizada não se adaptou bem a região de estudo, no caso em questão representou menos de 35% da produtividade total dos tratamentos consorciados, portanto a inserção de uma espécie mais indicada a região poderia gerar resultados ainda mais interessantes em relação a produtividade total do sistema consorciado; outra situação interessante é a avaliação da produção de casca nesse tipo de sistema, pois como observamos as árvores de acácia-negra atingiram maiores valores para o DAP quando consorciadas com o eucalipto, o que propicia conjuntamente uma maior produção de casca, que lembrando é um importante produto dessa espécie.

O tratamento 50%E:50%A – LS foi o sistema consorciado que atingiu maior produtividade, seria indicado ao produtor que teria maior interesse na produção da matéria prima de acácia-negra, pois nesse sistema o espaço fornecido ao crescimento desta espécie foi o maior, em contrapartida, para o eucalipto o menor, porém, a operação de colheita seria mais custosa e teria que ser realizada com mais cautela para não correr o risco de danificar árvores que, dependendo das práticas silviculturais adotadas, seriam deixadas na floresta.

O tratamento 50%E:50%A – LD seria indicado ao produtor que tem interesse em maior volume da matéria prima do eucalipto, pois foi nesse tratamento consorciado em que a espécie apresentou melhor desenvolvimento, este tratamento também é interessante quando se pensa na colheita, pois devido ao fato das espécies terem sido plantadas em linhas duplas subsequentes, diminuiria os custos dessa operação, quando comparado com o tratamento 50%E:50%A – LS, pois acaba facilitando o caminhar das máquinas.

As monoculturas se desenvolveram tão bem quanto ou melhor que os demais sistemas, porém a diversificação da produção seria reduzida, contudo, os custos de colheita seriam minimizados.

Do ponto de vista da colheita, o aumento da densidade de plantio implica diretamente a redução do volume individual das árvores, ocasionando também uma redução da capacidade produtiva das colhedoras florestais (BRAMUCCI; SEIXAS, 2002; BURLA, 2008).

Segundo Gingras (1994), o maior desempenho do *harvester* ocorre quando as árvores possuem um DAP entre 14 e 20 centímetros e, portanto, um menor custo de colheita por metro cúbico; no entanto, algumas dificuldades podem afetar tal desempenho, como: o menor comprimento das árvores e o maior diâmetro dos galhos.

Em estudo realizado por Martins et al. (2009), quando avaliaram a eficiência de um *harvester* trabalhando em diferentes espaçamentos, os autores concluíram que o volume médio por árvore foi a variável que melhor explicou a capacidade operacional do *harvester*, e que maiores espaçamentos resultaram em maior volume individual e consequentemente, influenciam no melhor desempenho da colhedeira; nessa mesma situação o custo da operação de colheita foi menor, esses resultados também foram encontrados por Oliveira Neto et al. (2003), Bramucci e Seixas (2002), Burla (2008) e Eliasson e Lageson (1998).

4.1.4 Mortalidade

Para podermos comparar a mortalidade das espécies nos diferentes sistemas adotados, foi utilizada a mortalidade total ao final do ciclo de estudo, e este valor foi passado para porcentagem, utilizando-se como referência o total de árvores plantadas por parcela de cada espécie em cada um dos tratamentos, nos consórcios haviam 56 árvores de *Eucalyptus globulus* e 68 de *Acacia mearnsii*, já nas monoculturas haviam 112 e 136, respectivamente.

Os sistemas consorciados foram muito eficientes em diminuir a mortalidade da acácia-negra, porém, estatisticamente os tratamentos não diferiram ($p > 0,05$) entre si, já para o eucalipto esse decréscimo não foi tão pronunciado, e também os tratamentos não diferiram estatisticamente ($p > 0,05$) entre si, como podemos verificar na Figura 21.

Figura 21 - Comportamento da mortalidade média das espécies nas situações de estudo ao final do ciclo

Apesar da não diferença significativa entre a taxa de mortalidade dos tratamentos para ambas espécies, para a acácia-negra, o tratamento 50%E:50%A – LD foi responsável por diminuir a mortalidade em 20% e o tratamento 50%E:50%A – LS diminuiu a mortalidade em 25%. Medina et al. (1999) já descreveu a preocupação de produtores devido ao intenso tombamento de árvores de *Acacia mearnsii* devido ao aumento da incidência de ventos fortes, essa facilidade de tombamento, segundo a EMBRAPA (2003) e Kannegiesser (1990) ocorre

devido ao sistema radicular da *Acacia mearnsii* ser superficial, situando-se em camadas superiores do solo. A Figura 22 demonstra esse tombamento.

Figura 22 - Árvores de acácia-negra tombadas pelo vento

Portando, os eucaliptos atuaram como uma espécie de quebra vento, o que forneceu uma proteção para a acácia-negra, diminuindo consideravelmente o tombamento destas nos tratamentos consorciados; além disso nesses tratamentos o espaçamento para a acácia-negra foi mais amplo, o que levou a uma menor competição por recursos, e consequentemente diminuindo a taxa de mortalidade.

Para o eucalipto a prática de consorciá-lo com a acácia-negra não diminui efetivamente sua taxa de mortalidade, pois como observado, o tratamento 50%E:50%A – LD obteve praticamente a mesma taxa de mortalidade da monocultura (100%E), no tratamento 50%E:50%A – LS essa taxa apresentou uma queda de 19%. Esses resultados demonstram que a espécie em questão não apresentou boa adaptação as condições ambientais da região, e outro fator que comprova essa baixa adaptação da espécie é o fato de que em todos os sistemas testados sua taxa de mortalidade foi superior as da acácia-negra, espécie que possui uma elevada taxa de mortalidade.

Forrester et al. (2004) também encontrou que a mortalidade foi menor nos consórcios quando comparados com as monoculturas, e que para a *Acacia mearnsii* essa diferença foi significativa, mas não para o *Eucalyptus globulus*.

4.2 Biomassa

4.2.1 Folhas

Com relação a produtividade média individual (Kg/árvore) de biomassa foliar para cada uma das espécies nas situações estudadas aos 96 meses de idade, podemos observar pela Tabela 2 ,que houveram diferenças significativas ($p < 0,05$) apenas no terço inferior da copa

do eucalipto, onde a produção de biomassa foliar média de cada indivíduo foi superior no tratamento 100%E, e este foi diferente estatisticamente aos tratamentos consorciados, que tiveram suas produções estatisticamente iguais ($p > 0,05$). Nas demais situações não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$).

Tabela 2 - Valor médio da produção de biomassa foliar individual (Kg/árvore) de ambas espécies por terço da árvore nas diferentes situações de estudo e a produção total média individual

Tratamento	Espécie	Biomassa (Kg/árvore) Inferior	Biomassa (Kg/árvore) Médio	Biomassa (Kg/árvore) Superior	Biomassa (Kg/árvore) Total
50%E:50%A - LS	Acácia-negra	0,8217 a	1,5938 a	1,2134 a	3,6289 a
50%E:50%A - LD	Acácia-negra	0,7809 a	1,2166 a	1,3016 a	3,2991 a
100%A	Acácia-negra	0,7004 a	2,2967 a	1,258 a	4,2552 a
50%E:50%A - LS	Eucalipto	0,9636 b	2,0996 a	1,2245 a	4,2877 a
50%E:50%A - LD	Eucalipto	1,0188 b	2,182 a	2,0143 a	5,2151 a
100%E	Eucalipto	2,2554 a	3,1175 a	1,4357 a	6,8087 a

No terço inferior das árvores, a acácia-negra apresentou maior valor médio para a produção de biomassa foliar individual aos 96 meses de idade no tratamento 50%E:50%A – LS, valor 17% superior quando comparado ao 100%A, seguido do 50%E:50%A – LD, 11,5% superior ao monocultivo. Para o eucalipto essas diferenças foram mais relevantes, o tratamento 50%E:50%A – LS alcançou apenas 42,7% do valor atingido pela monocultura (100%E), e o tratamento consorciado com as espécies plantadas em linha dupla foi um pouco mais produtivo, atingindo 45,2% do valor da monocultura.

Em relação ao terço médio das árvores, a produção média de biomassa foliar foi superior, para ambas espécies, em suas monoculturas. A acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LS alcançou 69,4% da produtividade média atingida pelo 100%A, e o tratamento 50%E:50%A – LD totalizou 52,9% do galgado pelo 100%A; para o eucalipto o tratamento 50%E:50%A – LS atingiu 67,5% da produção de sua monocultura, e o tratamento 50%E:50%A – LD totalizou 69,9% dessa produtividade.

No terço superior das árvores, a acácia-negra apresentou maior valor para a produção média individual de biomassa foliar no tratamento 50%E:50%A – LD, porém as diferenças com os demais tratamentos foram baixas; em relação ao 100%A foi 3,46% superior e cerca de 7% superior em relação ao tratamento 50%E:50%A – LS. Para o eucalipto as diferenças encontradas foram mais relevantes, o tratamento mais produtivo foi o mesmo da acácia-negra e esse foi 40,3% mais produtivo do que a monocultura de eucalipto (100%E), e o 50%E:50%A – LS chegou a 85,29% da produtividade totalizada pelo 100%E.

Ainda na Tabela 2 temos a produção total média individual de biomassa foliar, e não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos de ambas espécies, e os tratamentos mais produtivos foram as monoculturas. Para a acácia-negra o tratamento 50%E:50%A – LD totalizou 77,5% da produtividade atingida pela monocultura, e o 50%E:50%A – LS galgou 85,3% deste valor. O eucalipto nos tratamentos consorciados atingiu maiores valores do que a acácia-negra, porém, quando comparados com a produção total média individual de biomassa foliar do tratamento 100%E esses tratamentos atingiram valores consideravelmente menores, apesar da não significância dessas diferenças, o tratamento 50%E:50%A – LS alcançou 62,9% da produtividade do 100%E; e o 50%E:50%A – LD apresentou 76,6% da produtividade da monocultura. Ainda podemos observar que o eucalipto foi mais produtivo em relação a biomassa individual em todos os modelos de plantio, apesar da ausência de diferenças significativas.

Vezzani et al. (2001) também não encontraram diferenças significativas para a produção individual média de biomassa foliar para o *Eucalyptus saligna* e para a *Acacia mearnsii* aos 45 meses de idade, quando comparadas suas produções com as respectivas monoculturas. Porém, esses autores verificaram que a produtividade individual média do eucalipto foi superior no consórcio. A exemplo do encontrado no estudo corrente, esses autores também encontraram uma produtividade de biomassa foliar individual média superior para o eucalipto.

4.2.2 Galhos

Com relação a produtividade média individual (Kg/árvore) de biomassa de galhos para cada espécie nos tratamentos estudados aos 96 meses de idade, podemos observar pela Tabela 3 que para ambas as espécies, não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos testados.

Ainda que não significativas essas diferenças, os indivíduos de acácia-negra apresentaram maior biomassa individual média de galhos nos tratamentos consorciados, o oposto ocorreu para o eucalipto, onde os indivíduos apresentaram uma maior produtividade média em sua monocultura. E como característica da espécie, a acácia-negra em todos os modelos de plantio apresentou maiores valores para a biomassa individual de galhos.

Tabela 3 - Valor médio da produção de biomassa de galhos individual (Kg/árvore) de ambas espécies nas diferentes situações de estudo

Tratamento	Espécie	Biomassa (Kg/árvore)
50%E:50%A - LS	Acácia-negra	25,44 a
50%E:50%A - LD	Acácia-negra	18,39 a
100%A	Acácia-negra	16,51 a
50%E:50%A - LS	Eucalipto	5,86 a
50%E:50%A - LD	Eucalipto	10,39 a
100%E	Eucalipto	11,74 a

No tratamento 50%E:50%A – LS a produtividade média individual de biomassa dos galhos para a acácia-negra foi 54,1% superior a produtividade de sua monocultura (100%A), já para o eucalipto esse mesmo tratamento totalizou apenas 49,8% do valor observado no 100%E; já o tratamento 50%E:50%A – LD, para a acácia-negra, foi superior cerca de 11,4% comparado com o 100%A, e para o eucalipto esse tratamento alcançou 88,5% da produtividade de sua monocultura.

Nota-se a influência do espaçamento no desenvolvimento das espécies, pois ambas apresentaram maiores valores para a biomassa média individual de galhos nos tratamentos em que a área disponível para o desenvolvimento foi maior, para a acácia-negra isso ocorreu nos plantios consorciados, e para o eucalipto, em sua monocultura, pois o consorcio reduziu o espaço disponível para o desenvolvimento dessa espécie; o eucalipto que já possuiu uma elevada desrama natural, teve essa característica potencializada pelo maior adensamento de plantio nos tratamentos consorciados.

Em estudo de Vezzani et al. (2001), os autores também não encontraram diferenças significativas para a produção individual média de biomassa de galhos aos 45 meses de idade, tanto para o *Eucalyptus saligna* quanto para a *Acacia mearnsii*, quando comparadas aos valores observados em suas respectivas monoculturas, porém, esses autores encontraram que a biomassa individual média de galhos do eucalipto foi superior no consórcio. Seguindo o comportamento encontrado para a biomassa foliar, os autores encontraram que o eucalipto apresentou maiores valores para a produção de biomassa individual média de galhos, o oposto ocorreu no estudo corrente, onde a acácia-negra apresentou maiores valores para a biomassa individual média de galhos em todos os tratamentos testados.

O diâmetro dos galhos, segundo Wadouski (1987), é um dos fatores externos que influencia na produtividade das máquinas nas operações de colheita de madeira. De acordo

com Malinovski et al. (2006), sobretudo os *Harvesters*, tratores com esteiras e motosserras, nas operações de corte com possibilidade de desgalhamento; carregadores florestais, tratores com esteiras e motosserras, na operação de desgalhamento; e, *skidders* e tratores agrícolas, na operação de extração em conjunto com uma grade desgalhadora, são as máquinas que, diretamente, são influenciadas por estas variáveis.

4.2.3 Lenho

Na Tabela 4 temos os valores da densidade da madeira (g/cm^3) de ambas espécies nos diferentes tratamentos, e podemos observar que para ambas espécies não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$). Contudo, foi encontrada diferença significativa ($p < 0,05$) entre os valores de densidade entre as espécies, a acácia-negra possuiu um valor médio de $0,5908 \text{ g/cm}^3$ (a) e o eucalipto apresentou um valor médio de $0,5519 \text{ g/cm}^3$ (b).

Tabela 4 - Valor médio da densidade (g/cm^3) de ambas espécies nos diferentes tratamentos

Tratamento	Espécie	Densidade (g/cm^3)
50%E:50%A - LS	Acácia-negra	0,6019 a
50%E:50%A - LD	Acácia-negra	0,5864 a
100%A	Acácia-negra	0,5840 a
50%E:50%A - LS	Eucalipto	0,5592 a
50%E:50%A - LD	Eucalipto	0,5513 a
100%E	Eucalipto	0,5461 a

Os resultados de produtividade média individual (Kg/árvore) de biomassa de lenho para cada espécie nos tratamentos estudados aos 96 meses de idade, podem ser observados na Tabela 5. Verifica-se que para ambas as espécies, não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos testados, contudo, é possível observar que nos tratamentos consorciados a acácia-negra apresentou valores superiores aos do eucalipto, espécie que apresentou o maior valor para a biomassa de lenho individual quando em monocultivo.

Tabela 5 - Valor médio da produção de biomassa de lenho individual (Kg/árvore) de ambas espécies nas diferentes situações de estudo

Tratamento	Espécie	Biomassa (Kg/árvore)
50%E:50%A - LS	Acácia-negra	126,65 a
50%E:50%A - LD	Acácia-negra	135,32 a
100%A	Acácia-negra	126,54 a
50%E:50%A - LS	Eucalipto	102,97 a
50%E:50%A - LD	Eucalipto	113,49 a
100%E	Eucalipto	146,52 a

O tratamento 50%E:50%A – LD, para a acácia-negra, foi o que apresentou o maior valor para a biomassa individual de lenho, sendo, 7% superior ao valor do tratamento 100%A, esse tratamento apresentou valor praticamente igual ao 50%E:50%A – LS; para o eucalipto o tratamento que foi observado o maior valor para a biomassa individual de lenho foi a monocultura, e o tratamento 50%E:50%A – LD atingiu 77,45% do alcançado pelo 100%E, já o tratamento com as espécies plantadas em linha simples, 70,28%.

Balieiro et al. (2002) estudaram a biomassa de tronco + casca, e encontraram diferenças significativas entre os tratamentos e entre as espécies, os maiores valores foram encontrados para o eucalipto, tanto no sistema consorciado, quanto na monocultura.

4.2.4 Total

Na Figura 23 temos a biomassa acima do solo total individual média para cada espécie nos tratamentos testados, e podemos observar que não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$); para a acácia-negra todos os tratamentos alcançaram uma produção de biomassa acima do solo semelhantes, com o 50%E:50%A – LD atingindo 157,01 Kg/árvore, o 50%E:50%A – LS 155,72 Kg/árvore, e na monocultura foi observado o menor valor, que foi de 147,30 Kg/árvore; já para o eucalipto essa diferença, mesmo que não significativa, foi superior as encontradas para a acácia-negra, onde o tratamento com as espécies plantadas em linha dupla alcançou uma produção de biomassa acima do solo total individual de 129,09 Kg/árvore, no tratamento 50%E:50%A – LS foi observado um valor de 113,12 Kg/ha, e no 100%E foi observado o maior valor encontrado para essa variável, que foi de 165,07 Kg/ha.

Figura 23 - Comportamento biomassa total acima do solo total individual (Kg/árvore) por compartimento nos diferentes tratamentos para ambas espécies

Observa-se também que para ambas espécies e em todos os tratamentos a biomassa de lenho foi a de maior escala, e com isso a ordem decrescente da produção de biomassa por árvore foi: Lenho > Galhos > Folhas.

Viera e Schumacher (2011) encontraram que aos 6 meses de idade, tanto o eucalipto quanto a acácia-negra, independentemente de ser no monocultivo ou no consórcio, apresentaram a mesma ordem de alocação (folhas > madeira > galhos > casca), onde a copa foi responsável por mais de 50% da biomassa total; aos 18 meses de idade a ordem de alocação do eucalipto foi: madeira > galhos > folhas > casca, e a acácia-negra: madeira > folhas > galhos > casca, e no geral, para ambas espécies o tronco passou a representar mais de 50% da biomassa total.

Quando Barrichello et al. (2005) quantificou a biomassa de um povoamento puro de *Acacia mearnsii* na região sul do Brasil aos 8 anos de idade, encontraram que a ordem de alocação de biomassa foi: madeira > galhos > folhas, o mesmo padrão foi encontrado por Pereira et al. (1997).

Nota-se que o padrão de alocação da biomassa individual total acima do solo para ambas espécies foi o mesmo observado para a biomassa individual de lenho, o que demonstra a alta correlação entre essas variáveis (Tabela 6). Para o eucalipto, a biomassa individual total acima do solo apresentou o mesmo padrão que todos os compartimentos (folhas, galhos e lenho).

Tabela 6 - Matriz de correlação entre as variáveis: Biomassa de folhas por árvore (Kg/árvore), Biomassa de galhos por árvore (Kg/árvore), Biomassa de lenho por árvore (Kg/árvore), Biomassa total acima do solo por árvore (Kg/árvore) e volume individual (m³/árvore)

	Folhas (Kg/árvore)	Galhos (Kg/árvore)	Lenho (Kg/árvore)	Total (Kg/árvore)	Volume (m ³ /árvore)
Folhas (Kg/árvore)	1,00	-	-	-	-
Galhos (Kg/árvore)	0,34	1,00	-	-	-
Lenho (Kg/árvore)	0,76	0,42	1,00	-	-
Total (Kg/árvore)	0,77	0,54	0,99	1,00	-
Volume (m ³ /árvore)	0,79	0,43	0,98	0,98	1,00

A acácia-negra obteve no tratamento 50%E:50%A – LD valor médio de biomassa total acima do solo por indivíduo de 157,01 Kg/árvore, sendo que desse valor 2,1% é referente a biomassa de folhas, 11,71% a biomassa de galhos e 86,19% referente a biomassa de lenho (casca + madeira); e esse valor foi 6,6% superior ao observado na monocultura da espécie, que foi de 147,30 Kg/árvore, onde, 2,89% pertence a biomassa de folhas, 11,21% a biomassa de galhos e 85,91% referente a biomassa de lenho (casca + madeira); já para o tratamento 50%E:50%A – LS foi observado um valor de 155,72 Kg/árvore de biomassa total acima do solo, com 2,33% pertencente a biomassa foliar, 16,33% a biomassa de galhos e 81,34% ao lenho (casca + madeira), esse valor é 4,7% superior ao atingido pelo 100%A.

Segundo Sanquetta et al. (2014) a madeira e a casca são os compartimentos de maior interesse para os silvicultores de acácia-negra, e os autores encontraram que a biomassa desses compartimentos representou 80% da biomassa total acima do solo. Barrichello et al. (2005) encontrou que esses dois compartimentos representam 70,6% da biomassa acima do solo da acácia-negra.

No tratamento 50%E:50%A – LD o eucalipto alcançou uma produção de biomassa total acima do solo de 129,09 Kg/árvore, sendo desse valor, 4,04% devido a biomassa de folhas, 8,05% a biomassa de galhos e 87,91% a biomassa de lenho (casca + madeira); esse valor foi equivalente a 78,20% do observado na monocultura do eucalipto, onde observou-se uma quantia de 165,07 Kg/árvore, o qual, 4,12% é devido as folhas, 7,11% aos galhos e 88,76% ao lenho (casca + madeira); já para o tratamento 50%E:50%A – LS observou-se um valor de 68,5% do atingido no 100%E, e foi de 113,13 Kg/ha, onde 3,79% é referente a biomassa foliar, 5,18% a biomassa de galhos e 91,03% a biomassa de lenho (casca + madeira). Resultado esse que demonstra novamente o efeito negativo da competição

interespecífica no desenvolvimento do eucalipto nos consórcios, apesar das diferenças não terem sido significativas.

Viera et al. (2013) ao quantificar a biomassa em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* aos 10 anos de idade, plantado no espaçamento de 3,5 m x 2,5 m, encontrou que a biomassa acima do solo foi de 173,68 Kg/árvore, a madeira foi responsável por 84,2% desse valor, e a casca, os galhos e as folhas representaram 9,5%, 4,5% e 1,8%, respectivamente, sendo assim, a madeira + casca responsáveis por 93,7% da biomassa individual total acima do solo, valores esses semelhantes aos encontrados no presente estudo.

Altos valores percentuais de biomassa de lenho foram também encontrados por Reis et al. (1985), quando os autores avaliaram o acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis*, eles relataram que na fase inicial de desenvolvimento (15 meses de idade) a biomassa do lenho era inferior a 45% do total da biomassa aérea; porém, com o passar do tempo (73 meses de idade) esse componente atingiu mais de 85% da biomassa aérea total. Santana et al. (1999) encontraram valores variando entre 88 e 92% para a biomassa do lenho em relação a biomassa total acima do solo em diferentes procedências de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*.

Schumacher e Caldeira (2004) ao quantificar a biomassa em povoamentos de *Eucalyptus saligna*, encontraram que aos 7 anos de idade, a madeira e a casca representavam 92% da biomassa total acima do solo, os galhos 5% e as folhas 3%; valores esses semelhantes aos encontrados no presente estudo para o *Eucalyptus globulus* em sua monocultura.

Segundo Larcher (2000) durante a fase inicial de desenvolvimento de uma árvore, grande parte dos carboidratos é canalizada para a produção de biomassa da copa, e a partir do momento em que as copas começam a fechar, a produção relativa do tronco aumenta e a de folhas e ramos diminui gradativamente, por isso no presente estudo, onde o povoamento já passava dos 8 anos de idade, para ambas espécies e em todos os tratamentos, a participação das folhas e galhos na biomassa total acima do solo foi baixa.

Em estudo realizado por Viera e Schumacher (2011), onde se avaliou a biomassa em povoamentos monoespecíficos e mistos de eucalipto e acácia-negra e do milho em sistema agrossilvicultural, a exemplo do estudo corrente, não foram encontradas diferenças significativas quanto a alocação de biomassa total acima do solo, tanto pelo eucalipto, quanto pela acácia-negra, isso aos 6 e 18 meses de idade. Contudo quando os autores levaram em

consideração a compartimentação da biomassa, verificou-se diminuição na produção de biomassa de copa (folhas e galhos) da acácia-negra quando em consórcio com o eucalipto, aos 18 meses de idade, em relação ao monocultivo, o mesmo não ocorreu para o eucalipto, segundo os autores isso demonstrou uma interação competitiva interespecífica do eucalipto sobre a acácia-negra, ocasionando redução da formação de copa, no presente estudo, aos 96 meses de idade, ocorreu exatamente o oposto, pois a acácia-negra apresentou maior produção de copa nos tratamentos consorciados, com o tratamento 50%E:50%A – LS apresentando um valor de 29,06 Kg/árvore (3,63 Kg de folhas + 25,43 Kg de galhos) e o 50%E:50%A – LD um valor de 21,69 Kg/árvore (3,30 Kg de folhas + 18,39 Kg de galhos), enquanto a monocultura apresentou um valor de 20,76 Kg/árvore (4,25 Kg de folhas + 16,51 Kg de galhos); e o eucalipto apresentou menor produção de biomassa de copa nos tratamentos consorciados, sendo observado no tratamento 50%E:50%A – LS um valor de 10,14 Kg/árvore (4,28 Kg de folhas + 5,86 Kg de galhos) e o 50%E:50%A – LD apresentou um valor de 15,6 Kg/árvore (5,21 Kg de folhas + 10,39 Kg de galhos), enquanto que no 100%E observou-se uma produção de 18,55 Kg/árvore (6,81 Kg de folhas + 11,74 Kg de galhos), porém, essas diferenças não foram significativas para ambas espécies.

Quando Parrota (1999) quantificou a biomassa de povoamentos mistos entre *Eucalyptus robusta* (E), *Casuarina equisetifolia* (C) e *Leucaena leucocephala* (L), o autor encontrou diferença significativa entre os tratamentos (100%C, 100%E, 100%L, 50%C:50%E, 50%E:50%L, 50%C:50%L), para o eucalipto a biomassa acima do solo nos consórcios atingiu de 43 – 50% do valor encontrado na monocultura, não sendo possível afirmar se houveram interações positivas ou negativas, para a leucaena, quando consorciada com o eucalipto, a biomassa total acima do solo foi 47% de sua monocultura, e com a casuarina esse valor foi de 96% e essa última espécie, quando consorciada com o eucalipto a biomassa total acima do solo foi de 66% do valor observado em sua monocultura, e quando junta com a leucaena esse valor foi de 86%.

Observou-se também uma elevada correlação (0,98) entre a biomassa total individual acima do solo com o volume individual das espécies, como podemos observar na Figura 24. Isso ocorreu, pois como visto na Tabela 4, não foram encontradas diferenças significativas em relação a densidade da madeira (g/cm³) das espécies nos modelos de plantio testados, com a acácia-negra apresentando no 50%E:50%A – LS um valor de 0,60 g/cm³, no 50%E:50%A – LD um valor de 0,59 g/cm³ e no monocultivo 0,58 g/cm³, e o eucalipto apresentando valores de 0,56 g/cm³, 0,55 g/cm³ e 0,54 g/cm³ respectivamente nos tratamentos 50%E:50%A – LS,

50%E:50%A – LD e 100%E, e essa variável tem uma forte relação com a biomassa de lenho (Kg), que por sua vez se correlaciona fortemente com o volume individual das espécies (0,98) e com a biomassa total acima do solo (0,99) (Tabela 6).

Figura 24 - Correlação entre a biomassa total acima do solo por árvore (Kg/árvore) e o volume individual (m³/árvore)

4.3 Índice de Área Foliar (IAF)

A partir da metodologia destrutiva foi possível determinar o IAF de cada espécie em cada um dos tratamentos aqui testados considerando os terços das árvores e também o IAF foliar da copa da árvore como um todo.

Como podemos observar na Tabela 7 não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos para ambas espécies em todas as situações testadas. Contudo, esses valores devem ser analisados com calma, pois como observado por Fotan (2007) e por Cacau (2008); o IAF está altamente relacionado com a atividade fotossintética das plantas.

Tabela 7 - IAF médio de ambas espécies por terço da copa da árvore nas diferentes situações de estudo e o IAF médio da copa de cada espécie nas situações de estudo

Tratamento	Espécie	IAF - Inferior	IAF - Médio	IAF - Superior	IAF - Copa
50%E:50%A - LS	Acácia-negra	1,9887 a	4,0628 a	2,6277 a	2,8931 a
50%E:50%A - LD	Acácia-negra	1,8152 a	2,7682 a	2,3864 a	2,3232 a
100%A	Acácia-negra	1,4651 a	4,3678 a	2,1133 a	2,6488 a
50%E:50%A - LS	Eucalipto	1,3000 a	2,7518 a	1,7179 a	1,9232 a
50%E:50%A - LD	Eucalipto	1,6325 a	2,3019 a	1,8448 a	1,9264 a
100%E	Eucalipto	3,6737 a	4,0667 a	2,0024 a	3,2476 a

No terço inferior das árvores, aonde contêm, em sua maioria, folhas em estado de senescência, podemos observar na Tabela 7 que a acácia-negra apresentou valores próximos

de IAF, contudo, os tratamentos aonde ela esteve consorciada ao eucalipto foram os que apresentaram maiores valores; já para o eucalipto, foi observado um comportamento oposto, pois o tratamento 100%E apresentou valor de IAF superior as situações aonde a espécie estava consorciada, apesar na inexistência de diferenças significativas.

O maior valor do IAF no terço inferior foi observado no tratamento 100%E, porém, o eucalipto, nos tratamentos consorciados, quando comparado com a acácia-negra, apresentou valores inferiores.

Quando analisamos o terço médio isoladamente, notamos que para o eucalipto a monocultura mais uma vez apresentou valor superior aos demais tratamentos, e para a acácia-negra, agora, o tratamento que apresentou maior valor de IAF foi também a monocultura, porém acompanhada de perto pelo tratamento 50%E:50%A – LS, como podemos verificar na Tabela 7, além disso, a acácia-negra apresentou maiores valores de IAF nos consórcios do que o eucalipto.

No terço superior, aonde estão presentes as folhas em estado juvenil e que recebem diretamente a radiação solar, o eucalipto atingiu o maior valor para o IAF na monocultura, porém, a diferença com os demais tratamentos não foi grande, e não foi significativa, como podemos observar na Tabela 7; para a acácia-negra como ocorrido nos demais terços, o tratamento 50%E:50%A – LS apresentou o maior valor de IAF, e novamente esta espécie apresentou valores superior de IAF do que o eucalipto nos consórcios.

Quando analisamos os valores do IAF da copa da árvore, observamos que para a acácia-negra esses valores não foram muito diferentes, além disso, o tratamento em que o volume individual médio para essa espécie foi o maior, também foi o que o valor para IAF também foi maior, porém no tratamento 100%A foi observado o segundo maior valor para o IAF, já no volume individual foi observado o menor valor, para o eucalipto esse mesmo padrão também foi encontrado, visto isso, a correlação entre o IAF e o volume individual das espécies foi de 0,69 (Figura 25 – A).

Figura 25 - Correlação entre o IAF da copa e, em A) o volume individual (m³/árvore), em B) a Biomassa de folhas (Kg/árvore), em C) a biomassa de galhos (Kg/árvore), em D) a biomassa de lenho (Kg/árvore), em E) a biomassa total acima do solo (Kg/árvore) e em F) o DAP (cm)

O IAF teve alta correlação com a biomassa foliar, apresentando um valor de 0,81, com a biomassa de lenho de 0,72, com a biomassa total acima do solo com um valor de 0,74 e com o DAP, sendo a correlação de 0,70; como podemos observar nas Figura 25 – B, D, E e F, já com a biomassa de galhos a correlação não foi alta, apresentando um valor de 0,41 (Figura 25 – C).

Em estudo realizado por Viera et al. (2011) foi verificado um aumento significativo para o IAF do eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) no sistema consorciado 50%E:50%A – LS em relação aos demais tratamentos, o que indicou, segundo os autores, um efeito positivo interespecífico. Algumas semelhanças com o presente estudo foram notadas no estudo de Viera et al. (2011), como o fato de que a acácia-negra apresentou maiores valores de IAF quando consorciadas com o eucalipto, e as diferenças entre os tratamentos também não foram significativas, contudo, os valores encontrados pelos autores em questão (50%E:50%A – LS = 4,5; 100%A = 4,0), foram superiores aos aqui encontrados (50%E:50%A – LS = 2,89; 50%E:50%A – LD = 2,32; 100%A = 2,65). Para o eucalipto, o valor que esses autores encontraram para o IAF na monocultura (3,6) foi semelhante ao encontrado no estudo corrente (3,25); porém o valor encontrado para esta espécie no consórcio (5,9) foi muito superior ao IAF encontrado aqui nos tratamentos consorciados (50%E:50%A – LS = 1,92; 50%E:50%A – LD = 1,93), o que comprova mais uma vez que o *Eucalyptus globulus* não se adapta a região de estudo.

Contudo, Xavier et al. (2002) encontraram valores entre 1,7 e 4,3 para o IAF em estudos com clones de eucalipto, demonstrando que os valores aqui apresentados estão dentro desse intervalo. Já Dovey e du Toit (2006) em um plantio jovem de *Eucalyptus grandis* encontraram um IAF médio de 4,1 aos 2 anos de idade e 3,8 aos 3 anos de idade, demonstrando que, o IAF geralmente aumenta até o fechamento das copas, depois disso, o IAF tende a se equilibrar ou reduzir gradualmente (JARVIS; LEVERENZ, 1983; BEADLE; LONG, 1985; CROMER et al., 1993), segundo Xavier et al. (2002) o IAF tende a cair depois do pico de crescimento dos indivíduos.

Behling (2014) ao analisar o IAF de plantios comerciais de *Acacia mearnsii*, aos 7 anos de idade, encontrou valores variando de 3,25 até 9,10, com uma média de 5,35; valores esses superiores aos encontrados no estudo corrente, que para a acácia-negra apresentou um valor médio de 2,62.

4.4 Modelagem

4.4.1 Modelo Volumétrico

Após a cubagem pela metodologia de Smalian ter sido calculada, os coeficientes do modelo de Schumacher & Hall foram estimados para todas as situações de estudo.

Observou-se que os valores do coeficiente de correlação ajustado ($\bar{R}_{\hat{y}y}^2$) apresentaram valores entre 0,90 e 0,99 e os valores do erro padrão do resíduo ($S_{\hat{y}y}$) apresentaram, no geral, valores muito baixos, situando-se entre 0,02 m e 0,3 m, indicando que os modelos se ajustaram muito bem aos dados provindos da cubagem. Tal precisão do ajuste pode ser verificada pelo histograma de frequência dos erros percentuais (Figura 26), onde é possível verificar que o erro para os modelos ficou entre $\pm 5\%$, o que é um valor altamente aceitável.

Figura 26 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos de Schumacher & Hall

Porém, uma fonte de viés pode estar presente nos modelos volumétricos quando utilizados para recuperar os volumes das árvores em idades muito anteriores a da cubagem, que foi realizada no ano de 2014.

4.4.2 Modelos de Crescimento

a Altura

Os valores de todos os parâmetros das regressões estão presentes no Quadro 1, onde é possível notar que o desenvolvimento em altura para a acácia-negra foi mais homogêneo entre os tratamentos, devido a pequena diferença entre esses parâmetros, o que é confirmado com o coeficiente da variação (CV%) para a variável em questão, que para a acácia-negra apresentou um valor de 38,26% e para o eucalipto um valor de 44,77%.

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
Schumacher	β_0	3,13419***	3,099419***	3,072082***
	β_1	-20,17125***	-20,22816***	-19,327062***
Logístico	β_0	18,416723***	17,981159***	17,596109***
	β_1	6,144057***	6,054428***	5,838711***
	β_2	0,074762***	0,072811***	0,074391***
Chapman-Richards	β_0	19,31843***	18,9475***	18,45616***
	β_1	0,04062***	0,03887***	0,040237***
	β_2	1,47472***	1,43853***	1,416286***
		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Schumacher	β_0	3,10702***	3,20152***	3,18518***
	β_1	-21,80635***	-24,41033***	-25,25886***
Logístico	β_0	17,592663***	19,012234***	18,688164***
	β_1	6,947795***	8,519955***	8,803475***
	β_2	0,075868***	0,075822***	0,077139***
Chapman-Richards	β_0	18,483606***	20,152223***	19,782976***
	β_1	0,041133***	0,039814***	0,040822***
	β_2	1,596995***	1,768446***	1,822118***

Quadro 1 - Parâmetros dos modelos de crescimento modelados para a variável altura e suas significâncias

De acordo com o teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002), realizado a 5% de significância, o modelo de Schumacher foi descartado em todas as situações de estudo, o que pode ser observado no Quadro 2 e que em algumas situações, como acontece para o eucalipto nos tratamentos 50%E:50%A – LS e 50%E:50%A – LD e para a acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LD e 100%A, é facilmente eliminado através do histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 4).

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Schumacher	F	15,1770*	12,4496*	11,9632*	26,5633*	8,7582*	79,5039*
	t	3,3179*	3,6019*	3,2637*	3,7969*	2,5415*	5,0967*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest
Logístico	F	0,2007 ^{ns}	0,2174 ^{ns}	0,1760 ^{ns}	0,2046 ^{ns}	0,2026 ^{ns}	0,2192 ^{ns}
	t	0,5053 ^{ns}	0,5059 ^{ns}	0,4593 ^{ns}	0,5338 ^{ns}	0,6003 ^{ns}	0,6132 ^{ns}
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest
Chapman-Richards	F	0,0672 ^{ns}	0,0766 ^{ns}	0,0516 ^{ns}	0,0685 ^{ns}	0,0474 ^{ns}	0,0731 ^{ns}
	t	0,4395 ^{ns}	0,4366 ^{ns}	0,3796 ^{ns}	0,4643 ^{ns}	0,4800 ^{ns}	0,5525 ^{ns}
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest	Hobs = Hest

Quadro 2 - Resultados do procedimento estatístico proposto por Leite e Oliveira (2002) na análise das equações modeladas para a variável altura

Para os demais modelos, todos os parâmetros já citados, juntamente com o valor de F do teste L&O proposto por Leite & Oliveira (2002) e os demais parâmetros (Quadro 3), foram utilizados para a tomada de decisão na escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Schumacher	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,849	0,830	0,809	0,847	0,854	0,762
	$S_{\hat{y}y}$	0,200	0,224	0,224	0,224	0,245	0,346
	BIAS	0,212	0,262	0,254	0,242	0,298	0,544
	RQEM	15,602	18,141	16,863	18,429	18,169	25,161
Logístico	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,905	0,882	0,894	0,885	0,909	0,848
	$S_{\hat{y}y}$	2,235	2,478	2,259	2,477	2,494	3,367
	BIAS	-0,025	-0,025	-0,020	-0,028	-0,034	-0,039
	RQEM	15,999	18,436	17,074	18,787	18,365	25,168
Chapman-Richards	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,910	0,887	0,898	0,890	0,913	0,852
	$S_{\hat{y}y}$	2,175	2,425	2,214	2,423	2,438	3,320
	BIAS	-0,007	-0,007	-0,005	-0,008	-0,006	-0,009
	RQEM	15,569	18,039	16,733	18,380	17,954	24,812

Quadro 3 - Estatísticas obtidas após o ajuste dos modelos de crescimento para a variável altura

Como é possível verificar, a partir das informações apresentadas nos Quadros 2 e 3, o modelo de Chapman-Richards foi o que melhor se ajustou aos dados de altura, para ambas espécies em todos os tratamentos. O modelo foi o responsável por apresentar os maiores valores para o coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados com valores entre 0,85 e 0,91, além de apresentar os menores valores para BIAS (envieçamento na estimativa), situando entre -0,006 m e 0,009 m, da RQEM, variando entre 15,5 e 24,8 e

atingindo valores inferiores a 0,08 para a estatística F do teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002).

Observando o histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 4), também é possível verificar a superioridade do modelo de Chapman-Richards quanto ao comportamento dos resíduos, onde é notável um comportamento tendendo a normalidade.

Na Figura 27 estão apresentadas o comportamento de cada um dos modelos, em uma situação de estudo, para demonstrar a diferença entre eles, principalmente em relação ao ponto de inflexão.

Figura 27 - Comportamento das curvas para o tratamento 50%E:50%A - LS para o eucalipto; tem-se em a) o modelo de Schumacher, em b) o modelo Logístico e em c) o modelo de Chapman-Richards

Quadro 4 - Histograma de frequência dos erros percentuais de todos os modelos ajustados para estimação da altura (continua)

Quadro 4 - Histograma de frequência dos erros percentuais de todos os modelos ajustados para estimação da altura (conclusão)

b DAP

Para o DAP, a exemplo da altura, o desenvolvimento foi mais homogêneo entre os tratamentos para a acácia-negra, apresentando um coeficiente de variação de 45%, já para o eucalipto, apresentou um valor de 53,12%, tal fato pode ser evidenciado pela menor diferença entre os parâmetros das equações (Quadro 5) para a acácia-negra, porém essa diferença foi menos pronunciada quando comparada com a altura, o que reflete no menor coeficiente dessa variável para ambas espécies. Tal comportamento também pode ser observado a partir dos histogramas de frequência dos erros percentuais (Quadro 8).

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
Schumacher	β_0	2,9798***	2,91804***	2,813611***
	β_1	-22,0598***	-22,20159***	-20,269233***
Logístico	β_0	15,914729***	15,09432***	13,824008***
	β_1	6,698604***	6,8283***	6,095305***
	β_2	0,071756***	0,07153***	0,07208***
Chapman-Richards	β_0	16,880182***	16,046066***	14,610756***
	β_1	0,037503***	0,037114***	0,037849***
	β_2	1,510588***	1,520836***	1,420325***
		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Schumacher	β_0	2,6925***	2,89734***	3,07399***
	β_1	-18,52678***	-23,56244***	-28,60861***
Logístico	β_0	12,52821***	14,960726***	16,79435***
	β_1	4,94687***	7,403812***	9,944355***
	β_2	0,069697***	0,0701***	0,074857***
Chapman-Richards	β_0	13,174039***	16,04392***	17,993217***
	β_1	0,037118***	0,03506***	0,038234***
	β_2	1,245899***	1,54321***	1,906563***

Quadro 5 - Parâmetros dos modelos de crescimento modelados para a variável DAP e suas significâncias

Da mesma forma que ocorreu para a altura, o modelo de Schumacher foi rejeitado para o DAP em todas as situações de estudo pelo teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002) realizado a 5% de significância, como podemos verificar no Quadro 6, atingindo valores de F e t de até 177,36 e 5,24, respectivamente, sendo assim muito superiores aos valores encontrados para os demais modelos, que para a estatística F atingiu um valor máximo de 0,23 e para t um valor de 0,66. Em algumas situações, como os tratamentos 50%E:50%A –

LS e o 100%E, para o eucalipto, e em todos os tratamentos para a acácia-negra, é possível, a partir do histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 8), observarmos superioridade dos modelos Logístico e de Chapman-Richards sobre o de Schumacher.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Schumacher	F	25,9667*	32,0431*	24,9617*	33,6789*	20,6530*	177,3629*
	t	4,5902*	5,3526*	4,6060*	4,7771*	3,6277*	5,2454*
	$R_{\hat{Y}} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	DAPobs $\neq$ DAPest	DAPobs $\neq$ DAPest	DAPobs $\neq$ DAPest	DAPobs $\neq$ DAPest	DAPobs $\neq$ DAPest	DAPobs $\neq$ DAPest
Logístico	F	0,2220 ^{ns}	0,2340 ^{ns}	0,1813 ^{ns}	0,1457 ^{ns}	0,1538 ^{ns}	0,2322 ^{ns}
	t	0,5596 ^{ns}	0,5629 ^{ns}	0,4881 ^{ns}	0,3997 ^{ns}	0,5333 ^{ns}	0,6669 ^{ns}
	$R_{\hat{Y}} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest
Chapman-Richards	F	0,0783 ^{ns}	0,0867 ^{ns}	0,0536 ^{ns}	0,0389 ^{ns}	0,0079 ^{ns}	0,0766 ^{ns}
	t	0,4968 ^{ns}	0,4990 ^{ns}	0,4079 ^{ns}	0,3174 ^{ns}	0,1848 ^{ns}	0,6167 ^{ns}
	$R_{\hat{Y}} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest	DAPobs = DAPest

Quadro 6 - Resultados do procedimento estatístico proposto por Leite & Oliveira (2002) na análise das equações modeladas para a variável DAP

A partir dos demais parâmetros, apresentados no Quadro 7, o modelo de Chapman-Richards foi o que melhor de ajustou aos dados de DAP, para todas as situações de estudo, possuindo os maiores valores para o coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados; atingindo valores entre 0,72 e 0,83, enquanto o modelo de Schumacher os valores situaram-se entre 0,62 e 0,76 e no Logístico entre 0,71 e 0,82; apresentou também os menores valores, entre -0,009 m e -0,001 m, para BIAS (envieçamento na estimativa) e da RQEM, contudo esses valores foram próximos aos encontrados para o modelo Logístico, já os valores da estatística F do teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002) foram consideravelmente menores para o modelo de Chapman-Richards, encontrando-se entre 0,0079 e 0,0867; enquanto que o modelo Logístico apresentou valores entre 0,234 e 0,145 (Quadro 6).

Como foi observado para a altura, pôde-se observar um comportamento dos resíduos do modelo de Chapman-Richard tendendo a normalidade (Quadro 8).

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50% - LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Schumacher	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,760	0,744	0,713	0,623	0,656	0,648
	$S_{\hat{y}y}$	0,300	0,316	0,316	0,344	0,412	0,510
	BIAS	0,396	0,444	0,385	0,424	0,615	0,883
	RQEM	24,712	28,116	26,001	30,828	32,896	36,280
Logístico	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,826	0,797	0,807	0,719	0,771	0,771
	$S_{\hat{y}y}$	2,903	3,078	2,639	2,946	3,425	4,135
	BIAS	-0,026	-0,025	-0,018	-0,012	-0,020	-0,040
	RQEM	24,786	28,051	25,885	30,645	32,325	35,648
Chapman-Richards	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,831	0,802	0,811	0,723	0,774	0,775
	$S_{\hat{y}y}$	2,864	3,045	2,614	2,930	3,407	4,103
	BIAS	-0,008	-0,007	-0,004	-0,003	-0,001	-0,009
	RQEM	24,451	27,753	25,641	30,479	32,162	35,371

Quadro 7 - Estatísticas obtidas após o ajuste dos modelos de crescimento para a variável DAP

Na Figura 28 podemos observar o comportamento de cada um dos modelos, em uma situação de estudo, para demonstrar a diferença entre eles, principalmente em relação ao ponto de inflexão.

Figura 28 - Comportamento das curvas para o tratamento 100%A; tem-se em a) o modelo de Schumacher, em b) o modelo Logístico e em c) o modelo de Chapman-Richards

Quadro 8 - Histograma de frequência dos erros percentuais de todos os modelos ajustados para estimação do DAP (continua)

Quadro 8 - Histograma de frequência dos erros percentuais de todos os modelos ajustados para estimação do DAP (conclusão)

c Volume Individual

No Quadro 9 estão representados os parâmetros de todas as regressões, onde foi possível, novamente, observar uma maior aproximação entre os valores dos parâmetros para a acácia-negra entre os tratamentos.

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
Schumacher	β_0	-1,021***	-1,17036***	-1,38***
	β_1	-66,2609***	-64,40591***	-63,2273***
Logístico	β_0	0,222669***	0,207924***	0,164692***
	β_1	31,648051***	33,018427***	30,462581***
	β_2	0,067017***	0,067612***	0,068978***
Chapman-Richards	β_0	0,272698***	0,254792***	0,197273***
	β_1	0,02796***	0,028238***	0,029667***
	β_2	3,209704***	3,288126***	3,221833***
		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Schumacher	β_0	-1,71443***	-1,12189***	-0,90229***
	β_1	-61,64523***	-85,20186***	-82,91191***
Logístico	β_0	0,134003***	0,188189***	0,248157***
	β_1	28,377577**	43,895597**	48,543368***
	β_2	0,066959***	0,069763***	0,069638***
Chapman-Richards	β_0	0,162233***	0,23143854***	0,309495***
	β_1	0,028207***	0,02962***	0,029179***
	β_2	3,04369**	3,90606***	4,074084***

Quadro 9 - Parâmetros dos modelos de crescimento modelados para a variável Volume (m³) e suas significâncias

O modelo de Schumacher, que para essa variável, mesmo apresentando os maiores valores para os coeficientes de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$), variando entre 0,65 e 0,80 (Quadro 11), foi rejeitado pelo teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002) realizado a 5% de significância (Quadro 10), apresentando valores muito elevados para a estatística F, de até 9.034,89; e essa inferioridade perante os demais modelos testados é facilmente observado no histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 12) para todas as situações de estudo.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Schumacher	F	416,0607*	363,3302*	1133,9092*	1117,1557*	2057,0619*	9034,8960*
	t	5,3560*	8,3704*	5,8767*	7,8403*	6,0171*	11,1447*
	$R_{\hat{Y}} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Vobs $\neq$ Vest	Vobs $\neq$ Vest	Vobs $\neq$ Vest	Vobs $\neq$ Vest	Vobs $\neq$ Vest	Vobs $\neq$ Vest
Logístico	F	0,4918 ^{ns}	0,4969 ^{ns}	0,4477 ^{ns}	0,4514 ^{ns}	0,4567 ^{ns}	0,5 ^{ns}
	t	1,0047 ^{ns}	1,0057 ^{ns}	0,9957 ^{ns}	0,9889 ^{ns}	1,0263 ^{ns}	1,0272 ^{ns}
	$R_{\hat{Y}} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest
Chapman-Richards	F	0,4036 ^{ns}	0,3923 ^{ns}	0,2869 ^{ns}	0,2761 ^{ns}	0,0814 ^{ns}	0,2409 ^{ns}
	t	1,0121 ^{ns}	1,0075 ^{ns}	1,0026 ^{ns}	0,9877 ^{ns}	1,0357 ^{ns}	1,0620 ^{ns}
	$R_{\hat{Y}} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest	Vobs = Vest

Quadro 10 - Resultados do procedimento estatístico proposto por Leite & Oliveira (2002) na análise das equações modeladas para a variável Volume (m³)

Para o volume individual, como foi comentado no item 4.4.1, ao se estimar a produção volumétrica dos indivíduos em idades juvenis uma fonte de viés pode estar presente, devido ao fato da cubagem ter sido realizada apenas no ano de 2014, porém, mais uma vez é importante frisar que para a idade em que os modelos foram ajustados, eles estimaram com precisão os volumes das árvores.

Tal tendência pode ser observada no histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 12), pois ao contrário da altura e DAP, em algumas situações, os resíduos não apresentaram um comportamento tendendo a normalidade e também o nível dos erros não ficou localizado na faixa dos 10% e -10%. Mas nessa situação, o modelo de Chapman-Richards foi o único que conseguiu minimizar os erros, mantendo ainda um comportamento, em praticamente todas as observações, tendendo a normalidade.

Quando observamos os demais parâmetros de decisão (Quadro 11), o modelo de Chapman-Richards se sobressaiu mais uma vez sobre os demais, mas agora, por apresentar os menores valores do erro padrão do resíduo (S_{yx}), BIAS, RQEM; contudo esses valores foram próximos aos encontrados para o modelo Logístico, porém, os valores da estatística F do teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002) (Quadro 10) foram inferiores para o modelo de Chapman-Richards, situando entre 0,08 e 0,4, mostrando assim que os dados estimados se aproximaram dos observados; enquanto o modelo logístico teve esse valor situado entre 0,44 e 0,5, e o de Schumacher entre 363,33 e 9.034,89.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%A	50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%E
Schumacher	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,805	0,798	0,742	0,683	0,659	0,749
	$S_{\hat{y}y}$	0,775	0,775	0,894	1,000	1,483	1,140
	BIAS	0,017	0,019	0,016	0,018	0,025	0,031
	RQEM	59,193	70,332	68,163	102,538	91,257	87,052
Logístico	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,772	0,726	0,730	0,559	0,666	0,698
	$S_{\hat{y}y}$	0,062	0,066	0,052	0,067	0,072	0,087
	BIAS	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002
	RQEM	56,200	65,986	64,112	97,413	84,198	79,340
Chapman-Richards	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,775	0,729	0,733	0,561	0,668	0,700
	$S_{\hat{y}y}$	0,061	0,066	0,052	0,066	0,072	0,087
	BIAS	-0,0003	-0,0003	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0003
	RQEM	55,878	65,707	63,815	97,242	83,982	79,079

Quadro 11 - Estatísticas obtidas após o ajuste dos modelos de crescimento para a variável Volume (m³)

O comportamento das curvas, para a acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LD (Figura 29), demonstra bem a situação que foi comentada acima, sobre a superioridade no comportamento do modelo de Chapman-Richards, tendendo a minimizar os erros e possuindo um maior realismo biológico, e demonstra também inferioridade do modelo de Schumacher, que apresentou uma tendência de crescimento tendendo a linearidade.

Figura 29 - Comportamento das curvas para o tratamento 50%E:50%A – LD para acácia-negra; tem-se em a) o modelo de Schumacher, em b) o modelo Logístico e em c) o modelo de Chapman-Richards

Quadro 12 - Histograma de frequência dos erros percentuais de todos os modelos ajustados para estimação do Volume (m^3) (continua)

Quadro 12 - Histograma de frequência dos erros percentuais de todos os modelos ajustados para estimação do Volume (m^3) (conclusão)

Vários estudos vêm sendo publicados na área de modelagem do crescimento, em diversas áreas de estudo, testando vários modelos ou mesmo diferentes formas de ajustá-los. Lima Filho et al. (2012) ao modelar o crescimento para diferentes clones de eucalipto usando o modelo de Chapman-Richards com diferentes distribuições dos erros concluiu que o modelo foi bastante relevante para os estudos de crescimento e é útil para a análise de dados reais.

Araújo (2014) encontrou um resultado divergente com o presente estudo, pois contrastar o modelo de Schumacher com o de Chapman-Richards, para modelar o crescimento em altura e DAP para a espécie *Eremanthus incanus*, em todas as situações de estudo, onde se testou diferentes densidades de plantas remanescentes depois de efetuado o desbaste, o modelo de Schumacher apresentou um desempenho superior, apresentando uma variação no valor do coeficientes de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$) entre 0,04 e 0,9; para o DAP e entre 0,23 e 0,80; para a altura. No estudo corrente o modelo de Schumacher, foi o que obteve um menor desempenho ao se ajustar aos dados de todas as variáveis estudadas, apresentando para o DAP um $\bar{R}_{yy}^2$ entre 0,62 e 0,76; e para a altura entre 0,76 e 0,85; o que pode ser constatado também pelos demais parâmetros escolhidos para se comparar os modelos e também em diversas situações foi descartado pelo histograma de frequência dos erros percentuais. Outro estudo que apresentou um resultado contrário foi o realizado por Fontes et al. (2003), onde o modelo de Chapman-Richards foi comparado com outros modelos para a modelagem da altura dominante da *Pseudotsuga menziesii*, e foi rejeitado por estimativas não lógicas dos parâmetros, situação essa que não foi observada no atual trabalho.

Melo (2014); ao ajustar diferentes modelos não lineares para a estimação da altura média das árvores de *Eucalyptus* spp. e compará-los através das análises gráficas dos resíduos e a análise do histograma de classe dos resíduos além de medidas de acurácia como o erro padrão dos resíduos, critério de informação de Akaike, Bayesiano e pelo teste da razão da máxima verossimilhança, concluiu que todos os modelos ajustados poderiam ser utilizado para a estimação da altura média das árvores, porém, o modelo Logístico foi o que apresentou os melhores valores das medidas de acurácia, tendo como os piores modelos ajustados o de Chapman-Richards, seguido do modelo de Schumacher.

Ao ajustar o modelo de Chapman-Richards para o crescimento diamétrico de *Eremanthus erythropappus*, Páscoa (2014) verificou que os tratamentos por ele testado, no caso, diferentes espaçamentos com adoção de poda ou não, tiveram efeito sobre o parâmetro de escala (β_1) que está intimamente relacionado com a taxa de crescimento das árvores e com o parâmetro

relacionado com a inflexão da curva (β_2) que reflete a forma da curva e marca a alteração na fase de crescimento das plantas do crescimento inicial acelerado para a fase onde o ritmo decresce, e segundo Scolforo (2006), o valor de β_2 tende a ser menor nas situações em que o crescimento da variável em estudo for menor, ou seja, o ponto de inflexão ocorre muito cedo, interrompendo assim o período de rápido crescimento da planta; já para o valor de β_1 quanto mais próximo de zero, menor será o desenvolvimento da variável. Esse comportamento não foi observado no estudo presente, pois ao contrário do estudo realizado por Páscoa (2014), o parâmetro de locação (β_0) não teve seu valor fixado igualmente para todos os tratamentos, parâmetro esse que está relacionado com o máximo valor atingível pela variável que foi modelada, portanto, os três parâmetros conjuntamente influenciaram nas estimativas. Dentre as observações realizadas por Páscoa (2014) e Scolforo (2006), a que mais se assemelhou foi em relação ao parâmetro β_2 para o eucalipto, pois ele apresentou valores, para todas as variáveis, superiores nos tratamentos que tiveram um melhor desenvolvimento, indicando assim um maior período de crescimento até que ele comece a decrescer, já o parâmetro β_1 não apresentou grande diferença entre os tratamentos, devido a isso, o parâmetro β_0 tem uma importância significativa nos modelos.

Schneider et al. (2014) modelaram diferentes equações de crescimento em diâmetro para o *Pinus elliott* e *Pinus taeda*, e dentre os modelos testados se encontravam o de Chapman-Richards e Schumacher. Apesar dos autores não terem indicado na ocasião nenhum dos modelos referidos, selecionando o modelo de Backman modificado, quando analisados os parâmetros estatísticos utilizados, no caso o coeficiente de correlação entre valores observados e estimados - $R_{\hat{y}y}$, o erro padrão dos resíduos - S_{yx} , e o valor de F da análise de variância, a exemplo do atual estudo o modelo de Chapman-Richards apresentou maior valor para o coeficiente de correlação - $R_{\hat{y}y}$ (0,94) quando comparado ao modelo de Schumacher (0,63), e contrario aconteceu para o erro padrão do resíduo - S_{yx} , apresentando os valores de 2,33 e 0,37, respectivamente.

Quando Nascimento et al. (2010) testaram diferentes modelos de crescimento e produção em nível de povoamento para o *Pinus taeda*, e comparando apenas os modelos que estimaram a produção em função da idade, o modelo de Chapman-Richards foi superior ao de Schumacher, apesar da diferença entre os dois não ter sido grande, avaliando o coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$) e o erro padrão dos resíduos; essa superioridade do modelo de Chapman-Richards no estudo corrente foi muito pronunciada, o

que levou ao modelo ser selecionado. Outra conclusão interessante que Nascimento et al. (2010) chegaram foi que a adição do índice de sítio nos modelos não representou ganhos significativos nas estimativas, tendo suas estatísticas semelhantes às dos modelos citados acima.

No estudo de crescimento realizado para *Tectona grandis* por Cruz et al. (2008), a exemplo do estudo corrente, o modelo de Chapman-Richards foi eficiente para descrever as tendências de crescimento das características do povoamento analisado, entre as variáveis estudadas encontravam-se a altura total e o volume (m^3/ha). Comprovando, que o modelo de Chapman-Richards é muito eficiente para descrever as tendências de crescimento.

Em estudo de comparação de modelos de crescimento para *Pinus* spp. realizado por Bragg (2008), onde os modelos também foram avaliados através das medidas de coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$), RQEM e BIAS, todos os modelos ajustados executaram um bom trabalho ao estimar as tendências gerais do crescimento das árvores, porém, o modelo de Chapman-Richards foi o responsável, no geral, por apresentar os melhores valores para as medidas de avaliação, apresentando os valores de 0,97 e 0,96 para o $R_{\hat{y}y}$, 1,83 e 2,43 para a RQEM e 0,004 e 0,006 para o BIAS, o que não foi o suficiente para a sua indicação, pelo autor, pois essa diferença com os demais modelos testados foi pequena. No caso, o modelo logístico foi o indicado pelo autor como o que melhor se ajustou aos dados de altura, mesmo não sendo o superior absoluto ao se analisar os parâmetros utilizado, porém, segundo os autores, esse modelo foi mais realista que os demais para estimar as alturas além da faixa dos dados amostrados do *Pinus* spp. Tal comportamento não foi observado no estudo presente, como podemos observar nas Figuras 27, 28 e 29; o modelo logístico foi responsável por demonstrar, uma estagnação no crescimento em altura e DAP a partir do 72º mês, o que não foi observado nos dados de crescimento (Figura 30), além disso, observando os demais coeficientes, o modelo Logístico apresentou valores intermediários, não sendo portanto indicado como o modelo que melhor se ajustou aos dados.

Figura 30 - Crescimento médio por ano dos povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii*, em a) tem-se o crescimento médio do DAP para a acácia-negra, em b) o crescimento médio do DAP para o eucalipto, em c) o crescimento médio da altura para a acácia-negra e em d) o crescimento médio da altura para o eucalipto

Em estudo realizado por Santana et al. (2005), dentre outros estudos de modelagem para o *Eucalyptus grandis* (equações hipsométricas, equações volumétricas e o modelo de Clutter), a modelagem do crescimento foi avaliada, e os modelos de Chapman-Richards e Schumacher foram comparados para o ajuste de equações de sítio, e a exemplo do estudo presente, o primeiro modelo foi ajustado de maneira não linear, e o segundo linearmente. O autor selecionou o modelo de Chapman-Richards, pois apresentou um valor de 0,86 para o coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$) e um erro padrão dos resíduos de 2,08 metros; valores esses muito semelhantes aos encontrados no corrente estudo; contudo, Santana et al. (2005) não constatou diferenças significativas entre os modelos, concluindo que ambos modelos são adequados e apresentaram estimativas satisfatórias, o que não foi observado no estudo vigente, onde o modelo de Schumacher foi inferior em todas as situações de estudo.

Quando Brito et al. (1997), decidiram desenvolver novos modelos de crescimento para recursos florestais aplicados à leucena (*Leucaena leucocephala*), tendo como base as

hipóteses biológicas propostas por Chapman-Richards e Silva-Bailey, concluíram que todos os modelos testados se ajustaram de maneira satisfatória aos dados, podendo ser utilizados para se estimar o crescimento em altura da leucena, incluindo o modelo de Chapman-Richards, contudo, constataram que o estudo da modelagem é dinâmico e nunca se pode prever que o que já existe é suficiente, acima de tudo, quando se considera outros campos na ciência biológica, onde podem ser gerados novos modelos baseados em hipóteses biológicas específicas.

Ao comparar o modelo de Chapman-Richards com o modelo de Schnute, Fengri (1997) concluiu que o primeiro modelo é simples e foi conveniente nas situações de estudo devido a versatilidade do ponto de inflexão da curva e devido ao fato de que seus parâmetros tem uma clara interpretação biológica.

Ao comparar diferentes modelos não lineares, Huang et al. (1992) afirmou que a escolha de uma função em particular pode depender da relativa facilidade de obtenção de convergência para uma solução, das propriedades matemáticas e de sua interpretação biológica, e qualquer função pode ser considerada superior ou inferior. Todas as equações pelos autores testadas assumiram formas biologicamente consistentes, o que impedem previsões com alto nível de erro para a altura no caso de extrapolação dos dados para além da gama dos dados originais, contudo, o autor indicou o modelo de Chapman-Richards por ter sido adequado na estimação da altura, porém relatou que a função se aproximou da assíntota rapidamente quando a variável dependente foi fracamente relacionada com a variável independente. Comportamento semelhante foi observado no estudo corrente, com exceção para o modelo de Schumacher na estimação do volume individual dos indivíduos, onde apresentou um comportamento atípico e não consistente biologicamente.

A superioridade do modelo de Chapman-Richards já é documentada desde 1973, quando Piennar e Turnbull constataram que o modelo descreveu adequadamente o crescimento individual de árvores.

4.4.3 Modelos de Produção

Na seção 4.4.2, tanto o modelo de Schumacher quanto o Logístico não se ajustaram bem aos dados de altura, DAP e volume individual; e por esse motivo para se modelar a produção apenas o modelo de Chapman-Richards foi ajustado com a finalidade de comparar com o

modelo de Clutter, que é o modelo de crescimento e produção do tipo povoamento total mais difundido no Brasil até o momento.

O modelo de Clutter é constituído por um sistema de equações para prognosticar o volume corrente e futuro, em função das idades atual e futura (I_1 e I_2), do índice de local na idade atual (S_1) e das densidades atual e futura (B_1 e B_2), permitindo assim, estimativas mais precisas. Clutter et al. (1983) classificaram o modelo como um método de predição da produção futura, enquanto os métodos que não envolvem qualquer projeção da densidade da floresta são métodos que predizem a produção corrente.

Todos os parâmetros, bem como suas significâncias, das equações ajustadas estão representados no Quadro 13 abaixo.

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
Clutter	α_0	0,8014 ***	0,3732 ^{ns}	1,213 ***
	α_1	-0,0145 ^{ns}	0,0032 ^{ns}	-0,0201 ^{ns}
	β_0	4,5293 ***	4,993 ***	4,1699 ***
	β_1	-9,5929 **	-35,9468 ***	-19,4233 ***
	β_2	0,0299 ***	0,0232 *	0,0521 ***
	β_3	1,2824 ***	0,5912 ***	1,1273 ^{ns}
Chapman-Richards	β_0	212,5877 ***	183,9252 ***	260,3156 ***
	β_1	0,0289 **	0,0322 ***	0,0331 ***
	β_2	2,9321 **	3,1135 ***	2,9105 ***
		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Clutter	α_0	-1,8018 ***	-1,6777 ***	-0,9882 ***
	α_1	0,0606 ***	0,0701 **	0,0876 ***
	β_0	3,5776 ***	2,1889 **	5,9483 ***
	β_1	-33,6413 ***	-23,6443 **	-24,2452 ***
	β_2	0,0755 ***	0,1396 ***	-0,0369 ***
	β_3	0,8437 ***	1,0913 ***	1,0453 ***
Chapman-Richards	β_0	77,6406 **	99,492 ^{ns}	253,5648 *
	β_1	0,0308 ^{ns}	0,0276 ^{ns}	0,0298 ^{ns}
	β_2	2,9474 ^{ns}	3,2144 ^{ns}	3,6718 ^{ns}

Quadro 13 - Parâmetros das equações do modelo de Clutter e de Chapman-Richards modelados para a predição da produção por unidade de área (m³/ha) e suas significâncias

Segundo Campos e Leite (2009) uma inconsistência imediata do modelo de Clutter deve ocorrer se α_1 for negativo. Nesse caso, S_1 pode ser substituído por $\ln B_1$ ou por $(\ln B_1)^2$, desde que haja contribuição estatística, isso ocorreu somente para a acácia-negra, nos tratamentos 50%E:50%A – LS e 100%A; devido a isso, em ambos os casos o S_1 foi substituído por $\ln B_1$ e/ou $(\ln B_1)^2$, nas duas situações as substituições não resultaram em nenhum ganho estatístico, nem mesmo corrigiram as inconsistências; outra particularidade é que o coeficiente β_1 deverá ser negativo, o que ocorreu em todas as situações do presente estudo, além disso, podemos observar que o parâmetro β_2 foi significativo em todas as situações, o que demonstra o efeito da capacidade produtiva sobre a área basal.

A eliminação dos fatores não significativos nos modelos também foi testada, porém, com tal ação não foi possível observar melhorias nas estimativas, e com isso as variáveis permaneceram no modelo, como citado por Soares et al. (2009) mesmo se a variável não for significativa no modelo, porém possuir significado biológico ou tiver caráter explicativo muito forte para o fenômeno, ela deverá permanecer.

De acordo com o Quadro 13, podemos observar uma diferença pronunciada entre alguns parâmetros dos tratamentos puros (100%A e 100%E) em relação aos tratamentos consorciados. Isso ocorre pois para o cálculo da produtividade (m^3/ha), nas parcelas dos consórcios é considerado que existem a metade do número de árvores presentes nas parcelas de monocultivo de cada espécie.

Observando o Quadro 14, onde está representado as estatísticas referentes ao teste L&O de Leite e Oliveira (2002) realizado a 5% de significância, que ambos modelos poderiam ser empregados para a modelagem da produção para a acácia-negra, porém o modelo de Clutter foi responsável por apresentar os menores valores das estatísticas empregadas, dessa forma seria o modelo mais indicado para a finalidade em questão; já para o eucalipto esse teste indicou apenas o modelo de Clutter no tratamento 50%E:50%A – LD e nos demais tratamentos ambos foram rejeitados, vale ressaltar que nessas situações o modelo de Clutter apresentou menores valores da estatística F , sendo 9,0856 para o 50%E:50%A – LS e 4,2135 para o 100%E; e da estatística t , com valores de 0,1319 e 0,1271; do que o modelo de Chapman-Richards, que apresentou valores para a estatística F de 9,3978 e 6,6156 e da estatística t de 1,7715 e 2,4580, respectivamente para os tratamentos 50%E:50%A – LS e 100%E; demonstrando dessa forma que o modelo de Clutter se ajustou melhor aos dados nessas situações.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%A	50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%E
Clutter	F	1,2858 ^{ns}	0,0883 ^{ns}	0,1720 ^{ns}	9,0856 *	0,3365 ^{ns}	4,2135 *
	t	0,1262 ^{ns}	0,3615 ^{ns}	0,6218 ^{ns}	0,1319 ^{ns}	0,8424 ^{ns}	0,1271 ^{ns}
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	não
	Conclusão	Yobs = Yest	Yobs = Yest	Yobs = Yest	Yobs ≠ Yest	Yobs = Yest	Yobs ≠ Yest
Chapman-Richards	F	1,3214 ^{ns}	0,9810 ^{ns}	0,8572 ^{ns}	9,3978 *	13,0575 *	6,6156 *
	t	1,5685 ^{ns}	1,7364 ^{ns}	1,4834 ^{ns}	1,7715 ^{ns}	1,0606 ^{ns}	2,4580 *
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conclusão	Yobs = Yest	Yobs = Yest	Yobs = Yest	Yobs ≠ Yest	Yobs ≠ Yest	Yobs ≠ Yest

Quadro 14 - Resultados do procedimento estatístico proposto por Leite & Oliveira (2002) na análise da equação volumétrica de Clutter e de Chapman-Richards, modeladas para a produção por unidade de área (m³/ha)

Além disso, quando olhamos os demais parâmetros utilizados para se comparar os modelos (Quadro 15) e o histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 17) podemos constatar a superioridade do modelo de Clutter sobre o de Chapman-Richards.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%A	50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%E
Clutter - Área Basal	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,990	0,977	0,979	0,965	0,962	0,991
	$S_{\hat{y}y}$	0,044	0,066	0,050	0,094	0,120	0,065
	BIAS	0,003	-0,004	-0,011	0,010	0,010	0,014
	RQEM	3,485	6,226	5,010	8,741	9,182	5,682
Clutter - Volume	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,997	0,993	0,943	0,978	0,925	0,994
	$S_{\hat{y}y}$	0,039	0,052	0,145	0,117	0,309	0,071
	BIAS	0,644	-0,357	-1,417	1,616	1,126	2,020
	RQEM	3,877	7,080	8,088	15,476	20,996	9,677
Chapman- Richards	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,969	0,981	0,987	0,790	0,737	0,840
	$S_{\hat{y}y}$	15,930	11,200	13,180	18,170	26,040	48,380
	BIAS	-0,346	-0,336	-0,488	-0,093	-0,126	-0,385
	RQEM	15,484	11,724	9,218	45,618	59,714	43,450

Quadro 15 - Estatísticas obtidas após o ajuste das equações do modelo de Clutter e do modelo de Chapman-Richards

O modelo de Clutter - Volume, apresentou no geral os maiores valores para o coeficiente de determinação ($\bar{R}_{\hat{y}y}^2$), situando entre 0,925 e 0,997, e apresentou os menores valores para o erro padrão dos resíduos ($S_{\hat{y}y}$); variando entre 0,039 m³/ha e 0,309 m³/ha, e para a RQEM, com os valores entre 3,87 e 20,99, perdendo apenas nos valores de BIAS. Complementando, ao se analisar o histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 17), fica evidente a superioridade do modelo de Clutter para a estimar a produtividade das florestas; e apenas o

tratamento 50%E:50%A – LD os resíduos não se comportaram de forma normal, e mesmo assim, o modelo de Clutter foi responsável por apresentar um menor erro.

Em relação a idade técnica de corte (ITC), apresentadas no Quadro 16, para a acácia-negra nenhum dos modelos diferiram entre si e não apresentaram inconsistências com os dados observados; já para o eucalipto podemos observar uma inconsistência no tratamento 50%E:50%A – LD para o modelo de Chapman-Richards, pois esse encontrou a ITC entre os 72 e 84 meses de idade, quando na verdade esse ponto ocorreu entre os 60° e o 72° meses de idade, como foi observado no item 4.1.3, na monocultura do eucalipto, ambos modelos foram inconsistentes quando comparados com o dado observado, porém, como foi comentado no item 4.1.3, esse tratamento apresentou um comportamento atípico da curva de ICA, pois essa volta a crescer, e dessa forma tocando a curva de IMA mais de uma vez.

	Intervalo entre a Idade Técnica de Corte (meses)					
	Acácia-negra			Eucalipto		
	50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%A	50%E:50%A- LS	50%E:50%A- LD	100%E
Clutter	60 - 72	60 - 72	60 - 72	60 - 72	60 - 72	72 - 84
Chapman- Richards	60 - 72	60 - 72	60 - 72	60 - 72	72 - 84	72 - 84
Observado	60 - 72	60 - 72	60 - 72	60 - 72	60 - 72	60 - 72

Quadro 16 - Idade técnica de corte de ambas espécies nas diferentes situações de plantio

Quadro 17 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos de Clutter e Chapman-Richards (continua)

Quadro 17 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos de Clutter e Chapman-Richards (conclusão)

Em estudo realizado por Castro et al. (2013) para avaliar o crescimento e a produção de plantios comerciais de eucalipto, a exemplo do estudo corrente, o sistema de equações propostos por Clutter (1963) de área basal e volume ajustara-se bem aos dados observados e estimaram com precisão as áreas basais e os volumes futuros, em razão da alta correlação entre os valores observados estimados e o baixo valor do erro padrão, e segundo Clutter et al. (1963) esse sistema de equações simultâneas relaciona os coeficientes aos atributos do povoamento – como idade, índice de local e área basal do povoamento, e os sinais associados a esses coeficientes devem ser analisados com cuidado, pois apresentam significado biológico. No estudo de Castro et al. (2013) os sinais associados aos coeficientes foram coerentes com a literatura citada acima (CAMPOS; LEITE, 2009), o que como justificado anteriormente não foi atendido em sua totalidade no atual estudo.

Melo (2014) comparou o modelo de Clutter com modelos lineares e não-lineares para a produção em área basal e defrontou o modelo de Clutter com o modelo Logístico para a produção em volume; no primeiro caso, apesar da preferência do autor por modelos não-lineares por possuírem características desejáveis, como a parcimônia (evita o excesso de parâmetros no modelo) e interpretação biológica dos parâmetros, os mesmos não geraram estimativas superiores em relação aos modelos lineares, e estes por sua vez não foram superiores as estimativas do modelo de Clutter; já para o estudo da produção volumétrica, o modelo não linear (no caso o Logístico), foi superior ao modelo de Clutter, o que discorda dos resultados do presente estudo, onde o modelo de Clutter foi superior ao modelo não-linear (Chapman-Richards), e tal superioridade é facilmente observada pelos histogramas de frequência dos erros percentuais (Quadro 17).

A exemplo do estudo corrente, o trabalho realizado por Nascimento et al. (2010), onde diferentes modelos de crescimento e produção em nível de povoamento foram testados para o *Pinus taeda* (Chapman-Richards, Schumacher, modelo contendo idade e sítio e o modelo de Clutter), o modelo de Clutter foi superior aos demais, sendo indicado para estimar o volume por unidade de área quando há disponibilidade dos dados de sítio e área basal, apresentando valores de coeficientes de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$) de 0,99 e 0,96; para o modelo volumétrico e o de área basal, respectivamente, e valores para o erro padrão dos resíduos (S_{yx}) de 15,33 m³/ha e 2,23 m³/ha para o modelo volumétrico e o de área basal, respectivamente.

Santana et al. (2010), ajustou o modelo de Clutter para a simulação da produção em povoamentos de *Eucalyptus grandis* e obteve um valor de 0,98 para o coeficiente de

determinação ($\bar{R}_{yy}^2$), e como discutido pelos autores e retratado na Figura 31, referente ao estudo corrente, e como esperado, em uma determinada área basal inicial, quanto maior o índice de local, maior foi a produção futura, considerando o avanço da idade.

Figura 31 - Diferentes produtividades para diferentes sítios para o *Eucalyptus globulus* no tratamento 50%E:50%A – LS

No estudo de Salles (2010) para projetar o crescimento e a produção de povoamentos agroflorestais, contendo *Eucalyptus* spp., o modelo de Clutter foi escolhido na sua forma não-reduzida e segundo o autor houve um ajuste satisfatório em todos os materiais genéticos testados, com o RQEM da equação de área basal variando entre 0,37 e 0,56 e da equação volumétrica variando de 5,97 a 10,25. Diferentemente do estudo presente, para avaliar a significância dos parâmetros, o autor adotou a metodologia de Cartaxo et al. (2010), onde a estimativa do parâmetro é significativa caso o seu valor absoluto seja maior que o dobro do seu respectivo erro padrão. Caso no estudo corrente essa metodologia tivesse sido adotada, as significâncias dos parâmetros ficariam como demonstrado no Quadro 18.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Clutter	α_0	*	ns	*	*	*	*
	α_1	ns	ns	ns	*	*	*
	β_0	*	*	*	*	*	*
	β_1	*	*	ns	*	*	*
	β_2	*	ns	ns	*	*	*
	β_3	*	*	ns	*	*	*

Quadro 18 - Avaliação da significância dos parâmetros do modelo de Clutter segundo a metodologia de Cartaxo et al. (2010)

Podemos notar que para a acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LD, o parâmetro β_2 que era significativo a uma menor significância, passaria a não ser significativo, e no 100%A, os parâmetros β_1 e β_2 que antes também eram significativos, passariam a não ser.

Outra observação importante feita por Salles (2010) foi em relação a relevância da variável de sítio (S) para a modelagem em povoamentos agroflorestais. Pois devido a dificuldade em ajustar o modelo de Clutter para dados com poucas observações ou com tendências, além disso, uma situação semelhante com o estudo corrente que é a interação das espécies dentro do sistema, que podem resultar em tendências diferenciadas no crescimento; modelos volumétricos mais simples com poucas variáveis independentes são muitas vezes ajustados, porém podem ser inefficientes ao estimar a ITC, caso não considerem a variável S, e por conseguinte, resultando em ITC iguais para locais com classe de produtividade diferente.

Leite et al. (2011) também empregaram o modelo de equações simultaneas de Clutter para avaliar as tendências de crescimento dos povoamento de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em área basal e volume, utilizado os índices de local (S) obtidos no próprio trabalho através do emprego da metodologia da curva-guia, e a exemplo do estudo corrente, o modelo de Clutter se ajustou muito bem aos dados, não apresentando inconsistências quanto a ITC, e apenas em um caso houve um parâmetro inconsistente, o qual foi eliminado do modelo, ocasionando em ganhos estatísticos.

Outros trabalhos relataram informações semelhantes, com bom ajuste do modelo de Clutter (1963) aos dados observados em plantios de Pinus (LEITE et al., 2001) e de eucalipto não desbastado (SOARES et al., 2004; DEMOLINARI et al., 2007) e desbastado (DIAS et al., 2005; GÖRGENS et al., 2007).

4.4.4 Relação Hipsométrica

Duas classes de modelos para a relação hipsométrica foram testados, os modelos contendo apenas o DAP como variável independente (1) e os modelos contendo o DAP e alguma variável do povoamento (2), no caso idade, altura dominante (Hd) e área seccional (AS).

Comparando os modelos da classe 1, temos no Quadro 19 os parâmetros das equações ajustadas para todas as situações propostas, bem como suas significâncias.

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
Stoffels	β_0	0,6014***	0,6385***	0,5997***
	β_1	0,8316***	0,823***	0,8573***
Curtis	β_0	3,3559***	3,3333***	3,3313***
	β_1	-7,4056***	-7,0388***	-6,7447***
Linha-Reta	β_0	2,7367***	2,8582***	2,3981***
	β_1	0,959***	0,9645***	1,0626***

		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Stoffels	β_0	0,4523***	0,594***	0,6983***
	β_1	0,9364***	0,8548***	0,7795***
Curtis	β_0	3,4588***	3,4254***	3,3766***
	β_1	-7,6815***	-7,534***	-7,614***
Linha-Reta	β_0	2,218***	2,614***	2,711***
	β_1	1,1406***	1,0348***	0,9197***

Quadro 19 - Parâmetros dos modelos de equação hipsométrica da classe 1 e suas significâncias

Podemos observar a alta significância dos parâmetros, chamando atenção para o β_1 que é o parâmetro do DAP, demonstrando a importância dessa variável para a estimação da altura. Nos modelos os parâmetros também possuem representações biológicas e não apresentam inconsistências; nos modelos de Stoffels e da Linha-Reta, o parâmetro β_1 foi positivo como esperado, pois estão relacionados ao $\ln DAP$ e ao DAP respectivamente, já para o modelo de Curtis apresentou valor negativo pois está relacionado ao inverso do DAP.

De acordo com o teste L&O proposto por Leite e Oliveira (2002) realizado a 5% de significância (Quadro 20), nenhum dos modelos seria selecionado, dessa forma todos os modelos serão comparados utilizando-se os demais parâmetros (Quadro 21) e os histogramas de frequência dos erros percentuais (Quadro 22), para que então o modelo que melhor se ajustou aos dados possa ser indicado.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Stoffels	F	16,1894*	22,1785*	26,5448*	21,2519*	20,0124*	95,7631*
	t	2,8881*	3,1796*	4,0651*	3,1615*	3,2108*	4,012*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	não	não	não	não
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest
Curtis	F	13,4871*	19,1147*	29,4964*	34,9101*	8,3385*	17,9691*
	t	5,7241*	5,4640*	6,1564*	6,4376*	4,2316*	11,0017*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	não	sim	não	sim
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest
Linha-Reta	F	112,0909*	131,4063*	201,3171*	125,0893*	78,8075*	136,2033*
	t	8,9761*	9,6599*	12,3286*	13,0440*	8,9861*	12,1140*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	não	sim	sim	sim
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest

Quadro 20 - Resultados do procedimento estatístico proposto por Leite & Oliveira (2002) na análise dos modelos hipsométricos da classe 1

Ao observar as informações do Quadro 21 notamos que o modelo de Curtis foi o que melhor se ajustou aos dados de altura, pois apresentou os maiores valores para o coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$), valores esses que situaram entre 0,94 e 0,95, enquanto que nos modelos de Stoffels e da Linha-Reta, encontraram-se entre 0,85 e 0,92 e 0,86 e 0,89, respectivamente; e os menores valores, entre 11,4 e 14,2, para RQEM, visto que para o modelo de Stoffels a RQEM teve valores entre 12,0 e 16,9, e para o modelo da Linha-Reta, entre 12,5 e 16,7; o modelo de Stoffels foi responsável por demonstrar os menores valores para o erro padrão dos resíduos (S_{yx}) e valores intermediários de BIAS e RQEM, já o modelo da Linha-Reta apresentou os menores valores para BIAS, porém apresentou os piores valores para os demais parâmetros.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Stoffels	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,924	0,910	0,917	0,859	0,886	0,917
	$S_{\hat{y}y}$	0,144	0,159	0,149	0,212	0,215	0,202
	BIAS	0,068	0,084	0,074	0,177	0,199	0,225
	RQEM	12,072	13,428	12,145	16,952	15,193	14,601
Curtis	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,953	0,946	0,956	0,944	0,958	0,958
	$S_{\hat{y}y}$	1,635	1,759	1,511	1,767	1,752	1,903
	BIAS	0,135	0,149	0,108	0,072	0,159	0,238
	RQEM	11,708	13,088	11,423	13,409	12,911	14,226
Linha-Reta	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,887	0,871	0,890	0,827	0,868	0,884
	$S_{\hat{y}y}$	1,765	1,886	1,666	2,211	2,167	2,158
	BIAS	-0,0001	0,0001	0,00003	-0,0001	0,0002	0,0001
	RQEM	12,637	14,038	12,588	16,780	15,961	16,136

Quadro 21 - Estatísticas obtidas após o ajuste dos modelos hipsométricos da classe 1

Esses valores contrariam os resultados apresentados por Barros et al. (2004) e Machado et al. (2011) esses autores observaram que, em plantios de *Pinus oocarpa*, tanto o avanço da idade quanto o maior número de desbastes, o que implica redução na densidade de árvores por hectare (e, portanto, cria uma situação de arranjo espacial das árvores similar àquela encontrada em sistemas silvipastoris), ocasionaram descaracterização da relação hipsométrica, com redução gradativa do coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$).

Essa superioridade do modelo de Curtis sobre os demais modelos da classe 1 pode ser verificada com os histogramas de frequência dos erros percentuais (Quadro 22).

Quadro 22 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos hipsométricos da classe 1 (continua)

Quadro 22 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos hipsométricos da classe 1 (conclusão)

Andrade e Leite (2011) testaram diferentes modelos para a relação hipsométrica, dentre eles os modelos da classe 1 testados no presente estudo, porém nenhum deles foi selecionado pelos autores, pois segundo eles, os modelos de Stoffels e o da Linha-Reta só seriam adequados caso a relação entre altura e diâmetro observados apresentasse um comportamento linear, e foi observado um comportamento sigmoidal, a mesma conclusão em relação ao modelo da Linha-Reta, foi observado por Batista et al. (2001); já o modelo de Curtis foi biologicamente compatível com a realidade, contudo, subestimou a altura das árvores com DAP maior que 19 cm e superestimou as de menor que 11 cm de DAP; mas a exclusão em si do modelo ocorreu devido ao grande erro encontrado na subestimação. Esses modelos por sua vez, apresentaram respectivamente valores de 0,79, 0,78 e 0,78 para o coeficientes de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$). No presente estudo, o modelo de Stoffels e o da Linha-Reta também não foram biologicamente consistentes pois o comportamento da relação entra a altura e o DAP, a exemplo do estudo realizado por Andrade e Leite (2011) foi sigmoidal, e não linear; além disso o modelo de Stoffels foi responsável por uma superestimação considerável da altura das árvores de maiores DAP em todas as situações de estudo, e o modelo da Linha-Reta além de apresentar o mesmo problema também superestimou as alturas de indivíduos de menor DAP. O modelo de Curtis se apresentou biologicamente consistente, pois a relação entre a altura e o DAP observados apresentou um comportamento sigmoidal, porém apresentou um leve problema de subestimação das alturas de indivíduos com menor DAP. Como esse comportamento foi o mesmo em todas as situações de estudo, a Figura 32 demonstrará esses comportamentos dos modelos para a acácia-negra no tratamento 100%A, as demais situações estão no Quadro 35.

Figura 32 - Alturas observadas e estimadas para a acácia-negra no tratamento 100%A, tem-se em a) o modelo de Stoffels, em b) o modelo da linha reta e em c) o modelo de Curtis

Em estudo de relações hipsométricas para *Acacia mearnsii* realizado por Caldeira et al. (2002), vários modelos foram testados entre eles o de Curtir e o de Stoffels, e comparando apenas os dois, ao contrário do estudo presente, o modelo de Stoffels se ajustou melhor, apresentando 0,80 de coeficientes de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$) e 0,18 para o erro padrão dos resíduos (S_{yx}), contra 0,73 e 0,22 do modelo de Curtis; esses valores de S_{yx} vão ao encontro dos valores do estudo corrente, onde também foram menores para o modelo de Stoffels. Em outro estudo para *Acacia mearnsii* conduzido por Finger et al. (2000) o modelo de Stoffels foi rejeitado pela aceitação de um modelo polinomial que apresentou valores para o coeficiente de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$) muito superiores, porém para o erro padrão dos resíduos (S_{yx}), a exemplo do estudo presente, o modelo de Stoffels apresentou os menores valores. Com isso, é importante citar, como discutido por Dias (2013)², que o coeficiente de determinação - $\bar{R}_{yy}^2$ deve ser interpretado com cautela, pois essa estatística sempre aumentará à medida que uma variável é adicionada ao modelo, como nos modelos polinomiais, porém isso não significa

² DIAS, C.T.S. Análise da variância da regressão. Nota de aula: Estatística Experimental, 2013

que o modelo é superior, pois devido à perda de um grau de liberdade do resíduo a soma de quadrados do resíduo virá a ser maior (anotação de aula).

Sanquetta et al. (2014) também estudou a relação hipsométrica para *Acacia mearnsii* e concluíram que, os modelos de Curtis e Stoffels ficaram entre os modelos que obtiveram melhor desempenho, sendo o primeiro com o maior valor de coeficiente de correlação ($R_{\hat{y}y}$) e o segundo obteve o menor valor para o erro padrão dos resíduos (S_{yx}) e ambos modelos apresentaram uma boa amplitude dos resíduos, ficando entre $\pm 20\%$, resultados esses que estão de acordo com os apresentados no estudo corrente.

Os modelos que até aqui obtiveram melhor desempenho foram os logaritmos, principalmente como já citado anteriormente o modelo de Clutter, pois foi mais flexível, conseguindo explicar melhor a variabilidade da altura em função do DAP. Resultados semelhantes também foram observados por Saidelles et al. (2009), onde as equações logarítmicas foram superiores em desempenho. Bartoszeck et al. (2002), trabalhando com *Mimosa scabrella* Benth (bracatinga) na região metropolitana de Curitiba, indicaram que, entre 19 modelos matemáticos e genéricos testados, a equação logarítmica de Curtis foi a que apresentou melhores resultados para a estimativa da altura total das árvores, de acordo, com o que foi observado por Andrade et al. (2006) em um fragmento da Mata Atlântica, no Rio de Janeiro, e por Azevedo et al. (2011) em Vitória da Conquista - BA, em um experimento com espécies de sete-cascas (*Alchornea triplinervia* (Spreng.) Müll. Arg.) e ipê-amarelo (*Tabebuia serratifolia* (Vahl) Nich).

Jorge et al. (2009) também testou os mesmos modelos da classe 1 para *Eucalyptus* spp., e ao contrário do presente estudo o modelo de Stoffels e o da Linha-Reta obtiveram os melhores ajustes, porém, devido aos baixos valores do coeficientes de determinação ($\bar{R}_{\hat{y}y}^2$) e da distribuição dos resíduos inadequada, os autores não recomendaram nenhuma das equações ajustadas no estudo, e com isso concluíram que deveriam ser testados modelos envolvendo outras variáveis juntamente com o DAP, conclusão essa também feita por Souza et al. (2006) em trabalho realizado para *Eucalyptus urophylla*. Santana et al. (2005) encontrou altos valores para $\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ para o modelo de Curtis ajustado para *Eucalyptus grandis*, porém este modelo tendeu a superestimar a altura das árvores, já o modelo de Stoffels teve sua distribuição dos resíduos entre $+30\%$ e -20% .

No estudo realizado por Müller et al. (2014) onde equações hipsométricas para um sistema silvipastoril composto por *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, e a exemplo do presente estudo, os modelos que apresentaram os melhores desempenhos considerando o coeficiente de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$), o erro padrão dos resíduos (S_{yx}) e o comportamento gráfico dos resíduos, foram os modelos de Curtis e o de Stoffels; com os piores resultados obtidos para o modelo da Linha-Reta. Outra similaridade com o estudo corrente foi em relação a amplitude dos erros, que tanto para o eucalipto quanto para a acácia-negra ficaram entre $\pm 20\%$.

Alguns autores, como, Hanus et al. (1999), Caldeira et al. (2002), Leite et al. (2003), Souza et al. (2006), Tomé et al. (2007), Jorge et al. (2009), Salles (2010) e Temesgen et al. (2014) recomendam o estudo de relações hipsométricas que contenham mais variáveis independentes, além do DAP; dessa forma nesse estudo foram então testados diferentes modelos contendo outras variáveis.

Comparando esses modelos, classe 2, temos no Quadro 23 os valores de todos os parâmetros das equações ajustadas e suas significâncias.

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
$H \sim \int (DAP, Idade)$	β_0	1,4954***	1,5158***	1,4395***
	β_1	-2,2536***	-2,535***	-1,4136***
	β_2	-7,8654***	-8,1952***	-8,2502***
	β_3	20,207***	23,8086***	13,3942***
$H \sim \int (DAP, Hd)$	β_0	0,5644***	0,6378***	0,2***
	β_1	-1,4117***	-1,5287***	-1,0347***
	β_2	0,79***	0,7599***	0,8952***
$H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$	β_0	2,0731***	2,9034***	3,2035***
	β_1	0,6072***	0,3719***	0,3274***
	β_2	2,3726***	-1,8772**	-1,5596*
	β_3	0,2627***	0,2776***	0,3095***
	β_4	0,7765 ^{ns}	1,9207***	0,9289***

Quadro 23 - Parâmetros dos modelos de equação hipsométrica da classe 2 e suas significâncias (continua)

		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
$H \sim \int (DAP, Idade)$	β_0	1,5299***	1,4425***	1,4655***
	β_1	-2,021***	-0,7252***	-0,9951***
	β_2	-10,5156***	-10,4116***	-11,5487***
	β_3	22,0354***	7,3466***	11,8085***
$H \sim \int (DAP, Hd)$	β_0	-0,0904**	-0,0853*	-0,6266***
	β_1	-0,3742***	-0,3368***	-0,026***
	β_2	0,9674***	0,9721***	1,135***
$H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$	β_0	2,5082***	2,6577***	2,1188***
	β_1	0,4944***	0,4388***	0,5925***
	β_2	-2,8791***	-3,0644***	3,6546***
	β_3	0,2526***	0,2532***	0,2792***
	β_4	1,5322***	1,1875***	0,2037***

Quadro 23 - Parâmetros dos modelos de equação hipsométrica da classe 2 e suas significâncias (conclusão)

É importante ressaltar a significância de todos os parâmetros utilizados nas regressões, com exceção ao parâmetro β_4 para a acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LS, porém ele não foi excluído devido a sua importância, que comprovada nas demais situações de estudo. Essa significância demonstra que os modelos aqui empregados são consistentes biologicamente.

Quando analisamos o Quadro 24 que contém as informações referentes ao teste L&O realizado a 5% de significância, observamos que a exemplo do que aconteceu com os modelos da classe 1, praticamente nenhum dos modelos seria aceito, apenas o modelo $H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$ seria aceito para o eucalipto no tratamento 50%E:50%A – LD. Leite e Andrade (2003) ao empregarem o teste L&O com a mesma significância de 5% para o estudo de relações hipsométricas em um povoamento híbrido entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, também puderam observar a mesma situação, que aqui encontramos, para o teste, o que levou aos autores a darem mais ênfase as demais análises utilizadas para escolherem os modelos.

		Acácia			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
$H \sim \int (DAP, Idade)$	F	64,8433*	55,9519*	1716,2521*	43,5741*	122,6097*	329,8720*
	t	2,3678*	2,6375*	2,2017*	20,1990*	2,8494*	5,5071*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	não	sim	não	não
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest
$H \sim \int (DAP, Hd)$	F	318,2443*	397,2735*	568,9538*	162,7466*	149,4959*	372,0314*
	t	2,8155*	3,3305*	4,6545*	2,2816*	2,8056*	5,3445*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	não	não	não	não
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest
$H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$	F	19,2990*	27,0481*	12,3112*	12,7284*	2,9219 ^{ns}	52,9418*
	t	2,0545*	2,5674*	3,2422*	1,7908 ^{ns}	1,7758 ^{ns}	2,8484*
	$R_{\hat{y}y} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	não	não	sim	não
	Conclusão	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs $\neq$ Hest	Hobs = Hest	Hobs $\neq$ Hest

Quadro 24 - Resultados do procedimento estatístico proposto por Leite & Oliveira (2002) na análise dos modelos hipsométricos da classe 2

Ao observar o Quadro 25, notamos que o modelo $H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$ foi o que apresentou os maiores valores para o coeficiente de determinação ($\bar{R}_{\hat{y}y}^2$), com os valores situando entre 0,94 e 0,96, enquanto que os modelos $H \sim \int (DAP, I)$ e $H \sim \int (DAP, Hd)$ tiveram os valores entre 0,84 - 0,94 e 0,83 - 0,92, respectivamente, e os menores valores para BIAS (0,039 m - 0,1 m) e RQEM (7,2 - 10,1). A única situação em que esse modelo não foi superior quanto a essas estatísticas, foi para a acácia-negra no tratamento 50%E:50%A - LD, pois o modelo $H \sim \int (DAP, I)$ apresentou o menor valor para a RQEM nessa situação de estudo, que foi de 9,88, contudo esse valor foi próximo ao apresentado pelo modelo $H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$, que foi de 10,14.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
$H \sim \int (DAP, Idade)$	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,949	0,940	0,901	0,933	0,913	0,846
	$S_{\hat{y}y}$	0,051	0,056	0,071	0,063	0,082	0,119
	BIAS	0,075	0,076	0,156	0,091	0,212	0,370
	RQEM	8,582	9,883	10,296	10,747	13,680	18,124
$H \sim \int (DAP, Hd)$	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,925	0,898	0,877	0,914	0,911	0,833
	$S_{\hat{y}y}$	0,142	0,168	0,182	0,166	0,190	0,286
	BIAS	0,178	0,222	0,217	0,184	0,243	0,408
	RQEM	11,859	13,984	13,665	15,457	15,665	21,340
$H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,962	0,943	0,947	0,964	0,968	0,960
	$S_{\hat{y}y}$	0,102	0,126	0,119	0,107	0,115	0,140
	BIAS	0,041	0,060	0,039	0,042	0,041	0,104
	RQEM	8,064	10,148	8,874	8,836	7,249	9,412

Quadro 25 - Estatísticas obtidas após o ajuste dos modelos hipsométricos da classe 2

No Quadro 26, onde podemos observar os histogramas de frequência dos erros percentuais, notamos a superioridade do modelo $H \sim \int (DAP, Hd, AS, Idade)$, sobre os demais modelos da classe 2.

Quadro 26 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos hipsométricos da classe 2 (continua)

Quadro 26 - Histograma de frequência dos erros percentuais dos modelos hipsométricos da classe 2 (conclusão)

Na Figura 33 podemos observar o comportamento desses modelos da classe 2 para o eucalipto no tratamento 100%E, representando bem todas as situações aqui estudadas, as demais situações estão no Quadro 36.

Figura 33 - Alturas observadas e estimadas para o eucalipto no tratamento 100%E, tem-se em a) o modelo proposto por Caldeira et al. (2002), em b) o modelo proposto por Campos et al. (1984) e em c) o modelo proposto por Scolforo et al. (1993)

Como podemos observar todos os modelos da classe 2, apresentaram uma maior sobreposição de dados, significando estimativas mais próximas da realidade, além disso é notável um menor vício desses modelos na estimação da altura, porém os dois primeiros modelos aqui apresentados exibiram problemas de subestimação e superestimação de informações, contudo o modelo $H \sim \int(DAP, Hd, AS, Idade)$ se demonstrou superior a todos os modelos apresentados até aqui, tendo um comportamento biologicamente compatível e não apresentou problemas tão evidentes quanto aos demais.

Ao se comparar o melhor modelo da classe 1, modelo de Curtis; com o melhor modelo da classe 2, $H \sim \int(DAP, Hd, AS, Idade)$; temos que o segundo foi superior ao de Curtis, como podemos observar no Quadro 27, onde verifica-se que, quanto ao coeficiente de determinação ($\bar{R}_{yy}^2$) os modelos apresentaram valores próximos, porém o modelo da classe 2 foi responsável por apresentar valores menores para o erro padrão dos resíduos (S_{yx}), BIAS e RQEM.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%A	50%E:50%A-LS	50%E:50%A-LD	100%E
Curtis	$\bar{R}_{yy}^2$ ou R_{yy}	0,953	0,946	0,956	0,944	0,958	0,958
	S_{yy}	1,635	1,759	1,511	1,767	1,752	1,903
	BIAS	0,135	0,149	0,108	0,072	0,159	0,238
	RQEM	11,708	13,088	11,423	13,409	12,911	14,226
$H \sim \int \left(\begin{matrix} DAP, Hd, \\ AS, Idade \end{matrix} \right)$	$\bar{R}_{yy}^2$ ou R_{yy}	0,962	0,943	0,947	0,964	0,968	0,960
	S_{yy}	0,102	0,126	0,119	0,107	0,115	0,140
	BIAS	0,041	0,060	0,039	0,042	0,041	0,104
	RQEM	8,064	10,148	8,874	8,836	7,249	9,412

Quadro 27 - Estatísticas obtidas após o ajuste dos modelos da classe 1 e 2 que melhor se ajustaram aos dados de altura

Leite e Andrade (2003) demonstraram a importância da variável Hd em equações hipsométricas geradas para um povoamento do híbrido entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, e destacaram que em grandes áreas, a variável Hd, quando usada como variável independente em modelos hipsométricos tem a capacidade de contribuir com a redução da soma de quadrados dos resíduos, devido ao fato de representar diferentes capacidades produtivas dos locais onde se encontram as parcelas, dessa forma, as relações podem diferir entre parcelas, além disso a Hd é uma variável que geralmente é utilizada nos métodos clássicos de classificação da capacidade produtiva da floresta, sendo necessária para o ajuste de muitos modelos de crescimento e produção. Além disso os autores frisaram que em grandes áreas, a adoção de um único modelo hipsométrico do tipo $H \sim \int (DAP)$ certamente não deve ser adotada, por ser um procedimento moroso, pois é importante avaliar a exatidão proporcionada pelas equações geradas para cada parcela, e por se ter resultados muito próximos daqueles obtidos com o modelo hipsométrico que tenha Hd; dessa forma esse tipo de relação só deve ser adotada quando não forem detectadas variações na Hd entre as parcelas de inventário florestal, com isso, a melhor alternativa para estimar a altura e inventários florestais dependerá da heterogeneidade do povoamento e da intensidade de amostragem.

Em estudo realizado por Leite et al. (2011) o mesmo modelo aqui empregado ($H \sim (DAP, Hd)$), também foi utilizado pelos autores, onde o ajustaram dessa forma e substituindo a Hd pelo DAP dominante (DAPd), para avaliar assim a influência do DAPd em modelos de relação hipsométrica. O modelo considerando a Hd apresentou melhores estatísticas, porém, segundo os autores, o modelo com o DAPd não resultou em perdas de precisão, o que facilitaria o inventário florestal pois a Hd dominante não seria medida nas parcelas. Segundo os autores, o uso da Hd permite diferenciar a altura de árvores de mesmo DAP em diferentes locais, ou seja, o efeito da capacidade produtiva sobre a altura de árvores individuais é explicado pela altura média das árvores dominantes de cada lugar.

Temesgen et al. (2014) também observaram a influência da altura dominante (Hd) e da área basal (B) na relação hipsométrica em uma floresta ombrófila mista de coníferas, e a inclusão dessas variáveis do povoamento melhoraram a capacidade de previsão quando comparados com grande parte dos modelos testados no estudo, para todas as espécies. O modelo que melhor se ajustou aos dados, segundo os autores, foi o que relacionou a Hd com a B, indicando que a combinação dessas variáveis captura muito bem as variações na relação hipsométrica na situação de estudo, que é muito heterogênea, sendo capaz de representar todas as diferenças significativas entre os microsítios via efeito do habitat.

Ao testarem diferentes relações hipsométricas para *Acacia mearnsii*, Caldeira et al. (2002) constataram que a inclusão da variável independente idade foi capaz de melhorar a distribuição de resíduos, eliminar as tendências nítidas de superestimação e subestimação das alturas dentro da amplitude de diâmetros observadas.

No trabalho de Salles (2010) onde o crescimento e a produção foram modelados em povoamentos agroflorestais, foi ajustado o modelo hipsométrico proposto por Scolforo (1993), que também foi ajustado no estudo corrente, o autor constatou que nem sempre seus coeficientes foram todos significativos, e quando isso ocorreu os termos a eles relacionados foram retirados, o que no estudo atual, como comentado anteriormente, aconteceu em apenas uma ocasião e o termo não foi retirado. Além disso, o autor concluiu que também não houveram tendenciosidades nas estimativas, e os resíduos tiveram a amplitude em torno de $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$; aqui, como podemos observar através dos histogramas de frequência dos erros percentuais (Quadro 26), para o eucalipto os resíduos tiveram uma amplitude de $\pm 10\%$ e para a acácia-negra de $\pm 20\%$.

Salles (2010) ainda concluiu que modelar em nível de árvore implica em maior dispersão de erros se comparado com a modelagem em nível de povoamento. Isso porque, segundo o autor, a diferença entre os valores absolutos destas variáveis quando vistos indivíduo por indivíduo é alta, portanto, passar uma curva média por diferentes árvores em diferentes parcelas implicará em maiores erros relativos.

4.4.5 Classificação da capacidade produtiva

Como foi visto anteriormente, o modelo de crescimento que melhor se ajustou aos dados foi o de Chapman-Richards, e devido a isso para a classificação da capacidade produtiva ele foi novamente ajustado, agora para descrever o comportamento da Hd (altura

dominante) ao longo do tempo, porém não foi ajustado por tratamento e sim por espécie, possibilitando assim a classificação da capacidade produtiva pelo método da curva-guia e a indicação da existência de possíveis diferenças de sítios para cada espécie, representando dessa forma a diferença entre os tratamentos consorciados e a monocultura, por espécie

Fazendo a classificação da capacidade produtiva por espécie é possível retratar todas as parcelas que a espécie está contida, e verificar se houveram diferenças entre os valores dos sítios ocasionadas pelos diferentes tratamentos empregados.

O modelo de Chapman-Richards, escolhido para a classificação dos índices de local (S), ajustou-se bem aos dados para as duas espécies. Todas as estimativas dos parâmetros foram significativas pelo teste t ($p < 0,01$) e as equações e as demais análises de ajuste dos modelos obtidas com as duas espécies estão presentes no Quadro 28.

	Modelo	Estatísticas
Eucalipto	$Hd = 23,5037^{***}(1 - e^{(-0,0395^{***} * Idade)})^{1,5764^{***}}$	$R_{\hat{y}y} = 0,974$; $S_{yx} = 1,42$; BIAS= -0,01; RQEM= 8,67
Acácia-negra	$Hd = 22,025^{***}(1 - e^{(-0,0396^{***} * Idade)})^{1,3007^{***}}$	$R_{\hat{y}y} = 0,987$; $S_{yx} = 0,84$; BIAS= -0,002; RQEM= 5,21

Quadro 28 - Curvas-guia geradas para o *Eucalyptus globulus* e para a *Acacia mearnsii*, bem como suas estatísticas de precisão

Essas equações apresentadas acima representam a curva média de índices de local, denominada curva-guia, que mostra a estimativa do crescimento médio ao longo do tempo. Na Figura 34 encontra-se os histogramas de frequência dos erros percentuais e na Figura 35 o comportamento dessas curvas.

Figura 34 - Histograma de frequência dos erros percentuais das curvas-guia, em a) para o *Eucalyptus globulus* e em b) para a *Acacia mearnsii*

Figura 35 - Comportamento das Curvas-guia geradas e a dispersão dos dados de Hd, em a) para o *Eucalyptus globulus* e em b) para a *Acacia mearnsii*

Com base nos histogramas de frequência dos erros percentuais (Figura 34) podemos notar que em ambos os casos a amplitude dos resíduos foi boa, para o eucalipto foi de $\pm 10\%$ e para a acácia-negra variando entre 0 e 10%; ao analisar as medidas de precisão das equações, verifica-se que os dois modelos ajustaram-se bem aos dados apresentando valores para o coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$) de 0,97 e 0,98 e do erro padrão dos resíduos (S_{yx}) de 1,42 e 0,84, para o eucalipto e para a acácia-negra, respectivamente, sendo que no geral os valores das medidas foram melhores para a acácia-negra, e ainda podemos verificar na Figura 35, que o eucalipto apresentou uma variação maior nos dados comparado com a acácia-negra.

A partir das equações da curva-guia, duas equações de índices de local foram obtidas ao observar que as condições de que, quando a idade (I) do povoamento for igual à idade-índice (Ii), a altura dominante (Hd) é igual ao índice de local (S).

$$Hd = \beta_0 * (1 - e^{(\beta_1 * I)})^{\beta_2} \therefore S = \beta_0 * (1 - e^{(\beta_1 * Ii)})^{\beta_2}$$

Isolando β_0 em uma das equações temos:

$$Hd = \frac{S * (1 - e^{(\beta_1 * I)})^{\beta_2}}{(1 - e^{(\beta_1 * Ii)})^{\beta_2}} \therefore S = \frac{Hd * (1 - e^{(\beta_1 * Ii)})^{\beta_2}}{(1 - e^{(\beta_1 * I)})^{\beta_2}}$$

em que:

Hd = altura dominante, em metros;

S = índice de sítio, em metros;

I = idade, em meses;

Ii = idade índice, em meses;

β_i = parâmetros da regressão;

ln = logaritmo neperiano;

e = base dos logaritmos neperiano.

Observando o comportamento das curvas-guias (Figura 35), verificou-se que as Hd variavam entre 17,5 e 23,5 m para o eucalipto, e entre 18,5 e 21,5 m para a acácia-negra, na idade índice definida (72 meses). Isso significa que as curvas de índices de local devem abranger essa amplitude.

Segundo Oliveira et al. (2008) o índice de local é uma variável importante em estudos de crescimento e produção, e qualquer distorção na determinação desse índice influencia as estimativas de produção.

A partir das expressões de índice de local, foram construídas as curvas (Figura 36) e as tabelas de índice de local (Tabelas 9 e 10). Atribuindo-se valores de índice de sítio (S) compatíveis com a variação da altura dominante (Hd) na idade índice e variando a idade, foram geradas as curvas de índice de local. No trabalho foram geradas curvas anamórficas para as duas espécies, e os índices de local foram agrupados em 3 (três) classes de capacidade produtiva, classe I (alta), classe II (média) e classe III (baixa), observando uma amplitude de 2,8 m em cada classe na idade índice para o eucalipto, e uma amplitude de 1,6 m para a acácia-negra.

Figura 36 - Curvas de índice de local pelo método da curva-guia, em a) tem-se para o *Eucalyptus globulus* e em b) para a *Acacia mearnsii*

Segundo Campos e Leite (2009) o uso desse tipo de expressão é particularmente necessário ao se empregar um sistema de prognose, quando o *input* índice de local (S) é determinado para as alturas dominantes médias observadas em parcelas permanentes.

As curvas de índice de local (Figura 36) são geralmente utilizadas com propósito ilustrativo, uma forma mais precisa e eficiente de classificação consiste no emprego de uma tabela contendo os limites de alturas dominantes para cada índice de local, ou classe de capacidade produtiva, vale ressaltar que, uma classe engloba dois ou mais índices de local.

Para acessar a classe ou o índice de local, é necessário então conhecer a altura dominante média do lugar, além da idade atual do povoamento, como se segue na Tabela 8 utilizando a tabela de limites de alturas dominantes (Tabelas 9 e 10).

Tabela 8 - Classificação dos tratamentos testados para ambas as espécies aos 96 meses de idade

Eucalipto					Acácia-negra				
Tratamento	Idade (meses)	Hd (m)	S (m)	Classe	Tratamento	Idade (meses)	Hd (m)	S (m)	Classe
50%E:50%A – LS	96	22,21	21,2	II	50%E:50%A – LS	96	21,87	21,2	I
50%E:50%A – LD	96	23,2	21,2	II	50%E:50%A – LD	96	21,84	21,2	I
100%E	96	23,4	22,6	I	100%A	96	21,52	20,4	II

Por se tratar de um índice que reflete a capacidade produtiva do local em que as espécies estão plantadas, teoricamente esse valor de índice de sítio (S) deveria ser o mesmo entre os tratamentos, pois eles estão implantados no mesmo local; contudo, como podemos observar na Tabela 8 não é o que ocorre, demonstrando assim a influência que o sistema de manejo, o espaçamento e as espécies utilizadas tem sobre a variável de sítio.

Tabela 9 - Limites de altura dominante por idade e índice de local com definição de três classes de capacidade produtiva, considerando-se uma idade-índice de 72 meses, para o *Eucalyptus globulus* (continua)

Eucalipto						
Idade (meses)	Classe I					
	S22,6			S24		
12	5,19	-	5,50	5,52	-	5,83
24	11,12	-	11,78	11,83	-	12,49
36	15,58	-	16,51	16,58	-	17,51
48	18,63	-	19,74	19,82	-	20,93
60	20,62	-	21,85	21,94	-	23,17
72	21,9	-	23,2	23,3	-	24,6
84	22,71	-	24,06	24,16	-	25,51
96	23,22	-	24,60	24,70	-	26,08
108	23,54	-	24,93	25,04	-	26,44
120	23,73	-	25,14	25,25	-	26,66
Idade (meses)	Classe II					
	S19,8			S21,2		
12	4,52	-	4,83	4,86	-	5,16
24	9,70	-	10,36	10,41	-	11,07
36	13,59	-	14,52	14,59	-	15,51
48	16,25	-	17,35	17,44	-	18,54

Tabela 9 - Limites de altura dominante por idade e índice de local com definição de três classes de capacidade produtiva, considerando-se uma idade-índice de 72 meses, para o *Eucalyptus globulus* (conclusão)

Idade (meses)	Classe II					
	S19,8			S21,2		
60	17,99	-	19,21	19,30	-	20,53
72	19,1	-	20,4	20,5	-	21,8
84	19,81	-	21,15	21,26	-	22,61
96	20,25	-	21,63	21,73	-	23,11
108	20,53	-	21,92	22,03	-	23,43
120	20,70	-	22,11	22,22	-	23,63

Idade (meses)	Classe III					
	S17			S18,4		
12	3,86	-	4,17	4,19	-	4,50
24	8,28	-	8,94	8,99	-	9,65
36	11,60	-	12,52	12,60	-	13,52
48	13,87	-	14,97	15,06	-	16,16
60	15,35	-	16,57	16,67	-	17,89
72	16,3	-	17,6	17,7	-	19
84	16,90	-	18,25	18,35	-	19,70
96	17,28	-	18,66	18,76	-	20,14
108	17,52	-	18,91	19,02	-	20,42
120	17,67	-	19,07	19,18	-	20,59

Tabela 10 - Limites de altura dominante por idade e índice de local com definição de três classes de capacidade produtiva, considerando-se uma idade-índice de 72 meses, para a *Acacia mearnsii* (continua)

Acácia-negra						
Idade (meses)	Classe I					
	S21,2			S22		
12	6,35	-	6,57	6,60	-	6,81
24	11,91	-	12,31	12,37	-	12,77
36	15,72	-	16,25	16,33	-	16,86
48	18,21	-	18,82	18,91	-	19,52
60	19,80	-	20,46	20,56	-	21,23
72	20,8	-	21,5	21,6	-	22,3
84	21,43	-	22,15	22,25	-	22,97
96	21,82	-	22,55	22,66	-	23,39
108	22,07	-	22,81	22,91	-	23,66
120	22,22	-	22,97	23,07	-	23,82

Idade (meses)	Classe II					
	S19,6			S20,4		
12	5,86	-	6,08	6,11	-	6,32
24	10,99	-	11,39	11,45	-	11,85

Tabela 10 - Limites de altura dominante por idade e índice de local com definição de três classes de capacidade produtiva, considerando-se uma idade-índice de 72 meses, para a *Acacia mearnsii* (conclusão)

Idade (meses)	Classe II					
	S19,6			S20,4		
36	14,51	-	15,04	15,12	-	15,65
48	16,81	-	17,42	17,51	-	18,12
60	18,28	-	18,94	19,04	-	19,70
72	19,2	-	19,9	20	-	20,7
84	19,78	-	20,50	20,60	-	21,32
96	20,14	-	20,88	20,98	-	21,72
108	20,37	-	21,11	21,22	-	21,96
120	20,51	-	21,26	21,36	-	22,11

Idade (meses)	Classe III					
	S18			S18,8		
12	5,37	-	5,59	5,62	-	5,83
24	10,08	-	10,48	10,54	-	10,94
36	13,31	-	13,83	13,91	-	14,44
48	15,41	-	16,02	16,11	-	16,72
60	16,75	-	17,42	17,51	-	18,18
72	17,6	-	18,3	18,4	-	19,1
84	18,13	-	18,85	18,96	-	19,68
96	18,46	-	19,20	19,30	-	20,04
108	18,67	-	19,41	19,52	-	20,26
120	18,80	-	19,55	19,65	-	20,40

Segundo Nanang e Nunifu (1999) muitas equações têm sido utilizadas para desenvolver curvas de índice de local pelo método da curva-guia, sendo segundo os autores o modelo de Schumacher o mais utilizado; contudo, outros modelos podem apresentar propriedades desejáveis, como a elasticidade não constante e a hipótese de convergência assintótica. Portanto, a escolha do modelo funcional para as curvas de índice de local não deve ser limitada a critérios relacionados aos dados, mas também deve incluir considerações acerca do modelo escolhido. No estudo corrente, foi constatado que o modelo de crescimento que melhor se ajustou aos dados foi o de Chapman-Richards e como seus parâmetros estão relacionados biologicamente com o crescimento.

Schneider et al. (2001) e Schneider e Silva (1980) ao classificar os sítios de povoamentos de *Acacia mearnsii* utilizaram a idade índice de 60 meses de idade e classificaram a floresta em 5 classes de produção, variando de 12 m até 20 m, demonstrando uma maior amplitude nos dados de Hd, do que aqueles encontrado no presente trabalho.

Contudo, houveram duas classes escolhidas, pelos autores citados que foram a mesma ou muito próximas das que aqui foram utilizadas, a classe de 18 m e a de 20 m. Mesmo com diferentes idades índices utilizadas, os valores de Hd dessas classes, encontradas pelos autores citados, ficaram muito próximas aos valores aqui encontrados.

Em estudo desenvolvido por Cruz et al. (2008) para *Tectona grandis* as curvas de índice de local através do método da curva-guia foram confeccionadas, a exemplo do estudo corrente, com o modelo de Chapman-Richards, porém uma idade-índice de 48 meses foi utilizada, onde a produção foi classificada em três classes e cada uma contendo dois índices de local, da mesma forma que foram confeccionadas no estudo presente. E os autores concluíram que essa metodologia foi adequada, com todos os dados sendo contemplados pelas curvas-guias. Scolforo (1992) também selecionou o modelo de Chapman-Richards para a classificação da capacidade produtiva de florestas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Outros trabalhos utilizando o método da curva-guia para a classificação da capacidade produtiva obtiveram bons ajustes, como Demolinari et al. (2007), Dias et al. (2005), Flewelling et al. (2001), Nogueira (2003) e Leite et al. (2011).

4.4.6 Modelagem da Distribuição Diamétrica (MDD)

Foi estimada a distribuição diamétrica pela função Weibull, para cada parcela e espécie, em todas as idades, e comparada com a respectiva distribuição diamétrica observada. A análise de aderência foi realizada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, em nível de 1% de probabilidade, onde para a maioria das situações o teste foi não significativo ($p > 0,01$) e somente em algumas o teste foi significativo; nesses casos, ajustou-se a função Weibull pelo método da aproximação linear, conforme Campos e Leite (2009). Decidiu-se realizar o teste de Kolmogorov-Smirnov a 1% de probabilidade pois foi constatado que em muitas situações onde o teste foi significativo, que o problema não estava na função Weibull em si, mas sim na própria distribuição dos diâmetros que foi heterogênea. Devido ao grande número de gráficos gerados, os resultados de algumas situações selecionadas ao acaso são representados na (Figura 37).

Figura 37 - Frequência observada e estimada pela função Weibull de quatro situações selecionadas ao acaso

Esses resultados confirmam a suposição de que a função Weibull se ajusta bem aos dados de acácia-negra e eucalipto, e está de acordo com diversos autores que a utilizaram para a modelagem da distribuição de diâmetros, como: Nogueira (2003), Merganič e Sterba (2006), Schneider et al. (2008), Leite et al. (2005), Binoti et al. (2010, 2014), Lopes (2007), Nogueira et al. (2005), Orellana et al. (2014), Sanquetta et al. (2014, 2014b).

Todos os parâmetros das equações ajustadas para cada situação de estudo estão apresentados no Quadro 29:

		Acácia-negra		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%A
Hd	β_0	22,2239***	22,1967***	21,8122***
	β_1	0,0399***	0,0393***	0,0398***
	β_2	1,3546***	1,332***	1,26***
q	β_0	-5,6989***	4,5308***	3,3311***
	β_1	0,029***	0,0042*	0,0037***
	β_2	0,749***	0,697***	0,6381***
	β_3	0,0065***	-0,0075***	-0,0028***
DAPmax	β_0	-0,3304**	0,0448 ^{ns}	0,6304***
	β_1	0,0606***	0,0604***	0,0724***
	β_2	0,8892***	0,8385***	0,719***
Ln γ	β_0	11,3429***	-3,1045***	-7,6463***
	β_1	-1,881***	0,5555***	1,1219***
	β_2	2,5781***	0,7705***	0,4525***
	β_3	-3,0002***	-0,6312***	0,0524*
Ln β	β_0	-0,2738***	-0,0699 ^{ns}	-0,0583***
	β_1	0,9722***	1,0265***	1,0181***
	β_2	0,2424***	0,0367 ^{ns}	0,0456***

Quadro 29 - Parâmetros das equações de regressão utilizadas para a recuperação da distribuição diamétrica e suas significâncias (continua)

		Eucalipto		
		50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Hd	β_0	22,5398***	23,6532***	24,0224***
	β_1	0,0417***	0,0406***	0,0379***
	β_2	1,5527***	1,6777***	1,5411***
q	β_0	-0,911***	-4,6163***	-6,3861***
	β_1	0,0129***	0,0269***	0,0326***
	β_2	0,5222***	0,634***	0,7722***
	β_3	0,0038***	0,0102***	0,0054***
DAPmax	β_0	2,4956***	1,4287***	0,0525 ^{ns}
	β_1	0,0654***	0,0562***	0,1182***
	β_2	0,6081***	0,7141***	0,7586***
Ln γ	β_0	2,2685***	6,9852***	-2,0267***
	β_1	-0,5062***	-1,124***	0,2951***
	β_2	2,4185***	1,4442***	1,2443***
	β_3	-2,5355***	-1,8268***	-1,2025***
Ln β	β_0	-0,0525 ^{ns}	-0,0916***	-0,1251***
	β_1	1,034***	0,989***	1,0057***
	β_2	0,0176 ^{ns}	0,1153***	0,116***

Quadro 29 - Parâmetros das equações de regressão utilizadas para a recuperação da distribuição diamétrica e suas significâncias (conclusão)

Com a exceção de 6 (seis) parâmetros, todos os demais foram significativos estatisticamente; e entre os que não foram significativos apenas 2 (dois) deles não foram os parâmetros relacionados ao intercepto. Características essas que comprovam a importância das variáveis inseridas nos modelos.

O Quadro 30 contém os valores de coeficiente de determinação ($\bar{R}_{\hat{y}y}^2$) ou coeficiente de correlação entre valores observados e estimados ($R_{\hat{y}y}$), erro padrão dos resíduos (S_{yx}), BIAS e RQEM das equações ajustadas.

		Acácia-negra			Eucalipto		
		50%E:50%A- LS	50%E:50%A - LD	100%A	50%E:50%A - LS	50%E:50%A - LD	100%E
Hd	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,988	0,982	0,990	0,971	0,983	0,972
	$S_{\hat{y}y}$	0,827	1,014	0,710	1,395	1,166	1,490
	BIAS	-0,007	-0,007	-0,006	-0,009	-0,014	-0,013
	RQEM	4,918	6,276	4,424	8,562	7,139	9,048
q	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,991	0,954	0,991	0,876	0,930	0,974
	$S_{\hat{y}y}$	0,429	0,928	0,349	1,201	1,199	0,870
	BIAS	-0,0004	-0,0004	0,0001	0,001	0,001	-0,001
	RQEM	3,574	8,208	3,329	12,086	10,895	7,168
DAPmax	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,971	0,945	0,986	0,917	0,925	0,971
	$S_{\hat{y}y}$	1,086	1,446	0,661	1,555	1,694	1,365
	BIAS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	RQEM	6,272	8,664	4,177	9,836	10,607	7,343
Ln γ	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,895	0,182	0,522	0,579	0,65	0,745
	$S_{\hat{y}y}$	0,058	0,181	0,127	0,132	0,15	0,184
	BIAS	0,010	0,082	0,036	0,029	0,01	0,078
	RQEM	6,248	17,568	12,442	12,483	16,94	16,659
Ln β	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ ou $R_{\hat{y}y}$	0,991	0,948	0,985	0,904	0,96	0,986
	$S_{\hat{y}y}$	0,050	0,121	0,060	0,139	0,12	0,082
	BIAS	0,023	0,051	0,002	0,092	0,11	0,054
	RQEM	3,815	8,222	3,463	12,243	10,88	7,837

Quadro 30 - Estatísticas obtidas após o ajuste do sistema de equações utilizadas para a recuperação da distribuição diamétrica

No geral todos os modelos apresentaram valores relativamente altos de $\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ e $R_{\hat{y}y}$, em torno de 0,87 e 0,99, indicando que as variáveis independentes utilizadas nas equações tem grande influência nas variáveis dependentes e apresentaram também baixos valores de S_{yx} , BIAS e RQEM. No modelo do parâmetro de forma (γ) os valores para o $\bar{R}_{\hat{y}y}^2$ foram abaixo dos demais modelos, chamando muita atenção o modelo para a acácia-negra no tratamento 50%E:50%A – LD, onde esse valor (0,18) foi muito inferior e também apresentaram altos valores para o RQEM (17,56), essas características refletiram em uma maior dispersão dos resíduos quando comparado com os demais modelos, que apresentaram uma dispersão dos resíduos em torno de $\pm 10\%$ para a acácia-negra e $\pm 20\%$ para o eucalipto.

Em virtude de uma grande quantidade de gráficos, será apresentado abaixo alguns gráficos de dispersão dos resíduos, demonstrando no geral como os modelos se ajustaram bem aos dados (Figuras 38, 39, 40, 41, 42 e 43), e também os gráficos de resíduos para o modelo do parâmetro γ (Figuras 44, 45 e 46), os demais encontram-se no Quadro 37.

Figura 38 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao DAPmax, para o *Eucalyptus globulus* no tratamento 50%E:50%A - LS

Figura 39 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao parâmetro de forma da função Weibull (λ), para a *Acacia mearnsii* no tratamento 50%E:50%A - LS

Figura 40 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao parâmetro de escala da função Weibull (β), para o *Eucalyptus globulus* no tratamento 50%E:50%A - LD

Figura 41 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao diâmetro quadrático (q), para a *Acacia mearnsii* no tratamento 50%E:50%A – LD

Figura 42 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação à altura dominante (Hd), para a *Acacia mearnsii* no tratamento 100%A

Figura 43 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao parâmetro de escala da função Weibull (β), para o *Eucalyptus globulus* no tratamento 100%E

Com as Figuras 38, 39, 40, 41, 42 e 43 podemos constatar que, os modelos se ajustaram melhor aos dados de acácia-negra, isso ocorreu, devido ao fato de que o eucalipto apresentou uma maior variação no desenvolvimento para o DAP, como já foi comentado anteriormente, e que a maior dispersão dos resíduos ocorreu para os indivíduos de menor dimensão, pois o

desenvolvimento dos indivíduos nos estágios iniciais foi mais heterogêneo, em parte, pelas espécies terem sido plantadas de origem seminal.

Figura 44 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao parâmetro de forma da função Weibull (λ), para a *Eucalyptus globulus* no tratamento 50%E:50%A – LS

Figura 45 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao parâmetro de forma da função Weibull (λ), para a *Acacia mearnsii* no tratamento 50%E:50%A – LD

Figura 46 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação ao parâmetro de forma da função Weibull (λ), para a *Acacia mearnsii* no tratamento 100%A

Nas Figuras 44, 45 e 46 notamos que o parâmetro λ nessas situações apresentadas não se ajustou muito bem aos dados, quando comparado as outras variáveis, contudo os modelos para 50%E:50%A – LS para o eucalipto e 100%A ainda apresentaram um comportamento

razoavelmente aceitável, visto que essa variável é difícil de ser modelada, pois apresenta baixa ou nenhuma correlação com as demais variáveis estudadas, porém, o comportamento dos resíduos para 50%E:50%A – LD foi muito ruim, apresentando uma tendência forte de superestimação da variável em questão para os indivíduos de menores dimensões e de subestimação para os indivíduos de maior dimensão.

De acordo com Campos e Leite (2009), em modelos de distribuição diamétrica, a sobrevivência pode ser tratada tanto como admitindo-se uma percentagem de sobrevivência em relação ao número de árvores plantadas, quanto por estimação via regressão. Nesse trabalho foi utilizada a segunda maneira, porém, adotando o número de árvores sobreviventes no primeiro inventário florestal, com isso, foi gerada uma equação de projeção geral para cada espécie, e isso foi possível devido a inclusão de variáveis do povoamento, como idade (I), diâmetro quadrático (q) e índice de sítio (S). A referida equação está no Quadro 31, com seus parâmetros e suas significâncias, bem como com as suas medidas de precisão.

	Modelo	Estatísticas
Eucalipto	$LnN_2 = -0,09831 - 0,00162q + 1,00291^{***}LnN_1 + 0,00006*IS$	$\bar{R}_{yy}^2 = 0,977$; $S_{yx} = 0,05$; BIAS= 0,83; RQEM= 5,35
Acácia-negra	$LnN_2 = 0,42457^{**} - 0,01978^{***}q + 0,94011^{***}LnN_1 + 0,00016^{***}IS$	$\bar{R}_{yy}^2 = 0,973$; $S_{yx} = 0,05$; BIAS= 1,09; RQEM= 5,29

Quadro 31 - Modelos para a estimação da sobrevivência das espécies, bem como a significância de seus parâmetros e os valores das estatísticas de precisão utilizadas

Podemos constatar que ambas as equações se ajustaram bem aos dados, pois apresentaram altos valores de $\bar{R}_{yy}^2$, e baixos valores para as demais análises apresentadas, além disso, apresentaram boa distribuição dos resíduos, como pode ser observado nas Figuras 47 e 48, tendo a dispersão entre $\pm 10\%$.

Figura 47 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação a sobrevivência, para a *Eucalyptus globulus*

Figura 48 - Distribuição dos resíduos percentuais em relação a sobrevivência, para a *Acacia mearnsii*

Com as estimativas do número de árvores por hectare e dos parâmetros da função Weibull, estimou-se a frequência por hectare em cada classe de diâmetro, para todos os tratamentos, espécies e idades consideradas. Na Figura 49 são apresentadas as distribuições diamétricas projetadas para a acácia-negra e na Figura 50 para o eucalipto, considerando sempre os dados iniciais observados para cada situação.

Figura 49 - Distribuições diamétricas projetadas para idades futuras para a *Acacia mearnsii*, em a) tem-se no tratamento 50%E:50%A – LS, em b) o tratamento 50%E:50%A – LD e em c) o tratamento 100%A (continua)

Figura 49 - Distribuições diamétricas projetadas para idades futuras para a *Acacia mearnsii*, em a) tem-se no tratamento 50%E:50%A – LS, em b) o tratamento 50%E:50%A – LD e em c) o tratamento 100%A (conclusão)

De acordo com a Figura 49 podemos constatar que a acácia-negra nos tratamentos consorciados apresentou comportamento diamétrico bastante semelhante, contudo, é possível observar que no tratamento 50%E:50%A – LS a espécie alcançou maiores classes diamétricas (Figura 49 - a), o que pode ser confirmado pelo maior achatamento das distribuições diamétricas; já o tratamento 100%A apresentou comportamento contrário (Figura 49 - c).

Figura 50 - Distribuições diamétricas projetadas para idades futuras para a *Eucalyptus globulus*, em a) tem-se no tratamento 50%E:50%A – LS, em b) o tratamento 50%E:50%A – LD e em c) o tratamento 100%E (continua)

Figura 50 - Distribuições diamétricas projetadas para idades futuras para a *Eucalyptus globulus*, em a) tem-se no tratamento 50%E:50%A – LS, em b) o tratamento 50%E:50%A – LD e em c) o tratamento 100%E (conclusão)

Na Figura 50 a heterogeneidade da distribuição diamétrica para o eucalipto fica evidente, devido ao elevado achatamento das distribuições, chamando atenção para o tratamento 100%E (Figura 50 - c), onde, é possível aos 96 meses encontrar indivíduos com DAP inferior a 5 cm e superiores a 25 cm. Ao contrário do ocorrido para a acácia-negra, aqui a monocultura atingiu maiores valores para DAP, além disso foi possível encontrar diferenças evidentes entre os tratamentos consorciados, é possível notar que o 50%E:50%A – LS (Figura 50 - a) apresentou menores valores de DAP, quando comparado ao 50%E:50%A – LD (Figura 50 - b).

Uma consistência importante em MDD's é garantir que quando a idade futura for igual a idade atual, a distribuição diamétrica na idade futura tem que ser igual a distribuição diamétrica na idade atual, ou seja, $N/ha_1 = N/ha_2$, $Hd_1 = Hd_2$, $q_1 = q_2$, $DAPmax_1 = DAPmax_2$, $\beta_1 = \beta_2$ e $\gamma_1 = \gamma_2$; a qual foi confirmada no sistema testado.

Segundo Nogueira (2003), ao longo do tempo as distribuições diamétricas tendem a se achatar e deslocar para a direita, sendo esse o comportamento natural desse tipo de distribuição em florestas equiâneas, e com essa informação pode-se inferir que a redistribuição do número de árvores por classe de diâmetro, ao longo do tempo, obtida pelo modelo de distribuição diamétrica aqui empregado está de acordo com a teoria para todas as situações de estudo e todas as espécies. Outro aspecto que está de acordo com a teoria é o comportamento do ingresso das árvores em sucessivas classes de diâmetro, onde podemos observar que as áreas correspondentes aos ingressos diminuem com o passar do tempo, chegando, inclusive, a praticamente não existirem ingressos em algumas situações.

Outra afirmação importante realizada por Nogueira (2003) é que, quanto menor os valores de γ , maior é a competição entre as árvores, tornando mais intensa a assimetria das curvas de distribuição diamétrica. Para podermos observar tal alegação, a projeção das estimativas para as variáveis dependentes das equações que compõem o modelo de distribuição diamétrica são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Projeção dos parâmetros da função Weibull para idades avançadas, em meses, utilizando o modelo de distribuição diamétrica

(continua)

50%E:50%A - LS, <i>Eucalyptus globulus</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
472	12	5,299145	3,826416	6,502556	3,266841	3,880308
439	24	11,06207	6,863703	10,79157	4,361284	7,136249
412	36	15,23464	9,09355	14,11352	4,627167	9,555483
391	48	17,9885	10,60436	16,5728	4,5202	11,19685
375	60	19,73633	11,61058	18,42033	4,26695	12,28469
364	72	20,824	12,29177	19,86644	3,969284	13,01413
358	84	21,49361	12,77353	21,05833	3,671334	13,52335
357	96	21,9033	13,13808	22,09218	3,390648	13,90317
50%E:50%A - LS, <i>Acacia mearnsii</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
686	12	6,00767	3,59143	5,738773	3,560872	3,586252
686	24	11,54137	8,086292	11,38653	5,732911	8,860587
653	36	15,39236	11,10028	15,53804	5,777144	12,07901
609	48	17,91561	13,05674	18,50893	5,567561	14,01786
571	60	19,52715	14,36193	20,66913	5,406205	15,26909
543	72	20,54307	15,29323	22,29971	5,261891	16,12473
529	84	21,17891	16,02488	23,59233	5,077524	16,72894
528	96	21,5752	16,66459	24,67194	4,823126	17,16263
50%E:50%A - LD, <i>Eucalyptus globulus</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
431	12	4,777907	3,107159	5,515152	2,798041	3,152836
401	24	10,67326	6,865099	10,39965	3,759714	7,144749
376	36	15,18638	9,797198	14,29703	4,11529	10,26281
356	48	18,27059	11,87185	17,17395	4,226246	12,44791
341	60	20,27875	13,31144	19,28243	4,225744	13,93958
330	72	21,55454	14,33211	20,86789	4,165544	14,97142
323	84	22,35412	15,09459	22,11326	4,067934	15,71588
321	96	22,85133	15,70804	23,1427	3,943627	16,28902
50%E:50%A - LD, <i>Acacia mearnsii</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
708	12	6,037201	3,490114	5,832427	3,905653	3,536186
709	24	11,51452	7,35472	11,15057	4,746154	7,654737
682	36	15,32846	10,25976	15,07392	5,046072	10,79698

Tabela 11 - Projeção dos parâmetros da função Weibull para idades avançadas, em meses, utilizando o modelo de distribuição diamétrica

(conclusão)						
50%E:50%A - LD, <i>Acacia mearnsii</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
646	48	17,83805	12,33181	17,90355	5,095772	13,04553
612	60	19,45007	13,76194	19,98054	5,019685	14,59271
587	72	20,47287	14,71083	21,56346	4,892986	15,61179
575	84	21,11739	15,29572	22,82916	4,763794	16,23332
580	96	21,5219	15,59316	23,89363	4,661889	16,54432
100%A – <i>Acacia mearnsii</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
1358	12	6,438685	3,656445	6,129187	3,724915	3,749641
1303	24	11,82732	7,294106	10,87294	4,69908	7,654646
1212	36	15,46961	9,918796	14,36099	4,969645	10,4938
1117	48	17,82471	11,73312	16,92349	4,924839	12,44588
1037	60	19,31914	12,95566	18,86713	4,792851	13,75025
982	72	20,2584	13,75668	20,41158	4,696029	14,60262
953	84	20,8456	14,25589	21,70288	4,69832	15,14261
954	96	21,21157	14,53135	22,83511	4,839307	15,46139
100%E – <i>Eucalyptus globulus</i>						
(N/ha)	Idade	Hd	q	DAPmax	γ	β
867	12	5,085118	2,608601	5,32847	2,335089	2,553683
809	24	10,84669	7,1384	11,11762	3,616098	7,393849
760	36	15,23315	10,65411	15,86366	3,99674	11,18958
721	48	18,2792	13,18272	19,59292	3,986602	13,85788
690	60	20,31219	14,97703	22,5537	3,83462	15,68457
667	72	21,64149	16,27501	24,9807	3,649357	16,9542
654	84	22,50068	17,25581	27,05108	3,475332	17,88022
648	96	23,05224	18,04408	28,8881	3,329061	18,60867

Como podemos constatar as informações da Tabela 11 estão de acordo com a afirmação de Nogueira (2003), outra coisa que chama a atenção é o baixo valor de γ no início do desenvolvimento das plantas, indicando uma maior competitividade nesse período, o que explica e comprova a maior dispersão dos resíduos nas equações testadas para os indivíduos de menor dimensão, ou seja, indivíduos jovens, como pôde ser observado nas Figuras 38, 39, 40, 41, 42 e 43, além disso, essa maior dispersão também foi causada em parte pela origem do material plantado.

Com essas informações, e com as Figuras 49 e 50 é possível verificar o realismo biológico do sistema empregado, onde podemos observar que dos 48 meses para 60 meses o número de árvores que ingressam em novas classes de diâmetro reduziu consideravelmente, indicando que o espaço disponível não é mais suficiente para o crescimento significativo das

árvores, podendo essa transição ser mais ou menos abrupta dependendo da situação de estudo; outra informação que comprova isso, é a queda do valor do parâmetro γ em todas os modelos de plantio entre essas idades (Tabela 11).

Para o eucalipto é interessante pensar em múltiplos usos da madeira, portanto, considerar a pratica de desbastes. Visualmente pela Figura 50, um período ideal para a realização dessa pratica seria entre os 48 e 60 meses, pois é quando o número de árvores ingressantes em novas classes diamétricas reduz consideravelmente, porém, para se ter a certeza da idade em que esse ingresso passa a ser não significativo os ingressos percentuais deveriam ser calculados, porém tal atividade não foi objetivo do presente estudo. Essa metodologia poderia ser reaplicada, verificando a necessidade de se fazer outro desbaste nas árvores de eucalipto, seria então interessante pensar num ciclo de rotação de 15 anos de idade, tendo dessa forma uma madeira de maior dimensão, atingindo o mercado de serrados, para a acácia-negra a rotação adotada seria a comumente utilizada no Rio Grande do Sul, por volta, de 7 anos de idade, contudo vale ressaltar que essa espécie também se beneficiaria do desbastes do eucalipto, pois seu espaço de desenvolvimento também aumentaria, e com isso maior seria o incremento diamétrico e consequentemente maior produção de casca.

É importante ressaltar que a prática do desbaste para o eucalipto, principalmente em áreas consorciadas seria muito interessante para o pequeno/médio produtor rural fornecendo uma diversificação da produção, promovendo, além de um retorno econômico mais cedo; uma maior valorização, no futuro, da madeira que continuará em pé, devido a abertura de espaços disponíveis para o crescimento das árvores remanescentes na área; além de tudo, dependendo do interesse do produtor, até mesmo a inserção do gado na área, atividade essa que é cultural em plantios de acácia-negra no Rio Grande do Sul.

Contudo, a possibilidade de se realizar tais atividades seria altamente influenciada pelo sistema adotado nas áreas consorciadas, ou seja, plantando as espécies em linha simples (LS) ou linha dupla (LD), e isso dependerá do objetivo principal do produtor, ambos possuem vantagens e desvantagens de crescimento para as espécies estudadas, mas fica evidente que se for pensar em operações na área, principalmente a colheita, em um plantio que possua mais linhas da mesma espécie plantadas juntas, essa atividade seria facilitada e apresentaria menores riscos para as demais plantas.

4.4.7 Redes Neurais Artificiais (RNA)

As Redes Neurais Artificiais (RNA) possuem algumas vantagens quando comparadas aos métodos tradicionais de modelagem, e dentre essas estão a capacidade de aprender e generalizar as informações; e a capacidade de modelar com variáveis categóricas (qualitativas) além das numéricas (quantitativas). Tais características possibilitam que apenas uma rede seja capaz de modelar todo o conjunto de dados do estudo, ou seja, contemplando todos os tratamentos e espécies; e a fim de comparar o melhor modelo de relação hipsométrica também foi testado para todo o conjunto de dados. Nesse caso, as RNA podem ser modeladas para cada espécie, contudo, segundo Binoti et al. (2013) é recomendável utilizar apenas uma rede para todo o povoamento, a fim de facilitar o processo de modelagem.

As características das redes treinadas e da relação hipsométrica, bem como as demais estatísticas estão representadas no Quadro 32.

RNA	Entrada Categórica	Entrada Contínua	Arquitetura	$R_{\hat{y}y}$	S_{yx}	BIAS	RQEM
1	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd	14-10-1	0,982	0,0016	0,0012	7,59
2	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd	14-20-1	0,981	0,0017	0,0022	7,83
3	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP	13-15-1	0,983	0,015	-0,0002	7,38
4	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP	13-20-1	0,984	0,0015	-0,0025	7,25
5	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd	14-20-1	0,984	0,0014	0,00024	7,17
6	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmed, DAPmax	16-20-1	0,983	0,0015	-0,0005	7,35
7	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmax, Hmed	16-20-1	0,984	0,0014	-0,0002	7,20
8	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, DAPmed, DAPmin, DAPmax	16-20-1	0,984	0,0015	0,0009	7,25
9	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmed, DAPmin, DAPmax	17-25-1	0,984	0,0014	0,00018	7,09

Quadro 32 - Características das redes neurais artificiais (RNA) utilizadas para estimar a altura das árvores, bem como os valores das estatísticas utilizadas para a seleção da melhor RNA (continua)

10	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmed, DAPmin, DAPmax, Hmed	18-25-1	0,983	0,0015	0,0017	7,38
11	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmed, DAPmin, DAPmax	17-50-1	0,985	0,0014	0,00095	7,03
12	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmed, DAPmax, Hmed	17-50-1	0,985	0,0013	0,0004	6,98
13	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd	14-50-1	0,985	0,0014	0,0002	7,06
14	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, DAPmed, DAPmax, Hmed, AS, S	19-50-1	0,985	0,0013	0,0001	6,93
15	Bl, Trat, Esp	Idade, DAP, Hd, AS, S	16-50-1	0,985	0,0013	-0,0005	6,92
-	$H \sim \int \left(\begin{matrix} Idade, \\ DAP, \\ AS, \\ S \end{matrix} \right)$	-	-	0,952	0,13	0,06	9,44

Quadro 32 - Características das redes neurais artificiais (RNA) utilizadas para estimar a altura das árvores, bem como os valores das estatísticas utilizadas para a seleção da melhor RNA (conclusão)

Como observado no Quadro 32 todas as RNA's, desde as mais simples até as mais complexas, apresentaram valores superiores para as análises empregadas; com o coeficiente de correlação ($R_{\hat{y}y}$) de 0,98, o erro padrão do resíduo (S_{yx}) variando de 0,0013 a 0,0017 metros, o BIAS com valores entre -0,0005 e 0,0012 metros, e a RQEM apresentou-se entre 6,92 e 7,83; quando comparadas com o modelo hipsométrico testado, dessa forma as RNA apresentaram maiores valores para o $R_{\hat{y}y}$ e menores para S_{yx} , BIAS e RQEM.

Tais observações podem ser verificadas com os gráficos presentes no Quadro 33 onde estão presentes os histogramas de frequência dos erros percentuais e o comportamento das RNA e do modelo de regressão.

Quadro 33 - Histograma de frequência dos erros percentuais e a sobreposição de pontos entre os valores observados e estimados pelas RNA (continua)

Quadro 33 - Histograma de frequência dos erros percentuais e a sobreposição de pontos entre os valores observados e estimados pelas RNA (continuação)

Quadro 33 - Histograma de frequência dos erros percentuais e a sobreposição de pontos entre os valores observados e estimados pelas RNA (conclusão)

De acordo com o Quadro 33 verificamos que as RNA apresentam um grande potencial de uso nas situações avaliadas, por apresentarem estimativas precisas e pequena tendenciosidade, por ser uma metodologia menos onerosa quanto ao tempo da modelagem propriamente dita, quando comparada com os modelos de regressão tradicionais, pois atingem essa precisão elevada com um número inferior de modelos gerados; e a redução do tempo e custo para a realização do inventário florestal, pois dependendo da RNA utilizada e das informações disponíveis, somente haveria necessidade de se mensurar o DAP e a altura das árvores dominantes. No presente estudo, até mesmo as RNA contendo apenas o DAP como variável quantitativa se justou melhor aos dados do que o modelo de regressão tendo como variáveis independentes o DAP, Hd, AS e S.

Dentre as RNA testadas, todas as relações funcionais demonstraram-se satisfatórias para a estimação da altura, porém resultados superiores foram encontrados nas RNA 14 e 15, as quais se ajustaram melhor aos dados de altura, isso é comprovado no histograma de frequência dos erros percentuais (Quadro 33), demonstrando que apresentaram um comportamento mais desejável dos resíduos e a sobreposição dos dados estimados sobre os observados foi superior.

Quando comparamos as RNA com o modelo de regressão empregado, e que foi o melhor dentre os testados, notamos uma sobreposição de dados inferior ao das RNA (Quadro 33) e também é possível observar uma tendência de superestimar as alturas das árvores de maiores DAP's.

Binoti et al. (2013) ao aplicar RNA também para a estimação da altura em povoamentos equiâneos de eucalipto verificaram que as RNA propostas, utilizando como variáveis numéricas o DAP e a Hd e como variáveis categóricas a Idade, Clone e Solo; foram eficientes para a estimação da altura de árvores. Além disso os autores, destacaram que a introdução de informações adicionais como precipitação e radiação, entre outras, pode aumentar, ainda mais, a precisão das estimativas e recomendaram a mensuração da altura em somente algumas parcelas para o acompanhamento das estimativas geradas pelas redes e possíveis calibrações destas.

Diversos autores empregaram as RNA com finalidades diferentes e obtiveram resultados demonstrando sua superioridade, como: Diamantopoulou (2005) ao estimar a produção volumétrica de casca de *Pinus brutia*; Silva et al. (2009) para estimar o volume de árvores individuais de eucalipto, Binoti (2010) ao utilizar as RNA para modelar o crescimento e a prognose da produção em nível de povoamento e de árvore individual, a autora ainda concluiu sobre as variáveis categóricas, que auxiliam na extração de características e na solução do problema; Diamantopoulou (2012) ao estimar a altura individual de árvores em uma floresta praticamente pura de *Abies borisii regis* Mattf. com RNA; Binoti et al. (2014) ao empregar as RNA para a projeção da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos em povoamentos de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e Gorgens et al. (2009, 2014) na estimativa volumétrica de árvores individuais de eucalipto e teca.

5 CONCLUSÕES

Os consórcios foram benéficos para a acácia-negra, a espécie teve seu crescimento em altura, DAP, volume individual e a redução da mortalidade influenciados positivamente nos tratamentos consorciados, atingindo valores de produtividade superiores a 50% do valor observado na monocultura, situação oposta foi observada para o eucalipto.

Os indivíduos de acácia negra apresentaram maior biomassa total acima do solo nos tratamentos consorciados, porém não foram encontradas diferenças significativas entre os modelos de consórcio e as monoculturas em ambas espécies para essa variável, bem como para o IAF, tanto por terço da copa, quanto para a copa como um todo.

A idade técnica de corte (ITC) foi a mesma, para ambas espécies, tanto nos consórcios, quanto nas monoculturas.

As produtividades totais dos modelos de consórcio foram iguais estatisticamente as das monoculturas, demonstrando o grande potencial produtivo dos consórcios.

A classificação da capacidade produtiva das espécies pelo método da curva-guia mostrou-se eficiente, sendo capaz de agrupar as árvores com tendência de crescimento em altura dominante (H_d) semelhantes e de classificar os tratamentos em diferentes sítios de produção, demonstrando a relação das variáveis do povoamento com a capacidade produtiva dos locais.

Dentre os modelos de crescimento testados, o de Chapman-Richards foi o único capaz de descrever as tendências de crescimento, em altura, DAP e volume individual das espécies nos tratamentos testados, sendo responsável por minimizar os erros das estimativas e por apresentar maior realismo biológico; e o modelo de relação hipsométrica $H \sim \int(DAP, H_d, AS, Idade)$ apresentou resultados superiores aos demais testados, tanto nos modelos de consórcio, quanto nos monocultivos, com maior consistência biológica, estimativas mais próximas da realidade e com menor vício.

O modelo de Clutter comprovou sua eficiência em monocultivos de eucalipto e demonstrou-se eficaz para a estimar e prever a produção de povoamentos puros de acácia-negra e para os sistemas consorciados, sendo indicado para todas as situações de estudo.

A *f.d.p.* Weibull de dois parâmetros captou de forma precisa a distribuição dos diâmetros e o sistema de equações proposto neste estudo para a recuperação dessa distribuição pode ser empregado nas diferentes situações de manejo testadas.

As RNA possuem potencial de uso para a estimação da altura em monocultivos e consórcios de eucalipto e acácia-negra, gerando estimativas altamente precisas e com pequena tendenciosidade, além de diminuir a complexidade da modelagem.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, B.; RABELO, L.; HOSSEIKOUCHACK, N. Estimating parameters of the three-parameter Weibull distribution using a neural network. **European Journal of Industrial Engeneering**, London, v. 2, p. 428-445, 2008.
- ABBASI, B.; JAHROMA, A.H.E.; ARKAT, J.; HOSSEINKOUCHACK, M. Estimating the parameters of Weibull distribution using smulated annealing augorithm. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 183, p. 85-93, 2006.
- ANDRADE, V.C.L. de; LEITE, H.G. Hipsometric relationship modeling using data sampled in tree scaling and inventory plots. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 157-164, 2011.
- ANDRADE, V.C.L.; MARTINS, S.V.; CALEGARIIO, N.; CHICHARRO, J.F. 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, n. 70, p. 31-37, 2006.
- ARABATZIS, A.A.; BURKHART, H.E. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in Loblolly pine plantations. **Forest Science**, Betheseda, v. 38, n. 1, p. 192-198, 1992.
- ARAÚJO, E.J.G.; DAVID, H.C.; MORAIS, V.A.; SCOLFORO, J.R.S.; NETTO, S.P.; ZANETTE, V.H.; KOEHLER, H.S. Crescimento em diâmetro e altura da regeneração natural de *Eremanthus incanus*. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 2, p. 217-228, abr./jun. 2014.
- ARCANGELI, C.; KLOPF, M.; HALE, S.E.; JENKINS, T.A.R.; HASENAUER, H. The uniform height curve method for height–diameter modelling: an application to Sitka spruce in Britain. **Forestry**, Oxford, v. 87, p. 177–186, 2014.
- ARES, A.; FOWNES, J. H. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliate* in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 139, p. 227-236, 2000.
- ARIAS, D.; CALVO-ALVARADO, J.; DOHRENBUSCH, A. Calibration of LAI- 2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 247, p.185–193, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/136>>. Acessado em: 01 jul. 2014.
- _____. **Dados do setor, março – 2014**. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2015.
- ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **A indústria de base florestal no RS: dados e fatos**. Anuário AGEFLOR 2015 – ano base 2014. Disponível em: <<http://www.ageflor.com.br/noticias/biblioteca/anuario-ageflor-2015-ano-base-2014.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2015.
- _____. Disponível em: <<http://www.ageflor.com.br/>>. Acesso em: 01 maio 2015.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS-.

Disponível em: <<http://www.floresta.org.br/index.php?interna=textos/eucalipto&grupo=4>>.

Acesso em: 10 jul. 2014.

AZEVEDO, G.B.; SOUSA, G.T.O.; SILVA, H.F.; BARRETO, P.A.B.; NOVAES, A.B.

Seleção de modelos hipsométricos para quatro espécies florestais nativas em plantio misto no Planalto da Conquista na Bahia. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1-13, 2011.

BAILEY, R.L.; DELL, T.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function.

Forest Science, Bethesda, v. 9, n. 2, p. 97-104, 1973.

BALIEIRO, F.C.; FONTES, R.L.F.; DIAS, L.E.; FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.;

FARIA, S.M. de. Accumulation and distribution of aboveground biomass and nutrients in pure and mixed stands of guachapele and eucalyptus. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, p. 2639-2654, 2002.

BALLONI, E.A.; SIMÕES, J.W. **O espaçamento de plantio e suas implicações**

silviculturais. Piracicaba: IPEF, 1980. 26 p. (Série Técnica, 3).

BARCLAY, H. J.; TROFYMOW J. A.; LEACH R. I. Assessing bias from boles in

calculating leaf area index in immature Douglas-fir with the LI-COR canopy analyzer.

Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v. 100, p. 255-260, 2000.

BARRICHELO, L.R.; SCHUMACHER, M.V.; VOGEL, H.L.M. Quantificação da biomassa

de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 129-135, 2005.

BARROS, D.A. de; MACHADO, S.A.; ACERBI JÚNIOR, F.W.; SCOLFORO, J.R.S.

Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, v. 45, n. 1, p. 3-28, 2004.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio

de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. cap. 4, p. 127-186.

BARTOSZECK, A.C.P.S.; MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, E.B.

A distribuição diamétrica para bracatingais em diferentes idades, sítios e densidades na região metropolitana de Curitiba. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 305-323, set./dez. 2004.

BATISTA, J.L.F.; COUTO, H.T.; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relações

hipsométricas: estudo em três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 149-163, dez. 2001.

BATISTA, J.L.F.; COUTO, H.T.Z.; SILVA FILHO, D.F. **Quantificação de recursos**

florestais: árvores, arvoredos e florestas. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.

BATTAGLIA, M.; CHERRY, M.L.; BEADLE, C.L.; SANDS, P.J.; HINGSTON, A.

Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature.

Tree Physiology, Oxford, v. 18, p. 521-528, 1998.

BAUHUS, J.; VAN WINDEN, A.P.; NICOTRA, A.B. Above-ground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, p. 686–694, 2004.

BAUHUS, J.; KHANNA, P. K.; MENDEN, N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 12, p. 1886-1894, Dec. 2000.

BEADLE, C.L.; LONG, S.P. Photosynthesis: is it limiting biomass production? **Biomass**, Amsterdam, v. 8, p. 119–168, 1985.

BeETS, P.N.; MADGWICK, H.A.I. Aboveground dry matter and nutrient content of *Pinus radiata* as affected by lupin, fertilizer, thinning, and stand age. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 18, p. 43–64, 1988.

BEHLING, A. **A produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra em função de variáveis bioclimáticas**. 2014. 161 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BELTRAME, P.T.; RODRIGUES, E. Feijão guandu (*Cajanus cajan* L. Mill sp.) na restauração de florestas tropicais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 19-28, jan./mar. 2007.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G.; HASELEIN, C.R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 7-87, 2002.

BIGING, G.S.; ROBARDS, T.A.; Van DEUSEN, P C.; TURNBLOM, E.C. The predictive models and procedures used in the Forest Stand Generator (STAG), **Hilgardia**, Oakland, v. 61, n. 1, p. 1-36, Nov. 1994.

BINI, D.; SANTOS, C.A.; BOUILLER, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; CARDOSO, E.B.N. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: Evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 63, p. 57– 66, 2013.

BINKLEY, D. Ecosystem production in Douglas-fir plantations: interaction of red alder and site fertility. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 5, p. 215–227, 1983.

_____. Mixtures of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species. In CANNELL, M.G.R.; MALCOLM, D.C.; ROBERTSON, P.A. (Ed.). **The ecology of mixed species stands of trees**. London: Blackwell Scientific, 1992. p. 99–123.

_____. Seven decades of stand development in mixed and pure stands of conifers and nitrogen-fixing red alder. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, p. 2274–2279, 2003.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed.). **Management of soil, nutrient stands water in tropical plantation forests**. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 1997. p. 297-337.

BINKLEY, D.; BELL, R.; SOLLINS, P. Comparison of methods for estimating soil nitrogen transformations in adjacent conifer and alder-conifer forests. **Canadian Journal of Forest**, Ottawa, v. 22, n. 6, p. 858-863, June 1992.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C.; BASHKIN, M.A. Soil phosphorus pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Acacia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 241-247, 2000.

BINKLEY, D.; DUNKIN, K.A.; DEBELL, D.; RYAN, M.G. Production and nutrient cycling in mixed plantations of Eucalyptus and Albizia in Hawaii. **Forest Science**, Betheseda, v. 38, p. 393-408, 1992a.

BINKLEY, D.; SENOCK, R.; BIRD, S.; COLE, T.G. Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Facaltaria moluccana*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 182, n. 1/3, p. 93-102, 2003.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BARNARD, H. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**, Berlin, v. 5, p. 58-67, 2002.

BINKLEY, D.; SOLLINS, P.; BELL, R.; SACHS, D.; MYROLD, D. Biogeochemistry of adjacent conifer and alder-conifer stands. **Ecology**, New York, v. 73, p. 2022-2033, 1992b.

BINOTI, D.H.B. **Sistemas computacionais aplicados ao manejo florestal**. 2012. 122 p. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

_____. **Tutorial de redes neurais artificiais**. Viçosa: DAP Florestal, 2014. 93 p. (Apostila do curso de redes neurais artificiais aplicada a ciência florestal- Matriz da DAP Florestal).

BINOTI, M.L.M.S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

_____. **Emprego de redes neurais em mensuração e manejo florestal**. 2012. 168 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BINOTI, M.L.M.S.; BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 639-645, 2013.

BINOTI, M.L.M.S.; BINOTI, D.H.B.; GLERIANI, J.M.; LEITE, H.G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

BINOTI, M.L.M.S.; BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G.; SILVA, A.A.L.; CLAUDIO, P. Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 747-754, 2014.

BLISS, C.L.; REINKER, K.A. A lognormal approach to diameter distributions in even-aged stands. **Forest Science**, Behteseda, v. 10, p. 350-360, 1965.

- BOLAND, D.J. Genetic resources and utilisation of Australian bipinnate acacias (Botrycephalae). In: AUSTRALIAN ACACIAS IN DEVELOPING COUNTRIES. 16., 1984, Canberra. **Proceedings...** Canberra: ACIAR, 1987. p. 29-37.
- BOTKIN, D.B.; KELLER, E.A. **Environmental science: earth as a living planet.** 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. 664 p.
- BOUILLET, J.-P.; LACLAU, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, M.Z.; TRIVELIN, P.C.O.; JOURDAN, C.; SILVA, E.V.; TSAI, S.M.; GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil - 2: nitrogen accumulation in the stands and biological N(2) fixation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 12, p. 3918-3930, June 2008.
- BOUILLET, J.-P.; LACLAU, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; VOIGTLAENDER, M.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; HAKAMADA, R.; MARESCHAL, L.; MABIALA, A.; TARDY, F.; LEVILLAIN, J.; DELEPORTE, P.; EPRON, D.; NOUVELLON, Y. Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 89–101, 2013.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B**, New Jersey, v. 26, n. 2, p. 211–252, 1964.
- BOYDEN, S.; BINKLEY, D.; SENOCK, R. Competition and facilitation between Eucalyptus and nitrogen-fixing Falcataria in relation to soil fertility. **Ecology**, New York, v. 86, p. 992–1001, 2005.
- BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T.B. **Fundamentos de redes neurais artificiais.** Rio de Janeiro: DCC/I, COPPE; Sistemas, NCE/UFRJ, 1998. 246 p.
- _____. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 262 p.
- _____. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 260 p.
- BRAGA, N.C. **Os óleos essenciais no Brasil: estudo econômico.** Rio de Janeiro: Instituto de Óleos, 1971. 158 p.
- BRAGG, D. A comparison of Pineheight models for the Crossett Experimental Forest. **Journal of the Arkansas Academy of Science**, Fayetteville, v. 62, p. 24-31, 2008.
- BRAMUCCI, M.; SEIXAS, F. Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de “harvesters” na colheita florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 62, p. 62-74, 2002.
- BRANDÃO, M. Plantas produtoras de taninos nos cerrados mineiros. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 16, n. 173, p. 33-35, 1992.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono).** Brasília, 2012. 173 p.

_____. **Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono):** fixação biológica do nitrogênio. Disponível em:
<http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Abc/2.pdf>.
Acessado em: 01 maio 2015.

BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.

BRÍGIDA, A.I.S.; ROSA, M.F. Determinação do teor de taninos na casca de coco verde (*Cocos nucifera*) **Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture**, Fortaleza, v. 47, p. 25-27, 2003.

BRISTOW, M.; VANCLAY, J.K.; BROOKS, L.; HUNT, M. Growth and species interactions of *Eucalyptus pellita* in a mixed and monoculture plantation in the humid tropics of north Queensland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, n. 2/3, p. 285-294, 2006.

BRITO, C.C.R.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C.; SANTOS, E.S.; FERRAZ, I. Modelos de crescimento resultantes da combinação e variações dos modelos de Chapman-Richards e Silva-Bailey aplicados em *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 2, p. 175-185, abr./jun. 2007.

BROWN, D.; ROTHERY, P. **Models in biology: mathematics, statistics and computing**. New York: Wiley, 1993. 688 p.

BRUIJNZEEL, L.A. Nutrient input-output budgets of tropical forest ecosystems: a review. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 7, n. 1, p. 1-24, 1991.

BULLINARIA, J.A. **Introduction to neural computation**: notas de aula. Disponível em:
<<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>>. Acesso em: 10 abr. 2014.

BURKHART, H.E. Development of empirical growth and yield models. In: AMARO, A.; TOMÉ, M. (Ed.). **Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation**. Lisboa: Salamandra, 1997. p. 53-60.

BURKHART, H.E.; CAO, Q.V.; WARE, K.D. **A comparison of growth and yield prediction models for Loblolly pine**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute; State University, School of Forestry and Wildlife Resources, 1981. 59 p. (Publ., FWS-2).

BURLA, E.R. **Avaliação técnica e econômica do “harvester” na colheita do eucalipto**. 2008. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CACAU, F.V. **Decepa de plantas jovens de eucalipto em um sistema agroflorestal: dinâmica de copa e crescimento**. 2008. 47 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CALDEIRA, M.V.W.; SHUMACHER, M.V.; SANTOS, E.M. dos; VIEGAS, J.; PEREIRA, J.C. Quantificação de taninos em três povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. **Boletim de Pesquisas Florestais**, Colombo, n. 37, p. 81-88, 1998.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; SCHEEREN, L.W.; BARICHELLO, L. R.; WATZLAWICK, L.F. Relação hipsométrica para *Acacia mearnsii* com diferentes idades. **Boletim de Pesquisas Florestais**, Colombo, n. 45, p. 57-68, jul./dez. 2002.

CAMPOS, J.C.C. **A growth and yield study in thinned. Even-aged stands of Pinus pátula in Brazil**. 1979. 129 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Washington, Washington, 1979.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 470 p.

_____. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 548 p.

CAMPOS, J.C.C.; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento: Minas Gerais**. Brasília: IBDF, 1948. 126 p.

CAMPOS, J.C.C.; TORQUATO, M.C.; RIBEIRO, G.A. Equações para calcular índices de local e incremento da altura em plantações puras de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n.1, p. 1-9, 1985.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G.; SOUZA, R.N.; VITAL, B.R. Relações entre espaçamento, volume e peso de madeira em plantações de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 119-133, 1990.

CAMPOS, M.A.A. **Balanco de biomassa e nutrientes em povoamentos de *Ilex paraguariensis*: avaliação na safra e na safrinha**. 1991. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

CARBONERA PEREIRA, J.C.; SCHUMACHER, M.V.; HOPPE, J.M.; CALDEIRA, M.V.W.; SANTOS, E.M. Produção de biomassa em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. No estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 521-526, 1997.

CARDINALE, B.J.; MATULICH, K.L.; HOOPER, D.U.; BYRNES, J.E.; DUFFY, E.; GAMFELDT, L. BALVANERA, P.; O'CONNOR, M.I.; GONZALES, A. The functional role of producer diversity in ecosystems. **American Journal of Botany**, Saint Louis, v. 98, p. 572-592, 2011.

CARMEAN, W.H. Forest site quality evaluation in the United States. **Advances Agronomy**, Amsterdam, v. 27, p. 209-269, 1975.

CASTELLANOS, A.; BLANCO, A.M.; PALENCIA, V. Applications of radial basis neural networks for area forest. **International Journal Information Theories and Applications**, Sofia, v.14, p.218-222, 2007.

CASTRO, R.V.O.; SOARES, C.P.B.; MARTINS, F.B.; LEITE, H.G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-295, mar. 2013.

CAVALERI, M.A.; OBERBAUER, S.F.; RYAN, M.G. Foliar and ecosystem respiration in an old-growth tropical rain forest. **Plant, Cell and Environment**, Dordrecht, v. 31, p. 473–483, 2008.

CECONI, D.E.; POLETO, I.; LOVATO, T.; SCHUMACHER, M.V. Biomassa e comprimento de raízes finas em Povoamento de *Acacia Mearnsii* de wild. estabelecido em Área degradada por mineração de carvão. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p.1-10, jan./mar. 2008.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=eucalipto>>. Acesso em: 01 jul.2014.

CHAPMAN, D.G. Statistical problems in population dynamics. In: SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY, 4., 1961, Berkeley; Los Angeles. **Proceedings...** Berkeley; Los Angeles; University of California Press, 1961. p. 153-168.

CHAPMAN, H.H.; MEYER, W.H. **Forest mensuration**. New York: McGraw-Hill, 1949. 522 p.

CHEN, J.M.; CIHLAR, J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 55, p. 153-162, 1996.

CHERRY, M.; HINGSTON, A.; BATTAGLIA, M; BEADLE, C. Calibrating the LI-COR LAI-2000 for estimating leaf area index in the eucalypt plantations. **Forestry Tasmania**, Hobart, v. 82, p. 75–82, 1998.

CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for *Loblolly pine*. **Forest Science**, Bethesda, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

CLUTTER, J.L.; ALLISON, B.J. **A growth and yield model for *Pinus radiata* in New Zealand for tree and stand simulation**. Stockholm: Royal College of forestry, 1974. 4 p. (Research Notes, 30).

CLUTTER, J.L.; BENNETT, F.A. Diameter distributions in old-field slash pine plantations. **Georgia Forest Research Council Report**, Gorgia, n. 13, p. 1-9, 1965.

CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **A quantitative approach**. New York: John Wiley, 1983. 333 p.

COELHO, S.R.F.; GONÇALVES, J.L.M.; MELLO, S.L.M.; MOREIRA, R.M.; SILVA, E.V. da; LACLAU, J-P. Crescimento, nutrição e fixação biológica de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas arbóreas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 759-768, jun. 2007.

COLBERT, K.C.; LARSEN, D.R.; LOOTENS, J.R. Height-diameter equations for thirteen *Midwestern bottomland* hardwood species. **Northern Journal of Applied Forestry**. Bethesda, v. 19, n. 4, p. 171-176, 2002.

COUTO, L.; TSUKAMOTO FILHO, A.A.; NEVES, J.C.L.; RIBEIRO, C.A.A.S.; PASSOS, C.A.M.; RIBEIRO, C.A.A.S.; ARAUJO, M.M.F.C. Produção e alocação de biomassa em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 321 334, out./dez. 2004.

CROMER, R.N.; CAMERON, D.M.; RANCE, S.J.; RYAN, P.A.; BROWN, M. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 1. Biomass accumulation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 62, p. 211–230, 1993.

CRUZ, G.L. **Livro verde das plantas medicinais e industriais do Brasil**. Belo Horizonte: [s.n.], 1956. v. 1, 426 p.

CRUZ, J.P.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; CAMPOS, J.C.C.; SMIT, L.; NOGUEIRA, G.S. Curvas de crescimento e de índice de local para povoamentos de *Tectona grandis* em Tangará da Serra, Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 679-685, 2008.

CUNHA, A.P.; SILVA, A.P.; ROQUE, O.R. **Plantas e produtos vegetais em fitoterapia**. Lisboa: Serviço de Educação e Bolsas; Fundação Calouste Gulnekian, 2003.

CUNNINGHAM, S.C.; MAC NALLY, R.; READ, J.; BAKER, P.J.; WHITE, M.; THOMSON, J.R.; GRIFFIOEN, P.A. Robust technique for mapping vegetation condition across a major river system. **Ecosystems**, Berlin; Heidelberg, v. 12, p. 207–219, 2009.

CURTIS, R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, Bethesda, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.

DAVI, H.; BARBAROUX, C.; DUFRÊNE, E.; FRANÇOIS, C.; MONTPIED, P.; BRÉDA, N.; BADECK, F. Modelling leaf mass per area in forest canopy as affected by prevailing radiation conditions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 211, p. 339–349, 2008.

DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.M. **Forest management**. New York: McGraw-Hill Book, 1987. 790 p.

de OLIVEIRA, M.L.R.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; GARCIA, S.L.R.; SOUZA, A.L. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1559-1567, nov. 2008.

DEBELL, D.S.; COLE, T.G.; WHITESELL, C.D. Growth, development, and yield in pure and mixed stands of Eucalyptus and Albizia. **Forest Science**, Bethesda, v. 43, n. 2, p. 286-298, May 1997.

DEBELL, D.S.; WHITESELL, C.D.; SCHUBERT, T. H. Mixed plantations of Eucalyptus and leguminous trees enhance biomass production. BERKLEY, C.A.: **Pacific Southwest forest and range experiment station**. Washington: USDA, Forest Service, 1985. 6 p. (Research Paper, PSW-175).

DEBELL, D.S.; WHITESELL, C.D.; CRABB, T.B. **Benefits of Eucalyptus–Albizia mixtures vary by site on Hawaii Island**. Washington: USDA, Forest Service Research & Development, 1987. 6 p. (Paper PSW-187).

DE LOYOLA EISFELD, R.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; MAESTRI, R.; WEBER, K. S. Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio da função probabilística. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 2, p. 317-328, 2005.

DEMOLINARI, R.A.; SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 503-512, 2007.

DIAMANTOPOULOU, M.J. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 10, p. 235-244, 2005.

_____. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, Amsterdam, v. 2, p.190–197, 2012.

DIAS, A.N.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; ROGRIGUES, F.L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 741-747, 2005.

DIAS, A.N.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; COUTO, L.; CARVALHO, A.F. de. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, p. 731-739, 2005.

DOBNER JÚNIOR, M.; HIGA, A.R.; SEITZ, R.A. Efeito da cobertura de *Pinus taeda* L. na proteção contra geadas e no crescimento de plantas jovens de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 807-823, out./dez. 2009.

DOSSA, D.; SILVA, H.D. da; BELLORE, A.F.J.; RODIGHERI, H.R. **Produção e Rentabilidade do eucalipto em empresas florestais**. Concórdia: Embrapa Florestas, 2002. 4 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 83).

DOVEY, S. B.; DU TOIT, B. Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a Young eucalypt stand. **Trees**, Berlin, v. 20, p. 273–277, 2006.

DOWLA, U.F.; ROGERS, L. **Solving problems in environmental engineering and geosciences with artificial neural networks**. Cambridge: MIT Press, 1995. 241 p.

DRAPPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley, 1966. 407p.

DU, N.; FAN, J.; CHEN, S.; LIU, Y. A hydraulic–photosynthetic model based on extended HLH and its application to Coast redwood (*Sequoia sempervirens*). **Journal of Theoretical Biology**, Ann Arbor, v. 253, p. 393–400, 2008.

DYKSTRA, D.P. Presents a simple two variable land management linear programming model. In: _____. **Mathematical programming for natural resource management**. New York: McGraw- Hill, 1984. chap. 2, p. 15-38.

EERIKAINEN, K. Predicting the height-diameter pattern of planted *Pinus kesya* stands in Zambia and Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, p. 355-366, 2003.

ELIASSON, L.; LAGESON, H. A simulation study of a single-grip harvester in thinning using two different harvesting regimes; thinning from below and from above. In: SEMINARIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 10., 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR; FUPEF, 1998. p.85–94.

EMBRAPA. **Cultivo da acácia-negra**. Embrapa Florestas, 2003. (Sistemas de Produção, 3). Disponível em:

<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/AcaciaNegra/CultivodaAcaciaNegra/>>. Acesso em: 04 out. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. Disponível em: <<http://www.bentecsementes.com.br/eucalipto-benthamii/>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

EWEL, J.J. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 17, p. 245–271, 1986.

FAO. **Plantations in tropical and subtropical regions: mixed and pure**. Rome, 1995. 27 p.

FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA Y GARCIA, A.; VILA NOVA, N.A.; FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002.

FENGRI, L.; YONGHE, W.; LIJUN, H. Comparison of the Chapman-Richards function with the Schnute model in stand growth. **Journal of Forestry Research**, Tokyo, v. 8, n. 3, p. 137-143, 1997.

FILGUEIRAS, A.P.A.; CARVALHO, R.M. Análise da oferta e da demanda de feijão no Estado do Ceará: uma aplicação da técnica de sistemas lineares de equações simultâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 42., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SOBER, 2004. p. 1-20.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM, Centro de Pesquisas Florestais, 1992. 269 p.

FINGER, C.A.G.; SPATHELF, P.; SCHNEIDER, P.R.; COELHO, L. curvas de altura-diâmetro de Acácia Negra (*Acacia mearnsii* de Wild). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 387-391, 2000.

FISHER, R.F. Amelioration of degraded rain forest soils by plantations of native trees. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 544-549, 1995.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. New York, Chichester: John Wiley, 2000. 489 p.

FLEWELLING, J.; COLLIER, R.; GONYEA, B.; MARSHAL, D.; TURBLUM, E. **Height-age curves for planted stands of Douglas Fir, with adjustments for density: stand management cooperative**. 34 p. Seattle: University of Washington, College of Forest Resources, 2001. (SMC Working Paper, 1).

FONTES, L.; TOMÉ, M.; COELHO, M.B.; WRIGHT, H.; LUIS, J.S.; SAVILL, P. Modelling dominant height growth of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Portugal. **Forestry**, Oxford, v. 76, n. 5, p. 509-523, 2003.

FORD, E.D. Competition and stand structure in some even-aged plant monocultures. **The Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, p. 311-333, 1975.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L. On the success and failure of mixed- species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 209, p.147–155, 2005a.

_____. Nutrient cycling in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 12, p. 2942-2950, Dec. 2005b.

_____. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, n. 2/3, p. 275-284, 2006b.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; KHANNA, P.K. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1/2, p. 81-95, 2004.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L.; VANCLAY, J.K. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, n. 2/3, p. 211-230, Sept. 2006c.

FORRESTER, D.I.; COLLOPY, J.J.; MORRIS, J.D. Transpiration along an age series of *Eucalyptus globulus* plantations in southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1819-1835, 2010. v. 259, n. 9, p. 1754-1760, 2010.

FORRESTER, D.I.; COWIE, A.L.; BAUHUS, J.; WOOD, J.T.; FORRESTER, R.I. Effects of changing the supply of nitrogen and phosphorus on growth and interactions between *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* in a pot trial. **Plant and Soil**, The Hague, v. 280, n. 1/2, p. 267-277, 2006a.

FORRESTER, D.I.; MEDHURST, J.L.; WOOD, M.; BEADLE, C.L.; VALENCIA, J.C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: an Australian perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1819–1835, 2010.

FORRESTER, D.I.; SCHORTEMEYER, M.; STOCK, W.D.; BAUHUS, J.; KHANNA, P.K.; COWIE, A.L. Assessing nitrogen fixation in mixed- and single-species plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Tree Physiology**, Oxford, v. 27, p. 1319-1328, 2007.

FORRESTER, D.I.; THEIVEYANATHAN, S.; COLLOPY, J.J.; MARCAR, N.E. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1761-1770, Apr. 2010.

FOTAN, I.C.I. **Dinâmica de copa e crescimento de clones de eucalipto submetidos a desrama em sistema agroflorestal**. 2007. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

FRAZIER, J.R. **Compatible whole-stand and diameter distribution models for *Lobolly pine* plantations**. 1981. 125 p. Thesis (Ph.D.) - Virginia Polytech. Institute, Virginia State University, Blackburg, 1981.

FRIDLEY, J.D. The influence of species diversity on ecosystem-productivity: how, where, and why? **Oikos**, Copenhagen, v. 93, p.514-526, 2001.

- GAMA-RODRIGUES, A.C. **Ciclagem de nutrientes por espécies florestais em povoamentos puros e mistos, em solos tabuleiros da Bahia, Brasil.** 1997. 107 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- GARAY, I.; PELLEN, R.; KINDEL, A.; BARROS, E.; FRANCO, A.A. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil: a contribution to the study of sustainable land use. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 177-187, Oct 2004.
- GARCÍA, O. Estimating top height with variable plot size. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 28, p. 1509-1517, 1998.
- GEROLD, D. Beschreibung der Durchmesserstruktur und ihrer Entwicklung mit Hilfe der Weibullverteilung. **Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden**, Dresden, v. 37, n. 6, p. 221-224, 1988.
- GINGRAS, J.F. A comparative trial of two shortwood systems in southwestern. **Nova Scotia. FERIC Field Note. Felling**, Pointe Claire, n. 23, p. 1-2, 1994.
- GOMES, F.W.L. **Comparação entre modelos matemáticos para o estudo do crescimento e produção florestal.** Brasília: Universidade Católica de Brasília, 2006.16 p.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S.; NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, S.; BROWN, A. (Ed.). **Management of soil, nutrientes and water in tropical plantation forests.** Canberra: ACIAR; CSIRO, 1997. p. 379-418.
- GONÇALVES, J.L.M.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L.; SERRANO, M.I.P. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under diferente residue management pratices. In: AMBIAR, E.K. (Ed.). **Site management and productivity in tropical plantation forests.** Bogor: CIFOR, 2008. p. 51-62.
- GORDON, C. **Artificial Neural Network Modeling of Forest Tree Growth.** 1998. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - University of the Witwatersrand, Joanesburgo, 1998.
- GÖRGENS, E.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; DIAS, A.N. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação de desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, p. 879-885, 2007.
- GÖRGENS, E.B.; LEITE, H.G.; SANTOS, H.N.; GLERIANI, J.M. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1141-1147, 2009.
- GÖRGENS, E.B.; LEITE, H.G.; GLERIANI, J.M.; SOARES, C.P.B.S.; CEOLIN, A. Influência da arquitetura a estimativa de volume de árvores individuais opor meio de redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 289-295, 2014.
- GRANJA, A. Acacicultura. **Jornal dos Reflorestadores.** São Paulo, v. 1, n. 2, p. 6-7, 1979.
- GRAYBILL, F.A. **Theory and application of the linear model.** Belmonte: Wadsworth Publishing, 1976. 704 p.

GRUPO PORTUCEL SOPORCEL. Disponível em:

<http://www.portucelsoporcel.com/var/ezdemo_site/storage/original/application/ed8b71aa784a8e42ba7df3d4ddf6c1ec.pdf>. Acesso em: 01 maio 2015.

GUAN, B.T.; GERTNER G. Using a parallel distributed processing system to model individual tree mortality. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 3, p. 871-885, 1991a.

_____. Modeling red pine tree survival with an artificial neural network. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 5, p. 1429-1440, 1991b.

_____. Modeling individual tree survival probability with a random optimization procedure: an artificial neural network approach. **AI Application**, Amsterdam, v. 9, n. 1, p. 39-52, 1995.

GUEDES, B.; ARGOLA, J.; PUNÁ, N; MICHONGA, E.; MONTEIRO, J. **Estudo da biomassa florestal numa floresta aberta de miombo no distrito de Bárué, Manica**. Moçambique: Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, 2001. pt. 2, 15 p.

GUIMARÃES, D.P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto**. 1994. 178p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

GUJARATI, D. N. **Econometria básica**. São Paulo: Makron Books, 2004. 920 p.

GUREVITCH, J.; MORROW, L.L.; WALLACE, A.; WALSH, J.S. A meta-analysis of competition in field experiments. **American Naturalist**, Chicago, v. 140, p. 539-572, 1992.

GURNEY, K. **An introduction to neural networks**. London: Prentice Hall, 1999. 234 p.

HAFLEY, W.L.; SCHREUDER, H.T. Statistical distributions for felling diameter and height data in even-aged stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 7, p. 184-487, 1977.

HAKAMADA, R.E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de Eucalyptus** 2012. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

HAN, Q.; KAWASAKI, T.; KATAHATA, S.; MUKAI, Y.; CHIBA, Y. Horizontal and vertical variations in photosynthetic capacity in a *Pinus densiflora* crown in relation to leaf nitrogen allocation and acclimation to irradiance. **Tree Physiology**, Oxford, v. 23, p. 851–857, 2003.

HANDA, I.T.; KÖRNER, C.; HATTENSCHWILER, S.A. Test of the tree-line carbon limitation hypothesis by in situ CO₂ enrichment and defoliation. **Ecology**, New York, v. 86, p. 1288–1300, 2005.

HANUS, M.L.; MARSHALL, D.D.; HANN, D.W. **Height-diameter equations for six species in the coastal regions of the Pacific Northwest**. Corvallis: Oregon State University, College of Forestry, Forest Research Laboratory, 1999. 14 p. (Research Contribution, 25).

- HARWOOD, C.E. Progress in breeding and hybridization of tropical acacias. IUFRO, 2014. Disponível em: <<http://www.iufro.org/publications/proceedings/proceedings-meetings-2014/#c21354>>. Acesso em: 09 de set de 2014..
- HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.
- HE, C.-X.; LI, J.-Y.; ZHOU, P.; GUO, M.; ZHENG, Q.-S. Changes of leaf morphological, anatomical structure and carbon isotope ratio with the height of the wangtian tree (*Parashorea chinensis*) in Xishuangbanna, China. **Journal of Integrative Plant Biology**, New York, v. 50, p. 168–173, 2008.
- HIGA, A.R. **Projeto acácia-negra**. Colombo: Embrapa, 1996. 2 p.
- HINGSTON, F.J.; GALBRAITH, J.H.; DIMMOCK, G.M. Application of the process-based model BIOMASS to *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* plantations on exfarmland in south western Australia - I. Water use by trees and assessing risk of losses due to drought. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 106, p. 141-156, 1998.
- HUAND, S.; TITUS, S. J.; WIENS, D. P. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 22, p. 1297-1304, 1992.
- HUNT, M.A.; UNWIN, G.L.; BEADLE, C.L. Effects of naturally regenerated *Acacia dealbata* on the productivity of a *Eucalyptus nitens* plantation in Tasmania, Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterda, v. 117, n. 1/3, p. 75-85, May 1999.
- HUSCH, B.; BEERS, T.W.; KERSHAW JR., J.A. **Forest mensuration**. 4th ed. Hoboken: John Wiley, 2003. 443 p.
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 3rd ed. New York: John Wiley, 1993. 402 p.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2014, referente ao ano base 2013**. Disponível em: <http://www.iba.org/images/shared/iba_2014_pt.pdf>. Acesso em: 10 maio 2014.
- _____. **Relatório IBÁ 2015, referente ao ano base 2014**. Disponível em: <http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 08 dez. 2014.
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp>>. Acesso em: 08 jul. 2014.
- JARVIS, P.G.; LEVERENZ, J.W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C.B.; ZEIGLER, H. (Ed.). **Encyclopaedia of plant physiology**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 233–280. (New Series, 12D).
- JAYARAMAM, K.; LAPPI, J. Estimation of height-diameter curves through multilevel models with special reference to even-aged teak stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 142, p. 155-162, 2001.

JESUS, R.M.; DIAS, G.B.N. Eucalyptus/Leucaena mixture experiment: growth and yield. **IPEF**, Piracicaba, n. 39, p. 41-46, 1988.

JOHNSON, D.W.; CURTIS, P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 140, n. 2/3, p. 227-238, Jan. 2001.

JONES, H.G. **Plant and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1992. 456 p.

JORGE, D.L.; SILVA, J.A.A. da; GADELHA, F.H.L.; FERREIRA, R.L.C. Análise e comparação de modelos de relação hipsométrica para clones de *Eucalyptus* sp. Cultivados na região do pólo gesso do Araripe. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 9, 2009, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, .

KALA'CSKA, M.; CALVO-ALVARADO, J.; SA'NCHEZ-AZOFEIFA, G.A. Calibration and assessment of seasonal changes in leaf area index in a tropical dry forest in different states of succession. **Tree Physiology**, Oxford, v. 25, p. 733-744, 2005.

KANNEGIESSER, U. Apuntes sobre algunas acacias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Willd. **Ciencia e Investigación Forestal**, Concepción, v. 4, n. 2, p. 198-212, 1990.

KAYE, J.P.; RESH, S.C.; KAYE, M.W.; CHIMMER, R.A. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of Eucalyptus and Albizia trees. **Ecology**, New York, v. 81, p. 3267-3273, 2000.

KEENAN, R.; LAMB, D.; SEXTON, G. Experience with mixed species rainforest plantations in North Queensland. **The Commonwealth Forestry Review**, New York, v. 74, p. 315-321, 1995.

KELTY, M.J. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands. In: KELTY, M.J.; LARSON, B.C.; OLIVER, C.D. (Ed.). **The ecology and silviculture of mixed-species forests**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992. p. 125-141.

_____. The role of species mixtures in plantation forestry. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, n. 2/3, p. 195-204, 2006.

KELTY, M.J.; CAMERON, I.R. Plot designs for the analysis of species interactions in mixed stands. **The Commonwealth Forestry Review**, New York, v. 74, p. 322-332, 1995.

KENZO, T.; ICHIE, T.; WATANABE, Y.; YONEDA, R.; NINOMIYA, I.; KOIKE, T. Changes in photosynthesis and leaf characteristics with tree height in five dipterocarp species in a tropical rain forest. **Tree Physiology**, Oxford, v. 26, p. 865-873, 2006.

KER, J.; SMITH, J. Sampling for height-diameter relationships. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 55, n. 3, p. 205-207, 1957.

KHANNA, P.K. Measurement of changes in the nitrogen status of forest soils due to managements practices. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST SOILS, 1., 1990, Harbin. **Proceedings...** Harbin: Penn State Institutes of Energy and the Environment, 1990. p. 10.

_____. Comparison of growth and nutrition of young monocultures and mixed stands of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 94, n. 1/3, p. 105-113, 1997.

_____. Comparison of growth and nutrition of young monocultures and mixed stands of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 94, n. 1/3, p. 105-113, 1997.

_____. Nutrient cycling under mixed-species tree systems in Southeast Asia. **Agroforestry System**, Dordrecht, v. 38, p. 99-120, 1998.

KLEINPAUL, I.S. **Plantio misto de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em sistema agroflorestal**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

KLEINPAUL, I.S.; SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M.; NAVROSKI, M.C. Mixed Stands of *Eucalyptus urograndis* and *Acacia mearnsii* in an agroforestry system: I - Biomass production. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 621-627, Oct./Dec. 2010.

KNOWE, S.A. Effect of competition control treatments on height-age and height-diameter relationships in young Douglas-fir plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 67, p. 101-111, 1994.

KOCH, G.W.; SILLETT, S.C.; JENNINGS, G.M.; DAVIS, S.D. The limits of tree height. **Nature**, London, v. 428, p. 851-854, 2004.

KOVACS, Z.L. **Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Colledium Cognito, 1996. 174 p.

KRAMER, P.J.; KOZLOWSKI, T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1972. 745 p.

LACLAU, J-P.; NOUVELLON, Y.; REINE, C.; GONÇALVES, J.L. M.; KRUSHE, A.V.; JOURDAN, C.; LE MAIRE, G.; BOUILLET, J-P. Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. **Oecologia**, Berlin; Heidelberg, v. 172, n. 3, p. 903-913, 2013.

LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; SILVA, E.V.; JOURDAN, C.; CUNHA, M.C.S.; MOREIRA, R.M.; SAINT-ANDRÉ, L.; MAQUÈRE, V.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: 1. Growth dynamics and aboveground net primary production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 12, p. 3905-3917, 2008.

LANG, A.R.G.; McMURTRIE, R.E. Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from transmittances of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 58, p. 79-92, 1992.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531 p.

LE MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; CHRISTINA, M.; PONZONI, F.J.; CONÇALVES, 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**, Amsterdam, v. 288, p. 31-42, Jan. 2012.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; VERHOEF, W.; PONZONI, F.J.; LO SEEN, D.; BÉGUÉ, A.; STAPE, J.-L.; NOUVELLON, Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of *Eucalyptus* plantations. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 115, p. 586-599, 2011.

LE ROUX, X.; SINOQUET, H.; VANDAME, M. Spatial distribution of leaf dry weight per area and leaf nitrogen concentration in relation to local radiation regime within an isolated tree crown. **Tree Physiology**, Oxford, v. 19, p. 181–188, 1999.

LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. de. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 301-310, 2003.

_____. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.

LEITE, H.G.; OLIVEIRA, F.H.T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Abingdon, v. 33, n. 7/8, p. 1105-1118, 2002.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; MOREIRA, A.M.; LIMA, J.E. de. Um modelo de crescimento e produção para *Pinus taeda* L. na região Sul do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, p. 105-112, 2001.

LEITE, H.G.; BINOTI, D.H.B.; GUIMARÃES, D.P.; SILVA, M.L.M.D.; GARCIA, S.L.R. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 305-311, 2010.

LEITE, H.G.; CASTRO, R.; SILVA, A.; JÚNIOR, C.; BINOTI, D.; CASTRO, A.F.; BIOTI, M. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 19, n. 2, p. 181-195, 2001.

LEVINS, R. The strategy of model building in population biology. **American Scientist**, North Carolina, v. 54, p. 421–431, 1996.

LI-COR. **LAI-2000 plant canopy analyser**: instruction manual. . Lincoln, 1992. 182 p.

LIMA FILHO, L.M. de A. **Modelos simétricos não lineares de produção e crescimento em volume de clones de *Eucalyptus* spp.** 2012. 13 4p. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

LINHARES, C.A.; PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. Relação entre volume de madeira e índice de área foliar em um povoamento de *Pinus* spp.: estudo de caso. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, p. 47-54, 2000.

LITTLE, S.N. Weibull diameter distributions for mixed stands of western conifers. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 13, p. 85–88, 1983.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K.E. **Forest inventory**. Munchen: BLV Verlagsgesellschaft, 1973. v. 2, 469 p.

LOPES, C.R.G.; CAMPOS, J.C.C.; VALENTE, O.F.; VITAL, B.R. Produção de madeira, carvão e carbono em plantações de *Eucalyptus cloeziana*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 345-356, 1998.

LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil**: nativas e exóticas cultivadas. **Nova Odessa**. São Paulo: Instituto Plantarum, 2002. 560 p.

MACFARLANE, C.; HOFFMAN, MEGAN.; EAMUS, D.; KERP, N.; HIGGINSON, S.; MCMURTRIE, R.; ADAMS, M.A. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 143, p. 176–188, 2007a.

MACHADO, S.A.; MELLO, J.M.; BARROS, A.B. Comparação entre métodos para avaliação de volume total de madeira por unidade de área, para o Pinheiro do Paraná, na região sul do Brasil. **Cerne**, Lavras, v. 6, p. 55–66, 2000.

MACHADO, S.A.; BARROS, D.A.; SCOLFORO, J.R.; ACERBI JÚNIOR, F.W. The effects of successive thinning on the hypsometric function for *Pinus oocarpa* stands. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 397-406, 2011.

MAESTRI, R.; GRAÇA, L.R.; SIMÕES, J.W.; FREITAS, A.J.P. Análise da adubação fosfatada na produção física e econômica da acácia-negra. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 17, p. 39-45, jun.1987.

MAGALHÃES, P.C.; RODRIGUES, W.A.; DURÃES, F.O.M. **Tanino no grão de sorgo**: bases fisiológicas e métodos de determinação. Brasília: EMBRAPA, 1997. 26 p. (Circular Técnica, 27).

MALINOVSKI, R.A.; MALINOVSKI, R.A.; MALINOVSKI, J.R.; YAMAJI, F.M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 169-182, maio/ago. 2006.

MALTAMO, M.; KANGAS, A.; UUTTERA, J.; TORNIAINEN, T.; SARAMÄKI, J. Comparison of percentile based prediction on the Weibull distribution in describing the diameter distribution of heterogeneous Scots pine stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 133, p. 263–274, 2000.

MARSHALL, J.D.; MONSERUD, R.A. Foliage height influences specific leaf area of three conifer species. **Canadian Journal of Forest Research**, Oxford, v. 33, p. 164–170, 2003.

MARTINS, C.R.; PEREIRA, P.A.P.; LOPES, W.A.; ANDRADE, J. Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre: a importância química na atmosfera. **Química Nova**, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 28-41, 2003.

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, set. 2009.

MATNEY, T. G.; SULLIVAN, A. D. Variable top volume and height predictions for slash pine trees. **Forest Science**, Bethesda, v. 28, n. 2, p. 274-282, 1982.

MAY, B.M.; P. ATTIWILI, M. Nitrogen-fixation by *Acacia dealbata* and changes in soil properties 5 years after mechanical disturbance or slash-burning following timber harvest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 181, p. 339-355, 2003.

MEDINA, C.C.; NEVES, C.S.V.J.; HIGA, A.R. Arquitetura do sistema radicular de acácia negra (*Acacia mearnsii*) no Rio Grande do Sul. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1., 1999, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. p. 245-252.

MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A. C. Leaf respiration in two tropical rainforests: constraints on physiology by phosphorus, nitrogen and temperature. **Functional Ecology**, London, v. 15, p. 378-387, 2001.

MEIR, P.; KRUIJT, B.; BROADMEADOW, M.; BARBOSA, E.; KULL, O.; CARSWELL, F.; NOBRE, A.; JARVIS, P. G. Acclimation of photosynthetic capacity to irradiance in tree canopies in relation to leaf nitrogen concentration and leaf mass per unit area. **Plant, Cell and Environment**, Dordrecht, v. 25, p. 343-357, 2002.

MELO, E.A. **Desenvolvimento de modelos para crescimento florestal e afilamento de fuste**. 2014. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

MENDONÇA, A.V.R.; CARNEIRO, J.G.D.A.; BARROSO, D.G.; SANTIAGO, A.R.; FREITAS, T.A.S.D.; SOUZA, J.S. Desempenho de quatro de *Eucalyptus* spp em plantios puros e consorciados com sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth) em cava de extração de argila. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, p. 395-405, 2008.

MIDGLEY, S. **Global use of Acacia – why we are here**. Sustaining the future of acacia plantation forestry. IUFRO, 2014. Disponível em: <(http://www.iufro.org/publications/proceedings/proceedings-meetings-2014/#c21354)>. Acesso em: 09 set. 2014.

MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 2007. 270 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MONTAGNINI, F. Accumulation in above-ground biomass and soil storage of mineral nutrients in pure and mixed plantations in a humid tropical lowland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 134, n. 1/3, p. 257-270, 9/1/ 2000.

MONTAGNINI, F.; GONZÁLES, E.; PORRAS, C. Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: a comparison of early growth, pest damage and establishment costs. **The Commonwealth Forestry Review**, New York, v. 74, p. 306-314, 1995.

MONTEIRO, J.M.; NETO, E.M.F.L.; AMORIM, E.L.C.; STRATTMANN, R.R.; ARAÚJO, E.L.; ALBUQUERQUE, U.P. Teor de taninos em três espécies medicinais arbóreas simpátricas da Caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 999-1005, 2005.

MORA, A.L. **Interação com espaçamentos e locais em clones de *Eucalyptus* spp. no norte do Estado da Bahia.** 1986. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

_____. **Aumento da produção de sementes geneticamente melhoradas de *Acacia mearnsii* De Wild. (acácia-negra) no Rio Grande do Sul.** 2002. 140 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MORA, A.L.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SIMON, A.A. Melhoramento genético para a produção de tanino no Brasil. In: WORKSHOP SOBRE MELHORAMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS E PALMÁCEAS NO BRASIL, 1., 2001, Curitiba. **Anais...** Colombo: Embrapa Florestas, 2001. p. 141-152.

MÜLLER, M.D.; SALLES, T.T.; PACIULLO, D.S.C.; BRIGHENTI, A.M.; CASTRO, C. R.T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 3, p. 473-484, jul./set. 2014.

NAGEL, K.; BIGING, G.S. Schätzung der Weibull funktion zur generierung von Durchmesserverteilungen. **Allgemeine Forst-und Jagdzeitung**, Berlin, v. 166, n. 9/10, p. 185-189, 1995.

NANANG, D.M.; NUNIFU, T.K. Selectinga functional form for anamorphic site index curve estimation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 118, p. 211-221, 1999.

NASCIMENTO, F.A.F.; ARCE, J.E.; DIAS, A.N.; FILHO, A.F.; FIGUEIREDO, R. Modelos de crescimento e produção em nível de povoamento para o *Pinus taeda*. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO FLORESTAL, 2.; SEMANA DE ESTUDOS FLORESTAIS, 11., 2010, Irati. **Anais...** Irati: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2010. 5 p.

NELSON, T.C. Diamter distribution and growth of *Loblolly pine*. **Forest Science**, Betheseda, v. 10, n. 1, p. 105-114, 1964.

NIGH, D.G.; LOVE, B.A. A model for estimating juvenile height of *Lodgepole pine*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 123, p. 157-166, 1999.

NÎNEMETS, U. Distribution patterns of foliar carbon and nitrogen as affected by tree dimensions and relative light conditions in the canopy of *Picea abies*. **Trees**, Berlin, v. 11, p. 144–154, 1997.

_____. Research review: components of leaf dry mass per area – thickness and density – alter leaf photosynthetic capacity in reverse directions in woody plants. **New Phytologist**, Cambridge, v. 144, p. 35–47, 1999.

NILSSON, U.; ALBAUGH, T.; ALLEN, H.L. Development of size hierarchies prior to the onset of density-dependent mortality in irrigated and fertilized *Loblolly pine* stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 32, p. 989-996, 2002.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste.** 2003. 145 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.

NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: PEARCY, R.W.; EHRLINGER, J.; MOONEY, H.A.; RUNDEL, P.W. (Ed.). **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1989. p. 301-326.

NORTH, P.R.J. Estimation of fAPAR, LAI, and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 80, p. 114-121, 2002.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434 p.

OLIVEIRA, H.A. **Acácia-negra e tanino no Rio Grande do Sul**. Canoas: Associação Brasileira de Acacicultores, 1968. 121 p.

OLIVEIRA, M.L.R.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; GARCIA, S.L.R.; SOUZA, A.L. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1559-1567, nov. 2008.

OLIVEIRA NETO, S.N.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; NEVES, J.C.L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2003.

PAES, J.B.; DINIZ, C.E.F.; MARINHO, I.V.; LIMA, C R. Avaliação do potencial tanífero de seis espécies florestais de ocorrência no semi-árido brasileiro. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 232-238, jul./set. 2006.

PAINEL FLORESTAL. **A silvicultura e a dança da produtividade**. Disponível em: <<http://www.painelflorestal.com.br/noticias/celulose-e-papel/a-silvicultura-e-a-danca-da-produtividade>>. Acesso em: 08 jan.2015.

PAIVA, Y.G. **Estimativa do índice de área foliar por métodos óticos e sensoriamento remoto para calibrar modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado**. 2009. 73 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PARROTA, J.A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 124, p. 45-77, 1999.

PÁSCOA, K.J. **Modelagem e análise do crescimento de *Eremanthus erythropappus* (DD.) MacLeish em povoamento plantado**. 2014. 88 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PASSOS, C.A.M. **Comportamento inicial do eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden) em plantio consorciado com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 1990. 53 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

PATIL, V.A.; NITAVE, S.A. A review on *Eucalyptus globulus*: a divine medicinal herb. **World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, Sofia, v. 3, n. 6, p. 559-567, 2014.

PAULO, E.M.; BERTON, R.S.; CAVICHIOLI, J.C.; BULISANI, E.A.; KASAI, F.S. Produtividade do café apoaã em consórcio com leguminosas na região da alta paulista. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 195-199, 2001.

PENG, C.; WEN, X. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: CORTÉ, U.; SÀNCHEZ-MARRÈ, C.M. (Ed.). **Environmental decision support systems and artificial intelligence**. Menlo Park: AAAI Press, 1999. p. 15-22. (Technical Report WS-99-07).

PEREIRA, A.R. **Biomassa e ciclagem de nutrientes minerais em povoamentos jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, em região do cerrado**. 1990.160 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

PEREIRA, J.C.; CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; HOPPE, J.M.; SANTOS, E.M. Estimativa do conteúdo de nutrientes em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. No Rio Grande do Sul – Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 193-199, 2000.

PEREIRA, J.C.; SCHUMACHER, M.V.; HOPPE, J.M.; CALDEIRA, M.V.W.; SANTOS, E.M. Produção de biomassa em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 521-526, 1997.

PIENAAR, L.V.; TURNBULL, K.J. The Cahpman-Richards generalization of Vo Gertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. **Forest Science**, Betheseda, v. 19, p. 2-22, 1973.

PIENAAR, L.V.; TURNBULL, K.J. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area and yield in even-aged stands. **Forest Science**, Betheseda, v. 19, p. 2-22, 1973.

PINKARD, E.A.; NEILSEN, W.A. Crow and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 172, p. 215-227, 2001.

PIOTTO, D. A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3/4, p. 781-786, 2008.

RAISON, R.J.; CONNEL, M.J.; KHANNA, P.K. Methodology for studyng fluxes of soils mineral-N in situ. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 521-530, 1987.

RAISON, R.J.; CONNEL, M.J.; KHANNA, P.K.; FALKINER, R.A. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on fluxes of soils mineral nitrogen in stand of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 52, p. 43-64, 1992.

RAMBAL, S.; DAMESIN, C.; JOFFRE, R.; MÉTHY, M.; LO SEEN, D. Optimization of carbon gain in canopies of Mediterranean evergreen oaks. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 53, p. 547-560, 1996.

RANGER, J.; TURPAULT, M. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable. **Forest Management**, Amsterdam, v. 122, p. 139-154, 1999.

- REICH, P.B.; ELLSWORTH, D.S.; WALTERS, M.B.; VOSE, J.M.; GRESHAM, C.; VIOLIN, J.C.; BOWMAN, W.D. Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. **Ecology**, New York, v. 80, n. 6, p. 1955-1969, 1999.
- REINER, D.A.; SILVEIRA, E.R.; SZABO, M.S. O uso do eucalipto em diferentes espaçamentos como alternative de renda e suprimento da pequena propriedade na região sudoeste do Paraná. **Synergismus Scyentifica**, Pato Branco, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2011.
- REIS, M.G.F. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis*, plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 149-162, 1985.
- REPETTI, R. Aptitud tecnologica de los eucaliptos, *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. saligna* y *E. grandis* para su utilización en la elaboración de pastas kraft. In: JORNADAS SOBRE EUCALIPTOS PARA LA REGIÓN PAMPEANA, 1, 1990, Buenos Aires. Buenos Aires: Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales, 1990. p. 220-232.
- RESH, S.C.; BINKLEY, D.; PARROTTA, J.A. Greater soil carbon sequestration under nitrogen- fixing trees compared with eucalyptus species. **Ecosystems**, Berlin; Heidelberg, v. 5, n. 3, p. 217-231, 2002.
- REVISTA DA MADEIRA. **Acácia pode ser cortada com cinco anos**. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=729&subject=Esp%C3%A9cie-Ac%C3%A1cia&title=Ac%C3%A1cia%20pode%20ser%20cortada%20com%20cinco%20anos>. Acesso: 01 maio 2015.
- RICHARDS, A.R.; FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; SCHERER-LORENZEN, M. The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. **Tree Physiology**, Oxford, v. 30, n. 9, p. 1192-1208, Sept, 2010.
- RODRIGUES, W.A.; PAIVA, E.; SANTOS, F.G.DOS; RODRIGUES, J.A.S. Variabilidade para o teor de tanino em sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e sua associação com a resistência a pássaros. **Ciência Prática**, Lavras, v. 16, p. 74-77, 1992.
- RODRIGUEZ, L.C.E. **Técnicas de otimização matemática para a gestão de florestas plantadas**: notas de aula. LCF5734: Manejo Florestal Avançado. Piracicaba: ESALQ, 2014. 103 p.
- RODRÍGUEZ, R.; REAL, P.; ESPINOSA, M.; PERRY, D.A. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile. **Forestry**, Oxford, v. 82, n. 2, p. 149-162, 2009.
- ROSA, C.A.B. **Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft**. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- ROUPSARD, O.; DAUZAT, J.; NOUVELLON, Y.; DEVEAU, A.; FEINTRENIE, L.; SAINT-ANDRE, L.; MIALET-SERRA, I.; BRACONNIER, S.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; EPRON, D.; JOURDAN, C.; NAVARRO, M.; BOUILLET, J. Cross-validating Sun-shade and 3D models of light absorption by a tree-crop canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 549–564, 2008.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. Washington: NASA, 1974. 309 p. (Special Publication, 351).

ROY, P.S.; RAVAN, S.A. Biomass estimation using satellite remote sensing data: an investigation on possible approaches for natural forest. **Journal of Bioscience**, Karnataka, v. 21, n. 4, p. 535-561, 1996.

RYAN, M.G.; PHILLIPS, N.; BOND, B.J. The hydraulic limitation hypothesis revisited. **Plant, Cell and Environment**, Dordrecht, v. 29, p. 367-381, 2006.

SADIQ, T.A.; SMITH, V.G. Estimation of individual tree volumes with age and diameter. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 13, p. 32-39, 1983.

SAIDELLES, F.L.F.; CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; BALBINOT, R. Determinação do ponto de amostragem para a quantificação de micronutrientes em acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 1, p. 77-87, 2009.

SALLES, T.T. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos agroflorestais**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SANQUETTA, C.R.; BEHLING, A.; CORTE, A.P.D.; RUZA, M.S.; SIMON, A.; SÃO JOSÉ, J.F.B. Relação hipsométrica em inventários pré-corte em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. **Científica**, Jaboticabal, v. 42, n. 1, p. 80-90, 2014.

SANQUETTA, C.R.; BEHLING, A.; CORTE, A.P.D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M.S.; MOCHIUTTI, S. Estoque de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 361-370, set. 2014.

SANQUETTA, C.R.; BEHLING, A.; DALLA CORTE, A.P.; PÉLLICO NETTO, S.; RODRIGUES, A.L.; SIMON, A.A. A model based on environmental factors for diameter distribution in black wattle in Brazil. **PLoS One**, Cambridge, v. 9, n. 6, p. e100093, 2014.

SANTANA, C.; MELLO, A.A.; EISFELD, R.L.; SANQUETTA, C.R. Sistema de equações para simulação do crescimento e da produção em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. sem desbaste baseado no modelo de Clutter. **Ambiência - Revista do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 1, n. 2, p. 239-256, jun./dez. 2005.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 155-169, dez. 1999.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; LEITE, H.G.; COMERFORD, N.B.; NOVAIS, T.F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697-706, 2008.

SANTOS, A.; SIMÕES, R.; PEREIRA, H.; ANJOS, O. Alternative species for the forest industry as forms of diversify the landscape. In: SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE

- GESTIÓN Y ECONOMIA FLORESTAL, 2., 2004, Barcelona. **Proceedings...** Castelo Branco: Instituto Politécnico de Castelo Branco; Escola Superior Agrária, 2004. 11 p.
- SANTOS, S.C.; COSTA, W.F.; RIBEIRO, J.P.; GUIMARÃES, D.O.; FERRI, P.H.; FERREIRA, H.D.; SERAPHIN, J.C. Tannin composition of barbatimão species. **Fitoterapia**, Milano, v. 73, p. 292-299, 2002.
- SCHNEIDER, P.R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM; CEPEF; FATEC, 1993. 348 p.
- SCHNEIDER, P.R.; SILVA, J.A. Índice de sítio para acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 36, p. 58-82, 1980.
- SCHNEIDER, P.R.; ELESBÃO, L.E.G.; SCHNEIDER, P.S.P.; LONGHI, R.V. Crescimento em diâmetro de *Pinus elliott* e *Pinus taeda* em áreas arenizadas e degradadas no Oeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 9, p. 1561-1567, set. 2014.
- SCHNEIDER, P.R.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G.; KLEIN, J.E.M. Crescimento da acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 101-112, 2000.
- SCHNEIDER, P.R.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G.; SPATHELF, P. Produção de madeira e casca verde por índice de sítio e espaçamento inicial de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 151-165, 2001.
- SCHNEIDER, P.R.; FORTES, F.O.; SOUZA, L.H.S.; LÚCIO, A.D.; FINGER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.R.P. Análise da mortalidade de *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 137-143, 2005.
- SCHONAU, A.P.G. Silvicultural considerations for high productivity of *Eucalyptus grandis*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 9, p. 295-314, 1984.
- SCHUMACHER, F.X. A new growth curve and its application to timber yield studies. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 37, p. 819-820, 1939.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W. Quantificação de biomassa em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. com diferentes idades. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 381-391, 2004.
- SCOLFORO, J.R. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 45, p. 40-47, jan./dez. 1992.
- _____. **Mensuração florestal 3: relações quantitativas em volume, peso e a relação hipsométrica**. Lavras: ESAL; FAEPE, 1993. 292 p.
- _____. **Biometria florestal: técnicas de regressão aplicada para estimar volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira**. Belo Horizonte: CEMIG; Lavras: UFLA; FAEPE, 1997. 292 p.

_____. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA, 2006. 393 p.

SEFTON, C.A.; MONTAGU, K.; ATWELL, B.J.; CONROY, J.P. Anatomical variation in juvenile eucalypt leaves accounts for differences in specific leaf area and CO₂ assimilation rates. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 50, p. 301–310, 2002.

SELLIN, A.; KUPPER, P. Spatial variation in sapwood area to leaf area ration and specific leaf area within a crown of silver birch. **Trees**, Berlin, v. 20, p. 311–319, 2006.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **As florestas plantadas**. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

SHERRY, S.P. **The black wattle (*Acacia mearnsii* De Wild.)**. Pietermaritzburg: University Natal Press, 1971. 402 p.

SHIFLEY, S.R.; LENTZ, E. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 12, p. 195–203, 1985.

SHIPLEY, B.; VILE, D.; GARNIER, E.; WRIGHT, I.J.; POORTER, H. Functional linkages between leaf traits and net photosynthetic rate: reconciling empirical and mechanistic models. **Functional ecology**, London, v. 19, p. 602–615, 2005.

SHIVER, B.D. Sample sizes and estimation methods for the Weibull distribution for unthinned slash pine plantation diameter distributions. **Forest Science**, Bethesda, v. 34, n. 3, p. 809–814, 1988.

SIDDIQUE, I.; ENGEL, V.L.; PARROTTA, J.A.; LAMB, D.; NARDOTO, G.B.; OMETTO, J.P.H.B.; MARTINELLI, L.A.; SCHMIDT, S. Dominance of legume trees alters nutrient relations in mixed species forest restoration plantings within seven years. **Biogeochemistry**, Gewerbestrasse, v. 88, n. 1, p. 89–101, Mar. 2008.

SILVA, C.R. **Efeito do espaçamento e do arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região Nordeste do Estado de São Paulo**. 2006. 51 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SILVA, E.V. **Desenvolvimento de raízes finas em povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium***. 2007. 54 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SILVA, M.L.M.; BINOTI, D.H.B.; GLERIANI, J.M.; LEITE, H.G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1133–1139, 2009.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. O estado da arte na estimative de biomassa e carbon em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185–206, 2008.

SIMON, A.A. A cadeia produtiva da acácia-negra, aspectos econômicos, sociais e ambientais. In: STROHSCHOEN, A.G.; REMPEL, C. **Reflorestamento e recuperação ambiental: ambiente e tecnologia; o desenvolvimento sustentável em foco**. Lajeado: Univates, 2005. p. 149-166.

SOARES, C.P.B.; DE PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276 p.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; OLIVEIRA, M.L.R. de; CARVALHO, A. Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, p. 831-837, 2004.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. de; PENCHEL, R.M. Balanço hídrico de plantações de eucalipto a partir da estimativa de transpiração pelo método de Penman-Monteith (Hydrological balance of eucalypt plantations through transpiration by the method of Penman-Monteith). In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS (IUFRO) CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS, 1997, 4., Salvador. **Proceedings...** Colombo: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisas de Florestas, 1997. v. 4, p. 52-61.

SOUZA, C.A.M.; ALMEIDA, A.Q.; ALMEIDA, V.V.S.; SILVA, G.F. Comparação entre modelos de relações hipsométricas para estudo de uma floresta de *Eucalyptus urophylla*. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 6., 2006, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2006. p. 2850-2853.

STAPE, J.L. **Utilização de delineamento sistemático tipo “leque” no estudo de espaçamentos florestais**. 1995. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, 1995.

_____. Modelos ecofisiológicos têm aplicação ampliada. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 4, p. 108-109, 2005.

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis-urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219–234, 2004.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, K.M.; LIMA, A.M.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; SILVA, G.; ANDRADE, H.; ALVES, J.M. The Brazil Eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1686-1694, 2010.

STEIN, P.P.; TONIETTO, L. Black Wattle Silviculture in Brazil. In: BROWN, A.G.; KO, H.C. (Ed.). **Black wattle and its utilization**. Barton: RIRDC, 1997. p. 78-82.

STENBERG, P.; NILSON, T.; SMOLANDER, S.; VOIPIO, P. Gap fraction based estimation of LAI in scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 29, p. 363–370. 2003.

STRACK, J. **GPSS: modelagem e simulação de sistemas**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1984. 174 p.

TANAC. **Tanac investirá R\$ 150 milhões em Rio Grande**. Disponível em: <<http://www.tanac.com.br/pt-br/noticia/tanac-investir%C3%A1-r-150-milh%C3%B5es-em-rio-grande>>. Acesso em: 08 jan. 2014.

TEIXEIRA, M.L.; SOARES, A.R.; SCOLFORO, J.R.S. Variação do teor de tanino da casca de barbatimão [*Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville] em 10 locais de Minas Gerais. **Ciência Prática**, Lavras, v. 14, n. 2, p. 229-232, 1990.

TEMESGEN, H.; ZHANG, C.H.; ZHAO, X.H. Modelling tree height–diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: a large observational study from Northeast China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 316, p. 78–89, 2014.

TESTE DO USO MÚLTIPLO DE EUCALYPTUS. Disponível em: <<http://www.tume.esalq.usp.br/>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

THOMAS, S.C.; WEINER, J. Including competitive asymmetry in measures of local interference in plant populations. **Oecologia**, Berlin, v. 80, p. 349-355, 1989.

TOMÉ, M.R.F.; FAIAS, S. Relação hipsométrica geral para *Eucalyptus globulus* Labill. Em Portugal. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 15, n. 1, p. 41-55, 2007.

TRUGILHO, P.F.; CAIXETA, R.P.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Avaliação do conteúdo em taninos condensados de algumas espécies típicas do cerrado mineiro. **Cerne**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 1-13, 1997.

UMAÑA, C.L.A. **Distribuições diamétricas de árvores em dez hectares de floresta tropical úmida da Dois Mil Madeireira, Itacoatiara – AM. Manaus**. 1997. 44 p. Dissertação (Mestrado em em Biologia Tropical e Recursos Naturais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia; Universidade Federal do Amazonas, 1997.

VAN BREEMEN, N.; DRISCOLL, C.T.; MULDER, J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters. **Nature**, London, v. 307, n. 5952, p. 599-604, 1984.

VANCLAY, J.K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**, Wallingford: CAB International, 1994. 330 p.

_____. Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods, **Forest Science**, Bethesda, v. 41, n. 1, p. 4-42, 1995.

VANDERMEER, J. **The ecology of intercropping**. New York: Cambridge University Press, 1989. 237 p.

VARGAS, L.A.; ANDERSEN, M.N.; JENSEN, C.R.; JORGENSEN, U. Estimation of leaf area index, light interception and biomass accumulation of *Miscanthus sinensis* ‘Goliath’ from radiation measurements. **Biomass and Bioenergy**, Aberdeen, v. 22, p. 1–14, 2002.

VERHULST, P.F. A note on population growth. **Correspondance Mathematiques et Physiques**, Bruxelles, v. 10, p. 113-121, 1838.

VERTESSY, R.A.; BENYON, R.G.; O'SULLIVAN, S.K.; GRIBBEN, P.R. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. **Tree Physiology**, Oxford, v. 15, p. 559-567, 1995.

VEZZANI, F.M. **Aspectos nutricionais de povoamentos puros e mistos de *Eucalyptus saligna* (Smith) e *Acacia mearnsii* (De Wild.)** 1997. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

VEZZANI, F.M.; TEDESCO, M.J.; BARROS, N.F. Alterações dos nutrientes no solo e nas plantas em consórcio de eucalipto e acácia-negra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 225-231, 2001.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M.V. Biomassa em povoamentos monoespecíficos e mistos de eucalipto e acácia-negra e do milho em sistema agrossilvicultural. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 259-265, abr./jun. 2011.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M.; LIBERALESSO, E. Crescimento e produtividade de povoamentos monoespecíficos e mistos de eucalipto e acácia-negra. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 415-421, jul./set. 2011.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M.V.; TRÜBY, P.; ARAÚJO, E.F. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul-RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 1-13, jan./abr. 2013.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M.V.; LIBERALESSO, E.; CALDEIRA, M.V.W.; WATZLAWICK, L.F. Plantio misto de *Eucalyptus* spp. com leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 1, p. 16-25, 2013.

VIEIRA, S.A.; ALVES, L.F.; AIDAR, M.P.M.; ARAÚJO, L.S.; BAKER, T.; BATISTA, J.L.F.; CAMPOS, M.C.R.; CAMARGO, P.B.; CHAVE, J.; DELITTI, W.B.; HIGUCHI, N.; HONÓRIO, E.; JOLY, C.A.; KELLER, M.; MARTINELLI, L.A.; MATTOS, E.A. de; METZKER, T.; PHILLIPS, O.; SANTOS, F.A.M.; SHIMABUKURO, M.T.; SILVEIRA, M.; TRUMBORE, S.E. Estimation of biomass and carbono stocks: the case of the Atlantic Forest. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 21-29, 2008.

VITTI, A.M.S.; BRITO, J.O. Óleo essencial de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 731-735, 2007.

VOIGTLAENDER, M. **Produção de biomassa aérea e ciclagem de nitrogênio em consórcio de genótipos de *Eucalyptus* com *Acacia mangium***. 2012. 94 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

VOIGTLAENDER, M.; LACLAU, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; PICCOLO, M.C.; MOREIRA, M.Z.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J.; BOULLET, J.-P. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, The Hague, v. 352, n. 1/2, p. 99-111, Jan. 2012.

WADOUSKI, L.H. O planejamento operacional na exploração de florestas. In: SIMPÓSIO SOBRE EXPLORAÇÃO, TRANSPORTE, ERGONOMIA E SEGURANÇA EM REFLORESTAMENTOS, 1., 1987, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1987. p. 28-39.

WANG, F.; LI, Z.; XIA, H.; ZOU, B.; LI, N.; LIU, J.; ZHU, W. Effects of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species on soil properties and nitrogen transformation during forest restoration in southern China. **Soil Science & Plant Nutrition**, Tokyo, v. 56, n. 2, p. 297-306, Apr 2010.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, p. 41-76, 1947.

WEISKITTEL, A.R.; TEMESGEN, H.; WILSON, D.; MAGUIRE, D.A. Sources of within and between-stand variability in specific leaf area of three ecologically distinct conifer species. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 65, n. 103, p. 1-110, 2008.

WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**, Atlantic City, v. 18, p. 293-297, 1951.

WELLES, J.M. Some indirect methods of estimating canopy structure. **Remote Sensing Reviews**, Reading, v. 5, p. 31-34, 1990.

WELLES, J.M.; COHEN, S. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p. 1335-1347, 1996.

WHITE, J.D.; SCOTT, N.A. Specific leaf area and nitrogen distribution in New Zealand forest species independently respond to intercepted light. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, p. 319-329, 2006.

WOODRUFF, D.R.; BOND, B.J.; MEINZER, F.C. Does turgor limit growth in tall trees? **Plant, Cell and Environment**, Dordrecht, v. 27, p. 229-236, 2004.

WRIGHT, I.J.; REICH, P.B.; WESTOBY, M.; ACKERLY, D.D.; BARUCH, Z.; BONGERS, F.; CAVENDER-BARES, J.; CHAPIN, T.; CORNELISSEN, J.H.C.; DIEMER, M.; FLEXAS, J.; GARNIER, E.; GROOM, P.K.; GULIAS, J.; HIKOSAKA, K.; LAMONT, B.B.; LEE, T.; LEE, W.; LUSK, C.; MIDGLEY, J.J.; NAVAS, M.-L.; NIINEMETS, U.; OLEKSYN, J.; OSADA, N.; POORTER, H.; POOT, P.; PRIOR, L.; PYANKOV, V.I.; ROUMET, C.; THOMAS, S.C.; TJOELKER, M.G.; VENEKLAAS, E.J.; VILLAR, R. The worldwide leaf economics spectrum. **Nature**, London, v. 428, p. 821-827, 2004.

XAVIER, A.A.; SANFENTES, E.V.; JOUNGHANS, D.T.; ALFENAS, A.C. Resistência de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* à ferrugem (*Puccinia psidii*)¹. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 731-735, 2007.

XAVIER, A.C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Variação no índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

YAMASHITA, N.; OHTA, S.; HARDJONO, A. Soil changes induced by *Acacia mangium* plantation establishment: Comparison with secondary forest and Imperata cylindrica grassland

soils in South Sumatra, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 254, n. 2, p. 362-370, Jan. 2008.

ZAKRZEWSKI, W.T.; TER-MIKAELIAN, M. New application of a polynomial curve to plot volume estimation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 24, p. 1083-1088, 1994.

ZANON, M.L.B.; FINGUER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.R.; KLEIN, J.E.M.; COELHO, M.C.B. Funções para descrever a relação altura e diâmetro de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 87-90, 1996.

ZEIDE, B. Accuracy of equations describing diameter growth. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 19, p. 1283-1286, 1989.

_____. Analysis of growth equations. **Forest Science**, Bethesda, v. 39, n. 3, p. 594-616, 1993

ZHONG, C.; PINYOPUSAREK, K. **Acacia melanoxylon**: research and application in China. IUFRO. Disponível em: <<http://www.iufro.org/publications/proceedings/proceedings-meetings-2014/#c21354>>. Acesso em: 09 set. 2014.

ZOBEL, B.J.; WYK, G.V.; STAHL, P. **Growing exotic plants**. New York: Wiley – Interscience, 1987. 528 p.

ZUTTER, B.R.; ODERWALD, R.G.; MURPHY, P.A.; FARRAR, R.M. Jr. Characterizing diameter distributions with modified data types and forms of the Weibull distribution. **Forest Science**, Bethesda, v. 32, n. 1, p. 37-48, 1986.

ANEXOS

Bloco	Tratamento	Espécie	β_0	β_1	β_2	$\bar{R}_{\hat{y}y}^2$	$S_{\hat{y}y}$
1	1	<i>Eucalyptus</i>	-11,207	1,1592	2,2127	0,9939	0,07706
1	1	<i>Acacia</i>	-10,654	1,51586	1,63265	0,9979	0,05349
1	2	<i>Eucalyptus</i>	-16,51	5,216	-0,4081	0,9671	0,1715
1	2	<i>Acacia</i>	-10,168	1,1346	1,8573	0,9931	0,1133
1	3	<i>Acacia</i>	-9,8741	0,9212	2,0024	0,9986	0,07052
1	4	<i>Eucalyptus</i>	-9,3843	1,2175	1,4815	0,9874	0,1896
2	1	<i>Eucalyptus</i>	-10,319	0,8104	2,2596	0,9977	0,04575
2	1	<i>Acacia</i>	-9,8398	0,663	2,2423	0,9981	0,06324
2	2	<i>Eucalyptus</i>	-11,051	1,3397	1,9288	0,9982	0,03169
2	2	<i>Acacia</i>	-10,203	1,3801	1,6305	0,9973	0,05374
2	3	<i>Acacia</i>	-10,833	1,3977	1,8298	0,9954	0,04522
2	4	<i>Eucalyptus</i>	-11,114	1,4242	1,8571	0,9936	0,08091
3	1	<i>Eucalyptus</i>	-11,247	1,4495	1,8663	0,9976	0,0483
3	1	<i>Acacia</i>	-10,206	1,2719	1,7402	0,9969	0,05938
3	2	<i>Eucalyptus</i>	-10,712	1,4413	1,6882	0,9935	0,08353
3	2	<i>Acacia</i>	-10,489	1,2756	1,8143	0,9942	0,05443
3	3	<i>Acacia</i>	-9,2355	0,9633	1,724	0,9978	0,04372
3	4	<i>Eucalyptus</i>	-11,954	1,864	1,6255	0,9933	0,0882
4	1	<i>Eucalyptus</i>	-9,0463	0,2441	2,4216	0,9939	0,08531
4	1	<i>Acacia</i>	-11,858	2,713	0,8243	0,9008	0,3017
4	2	<i>Eucalyptus</i>	-9,3115	0,8811	1,7982	0,9998	0,02826
4	2	<i>Acacia</i>	-9,0536	0,15416	2,56605	0,999	0,0322
4	3	<i>Acacia</i>	-12,896	2,4488	1,4506	0,9915	0,08441
4	4	<i>Eucalyptus</i>	-9,3841	0,8205	1,9299	0,9968	0,09115

Quadro 34 - Parâmetros das equações de Schumacher & Hall, e seus coeficientes de correlação e erro padrão do resíduo

Quadro 35 - Alturas observadas e estimadas pelos modelos de regressão hipsométrica da classe 1

(continua)

Quadro 35 - Alturas observadas e estimadas pelos modelos de regressão hipsométrica da classe 1

(conclusão)

Quadro 36 - Alturas observadas e estimadas pelos modelos de regressão hipsométrica da classe 2

(continua)

Quadro 36 - Alturas observadas e estimadas pelos modelos de regressão hipsométrica da classe 2

(conclusão)

Quadro 37 - Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de regressão utilizados no sistema para a redistribuição teórica dos diâmetros por classe ou recuperação da distribuição diamétrica (continua)

Quadro 37 - Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de regressão utilizados no sistema para a redistribuição teórica dos diâmetros por classe ou recuperação da distribuição diamétrica (conclusão)