

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO - PR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA
MESTRADO

PRODUÇÃO DE BIOMASSA E QUANTIFICAÇÃO DE NUTRIENTES EM
***Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage SOB DIFERENTES DENSIDADES**
DE PLANTIO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SAULO VINICIUS KÜSTER DA SILVA

GUARAPUAVA-PR

2015

SAULO VINICIUS KÜSTER DA SILVA

**PRODUÇÃO DE BIOMASSA E QUANTIFICAÇÃO DE NUTRIENTES EM
Eucalyptus benthamii Maiden et Cabbage SOB DIFERENTES DENSIDADES DE
PLANTIO**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick
Orientador

GUARAPUAVA-PR
2015

Saulo Vinicius Küster da Silva

PRODUÇÃO DE BIOMASSA E QUANTIFICAÇÃO DE NUTRIENTES EM *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage SOB DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTIO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 24 de fevereiro de 2015.


Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick
(UNICENTRO)


Prof. Dr. Rafael Balbinot
(UFSM)


Prof. Dr. Sebastião Brasil Campos Lustosa
(UNICENTRO)

GUARAPUAVA-PR

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas muitas graças recebidas e pelo final de mais uma etapa importante de minha vida.

Aos meus dedicados pais, Nei e Marilda, responsáveis pela minha formação e também de meus irmãos.

À Vantielen, um exemplo de esforço e dedicação para mim.

Aos colegas do Laboratório de Ciências Florestais e Forrageiras, sempre dispostos a colaborar.

A meu chefe, Celso Alves de Araújo, pelo apoio.

À UNICENTRO e ao Professor Dr. Luciano Farinha Watzlawick, pelo incentivo e orientação.

A todos que de alguma forma colaboraram durante este período de minha vida, o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1. Origem e características do <i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden et Cabbage.....	5
3.2. Influência do espaçamento na biomassa florestal.....	6
3.3. Determinação e estimativa de biomassa	8
3.4. Biomassa florestal e exportação de nutrientes	10
3.5. Sistemas de colheita florestal e exploração de biomassa.....	12
3.5.1. Sistema de tora curta (<i>Cut-to-length</i>)	13
3.5.2. Sistema de tora longa (<i>Tree-length</i>)	13
3.5.3. Sistema de árvores inteiras (<i>Full-tree</i>)	13
3.5.4. Sistema de cavaqueamento (<i>Chipping</i>)	14
3.5.5. Sistema de árvores completas (<i>Whole-tree</i>)	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1. Localização e caracterização do experimento.....	15
4.2. Amostragem e coleta de dados	17
4.3. Estimativa da biomassa.....	18
4.4. Estimativa das alturas	21
4.5. Determinação do teor de nutrientes	22
4.6. Análises estatísticas	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1. Ajuste dos modelos para estimativa da biomassa seca	24
5.1.1. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca total.....	24
5.1.2. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de madeira	25
5.1.3. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de casca.....	26

5.1.4.	Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de galhos.....	28
5.1.5.	Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de folhas	30
5.2.	Estimativa da produção da biomassa total e dos compartimentos.....	32
5.2.1.	Produção média de biomassa seca por árvore e compartimentos.....	36
5.2.2.	Distribuição percentual de biomassa seca nos compartimentos avaliados.....	38
5.3.	Teores de macronutrientes nos compartimentos.....	39
5.4.	Teores de micronutrientes nos compartimentos	43
5.5.	Conteúdo de macronutrientes	45
5.6.	Conteúdo de micronutrientes	47
5.7.	Exportação de nutrientes pela exploração da biomassa.....	49
5.7.1.	Exploração da biomassa total acima do solo.....	50
5.7.2.	Exploração da biomassa do fuste (madeira e casca)	52
5.7.3.	Exploração da biomassa da madeira (fuste sem casca).....	58
6.	CONCLUSÕES.....	66
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	APÊNDICE I.....	77
	APÊNDICE II.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espaçamentos utilizados no plantio experimental, área vital e número de árvores por hectare.	16
Tabela 2. Modelos matemáticos utilizados para estimativa da biomassa total e dos compartimentos de árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	21
Tabela 3. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca total de árvores <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	24
Tabela 4. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca da madeira de árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	26
Tabela 5. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca da casca de árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	27
Tabela 6. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca de galhos de árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	29
Tabela 7. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca de folhas de árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	31
Tabela 8. Resultados do ajuste do modelo 2 utilizado para estimar a biomassa seca total e dos compartimentos de árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	33
Tabela 9. Produção de biomassa total e por compartimento nos diferentes tratamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	34
Tabela 10. Produção de biomassa seca média por árvore e compartimento para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade em cada tratamento analisado.	36
Tabela 11. Contribuição percentual de cada compartimento na biomassa seca total para árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	38
Tabela 12. Teores médios de macronutrientes em diferentes espaçamentos e compartimentos de árvores <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	40
Tabela 13. Teores médios de micronutrientes em diferentes espaçamentos e compartimentos de árvores <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	43
Tabela 14. Conteúdo de macronutrientes total e por compartimento em diferentes espaçamentos de plantio para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	46
Tabela 15. Conteúdo de micronutrientes total e por compartimento em diferentes espaçamentos de plantio para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	48

Tabela 16. Nutrientes exportados pela colheita da biomassa total acima do solo nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	51
Tabela 17. Quantidades de macronutrientes exportados pela colheita da biomassa do fuste nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	53
Tabela 18. Quantidades de micronutrientes exportados pela colheita da biomassa do fuste nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	56
Tabela 19. Quantidades totais de nutrientes exportados pela colheita da biomassa do fuste nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	58
Tabela 20. Quantidades de macronutrientes exportados pela colheita da biomassa da madeira nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	59
Tabela 21. Quantidades de micronutrientes exportados pela colheita da biomassa da madeira nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	62
Tabela 22. Quantidades totais de nutrientes exportados pela colheita da biomassa da madeira nos diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do experimento com <i>Eucalyptus benthamii</i> no Campus Universitário CEDETEG, no Município de Guarapuava - PR.	16
Figura 2. Croqui do experimento com <i>Eucalyptus benthamii</i> com a distribuição dos tratamentos dentro dos blocos.	17
Figura 3. Compartimentos das árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i> que tiveram sua biomassa fresca pesada em campo.	19
Figura 4. Localização das amostras retiradas para determinação do teor de umidade da madeira e da casca das árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i>	20
Figura 5. Localização das amostras retiradas para determinação do teor de umidade de galhos e folhas das árvores de <i>Eucalyptus benthamii</i>	20
Figura 6. Distribuição dos resíduos para biomassa seca total para os três modelos ajustados.	25
Figura 7. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de madeira para os três modelos ajustados.	26
Figura 8. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de casca para os três modelos ajustados.	28
Figura 9. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de galhos para os três modelos ajustados.	30
Figura 10. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de folhas para os três modelos ajustados.	32
Figura 11. Diferentes tipos de exploração da biomassa analisados para avaliação da exportação de nutrientes.	50
Figura 12. Macronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa do fuste em diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	54
Figura 13. Micronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa do fuste em diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	57
Figura 14. Macronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa da madeira em diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	61
Figura 15. Micronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa da madeira em diferentes espaçamentos para <i>Eucalyptus benthamii</i> aos seis anos de idade.	64

RESUMO

Saulo Vinicius Küster da Silva. Produção de Biomassa e Quantificação de Nutrientes em *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage Sob Diferentes Densidades de Plantio.

Este trabalho teve por objetivo avaliar a produção de biomassa acima do solo, o conteúdo e a alocação de nutrientes em árvores de *Eucalyptus benthamii* sob quatro diferentes densidades de plantio aos seis anos de idade. Para tanto, foi instalado um plantio experimental com delineamento em blocos ao acaso, com os espaçamentos de plantio 3x2, 3x3, 4x3 e 4x4, com quatro repetições compostas por 20 árvores cada. Foram selecionadas árvores em todas as classes de diâmetro para determinação da altura, biomassa total e dos compartimentos madeira, casca, galhos e folhas. Posteriormente, amostras foram retiradas para se obter a biomassa seca em cada compartimento. Para a determinação do teor de nutrientes nos diferentes compartimentos das árvores, foram utilizadas somente amostras da árvore mediana das cinco classes de maior frequência em cada tratamento. A maior produção de biomassa seca total foi encontrado no tratamento 1, que corresponde ao espaçamento 3x2, com 184,2 Mg ha⁻¹, seguido dos tratamentos 2 (3x3), 3 (4x3) e 4 (4x4), com 147,3, 133,5 e 109,3 Mg ha⁻¹. Em média, a madeira contribuiu com 75,2% da biomassa seca total, seguida da casca com 13,1%, dos galhos com 7,4% e das folhas com 4,3%. No entanto, a biomassa da madeira e da casca teve uma tendência a diminuir a sua contribuição em relação à biomassa total à medida que espaçamento aumenta. O inverso acontece com os compartimentos galhos e folhas, em razão dos espaçamentos mais amplos permitirem um maior desenvolvimento da copa das árvores. Os tratamentos não interferiam significativamente na concentração de macronutrientes e micronutrientes em nenhum dos compartimentos. Foi encontrada a seguinte ordem decrescente de concentração para macronutrientes: Ca > N > K > Mg > S > P. Já para micronutrientes a ordem foi: Mn > Fe > Zn > Cu > B. Com relação ao conteúdo armazenado pela biomassa total acima do solo, os macronutrientes apresentaram a ordem decrescente: N > Ca > K > P > Mg > S; distribuídos desta maneira pelos compartimentos: madeira > casca > folhas > galhos. Para micronutrientes a ordem decrescente foi: Mn > Fe > Zn > Cu > B, com a seguinte ordem de distribuição pelos compartimentos: casca > madeira > folhas > galhos.

Palavras chave: Espaçamento de plantio; biomassa acima do solo; compartimentos.

ABSTRACT

Saulo Vinicius Küster da Silva. Biomass production and Quantification of nutrients in *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage Under Different Planting Densities.

This study aimed to evaluate the production of aboveground biomass, the content and the allocation of nutrients in *Eucalyptus benthamii* trees, under four different planting densities, at six years of age. Thus, it was placed experimental planting design in randomized blocks, with the planting spacing 3x2, 3x3, 4x3 and 4x4, with four replications composed of 20 trees each. Trees were selected in all diameter classes to determine the height, total biomass and wood compartments, bark, branches and leaves. Subsequently, samples were taken to obtain the dry weight in each compartment. To determine the nutrient content in different compartments of the trees, samples were used from the median tree of the five most frequent class in each treatment. The higher total dry matter was found in treatment 1, which corresponds to the spacing 3x2 with 184.2 Mg ha⁻¹, followed by treatments 2 (3x3), 3 (4x3) and 4 (4x4) with 147.3 , 133.5 and 109.3 Mg ha⁻¹. On average, the timber contributed 75.2% of the total biomass, followed by peeling to 13.1%, with 7.4% of the branches and leaves to 4.3%. However, the biomass of wood and bark had a tendency to decrease its contribution to total biomass as spacing increases. The reverse happens with compartments branches and leaves, due to the wider spacing that allows further development of the treetops. The treatments did not significantly interfere in the concentration of macronutrients and micronutrients in any of the compartments. It was found the following descending order in concentration of macronutrients: Ca > N > K > Mg > S > P. As for micronutrients, the order was: Mn > Fe > Zn > Cu > B. With regard to the content stored by the total biomass above soil, the macronutrients were presented in descending order: N > Ca > K > P > Mg > S and distributed in this way by compartments: wood > bark > leaves > branches. For micronutrients, the descending order was: Mn > Fe > Zn > Cu > B, with the following order of distribution by compartments: bark > wood > leaves > branches.

Keywords: planting spacing; aboveground biomass; compartments.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa começou a ser considerada como uma alternativa viável às demandas de energia no mundo a partir na década de 1970, devido às crises de petróleo. Porém, na década de 1980, com a baixa nos preços do petróleo, o interesse nessa energia alternativa diminuiu, e só voltou a ganhar destaque na década de 1990 em razão das previsões de esgotamento dos combustíveis fósseis, das questões ambientais e do desenvolvimento de novas tecnologias de transformação (MÜLLER e COUTO, 2006).

Sanquetta (2002) define a biomassa como qualquer matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. Quando utilizada para produção de energia mecânica, térmica ou elétrica, ela essencialmente tem origem florestal, agrícola e de resíduos industriais e urbanos (ANEEL, 2008).

Em 2012 a biomassa foi responsável por aproximadamente 28% da matriz energética brasileira, ficando atrás apenas do petróleo e seus derivados. Os produtos da cultura da cana representam 54,8 % desse total e por 15,4% da matriz. A lenha corresponde por 32,4% e 9,1% da matriz. Já outras fontes, como resíduos da indústria florestal e da agroindústria, são responsáveis por 12,8% do total da energia produzida pela biomassa e por 3,6% da matriz (EPE, 2013; MME, 2013).

Dentre as fontes renováveis de energia utilizadas no Brasil, a biomassa de origem florestal se destaca por possuir muitas características consideradas favoráveis, como as diversas fontes que dão origem a esse recurso, podendo ser tanto de resíduos florestais ou industriais, como de plantios destinados especificamente para fins energéticos, como é o caso diversas espécies do gênero *Eucalyptus* (BRAND, 2007).

O eucalipto no Brasil, antes somente conhecido como uma árvore ornamental, teve os primeiros reflorestamentos experimentais implantados para fins produtivos pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro (CPEF). Em 1904, o agrônomo Edmundo Navarro de Andrade foi contratado pela companhia para encontrar as melhores espécies florestais para o fornecimento de carvão para as locomotivas e de madeira para os dormentes das ferrovias. O eucalipto foi o que melhor se destacou, e a partir de 1908 tiveram início os plantios em larga escala (DOSSA, 2002; MARTINI, 2004).

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (2013), a área total ocupada com reflorestamentos de eucalipto no Brasil chegou em 2012 a 5.102.030

ha, correspondendo a 76,6% da área total de plantios florestais no país. O cultivo do eucalipto oferece uma alternativa para o fornecimento de madeira, diminuindo a pressão sobre as florestas nativas que, mesmo exploradas de modo sustentável, não seriam suficientes para atender à demanda crescente de madeira para diversos fins (VIERA, 2012).

Na região sul do Brasil, onde as baixas temperaturas restringem a sobrevivência e o crescimento de muitas espécies de eucalipto, destacam-se apenas algumas que apresentam tolerância comprovada a geadas, sendo uma delas o *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage (LIMA et al., 2010). Essa espécie foi introduzida no país pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em 1988 que realizou o plantio de mudas em regiões de ocorrência de geadas severas nos estados do sul do país. O *E. benthamii* demonstrou ser bastante tolerante a geadas, suportando temperaturas negativas na fase inicial de crescimento, sem danos significativos às plantas, além de um bom incremento médio anual de até 45 m³ ha⁻¹ (ALVES et al., 2011).

Dentre as diversas práticas silviculturais, o espaçamento pode afetar diretamente as taxas de crescimento das plantas, a idade de corte, bem como o manejo da floresta. Espaçamentos menores produzem madeira de pequenas dimensões, porém com maiores rendimentos volumétricos por unidade de área e em ciclos curtos. Espaçamentos mais amplos visam produzir árvores de maiores dimensões em menos tempo, porém com uma menor produção por hectare (BALLONI e SIMÕES, 1980; BERGER, 2000; COELHO et al., 1970).

Devido ao crescente aumento do consumo de madeira de eucalipto, a necessidade da maximização da produção implica em práticas silviculturais como a redução do ciclo de corte, muitas vezes associado ao aumento da densidade de populações florestais. Essas práticas silviculturais estão diretamente relacionadas com a exportação de nutrientes devido à colheita florestal e, considerando que os plantios florestais ocupam na maioria das vezes solos de baixa fertilidade, estudos sobre concentração e quantificação de nutrientes na biomassa são muito importantes para que se possam evitar problemas nutricionais com as rotações futuras (SCHUMACHER e POGGIANI, 1993).

Na maioria das empresas florestais se explora o tronco das árvores (madeira e casca) e, em algumas situações, também os galhos e as folhas para a produção de energia. Dessa forma, é importante quantificar os nutrientes retirados pela colheita nesses diferentes compartimentos, pois certamente a produtividade dos povoamentos florestais dependerá da reposição desses nutrientes contidos na biomassa exportada na colheita, que, associada às

perdas por lixiviação e erosão, irá afetar negativamente a produtividade dos sítios ao longo dos ciclos de corte (MORO et al., 2008).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a produção de biomassa acima do solo, o conteúdo e a alocação de nutrientes em árvores de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage sob diferentes densidades de plantio aos seis anos de idade.

2.2. Objetivos específicos

- a) Avaliar o efeito de quatro densidades de plantio na produção de biomassa total acima do solo e para os compartimentos madeira, casca, galhos e folhas;
- b) Avaliar o efeito de diferentes densidades de plantio no teor e quantidade de micronutrientes e macronutrientes na biomassa total e para os compartimentos: madeira, casca, galhos e folhas;
- c) Quantificar a exportação de micronutrientes e macronutrientes pela exploração de biomassa considerando diferentes sistemas de colheita;
- d) Ajustar modelos matemáticos para estimativa de biomassa total acima do solo e por compartimento.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Origem e características do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Mirtaceae* e é nativo da Austrália. O Serviço Florestal australiano já identificou mais de 670 espécies, sendo que apenas duas delas têm ocorrência natural fora do território do país (MARTINI, 2004). Dentre as espécies já descritas, o *Eucalyptus benthamii* é uma das que tem menor área de ocorrência natural.

O *E. benthamii* tem esse nome em homenagem ao botânico inglês George Bentham, do *Royal Botanic Gardens*, em Londres, que foi o principal autor da obra *Flora australiensis*, publicado em Londres entre 1864 e 1878, contendo sete volumes (RICHARDSON, 2012).

A ocorrência natural da espécie é limitada a uma faixa estreita localizada no Estado de New South Wales (NSW), na Austrália, próximo à cidade de Camden, ao longo de solos férteis e terras planas próximas do rio Nepean e de seus afluentes, em uma área com 100 km de comprimento por 40 km de largura e altitudes inferiores a 100 m. A temperatura média máxima da região é de 26°C e a temperatura média mínima de 4°C, com incidência de geadas leves e precipitação média anual de 1100 mm. Grande parte da área da população original foi cortada para formação de pastagens ou inundada com a construção da represa de Warragamba em 1933. Além disso, sistemas de mitigação de inundações fluviais tem reduzido a germinação das sementes (HIGA, 1999; RICHARDSON, 2012).

É uma espécie considerada vulnerável e protegida por duas leis do governo australiano. A Lei de Proteção das Espécies Ameaçadas e a Lei de Proteção do Meio Ambiente e Conservação da Biodiversidade. No estado onde a espécie é nativa, ela também é protegida por lei desde 1995. Recentemente, em abril de 2014, o Departamento de Meio Ambiente da Austrália emitiu o documento *Conservation Advice for Eucalyptus benthamii*, que contém orientações para recuperação e redução de ameaças imediatas à espécie (AUSTRALIA, 2014).

No Brasil, ela foi introduzida em 1988 pela Embrapa Florestas, estabelecendo uma das primeiras populações genética-base em Colombo – PR. Esse povoamento é formado pela mistura de dez matrizes da procedência *Wentworth Falls* (GRAÇA et al., 1999). Com a intenção de ampliar essa base genética da população de *E. benthamii* no país, em 2005 a Embrapa Florestas importou 36 lotes de sementes na forma de progênies de polinização aberta

e ainda dois lotes adicionais formados a partir da mistura de sementes colhidas em árvores pertencentes a duas populações naturais (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

Em razão do seu rápido crescimento e da resistência comprovada a baixas temperaturas, o que possibilita seu plantio em regiões do sul do Brasil onde ocorrem geadas frequentes, o *E. benthamii* tem despertado o interesse de vários melhoristas. Estudos e avaliações tecnológicas da madeira (densidade, poder calorífico, teor de lignina) indicam um uso potencial como lenha, carvão e celulose (HIGA e PEREIRA, 2003; SILVA et al., 2012). Essa espécie também apresenta vantagens em relação a outras, que também são consideradas resistentes a baixas temperaturas, como o *E. viminalis* e *E. dunnii* (BACCARIN, 2012; NISGOSKI et al., 1998). O *E. viminalis*, apesar da evidente resistência às geadas, possui crescimento lento e diversos problemas fisiológicos. Já o *E. dunnii*, em um plantio experimental no município de Guarapuava, demonstrou uma menor taxa de crescimento e menos resistência a geadas (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

Em razão disso, nos últimos anos houve uma expansão gradual do plantio dessa espécie, e hoje estima-se que existam mais de dez mil hectares ocupados com *E. benthamii* no sul do Brasil. (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2011).

3.2. Influência do espaçamento na biomassa florestal

O melhoramento genético de várias espécies do gênero *Eucalyptus* tem contribuído muito para obtenção de povoamentos mais produtivos. Porém, as práticas silviculturais também são ferramentas importantes para alcançar altas produtividades e adequar as florestas aos objetivos dos produtos finais. Entre essas práticas pode-se destacar o preparo do solo, a adubação, o desbaste, a desrama e, sobretudo, o espaçamento inicial de plantio (GOULART et al., 2003).

O número de plantas por hectare definido na implantação de um povoamento florestal tem implicações diretas do ponto de vista silvicultural, definindo também o estabelecimento e manejo da floresta, pois ele afeta as taxas de crescimento das plantas, a idade de corte, bem como as práticas de exploração que serão aplicadas (BALLONI e SIMÕES, 1980).

Muitas vezes a determinação do espaçamento entre plantas ocorre de maneira empírica e deve-se a práticas comuns locais, não sendo empregado de forma correta em relação ao produto final e à qualidade do sítio. O espaçamento, com frequência, também depende das

ferramentas e maquinários empregados na implantação, cultivo e colheita futura da floresta (BERGER, 2000).

Vários pesquisadores têm estudado o efeito do espaçamento nas variáveis dendrométricas e na produção de biomassa (BALLONI e SIMÕES, 1980; BERGER et al., 2002; COELHO et al., 1970; MAGALHÃES et al., 2006; MIRANDA e NAHUZ, 1999). De maneira geral, todos encontraram uma alta interferência da densidade de plantio no diâmetro médio das árvores.

No entanto, para a variável altura há pouca influência do espaçamento. Morais (2006), ao estudar o efeito de diferentes espaçamentos em clones de eucalipto aos 12 meses de idade, não encontrou diferença estatística entre as médias das alturas para nenhum dos tratamentos. Porém, observou um leve aumento da altura do menor para o maior espaçamento. Resultado semelhante também foi encontrado por Bernardo et al. (1998), que no estudo de três espécies de eucalipto em diferentes densidades de plantio aos 41 meses de idade, não encontram diferenças estatísticas entre as médias das alturas, porém a mesma tendência de aumento foi observada. Magalhães et al. (2007), avaliando o desempenho de clones híbridos e de espécies/procedências de eucaliptos em quatro espaçamentos, aos 113 meses de idade, somente encontraram diferenças estatísticas para as alturas entre os clones e as espécies estudadas.

Santos (2011), estudando o efeito do espaçamento na biomassa do fuste de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, constatou que em espaçamentos maiores as plantas atingem dimensões mais apropriadas para a indústria em um menor período de tempo, gerando árvores com maior volume individual. Já em plantios com espaçamentos reduzidos, se destaca a maior produção volumétrica por hectare em menor tempo, porém com volume individual menor em razão das dimensões reduzidas das árvores, principalmente em diâmetro.

Portanto, a diferença de produção entre um espaçamento adensado e um amplo diminui com o avanço da idade do povoamento. Isso ocorre devido a maior competição entre as árvores plantadas em espaçamento reduzido, onde a estabilização do acúmulo de biomassa ocorre em um menor período de tempo em relação a espaçamentos mais amplos. Dessa maneira, com o avanço da idade do plantio em espaçamentos maiores, a produção de biomassa é compensada pelo maior crescimento em diâmetro, o que significa maior volume individual, apesar da redução do número de árvores por unidade de área.

Porém, a produção total de biomassa em povoamentos florestais depende muito do ciclo de corte. Desde que haja uma densidade de plantas suficiente, há uma tendência de que a produção máxima final por hectare seja similar para todos os espaçamentos, o que corresponde à lei da produção final constante, onde a produção de biomassa por unidade de área é compensada com o tempo, pela baixa ou alta densidade de plantas (BEGON et al., 2006; WEINER e FRECKLETON, 2010).

O espaçamento pode interferir também na distribuição de biomassa nos diferentes compartimentos da árvore. Leles et al. (2001), estudando a alocação de matéria seca de *E. camaldulensis* sob diferentes espaçamentos, constataram que em espaçamento igual ou inferior a 4x3 m, 13% da matéria seca total foi alocada na copa (folhas e galhos). Já em espaçamentos de 3x5 m ou superior, essa proporção foi de 27%, pois espaçamentos maiores, além de permitirem o desenvolvimento de árvores com maiores diâmetros, também disponibiliza espaço para um maior crescimento da copa.

Müller et al. (2005), estudando o comportamento de clones de eucalipto sob diferentes densidades de plantio, encontraram diferenças nas percentagens da biomassa do fuste e da casca. Em espaçamento 3x0,5 m, a madeira e a casca correspondem, respectivamente, a 70% e 10% da biomassa total. Já para o espaçamento 3x3 m, o fuste corresponde a 66% e a casca 11,2% da biomassa total acima do solo.

Portanto, o estudo do efeito do espaçamento no desenvolvimento de árvores individuais fornece informações sobre a interação entre o crescimento total e de seus compartimentos, e de como essa interação pode afetar coletivamente a produção da floresta (HARRIS, 2007).

3.3. Determinação e estimativa de biomassa

No caso da biomassa florestal, existem duas maneiras distintas para sua avaliação. Ela pode ser avaliada por meio de métodos diretos e métodos indiretos. O primeiro, considerado um método destrutivo, implica em determinações, ou seja, as árvores são cortadas e seus componentes pesados separadamente para obtenção dos dados reais da biomassa. Esse método não é viável para grandes áreas, pois é trabalhoso, demorado e também oneroso. Já os métodos indiretos necessitam da determinação da biomassa de apenas uma amostra da população estudada ou de dados provenientes de outros estudos semelhantes, sendo possível

dessa maneira, gerar estimativas através de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões. Em razão disso, os métodos indiretos devem sempre ser aplicados em conjunto com os métodos diretos (SANQUETTA, 2002; WATZLAWICK, 2003).

Koehler et al. (2002) relatam que o método mais comum para a estimativa de biomassa em povoamentos florestais é o ajuste de equações por meio das técnicas de regressão. As árvores amostradas de uma população são derrubadas, seus pesos totais e de cada compartimento (madeira, casca, galhos e folhas) são determinados e relacionados pela regressão com variáveis dendrométricas.

A análise de regressão é muito útil, pois possibilita descrever a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes para obtenção indireta dessas estimativas, proporcionando assim grande economia de custo e tempo (SCHNEIDER, 1997). Uma das principais razões para o uso da análise de regressão é a dificuldade de se obter dados relativos à produção florestal, devido às dimensões das árvores e dos talhões florestais. Dessa forma, medidas mais fáceis de se auferir com o auxílio de instrumentos, como diâmetro e altura podem ser utilizadas para se chegar a informações como volume ou peso (WEST, 2009).

Dentre as variáveis dendrométricas mensuráveis em uma árvore, o DAP e altura são relativamente fáceis de se obter e constituem medidas indispensáveis para o cálculo de estimativas de biomassa, sendo o DAP a variável independente mais importante no ajuste de equações de regressão, por ser um dado de fácil acesso e normalmente apresentar alta correlação com variáveis independentes como volume e biomassa (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2003). No entanto, a qualidade do ajuste varia de acordo com o compartimento que se quer estimar, pois nem sempre as variáveis medidas têm uma alta correlação com o aquele componente da árvore (LAAR e AKÇA, 2007).

Os principais critérios para avaliação da qualidade dos ajustes para escolha do melhor modelo são o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa (S_{yx}), que pode ser apresentado em valores absolutos ou relativos (%). O primeiro expressa o quanto a variável independente explica as variações da variável dependente, e o segundo mede a dispersão média entre os valores observados e estimados (SCOLFORO, 2005).

Ressalta-se também, que na avaliação dos melhores modelos, além das estatísticas indicadoras da qualidade do ajuste, deve-se avaliar também o comportamento dos resíduos no gráfico de distribuição, pois eles têm uma relação muito forte com a qualidade do ajuste,

sendo possível analisar visualmente as diferenças entre os dados reais e estimados, além de tendências nas estimativas ao longo de toda a amplitude dos dados observados (AHRENS, 1983; CHARNET et al., 2008; SANQUETTA, 2002; SCHNEIDER, 1997).

Para Vanclay (1994) os modelos utilizados na estimativa de biomassa são empíricos e descrevem o comportamento de uma variável resposta, sem identificar ou explicar as causas. No entanto, isso não significa que eles não ofereçam estimativas biologicamente realistas ou que sejam inferiores a modelos fundamentados biologicamente.

3.4. Biomassa florestal e exportação de nutrientes

Um dos principais objetivos do setor florestal é aumentar a produtividades de seus reflorestamentos, portanto, do ponto de vista econômico, a melhor espécie florestal é aquela que produz uma máxima quantidade de biomassa do componente madeira num menor intervalo de tempo com a necessidade mínima do uso de fertilizantes. Porém, a produtividade depende das condições do sítio e das prioridades de alocação de carboidratos que poderão ser alteradas, refletindo na produção final de biomassa e no acúmulo de nutrientes em cada compartimento das árvores (SCHUMACHER e CALDEIRA, 2004).

Quando se explora toda a biomassa produzida acima do solo, deve-se considerar a manutenção da produtividade do sítio que deverá ser comprometida ao longo das rotações, principalmente em solo de baixa fertilidade. Rotações curtas sem a reposição de nutrientes após as colheitas são grandes responsáveis pelo esgotamento do solo na cultura do *Eucalyptus*, pois a quantidade de nutrientes nos galhos, folhas e casca é bastante expressiva (BELLOTE et al., 2008).

De modo geral, em razão da baixa fertilidade dos solos brasileiros, a exportação de grandes quantidades de nutrientes pela colheita florestal ao longo de várias rotações pode levar a uma expressiva redução da capacidade de produção do sítio. Além da colheita da madeira, em alguns casos, outros componentes da árvore, antes considerados resíduos da exploração, também são utilizados. Isso associado a outras práticas silviculturais, como espaçamentos reduzidos e ciclos de corte cada vez menores, pode trazer consequências negativas às produções futuras dos sítios florestais. Portanto, o conhecimento da taxa de exportação desses nutrientes é essencial para a adoção de técnicas de conservação e de

reposição de nutrientes ao sistema (SANTANA et al., 1999; SANTANA et al., 2008; SILVA et al., 1983).

Schumacher e Poggiani (1993), em um estudo sobre produção de biomassa e remoção de macronutrientes em povoamentos de *E. camaldulensis*, *E. grandis* e *E. tolleriana*, constataram que as três espécies apresentaram comportamento semelhante em relação à concentração de nutrientes em diferentes compartimentos. As concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio foram maiores nas folhas, já a concentração de cálcio e magnésio foram maiores na casca, apresentando, de uma maneira geral, a seguinte ordem decrescente de concentração: folhas, galhos, casca e madeira.

Viera et al. (2012) chegaram a um resultado semelhante em um trabalho sobre biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* no Rio Grande do Sul, encontrando uma maior concentração de macro e micronutrientes na folhas, também com exceção do cálcio e o magnésio, onde a maior concentração foi na casca. No entanto, a seguinte ordem de concentração de nutrientes por compartimento foi encontrada: folhas, galhos, madeira e casca.

Com relação à quantidade total de nutrientes encontrado na biomassa, Freitas et al. (2004), em estudo realizado com *E. grandis*, encontraram, em média, 25,7% do total de nutrientes nas folhas e galhos das árvores, enquanto a casca e a madeira do fuste acumularam 74,3%.

A quantidade de nutrientes exportados do sítio é determinada pela intensidade da colheita florestal, ou seja, quanto da biomassa total produzida está sendo explorada. A exploração menos intensiva e o retorno dos resíduos após a colheita pode minimizar o impacto da exportação de nutrientes na fertilidade do solo dos sítios florestais. De acordo com Santana et al. (2008), na exploração do fuste com casca de plantios de eucalipto aos seis anos e meio de idade, cerca de 50% do nitrogênio, 56% do fósforo, 73% do cálcio e 61% do magnésio da biomassa acima do solo são exportados. Esses percentuais podem ser significativamente reduzidos com a prática do descascamento das árvores no campo, tendo um impacto relevante principalmente em solos de baixa fertilidade.

Santana et al. (1999) encontram em um trabalho realizado com *E. grandis* e *E. saligna* um conteúdo de nutrientes na copa e na casca que representa respectivamente, 68 e 78% de cálcio, 70 e 74% de magnésio, 57 e 62% de fósforo, 48 e 46% de nitrogênio e 45 e 44% de potássio para o total de nutrientes encontrados na biomassa acima do solo. Caso a colheita se

restringa apenas à madeira, a exportação de nutrientes, principalmente do cálcio e do magnésio, seria substancialmente reduzida, evitando uma deficiência que limitaria a produtividade ao longo dos ciclos de corte. No caso da copa, ela normalmente apresenta um pequeno percentual em relação à biomassa total, porém ela possui um alto teor de nutrientes, o que a torna o componente com maior potencial de ciclagem de nutrientes (BELLOTE et al., 1980; SCHUMCHER e CALDEIRA, 2001).

Freitas et al. (2004), em um estudo realizado com *Eucalyptus grandis* aos nove anos de idade, encontraram uma diferença significativa na quantidade de nutrientes exportados na colheita do fuste com e sem casca. No caso no nitrogênio, com a remoção da casca, a exportação cairia de 70 para 21%, para o fósforo de 75 para 24%, para o potássio de 81 para 63%, para o cálcio de 83 para 53% e para o magnésio de 55 para 43% do total de nutrientes retirados pela exploração da biomassa do fuste.

Portanto, a quantificação e distribuição de biomassa e nutrientes nos diferentes compartimentos das árvores em povoamentos florestais, pode contribuir para aplicação de práticas que visam manter a produtividade dos sítios, como: definição da idade e intensidade da colheita, manejo de resíduos da colheita, adubação, preparo do solo, entre outros (SCHUMACHER et al., 2013).

3.5. Sistemas de colheita florestal e exploração de biomassa

Machado et al. (2008) definem a colheita florestal como o conjunto de operações que visa preparar e extrair a madeira até o local de transporte, por meio de técnicas e padrões estabelecidos, com o objetivo de transformá-la em produto final. Já os sistemas de colheita podem ser definidos como o conjunto de atividades integradas que permitem o fluxo constante de madeira, com a máxima utilização dos equipamentos; podendo variar de acordo com diversos fatores, como: topografia do terreno, uso final da madeira, equipamentos e recursos disponíveis.

De acordo com Malinovski et al. (2002), existem cinco sistemas de colheita de madeira com relação à forma de extração da matéria-prima:

- Sistema de tora curta (*Cut-to-length*);
- Sistema de tora longa (*Tree-length*);
- Sistema de árvores inteiras (*Full-tree*);

- Sistema de árvores completas (*Whole-tree*);
- Sistema de cavaqueamento (*Chipping*).

3.5.1. Sistema de tora curta (*Cut-to-length*)

É o sistema de colheita mais antigo utilizado no Brasil e o mais utilizado nos países escandinavos. Todos os trabalhos realizados após o corte (desgalhamento, destopo e traçamento) são realizados no campo, sendo opcional a operação de descascamento da madeira (MALINOVSKI et al., 2002; ZAGONEL, 2005). Dessa forma, a biomassa comercial do fuste é explorada com ou sem casca, dependendo das práticas de manejo ou do tipo de matéria-prima utilizada pela indústria.

3.5.2. Sistema de tora longa (*Tree-length*)

Nesse sistema o desgalhamento e o destopo da árvore são feitos no local do corte, e as demais operações de traçamento e descascamento eventual são realizados à beira das estradas dos talhões, ou em pátios antes do processamento. É um sistema muito utilizado em países norte-americanos e adotado principalmente por grandes empresas no Brasil, principalmente no corte raso (MALINOVSKI et al., 2002; SEIXAS, 1983). Da mesma maneira do sistema de toras curtas, a biomassa comercial pode ser explorada com ou sem a casca.

3.5.3. Sistema de árvores inteiras (*Full-tree*)

Essa alternativa de colheita florestal implica em remover do talhão a árvore inteira, porém sem as raízes. Após o corte as árvores são transportadas a outro local, onde ocorre o processamento, e por essa razão esse sistema requer um alto grau de mecanização. No caso do uso da biomassa florestal para energia ele é indicado devido ao potencial do uso da casca, galhos e folhas para esse fim, porém com alto grau de restrição ambiental em virtude da grande quantidade de nutrientes exportados (MALINOVSKI et al., 2002).

3.5.4. Sistema de cavaqueamento (*Chipping*)

Segundo Sant'anna (2002), o cavaqueamento consiste em transformar toda a árvore ou parte dela em cavacos (*chips*) por meio de equipamentos chamados de picadores.

De acordo com o mesmo autor existem três métodos de cavaqueamento:

- Cavaqueamento verde: madeira, casca, galhos e folhas;
- Cavaqueamento marrom: madeira com casca;
- Cavaqueamento branco: madeira sem casca e sem galhos e folhas.

Por esses métodos a quantidade de biomassa explorada é semelhante àquela retirada pelos sistemas de toras curtas e longas, e também, pelo sistema de árvores inteiras.

3.5.5. Sistema de árvores completas (*Whole-tree*)

Nesse sistema toda a árvore, inclusive as raízes, é retirada do talhão. Somente quando as raízes possuem alto valor comercial há a viabilidade da utilização desse sistema (MALINOVSKI et al., 2002), porém com maiores restrições em relação ao sistema de árvores inteiras, pois extrai mais um compartimento da árvore que normalmente ficava na área explorada juntamente com o toco, aumentando dessa forma a quantidade de nutrientes exportados pela colheita.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização do experimento

A área de estudo localiza-se no Município de Guarapuava, entre as coordenadas do sistema UTM 450030 E a 450199 E e 7192169 N a 7192253 N, Fuso 22 J, Datum SAD 69 Brasil (Figura 1).

O município situa-se no Centro-Sul do Estado do Paraná, no terceiro planalto paranaense, também chamado de Planalto de Guarapuava, a 1120 m de altitude. Localiza-se à 260 km de distância da capital, Curitiba.

O clima, de acordo com a Classificação Climática de Köppen é Cfb, ou seja, subtropical mesotérmico úmido, com temperatura média no mês mais quente inferior a 22°C e no mês mais frio inferior a 14°C, com precipitação média anual de aproximadamente 1700 mm, não apresentando estação seca definida (IAPAR, 2000). O Solo da área do experimento é classificado como Latossolo Bruno de textura argilosa (Michalovicz, 2012).

O plantio experimental de *Eucalyptus benthamii* com seis anos de idade foi instalado pela equipe do Laboratório de Ciências Florestais e Forrageiras na área do Campus Universitário CEDETEG, ao fim do ano de 2006, com mudas seminais da cultivar EBC 06 Candói, provenientes do viveiro da Reflorestadora Golden Tree Ltda.

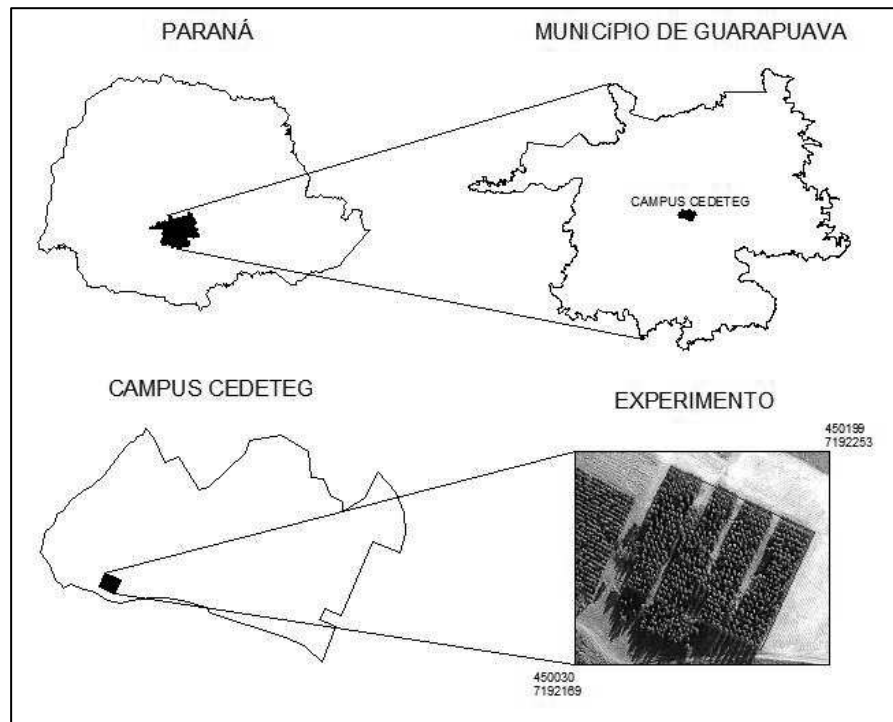


Figura 1. Localização do experimento com *Eucalyptus benthamii* no Campus Universitário CEDETEG, no Município de Guarapuava - PR.

O objetivo do experimento foi observar o comportamento da espécie frente a quatro diferentes espaçamentos de plantio (Tabela 1). Para tanto, utilizou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições e vinte árvores por repetição, sendo cada repetição isolada com duas linhas de árvores de bordadura (Figura 2).

Tabela 1. Espaçamentos utilizados no plantio experimental, área vital e número de árvores por hectare.

Tratamento	Espaçamento (m)	Área vital (m ²)	Árvores ha ⁻¹
1	3x2	6	1666
2	3x3	9	1111
3	4x3	12	833
4	4x4	16	625

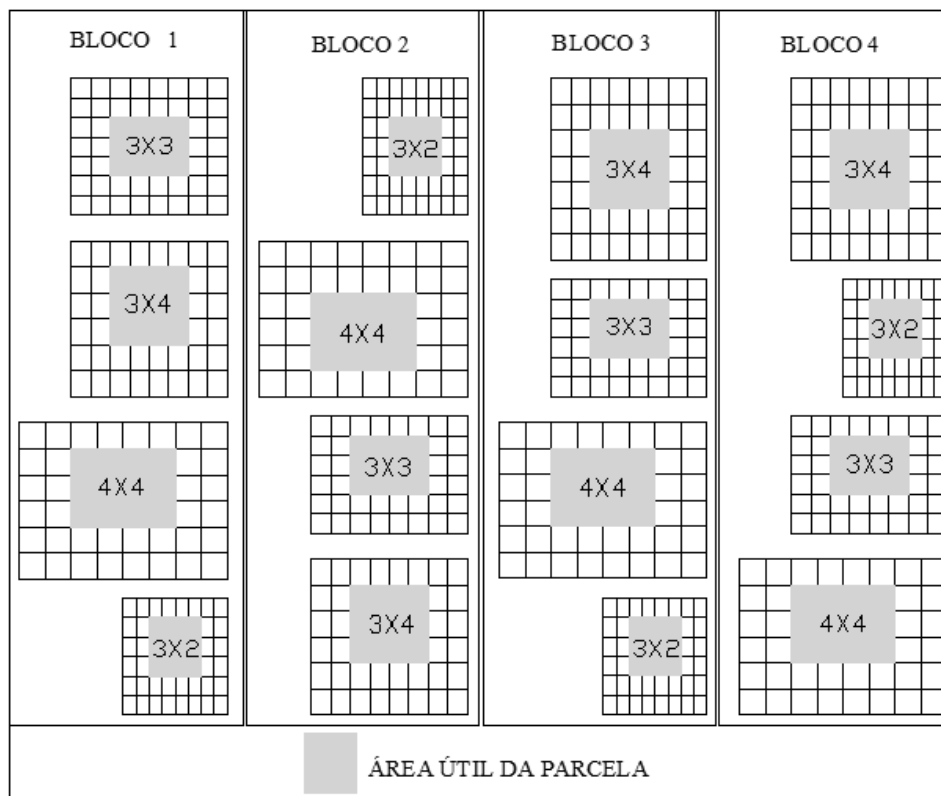


Figura 2. Croqui do experimento com *Eucalyptus benthamii* com a distribuição dos tratamentos dentro dos blocos.

Utilizou-se o sistema de cultivo mínimo no preparo do solo, com o coveamento realizado por meio de um motocoveador. Realizou-se adubação de cobertura após o plantio, utilizando-se adubação com NPK na formulação 04-14-08, com a aplicação feita em covetas laterais, na dosagem de 200 g planta⁻¹. Os tratos culturais empregados foram o coroamento das mudas para controle de mato-competição, aos três e seis meses após o plantio, e a desrama, realizada aos dois anos de idade até a altura de dois metros.

4.2. Amostragem e coleta de dados

Os dados foram coletados em janeiro de 2013 por meio da medição da circunferência à altura do peito (CAP) de todas as árvores úteis do experimento com o auxílio de uma fita métrica. Após a obtenção das circunferências, todos os dados foram convertidos para diâmetro à altura do peito (DAP) a partir da relação CAP/π .

Para a amostragem e seleção das árvores destinadas para quantificação da biomassa, os diâmetros foram agrupados em classes diamétricas, utilizando-se para tanto a Fórmula (1) proposta por Sturges na determinação do número de classes.

$$n_c = 1 + 3,322 \log n \quad (1)$$

Em que:

n_c – quantidade de classes de diâmetro;

\log – logaritmo decimal;

n – quantidade de observações (número de árvores).

Já o intervalo das classes de diâmetro foi obtido pela Fórmula (02).

$$I_c = \frac{d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n}}{n_c} \quad (2)$$

Em que:

I_c – intervalo de classe;

$d_{m\acute{a}x}$ – diâmetro máximo;

$d_{m\acute{i}n}$ – diâmetro mínimo;

n_c – número de classes.

A partir dessa classificação, foram selecionadas árvores em todas as classes de diâmetro para determinação da altura, biomassa total e de seus compartimentos (madeira, casca, galhos e folhas), totalizando 78 árvores.

4.3. Estimativa da biomassa

Para determinação da biomassa total e nos diferentes compartimentos da árvore, foi utilizado o método direto, no qual as árvores são cortadas e seus compartimentos pesados (SANQUETA, 2002). Para esse trabalho foi determinada a biomassa total e dos compartimentos: madeira, casca, galhos e folhas.

Depois de derrubar cada indivíduo selecionado, os componentes da biomassa foram separados em fuste (madeira com casca) e copa. Esses foram pesados separadamente utilizando-se um tripé e um dinamômetro eletrônico com capacidade para 500 kg, obtendo-se a biomassa fresca total da árvore e para cada componente (Figura 3).

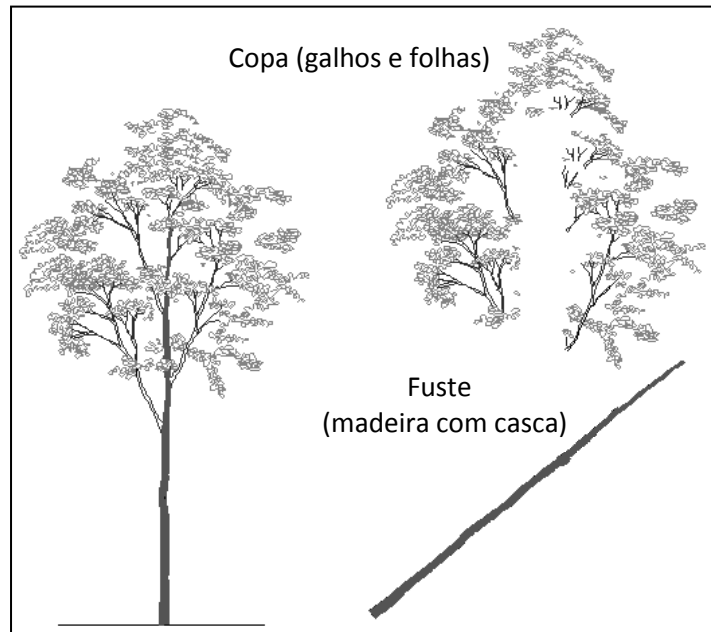


Figura 3. Compartimentos das árvores de *Eucalyptus benthamii* que tiveram sua biomassa fresca pesada em campo.

Posteriormente, amostras foram retiradas para a determinação do teor de umidade em cada componente. Para o fuste (madeira com casca), foram retirados discos de aproximadamente cinco centímetros de espessura nas seguintes alturas: base (0,10 m), DAP (1,30 m), 25%, 50% e 75% da altura total da árvore (Figura 4). Os discos ainda foram separados em madeira e casca, para obter o peso de cada componente.

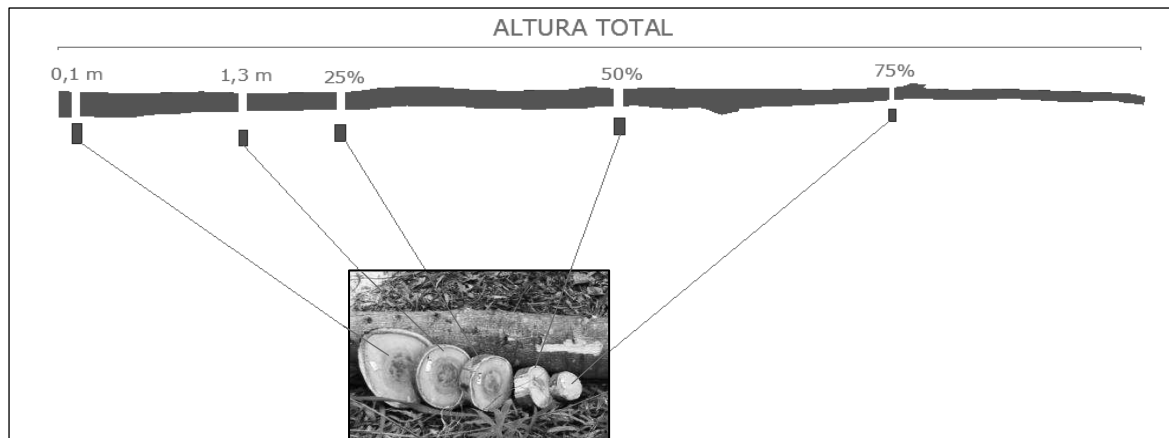


Figura 4. Localização das amostras retiradas para determinação do teor de umidade da madeira e da casca das árvores de *Eucalyptus benthamii*.

Para os galhos e folhas foi retirada uma amostra do terço médio da copa de todas as árvores selecionadas. Logo após, as folhas foram retiradas dos galhos e pesadas separadamente para avaliação da biomassa nos dois compartimentos (Figura 5).

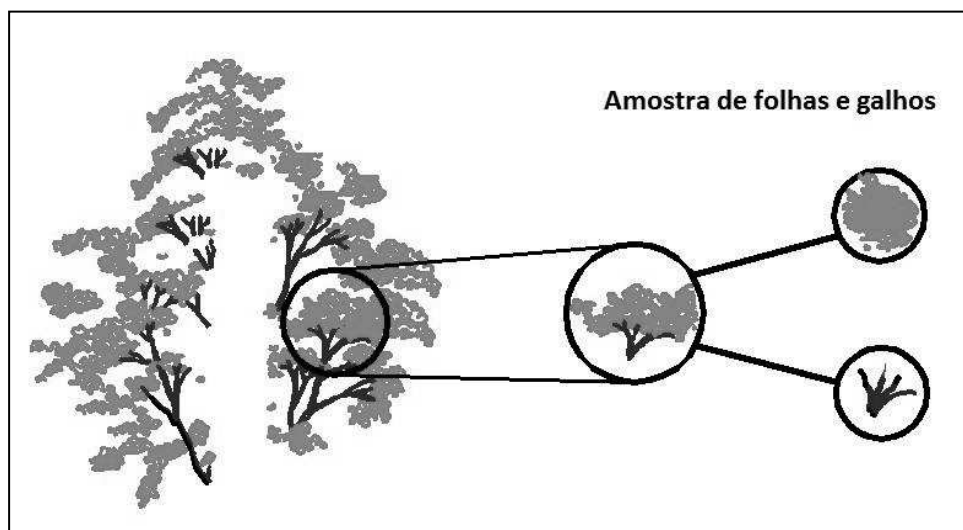


Figura 5. Localização das amostras retiradas para determinação do teor de umidade de galhos e folhas das árvores de *Eucalyptus benthamii*.

Todas as amostras foram secadas em estufa de circulação de ar à 65°C e pesadas a cada dois dias até obter peso constante para determinação do peso seco para cada compartimento.

A estimativa da biomassa seca total e dos compartimentos das demais árvores foi obtida por meio dos modelos matemáticos propostos na Tabela 2. Esses já foram amplamente empregados com o mesmo objetivo em diferentes espécies de eucalipto (BERGER, 2000; FREITAS et al., 2004; MELLO e GONÇALVES, 2008; SANTANA et al., 1999; SILVA et al., 2009; SCHUMACHER e CALDEIRA, 2001; SCHUMACHER e CALDEIRA, 2004; VIEIRA, 2012).

Os modelos foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados com o auxílio do pacote *Microsoft Office Excel* 2010, utilizando-se para estimativa da biomassa total e por compartimento, as variáveis independentes: diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (H) e a variável combinada DAP^2H .

Tabela 2. Modelos matemáticos utilizados para estimativa da biomassa total e dos compartimentos de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nº do modelo	Modelo
1	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP$
2	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP + b_2 \ln H$
3	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP^2H$

Em que:

B= biomassa seca;

b_0, b_1 = coeficientes estimados pela regressão;

DAP = diâmetro à altura do peito (cm);

H = altura total (m);

\ln = logaritmo neperiano.

A biomassa total e dos compartimentos por unidade de área foi obtida por meio da relação entre a área das parcelas em cada espaçamento e a área de um hectare.

4.4. Estimativa das alturas

Com base nas alturas reais, obtidas das 78 árvores derrubadas, ajustou-se uma relação hipsométrica para estimativa das demais alturas (APÊNDICE I). O Modelo (1) utilizado foi o de Curtis na sua forma linearizada, ajustado também pelo método dos mínimos quadrados.

$$\ln H = b_0 + b_1 \ln DAP \quad (1)$$

em que:

H = altura total (m);

DAP = diâmetro à altura do peito (cm);

b_0 , b_1 = coeficientes estimados pela regressão;

ln = logaritmo neperiano.

4.5. Determinação do teor de nutrientes

Para a determinação do teor de nutrientes nos diferentes compartimentos das árvores, foram utilizadas somente amostras da árvore mediana das cinco classes de maior frequência em cada um dos quatro espaçamentos de plantio, totalizando 20 árvores. As amostras foram moídas em moinho do tipo Wiley e submetidas a análises químicas para obtenção dos teores dos nutrientes com base na metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) para análises de tecidos vegetais. Os macronutrientes determinados foram: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); e os micronutrientes foram: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn).

Para casca, galhos e folhas, o total de cada amostra seca das 20 árvores selecionadas foi preparado para as análises. No caso da casca, onde havia cinco pontos de amostragem em cada árvore, uma amostra composta foi preparada por meio da mistura do material moído. O mesmo procedimento foi realizado para preparar uma amostra composta da madeira, porém apenas 10% do peso seco de cada disco foi retirado e preparado para as análises.

Para quantificar os nutrientes em cada tratamento, foi multiplicado o teor de cada nutriente pela respectiva biomassa estimada em cada compartimento.

4.6. Análises estatísticas

Os dados e os resultados médios de biomassa seca de cada tratamento foram submetidos ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e de homogeneidade de

variâncias de Bartlett ao nível de 5% de probabilidade de erro, visando assegurar as condicionantes necessárias para a realização da análise de variância (*ANOVA*).

Em seguida, com auxílio do software estatístico ASSISTAT versão 7.6 beta (SILVA, 2012), foi realizada a *ANOVA* (APÊNDICE II) e o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro, com o objetivo de avaliar o efeito dos diferentes espaçamentos de plantio sobre a biomassa total e por compartimento.

Para a avaliação da qualidade e precisão dos modelos matemáticos utilizados para estimar a biomassa das árvores, foram usados os critérios: coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj); erro padrão da estimativa absoluto e em porcentagem (Syx e Syx%); distribuição gráfica dos resíduos.

Em razão do uso de modelos linearizados para estimativa de biomassa e altura, os resultados foram multiplicados pelo fator de correção de Meyer, obtido pela Fórmula (3)

$$\text{Fator de Meyer} = e^{0,5 \text{ Syx}^2} \quad (3)$$

Em que:

e – base dos logaritmos neperianos;

Syx^2 – quadrado do erro padrão da estimativa.

Quanto às avaliações do teor de micronutrientes e macronutrientes, após a homogeneidade da variância e a normalidade terem sido comprovadas, os dados foram relacionados estatisticamente por meio da *ANOVA*, no delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 4x4 (espaçamentos x compartimentos), totalizando 16 tratamentos com cinco repetições. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ajuste dos modelos para estimativa da biomassa seca

5.1.1. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca total

Como pode ser visualizado na Tabela 3, todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios para estimativa da biomassa seca total, obtendo coeficientes de determinação maiores (R^2) que 0,9 e erro padrão da estimativa (Syx%) menores que 12% e com uma variação de 1,17%. Essa variação no Syx% dos modelos incluídos nesse estudo pode ser considerada aceitável, sendo necessário também observar a distribuição gráfica dos resíduos para uma melhor avaliação. Nessa avaliação, ficou claro que no modelo 1 há uma maior dispersão dos pontos no gráfico em relação aos outros dois modelos (Figura 6).

Os modelos 2 e 3 apresentaram os melhores valores para os critérios avaliados, chegando a números muito próximos e distribuição gráfica dos resíduos muito semelhantes (Figura 6). Mello e Gonçalves (2008), utilizando as mesmas equações para estimar biomassa do fuste em *Eucalyptus grandis*, encontraram valores muito próximos para o R^2 e Syx. Porém, houveram resultados diferentes para a qualidade dos ajustes nas estimativas de casca, galhos, folhas e raízes.

Tabela 3. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca total de árvores *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Modelo	Coeficientes			R^2 ajust.	Syx (kg)	Syx (%)	
	b_0	b_1	b_2				
1	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP$	-2,283	2,488	–	0,976	16,47	11,08
2	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP + b_2 \ln H$	-3,635	1,929	0,940	0,986	14,73	9,91
3	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP^2 H$	-3,661	0,959	–	0,986	14,78	9,95

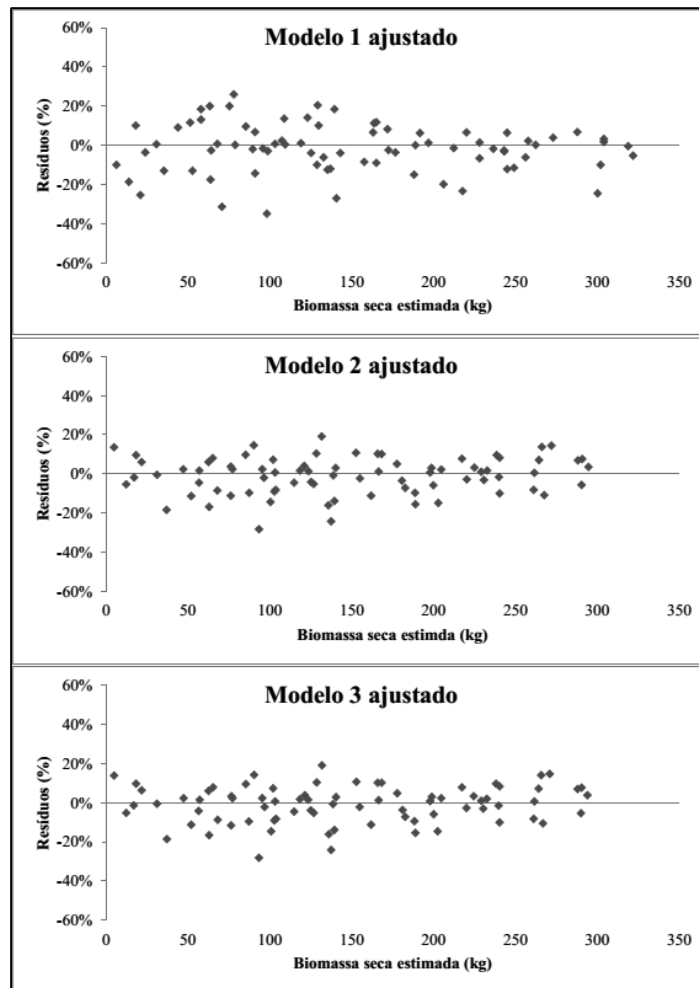


Figura 6. Distribuição dos resíduos para biomassa seca total para os três modelos ajustados.

5.1.2. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de madeira

Da mesma forma que o ajuste da biomassa total, os modelos 2 e 3 apresentaram resultados estatísticos muito próximos e melhores do que o modelo 1 (Tabela 4), provavelmente em razão do uso de duas variáveis dendrométricas (DAP e H), pois essas têm uma relação mais consistente com as dimensões do fuste da árvore e, portanto, com a sua biomassa. A distribuição gráfica dos resíduos pode ser considerada homogênea para os três modelos, no entanto os pontos no gráfico ficaram menos agrupados para o modelo 1 (Figura 7).

Tabela 4. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca da madeira de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

.Modelo	Coeficientes			R ² ajust.	Syx (kg)	Syx (%)	
	b ₀	b ₁	b ₂				
1	$\ln B = b_0 + b_1 \ln \text{DAP}$	-2,519	2,471	–	0,965	15,45	13,87
2	$\ln B = b_0 + b_1 \ln \text{DAP} + b_2 \ln H$	-4,355	1,712	1,276	0,983	11,88	10,67
3	$\ln B = b_0 + b_1 \ln \text{DAP}^2 H$	-3,919	0,956	–	0,982	11,90	10,69

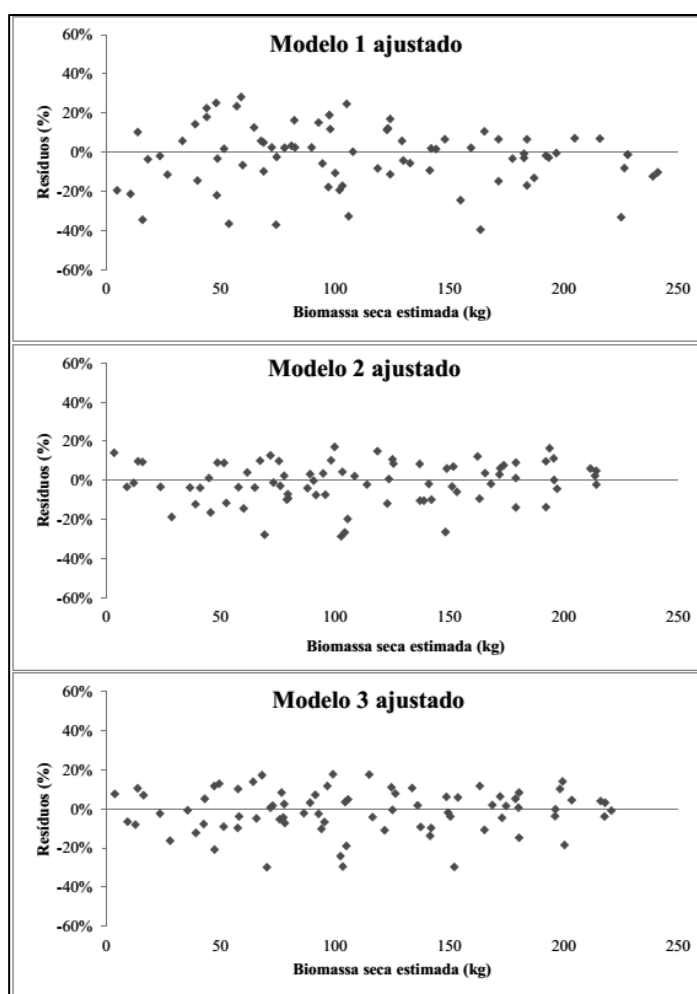


Figura 7. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de madeira para os três modelos ajustados.

5.1.3. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de casca

Para a estimativa da biomassa seca da casca do fuste, os três modelos ajustados podem ser considerados satisfatórios, com R² maiores que 0,9, Syx% menores que 15% (Tabela 5) e

distribuição gráfica dos resíduos muito semelhantes (Figura 8). No entanto, os modelos 1 e 2 foram um pouco melhores que o modelo 3, que utiliza a variável combinada DAP^2H .

Vieira et al. (2012), testando vários modelos para estimativa de biomassa em um plantio híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, encontraram o melhor resultado para estimativa da casca utilizando o modelo 1 ajustado para esse trabalho, mostrando que apenas a variável independente DAP pode ser suficiente para explicar a variação da biomassa da casca em árvores de eucalipto. Saidelles (2005), também utilizando o mesmo modelo, encontrou resultados semelhantes para estimativa da biomassa da casca em um povoamento de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.).

Tabela 5. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca da casca de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

	Modelo	Coeficientes			R ² ajust.	Syx (kg)	Syx (%)
		b ₀	b ₁	b ₂			
1	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP$	-3,469	2,192	–	0,962	2,70	14,34
2	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP + b_2 \ln H$	-3,991	1,968	0,369	0,960	2,73	14,47
3	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP^2H$	-4,642	0,840	–	0,960	2,90	15,39

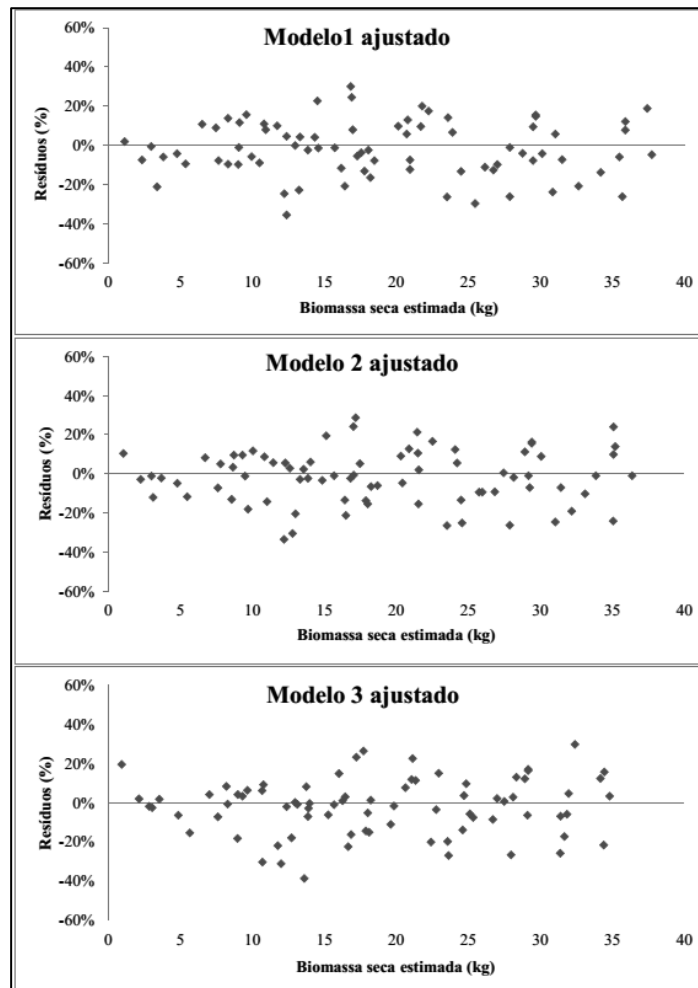


Figura 8. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de casca para os três modelos ajustados.

5.1.4. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de galhos

De modo geral, as três equações utilizadas para estimativa da biomassa seca de galhos apresentaram um R^2 maior que 0,9, porém um alto $Syx\%$ (Tabela 6). O modelo 3, que utiliza a variável combinada DAP^2H , foi o que apresentou os resultados menos satisfatórios, com R^2 de 0,916 e $Syx\%$ de 32,91%, além de uma maior dispersão dos resíduos no gráfico. No entanto, avaliando a distribuição gráfica dos resíduos de todos os modelos, pode-se observar uma grande amplitude na distribuição dos pontos, com uma tendência em superestimar os valores da biomassa encontrada (Figura 9).

Em razão da forma irregular da copa (galhos e folhas), existe uma dificuldade em encontrar um modelo adequado para explicar sua correlação com o DAP e a altura das

árvores. As dimensões da copa são muito influenciadas por fatores ambientais como: falhas no plantio, dominância ou localização do povoamento (COUTO et al., 1984; SILVA, 1996).

Giongo et al. (2011), ajustando modelos com as variáveis independentes DAP e/ou altura para avaliação da biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm, encontraram, na maioria das vezes, R^2 menores que 0,8 e Syx% de até 71,26% para estimativa de biomassa seca de galhos e folhas. Baggio et al. (1995), apesar de encontrar bons coeficientes de determinação ($R^2 > 0,8$) testando três modelos na estimativa de biomassa de bracinga (*Mimosa scabrella* Benth.), chegou a um erro padrão de estimativa médio de 48% para biomassa seca de galhos.

Tabela 6. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca de galhos de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

	Modelo	Coeficientes			R ² ajust.	Syx (kg)	Syx (%)
		b ₀	b ₁	b ₂			
1	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP$	-6,592	3,060	–	0,935	3,09	26,55
2	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP + b_2 \ln H$	-5,783	3,394	-0,562	0,937	2,80	24,13
3	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP^2 H$	-8,129	1,161	–	0,916	3,83	32,91

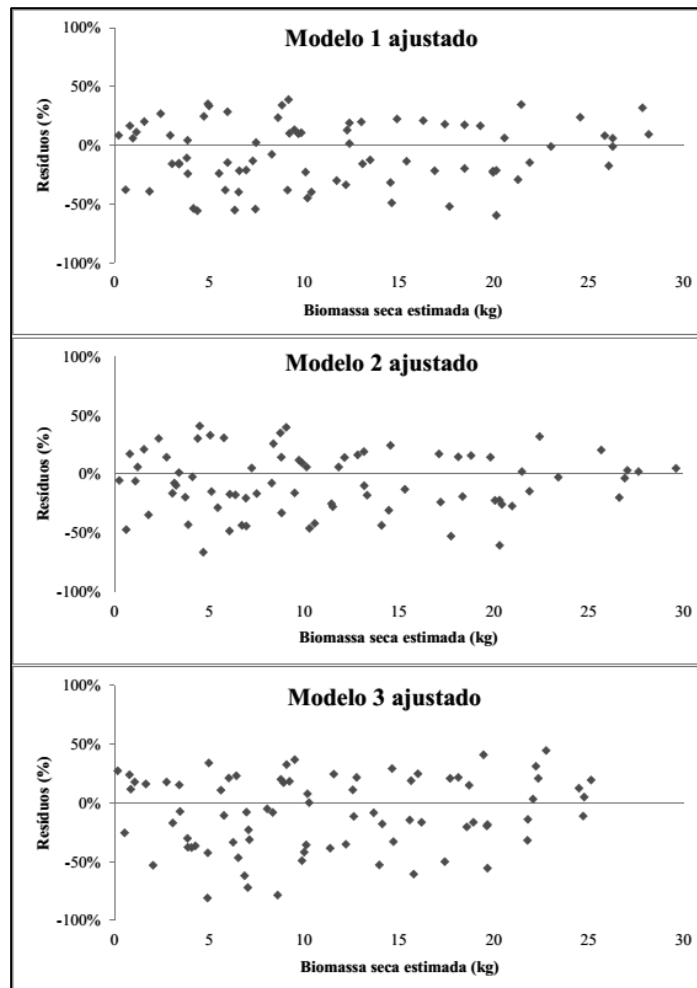


Figura 9. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de galhos para os três modelos ajustados.

5.1.5. Ajuste dos modelos para a estimativa da biomassa seca de folhas

Para estimativa da biomassa seca das folhas os modelos ajustados obtiveram estatísticas semelhantes ao da biomassa seca dos galhos, apresentando bons R^2 e altos $Syx\%$, com o modelo 3 sendo também o menos satisfatório (Tabela 7).

Avaliando a distribuição gráfica dos resíduos de todos os modelos, observa-se uma grande amplitude na distribuição dos pontos no gráfico, com uma tendência a superestimar os valores da biomassa encontrada (Figura 10).

Silva (1996) encontrou no ajuste de modelos matemáticos para estimativa de Biomassa de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos 7 anos de idade, um R^2 de 0,958 e um $Syx\%$ de 26,93% para folhas, utilizando as variáveis independentes DAP e altura.

Para uma melhor estimativa dos componentes da copa (galhos e folhas), outras variáveis além de DAP e altura devem ser utilizadas, como por exemplo, o diâmetro e a altura do início da copa (BAGGIO et al., 1995; GIONGO et al., 2011; VIANA et al., 2009). No entanto elas gerariam modelos menos práticos em razão de uma maior dificuldade na obtenção dessas variáveis.

Tabela 7. Resultado do ajuste dos modelos para biomassa seca de folhas de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

	.Modelo	Coeficientes			R ² ajust.	Syx (kg)	Syx (%)
		b ₀	b ₁	b ₂			
1	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP$	-6,554	2,866	–	0,922	1,49	22,01
2	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP + b_2 \ln H$	-6,101	3,053	-0,315	0,921	1,47	21,72
3	$\ln B = b_0 + b_1 \ln DAP^2 H$	-8,014	1,090	–	0,906	1,72	25,37

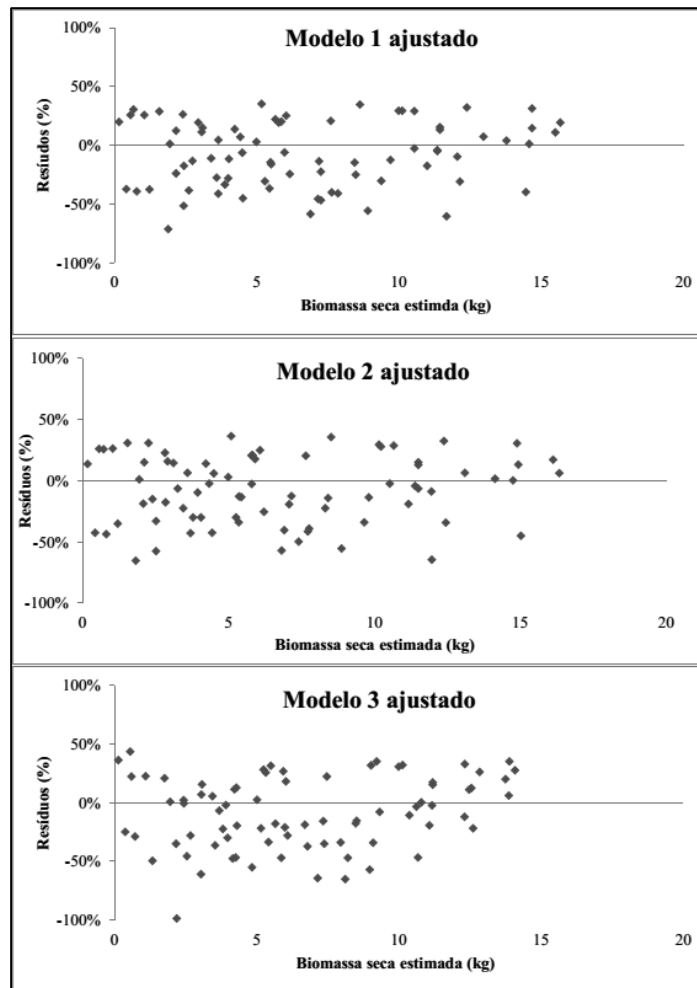


Figura 10. Distribuição dos resíduos para biomassa seca de folhas para os três modelos ajustados.

5.2. Estimativa da produção da biomassa total e dos compartimentos

Com base nos critérios utilizados para avaliação dos ajustes dos modelos, o modelo 2 ajustado foi considerado o melhor para estimativa da biomassa total e dos compartimentos. O modelo ajustado selecionado apresentou elevados coeficientes de determinação e baixos erros padrão, com exceção de galhos e folhas (Tabela 8). Porém, para esses dois compartimentos, nenhum dos modelos ajustados conseguiu alcançar resultados com maior precisão.

Tabela 8. Resultados do ajuste do modelo 2 utilizado para estimar a biomassa seca total e dos compartimentos de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Biomassa	Coeficientes			R ² ajust.	Syx (kg)	Syx (%)
	b ₀	b ₁	b ₂			
Total	-3,635	1,929	0,940	0,986	14,73	9,91
Madeira	-4,355	1,712	1,276	0,983	11,88	10,67
Casca	-3,991	1,968	0,369	0,960	2,73	14,47
Galhos	-5,783	3,394	-0,562	0,937	2,80	24,13
Folhas	-6,101	3,053	-0,315	0,921	1,47	21,72

Quanto à produção, é possível observar uma relação direta entre a quantidade de biomassa seca e o espaçamento de plantio, com o tratamento 1 apresentando a maior quantidade de biomassa seca total e por compartimento (Tabela 9). Já os tratamentos 2, 3 e 4, produziram respectivamente 20%, 28% e 41% menos matéria seca total por hectare em relação ao tratamento 1. Essa tendência ocorreu também para a biomassa seca de madeira e casca, apresentando resultados muito próximos de redução de biomassa com o aumento do espaçamento.

No entanto, de acordo com o teste de comparação de médias de Tukey ($P < 0,05$), não houve diferença estatística entre o tratamento 2 e os demais tratamentos. A diferença estatística somente ocorreu entre o tratamento 1 e os tratamentos 3 e 4 para a biomassa total e também para os compartimentos madeira e casca.

A mesma relação ocorre para os compartimentos galhos e folhas, com uma redução da biomassa seca produzida à medida que o espaçamento entre plantas fica maior. No entanto para esses compartimentos, não houve diferença estatística entre os tratamentos de acordo com o teste de comparação de médias de Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 9. Produção de biomassa total e por compartimento nos diferentes tratamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Tratamento	Espaçamento (m)	Biomassa total (Mg ha ⁻¹)	Compartimentos (Mg ha ⁻¹)			
			madeira	casca	galhos	folhas
1	3x2	184,2 a	139,7 a	23,8 a	12,7 a	7,9 a
2	3x3	147,3 ab (-20%)	111,2 ab (-20%)	18,7 ab (-21%)	10,9 a (-14%)	6,5 a (-18%)
3	4x3	133,5 b (-28%)	99,7 b (-29%)	16,7 b (-30%)	10,9 a (-14%)	6,2 a (-21%)
4	4x4	109,3 b (-41%)	80,5 b (-42%)	13,6 b (-43%)	9,8 a (-22%)	5,4 a (-31%)

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Valores entre parênteses correspondem à redução percentual de biomassa produzida em relação ao tratamento 1.

A maior produção de biomassa seca total foi encontrada no tratamento 1, que corresponde ao espaçamento 3x2, com 184,2 Mg ha⁻¹, seguido dos tratamentos 2, 3 e 4, com 147,3, 133,5 e 109,3 Mg ha⁻¹, respectivamente. Santana et al. (1999), estudando as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* de três procedências aos seis anos e meio de idade em diferentes localidades, plantadas com um espaçamento de 3x1,8 m, obtiveram produção de biomassa seca total para uma das procedências de *Eucalyptus grandis* de 188 Mg ha⁻¹. No entanto, a produção total obtida nos diferentes tratamentos avaliados oscilou de 92 a 234 Mg ha⁻¹. Essa diferença foi atribuída às condições dos sítios onde os experimentos foram implantados e à procedência da espécie utilizada, com uma variação de até 35% na produção de biomassa seca entre procedências para um mesmo sítio, e de até 58% entre sítios para a mesma procedência. Isso evidencia a importância do conhecimento desses fatores antes da implantação de povoamentos florestais.

Goulart et al. (2003), avaliando um experimento com *Eucalyptus grandis* sob 12 diferentes espaçamentos de plantio aos 10 anos de idade, observaram uma redução da biomassa seca de madeira produzida com o aumento da distância entre as plantas, variando de 91 Mg ha⁻¹ para um espaçamento de 4x3, até 272 Mg ha⁻¹ para o espaçamento 1,5x1.

Já Müller et al. (2005), estudando o comportamento de clones de eucalipto sob diferentes densidades de plantio aos dois anos de idade, encontraram resultados semelhantes, com uma redução de produção de matéria seca de 50% entre os espaçamentos 3x0,5 e 3x3,

indicando que em povoamentos jovens essa diferença na produção fica ainda mais evidente. No entanto a participação de cada compartimento em relação à biomassa total pode ser alterada com o aumento da idade.

Paulino (2012), em um estudo sobre a influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, concluiu que o efeito do espaçamento aumentou até os dois anos de idade e que, a partir de quatro anos, as diferenças na produção de biomassa foram diminuindo, tendendo a se estabilizar.

Morais (2006), em um trabalho realizado com clones de eucalipto sob diferentes espaçamentos, observou que no menor espaçamento avaliado (3x2) houve o início do processo de estagnação de crescimento aos nove anos. Em espaçamentos com área vital maior que $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$, para um mesmo sítio, o início desse processo acontece após os dez anos em razão de uma menor densidade de indivíduos por unidade de área. Isso vai de encontro à lei da produção final constante, onde a produção de biomassa por unidade de área é compensada com o tempo, pela baixa ou alta densidade de plantas (BEGON et al., 2006; WEINER e FRECKLETON, 2010).

Portanto, a diferença de produção entre um espaçamento adensado e um amplo diminui com o avanço da idade do povoamento. Isso ocorre devido à maior competição entre as árvores plantadas em espaçamento reduzido, onde a estabilização do acúmulo de biomassa ocorre em um menor período de tempo em relação a espaçamentos mais amplos.

Os compartimentos galhos e folhas apresentaram menores diferenças de produção de biomassa seca por hectare. Isso ocorreu em razão de um maior espaço disponível para o desenvolvimento da copa nos tratamentos que apresentam maior área vital por planta, compensando o número inferior de árvores. Para o compartimento galhos, o tratamento 1 produziu $12,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, e os tratamentos 2, 3 e 4 produziram respectivamente $10,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, $10,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $9,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, o que corresponde a uma redução de produção de biomassa de 14%, 14% e 22%. Já para o compartimento folhas, a produção de biomassa do tratamento 1 foi de $7,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, seguido dos tratamentos 2, 3 e 4, com $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, $6,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $5,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, com uma redução de 18%, 21% e 31% do menor para o maior espaçamento.

Bernardo et al. (1998), avaliando o desenvolvimento de *Eucalyptus pellita* F. Muell nos espaçamentos 3x1,5, 3x3 e 4x3, não encontraram diferenças estatísticas entre a produção de galhos e folhas entre os tratamentos aos três anos e meio de idade, aplicando o mesmo teste

de comparação de médias, apesar de ter ficado evidente o aumento da biomassa com a diminuição de espaçamento de plantio.

No entanto, Silva (2005) estudando o efeito do espaçamento na biomassa do fuste de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade, encontrou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos 6, 10,5 e 15 m² planta⁻¹, aplicando o mesmo teste de comparação de médias.

5.2.1. Produção média de biomassa seca por árvore e compartimentos

Foi possível observar que nos menores espaçamentos houve uma maior produção de biomassa seca por unidade de área. No entanto, quando avaliadas as dimensões das plantas, os maiores espaçamentos produziram as maiores árvores.

Como pode ser visualizada na Tabela 10, a diferença nas médias da biomassa individual é muito expressiva entre os tratamentos, tanto para biomassa total, como para os seus compartimentos.

No entanto, o teste de comparação de médias de Tukey ($P < 0,05$), dividiu os tratamentos em dois grupos para biomassa total e dos compartimentos madeira e casca, com os tratamentos 1 e 2 não apresentando diferenças estatísticas entre si, assim como os tratamentos 3 e 4. Já para os compartimentos galhos e folhas não houve diferenças estatísticas significativas apenas entre os tratamentos 1 e 2.

Tabela 10. Produção de biomassa seca média por árvore e compartimento para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade em cada tratamento analisado.

Tratamento	Espaçamento (m)	Total (kg árvore ⁻¹)	Compartimentos (kg árvore ⁻¹)			
			madeira	casca	galhos	folhas
1	3x2	117,9 a	89,5 a	15,2 a	8,2 a	5,0 a
2	3x3	143,3 a (22%)	108,2 a (21%)	18,2 a (20%)	10,6 a (31%)	6,3 a (26%)
3	4x3	178,0 b (51%)	133,0 b (49%)	22,3 b (47%)	14,5 b (79%)	8,2 b (64%)
4	4x4	205,3 b (74%)	151,2 b (69%)	25,5 b (68%)	18,4 c (127%)	10,2 c (104%)

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Valores entre parênteses correspondem ao aumento percentual de biomassa em relação ao tratamento 1.

A produção média de biomassa seca total por árvore para os tratamentos 1, 2, 3 e 4 foi de 117,9 kg árvore⁻¹, 143,3 kg árvore⁻¹, 178,0 kg árvore⁻¹ e 205,3 kg árvore⁻¹ respectivamente. O aumento da produção média de biomassa seca total a partir do tratamento 1 foi de 22%, 51% e 74%. Com o avanço da idade do plantio, nos espaçamentos maiores, a produção de biomassa foi compensada pelo maior crescimento individual, o que significou uma maior produção de biomassa total por árvore e compartimento.

Magalhães et al. (2007), em um estudo com diferentes espécies e clones de eucalipto aos 9,4 anos de idade, nos espaçamentos 3x2, 6x2, 6x3 e 6x4, encontram um incremento na produção média por árvore de 42%, 95% e 117% com o aumento da distância entre plantas. Oliveira Neto et al. (2003) ao estudar o comportamento de *Eucalyptus camaldulensis* aos 32 meses de idade nos espaçamentos 3x2, 3x3, 3x4 e 3x5, encontraram um aumento na produção média individual do menor para o maior espaçamento, de 45%, 77% e 106%.

Para os compartimentos madeira e casca, o aumento na produção média de biomassa segue da mesma maneira, à medida que o espaçamento fica mais amplo. Essa semelhança entre a biomassa total e os compartimentos madeira e casca se dá em razão de que a maior parte da biomassa, produzida na idade do plantio analisado, está localizada no fuste (madeira e casca).

A maior diferença encontrada foi para o compartimento galhos, com um aumento da produção média de biomassa seca por árvore de 31%, 79% e 127% à medida que o espaçamento fica mais amplo, com o tratamento 1 produzindo 8,2 kg árvore⁻¹, o tratamento 2 10,6 kg árvore⁻¹, o tratamento 3 14,5 kg árvore⁻¹ e o tratamento 4 18,4 kg árvore⁻¹. Para o compartimento folhas, a produção foi de 5,0 kg árvore⁻¹, 6,3 kg árvore⁻¹, 8,2 kg árvore⁻¹ e 10,2 kg árvore⁻¹, do menor para o maior espaçamento, com um o aumento de 26%, 64% e 104% em relação ao tratamento 1. Silva (2005), avaliando clones de eucalipto aos seis anos nas densidades de plantio 6, 10,5 e 15 m² árvore⁻¹, encontrou um aumento da produção de biomassa seca da menor para a maior densidade de plantio de 58% e 104% para galhos, e de 71% e 109% para folhas.

Isso confirma que com o aumento do espaçamento ocorre a diminuição da competição intraespecífica, o que disponibiliza, por um maior período de tempo, fatores de produção favoráveis ao desenvolvimento das árvores, deixando-as maiores. Por consequência, altas

densidades de plantio podem reduzir significativamente o crescimento das árvores e seu tamanho médio (HARRIS, 2007; MAGALHÃES et al., 2006).

5.2.2. Distribuição percentual de biomassa seca nos compartimentos avaliados

Como pode ser visualizado na Tabela 11, houve pouca diferença para a distribuição da biomassa entre os tratamentos para a idade avaliada, porém, pode ser verificado que a biomassa da madeira e da casca teve uma tendência a diminuir a sua contribuição com a biomassa total à medida que espaçamento aumentou. O inverso aconteceu com os compartimentos galhos e folhas, que apresentaram um aumento na sua participação em relação à biomassa total com a ampliação do espaçamento. Isso ocorreu em razão dos espaçamentos mais amplos permitirem um maior desenvolvimento da copa das árvores, principalmente dos galhos, diminuindo a participação do fuste (madeira e casca) e aumentando a participação da copa (galhos e folhas) em relação à biomassa total. Porém, a ordem de distribuição da biomassa total nos compartimentos acompanhou a seguinte ordem para todos os tratamentos: madeira > casca > galhos > folhas.

Tabela 11. Contribuição percentual de cada compartimento na biomassa seca total para árvores de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Tratamento	Espaçamento (m)	Compartimentos (%)				
		madeira	casca	galhos	folhas	total
1	3x2	76,0	13,5	6,5	4,0	100
2	3x3	75,8	13,2	6,9	4,1	100
3	4x3	75,1	12,8	7,7	4,4	100
4	4x4	74,0	12,9	8,4	4,7	100
	Média	75,2	13,1	7,4	4,3	100

Silva (2005), estudando o efeito do espaçamento na biomassa do fuste de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade em três densidades de plantio, encontrou diferenças na distribuição da biomassa menores que 1% para os mesmos compartimentos nos tratamentos avaliados, com uma média de 86,5% para madeira, 7,6% para casca, 3,4% para galhos e 2,4% para folhas.

Provavelmente essa diferença na distribuição da biomassa nas árvores ficaria mais evidente em densidades de plantios mais extremas do que as testadas nesse experimento. Leles et al. (2001), estudando a alocação de matéria seca de *E. camaldulensis* sob diferentes espaçamentos aos 52 meses de idade, constataram que entre os espaçamentos 3x1 e 9x9, a contribuição da copa em relação à biomassa total foi de 8,3% e 31,3%, respectivamente.

No entanto, levando em consideração a idade do povoamento, constata-se que em plantios jovens o peso da copa (galhos e folhas) é superior ao do fuste (madeira e casca), e que com o tempo o peso do tronco tem um crescimento exponencial e a copa tende a estabilizar sua biomassa (POGGIANI et al., 1979).

Schumacher e Caldeira (2004), quantificando a biomassa total e dos compartimentos de árvores em povoamentos de *Eucalyptus saligna* com quatro e sete anos de idade relataram, respectivamente, uma redução de galhos de 8% para 5% e de folhas de 10% para 3%.

Oliveira Neto et al. (2003) encontram diferenças na distribuição da biomassa ao estudar o comportamento de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em quatro espaçamentos de plantio e em duas idades diferentes. Eles observaram um aumento da proporção do compartimento madeira com o avanço da idade, principalmente nos menores espaçamentos. Santos (2011), estudando o efeito do espaçamento na biomassa do fuste de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, constatou que em árvores de maiores dimensões a porcentagem de casca é menor, aumentando dessa forma a contribuição da madeira na produção de biomassa do fuste em espaçamentos mais amplos.

5.3. Teores de macronutrientes nos compartimentos

Considerando-se os resultados da *ANOVA*, não se observou interação entre os dois fatores avaliados (espaçamento x compartimentos), mostrando que os espaçamentos utilizados nesse experimento não interferiram na concentração de macronutrientes em nenhum dos compartimentos. Somente foram encontradas diferenças significativas nas concentrações entre os compartimentos. Kerbauy (2012) e Larcher (2004) relatam que essas diferenças na absorção e a proporção de cada nutriente nos diferentes órgãos da planta variam de acordo com a espécie, o ambiente e seu estágio do desenvolvimento. Já com relação aos diferentes espaçamentos de plantio, Harris (2007) afirma que a competição tem pouco efeito sobre a concentração de nutrientes em plantações florestais.

Poggiani et al. (1984) também não encontraram diferenças significativas na concentração de nutrientes estudando três espécies de eucalipto em três densidades de plantio.

Schumacher e Poggiani (1993) concluem que a concentração de nutrientes se apresenta de maneira diferente nos compartimentos da árvore e segue, de maneira geral, um gradiente decrescente com a seguinte tendência: folhas > casca > galhos > madeira. O mesmo ocorreu no presente trabalho, com a concentração de nutrientes seguindo a mesma ordem. Essa mesma ordem de concentração também foi encontrada por Vieira et al. (2012), em um trabalho realizado com *Eucalyptus urograndis* com 1,5 ano de idade, e também por Freitas et al. (2004), em um estudo realizado com *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade.

Na Tabela 12, podem ser observados os teores médios de macronutrientes encontrados nos espaçamentos e nos compartimentos. A ordem geral da menor para maior concentração média se apresenta da seguinte maneira: Ca > N > K > Mg > S > P.

Tabela 12. Teores médios de macronutrientes em diferentes espaçamentos e compartimentos de árvores *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nitrogênio (g kg ⁻¹)						
Tratameto	Espaçamento (m)	Compartimentos				Média
		Madeira	Casca	Galho	Folha	
1	3x2	3,44	6,15	5,43	15,77	7,70 a
2	3x3	2,74	6,45	6,38	15,08	7,66 a
3	4x3	2,87	6,13	5,11	15,88	7,50 a
4	4x4	3,33	7,48	5,12	15,11	7,76 a
	Média	3,09 a	6,55 b	5,51 b	15,46 c	
	DP	(±1,12)	(±1,58)	(±0,96)	(±1,93)	
Fósforo (g kg ⁻¹)						
1	3x2	1,67	1,15	1,72	1,98	1,63 a
2	3x3	1,06	1,32	1,33	1,70	1,35 a
3	4x3	1,16	1,99	1,18	1,73	1,52 a
4	4x4	1,01	1,67	1,08	1,29	1,26 a
	Média	1,23 a	1,53 ab	1,33 ab	1,68 b	
	DP	(±0,50)	(±0,58)	(±0,50)	(±0,71)	
Potássio (g kg ⁻¹)						
1	3x2	1,14	4,92	5,80	6,40	4,57 a
2	3x3	1,14	5,90	4,78	7,22	4,76 a
3	4x3	1,06	5,36	5,20	6,58	4,55 a
4	4x4	1,02	5,14	4,82	6,32	4,32 a
	Média	1,09 a	5,33 b	5,15 b	6,63 c	
	DP	(±0,22)	(±0,71)	(±1,08)	(±1,35)	
Cálcio (g kg ⁻¹)						
1	3x2	1,30	20,36	4,96	5,48	8,03 a
2	3x3	1,50	18,06	5,82	5,84	7,81 a
3	4x3	1,26	20,66	4,64	5,40	7,99 a
4	4x4	1,50	20,58	4,86	5,44	8,10 a
	Média	1,39 a	19,91 b	5,07 c	5,54 c	
	DP	(±0,30)	(±3,29)	(±0,73)	(±0,93)	

Continuação.

Tratamento	Espaçamento (m)	Compartimentos				Média
		Madeira	Casca	Galho	Folha	
Magnésio (g kg⁻¹)						
1	3x2	0,34	2,67	1,48	2,50	1,75 a
2	3x3	0,42	2,59	1,80	2,72	1,88 a
3	4x3	0,35	2,90	1,40	2,46	1,78 a
4	4x4	0,42	3,20	1,36	2,46	1,86 a
	Média	0,38 a	2,84 b	1,51 c	2,54 b	
	DP	(±0,13)	(±0,67)	(±0,73)	(±0,37)	
Enxofre (g kg⁻¹)						
1	3x2	0,16	0,15	0,75	4,03	1,27 a
2	3x3	0,21	0,12	0,75	5,77	1,71 a
3	4x3	0,18	0,13	0,70	4,23	1,31 a
4	4x4	0,23	0,17	0,65	4,90	1,49 a
	Média	0,20 a	0,14 a	0,71 a	4,73 b	
	DP	(±0,10)	(±0,05)	(±0,35)	(±1,58)	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão da média dos macronutrientes para cada compartimento.

Vieira et al. (2013), avaliando o teor de nutrientes em um plantio híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* aos dez anos de idade, encontraram a seguinte ordem de concentração: Ca > N > K > Mg > P > S. A mesma tendência foi encontrada no presente trabalho, com exceção do P e S que inverteram suas posições, porém esses apresentam valores muito próximos de concentração.

Moura et al. (2006), em um estudo com outra espécie florestal, a *Mimosa caesalpiniaefolia* BENTH, encontrou a seguinte ordem de concentração de macronutrientes: N > Ca > K > Mg > S > P. Com exceção do N e do Ca, que inverteram as posições, os demais nutrientes apresentaram a mesma ordem. No entanto, esses dois elementos apresentam geralmente as maiores concentrações médias na biomassa acima do solo, com o N apresentando os maiores teores na maior parte dos compartimentos, com exceção da casca, onde normalmente o Ca apresenta a maior concentração.

As folhas apresentam a maior concentração de N, P, K e S. Já o compartimento casca apresenta a maior concentração de Ca e Mg. O mesmo resultado foi encontrado por Schumacher e Poggiani (1993), em um estudo sobre produção de biomassa e remoção de macronutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. grandis* e *E. tolleriana*, onde as três espécies apresentaram o mesmo comportamento em relação à concentração de nutrientes nos diferentes compartimentos. O alto teor de cálcio na casca em relação aos outros compartimentos pode ser explicado pela presença de cristais de oxalato de cálcio no floema,

componente que junto com a periderme forma a casca (PATRÍCIO, 2014; PAULA et al., 2006), fazendo com que, na média, esse nutriente muitas vezes apresente o maior teor.

Considerando todos os compartimentos, o compartimento folhas apresentou em média, a maior concentração de nutrientes, principalmente o nitrogênio. Isso se deve ao fato desse componente da planta possuir maior atividade fisiológica, sendo responsável pela fotossíntese e transpiração. A redistribuição dos elementos minerais dos tecidos mais velhos para os mais jovens, principalmente o N, P, K e Mg, também é responsável por essas diferenças de concentrações entre os compartimentos das plantas (MALAVOLTA et al., 1997).

Com relação à nutrição, onde o componente folhas é avaliado, os teores de macronutrientes ficam muito próximos aos valores de referência apresentados por Wadt (1998), com os nutrientes K, Ca e Mg, ficando dentro da faixa ótima determinada, e os nutrientes P e N um pouco acima e um pouco abaixo dos limites da faixa respectivamente. No entanto, o S apresentou o dobro da concentração máxima de referência.

Essa elevada concentração de S pode ser atribuída às características da espécie avaliada e ao alto teor de matéria orgânica do solo (MOS), já que o S, assim como N, encontra-se em sua maior parte na forma orgânica e sua disponibilidade depende muito da decomposição da MOS (MOTTA e SERRAT, 2006).

O compartimento madeira foi o que apresentou a menor concentração de nutrientes. Isso se deve à forma como esse componente se desenvolve na árvore e de sua anatomia, podendo ser dividido em cerne e alburno. Com o crescimento das árvores as partes internas distanciam-se do câmbio e perdem gradativamente sua atividade fisiológica. Isto é, o alburno, à medida que se distancia do tecido meristemático, aos poucos vai cessando sua atividade fisiológica e transformando-se em cerne, um tecido mais compacto e com baixos teores de nutrientes (BURGER e RICHTER, 1991).

5.4. Teores de micronutrientes nos compartimentos

Também não houve interação entre os dois fatores avaliados (espaçamento x compartimentos) para teores de micronutrientes, mostrando que os espaçamentos utilizados nesse experimento não afetaram significativamente nenhum dos compartimentos.

Na Tabela 13 podem ser observados os teores médios de micronutrientes encontrados nos compartimentos. Eles seguem, de maneira geral, a seguinte ordem decrescente de concentração: casca > folhas > galhos > madeira. Já a ordem da concentração média de micronutrientes apresentou-se da seguinte maneira: Mn > Fe > Zn > Cu > B. Vieira et al. (2013), avaliando o teor de micronutrientes em um plantio híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* encontram, com exceção do B que não foi avaliado, a mesma ordem decrescente de concentração: Mn > Fe > Zn > Cu. Já Vieira et al. (2012), em um trabalho realizado com *Eucalyptus urograndis* encontraram a seguinte ordem: Mn > Fe > B > Zn > Cu.

Com relação aos teores em todos os compartimentos, os micronutrientes tiveram um comportamento diferente dos macronutrientes, com a casca apresentando maior teor médio do que as folhas.

Tabela 13. Teores médios de micronutrientes em diferentes espaçamentos e compartimentos de árvores *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Tratamento	Espaçamento (m)	Boro (mg kg ⁻¹)				Média
		Compartimentos				
		Madeira	Casca	Galho	Folha	
1	3x2	2,10	2,80	4,71	8,44	4,51 a
2	3x3	1,81	3,60	6,16	9,86	5,35 a
3	4x3	2,69	3,54	4,70	10,58	5,38 a
4	4x4	2,80	3,39	5,41	9,49	5,27 a
	Média	2,35 a	3,33 a	5,25 b	9,59 c	
	DP	(±0,89)	(±1,49)	(±2,29)	(±1,58)	
Cobre (mg kg ⁻¹)						
1	3x2	5,40	16,50	23,68	7,00	13,14 a
2	3x3	5,50	15,10	19,54	7,20	11,83 a
3	4x3	5,90	12,30	23,94	6,80	12,23 a
4	4x4	7,20	11,00	18,84	5,40	10,61 a
	Média	6,00 a	13,72 b	21,50 c	6,60 a	
	DP	(±2,44)	(±4,44)	(±7,5)	(±1,24)	

Continuação.

Tratamento	Espaçamento (m)	Compartimentos				Média
		Madeira	Casca	Galho	Folha	
Ferro (mg kg⁻¹)						
1	3x2	12,83	153,20	47,82	155,02	92,22 a
2	3x3	11,80	152,40	53,40	145,20	90,70 a
3	4x3	11,80	116,40	47,20	139,40	78,70 a
4	4x4	15,90	124,62	43,70	120,50	76,18 a
	Média	13,08 a	136,65 b	48,03 c	140,03 b	
	DP	(±5,27)	(±65,09)	(±15,78)	(±45,57)	
Manganês (mg kg⁻¹)						
1	3x2	16,20	507,14	162,40	381,00	266,68 a
2	3x3	21,10	648,60	178,10	299,42	286,80 a
3	4x3	21,60	490,00	156,60	340,92	252,28 a
4	4x4	21,50	418,24	150,90	407,50	249,53 a
	Média	20,10 a	515,99 b	162,00 c	357,21 d	
	DP	(±6,44)	(±171,85)	(±60,69)	(±99,87)	
Zinco (mg kg⁻¹)						
1	3x2	14,90	23,80	17,20	36,20	23,03 a
2	3x3	17,10	20,90	20,04	43,60	25,41 a
3	4x3	17,28	16,20	21,10	41,80	24,10 a
4	4x4	12,76	15,20	16,40	39,10	20,87 a
	Média	15,51 a	19,03 a	18,69 a	40,18 b	
	DP	(±4,44)	(±7,01)	(±8,63)	(±7,98)	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão da média dos micronutrientes para cada compartimento.

Os maiores teores de B, Fe e Zn foram encontrados nas folhas, já os de Cu e Mn foram encontrados nos galhos e na casca, respectivamente. Isso está de acordo com Larcher (2004), que afirma que os elementos B, Fe e Zn se encontram na parte aérea da planta, principalmente nas folhas, o Cu se encontra em tecidos lignificados e a casca contém maior concentração do elemento Mn.

O compartimento madeira foi o que apresentou os menores teores para todos os micronutrientes. No entanto, para o Cu não houve diferença estatística entre os teores médios na madeira e nas folhas.

Lambert (1981) afirma que a maior ou menor quantidade de cerne ou alburno na madeira pode alterar significativamente os resultados de análises dos teores de nutrientes nesse componente, já que o cerne apresenta menores teores.

De acordo com Gonçalves (1995) os valores de referência de micronutrientes nas folhas para nutrição ideal do eucalipto estão muito próximos dos encontrados nesse trabalho, com exceção do B, que aparentemente apresenta uma deficiência, já que o teor ideal estaria entre 30 e 50 mg kg⁻¹, e o teor médio encontrado nesse trabalho variou de 8,44 mg kg⁻¹ a

10,58 mg kg⁻¹. Essa deficiência aparente de B parece não ter afetado o desenvolvimento das plantas, que não apresentaram nenhum sintoma ao longo do crescimento do plantio, como morte do tecido apical, clorose nas bordas do limbo, fendilhamento de casca, cancro e bifurcações em excesso (SANTOS et al., 2001).

As concentrações de Fe, Cu e Zn para os demais compartimentos são consideradas elevadas de acordo com valores médios apresentado Lúcio et al. (2010), em um estudo realizado com várias análises de tecidos vegetal, com o objetivo de estimar limites de controle de teores de nutrientes nos diferentes compartimentos de árvores de eucalipto. Já para B e Mn, os valores encontrados ficaram abaixo dos limites apresentado pelos autores. Porém, os desvios- padrão das médias dos limites apresentaram-se altos, mostrando a grande variação dos dados das análises em relação às médias encontradas, principalmente para micronutrientes. No entanto, a variabilidade dos teores entre espécies e para a mesma espécie em diferentes locais é grande, principalmente em árvores jovens e para o compartimento casca (LAMBERT, 1981).

5.5. Conteúdo de macronutrientes

A quantidade de macronutrientes armazenada pela biomassa total acima do solo (Tabela 14) apresentou a seguinte ordem decrescente: N > Ca > K > P > Mg > S. No entanto, o N e Ca apresentaram valores muito próximos, com 780,07 kg ha⁻¹ e 776,20 kg ha⁻¹ respectivamente, em razão desses apresentarem teores médios semelhantes quando considerados todos os compartimentos.

Tabela 14. Conteúdo de macronutrientes total e por compartimento em diferentes espaçamentos de plantio para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nutriente (kg ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Compartimentos								Total (kg ha ⁻¹)
		madeira		casca		galhos		folhas		
N	3x2	431,67	55%	155,89	20%	69,98	9%	122,13	16%	779,67
	3x3	343,61	55%	122,49	20%	60,06	10%	100,49	16%	626,64
	4x3	308,07	54%	109,39	19%	60,06	10%	95,85	17%	573,37
	4x4	248,75	52%	89,08	19%	54,00	11%	83,48	18%	475,31
	Média	333,02	54%	119,21	19%	61,02	10%	100,49	17%	613,75
P	3x2	171,83	72%	36,41	15%	16,89	7%	13,27	6%	238,41
	3x3	136,78	72%	28,61	15%	14,50	8%	10,92	6%	190,80
	4x3	122,63	71%	25,55	15%	14,50	8%	10,42	6%	173,10
	4x4	99,02	70%	20,81	15%	13,03	9%	9,07	6%	141,93
	Média	132,56	71%	27,85	15%	14,73	8%	10,92	6%	186,06
K	3x2	152,27	38%	126,85	32%	65,41	16%	52,38	13%	396,91
	3x3	121,21	38%	99,67	31%	56,14	18%	43,10	13%	320,11
	4x3	108,67	37%	89,01	30%	56,14	19%	41,11	14%	294,93
	4x4	87,75	36%	72,49	29%	50,47	20%	35,80	15%	246,51
	Média	117,47	37%	97,01	31%	57,04	18%	43,10	14%	314,61
Ca	3x2	194,18	25%	473,86	61%	64,39	8%	43,77	6%	776,20
	3x3	154,57	25%	372,32	60%	55,26	9%	36,01	6%	618,16
	4x3	138,58	25%	332,50	59%	55,26	10%	34,35	6%	560,69
	4x4	111,90	24%	270,78	59%	49,69	11%	29,92	6%	462,27
	Média	149,81	25%	362,36	60%	56,15	9%	36,01	6%	604,33
Mg	3x2	53,09	33%	67,59	42%	19,18	12%	20,07	13%	159,92
	3x3	42,26	33%	53,11	41%	16,46	13%	16,51	13%	128,33
	4x3	37,89	32%	47,43	40%	16,46	14%	15,75	13%	117,52
	4x4	30,59	31%	38,62	40%	14,80	15%	13,72	14%	97,73
	Média	40,95	32%	51,69	41%	17,62	13%	16,51	13%	125,88
S	3x2	27,94	36%	3,33	4%	9,02	12%	37,37	48%	77,66
	3x3	22,24	35%	2,62	4%	7,74	12%	30,75	49%	63,34
	4x3	19,94	34%	2,34	4%	7,74	13%	29,33	49%	59,34
	4x4	16,10	32%	1,90	4%	6,96	14%	25,54	51%	50,50
	Média	21,56	34%	2,55	4%	7,56	13%	30,75	49%	62,71

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutriente presente na biomassa de cada compartimento em relação ao conteúdo total.

Pereira et al. (1984) estudando sobre produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus saligna* aos nove anos de idade, encontraram diferenças entre as duas espécies, com a primeira apresentando a ordem N > Ca

> Mg > K > P, e a segunda N > K > Ca > Mg > P. Essa diferença foi mais associada aos teores encontrados do que à biomassa produzida pelas duas espécies. Já Schumacher e Caldeira (2001), estudando o conteúdo de nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus globulus* aos quatro anos de idade, destacaram o Ca como o nutriente em maior quantidade na biomassa, encontrando a seguinte ordem decrescente: Ca > N > K > Mg > P.

De maneira geral, a distribuição do conteúdo de macronutrientes nas árvores apresentou a seguinte ordem decrescente: madeira > casca > folhas > galhos. Com os maiores conteúdos médios de N, P e K encontrando-se no compartimento madeira, estocando em média 54%, 71% e 37 % do total desses nutrientes respectivamente. Já o Ca e o Mg se apresentam em maior quantidade na casca, com 60% e 41%, e o S nas folhas, com 49% do total acumulado na biomassa acima do solo. Vale salientar que a casca é responsável em média por 13,1% do total da biomassa produzida, e as folhas por apenas 4,3%. A grande diferença de concentração entre os compartimentos com menor biomassa (casca, galhos e folhas) e a madeira para os elementos Ca, Mg e S, é a razão desse compartimento apresentar um menor conteúdo, mesmo que em média ele apresente 75% da biomassa total acima do solo.

Em média, o nutriente com a maior concentração na biomassa acima do solo foi o Ca. No entanto, o N é o nutriente que apresenta o maior conteúdo por hectare, pois o teor dele na madeira, onde se encontra a maior parte da biomassa, é maior do que a do Ca nesse mesmo compartimento.

O mesmo aconteceu com o P, pois ainda que ele apresente a menor concentração entre os macronutrientes, sua presença na madeira torna-o o quarto em quantidade, entre os seis avaliados.

O macronutriente que contém a menor quantidade na biomassa acima do solo é o S. Mesmo apresentando em média uma concentração muito próxima do elemento P, ele se encontra principalmente nas folhas, o compartimento com menos biomassa na árvore.

5.6. Conteúdo de micronutrientes

A quantidade de micronutrientes armazenada pela biomassa total acima do solo (Tabela 15) apresentou a seguinte ordem decrescente: Mn > Fe > Zn > Cu > B. De maneira

geral, a distribuição do conteúdo de micronutrientes na biomassa dos compartimentos das árvores apresentou a seguinte ordem: casca > madeira > folhas > galhos.

Tabela 15. Conteúdo de micronutrientes total e por compartimento em diferentes espaçamentos de plantio para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nutriente (g ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Compartimentos								Total (g ha ⁻¹)
		madeira		casca		galhos		folhas		
B	3x2	328,30	60%	79,25	14%	66,68	12%	75,76	14%	549,99
	3x3	261,32	59%	62,27	14%	57,23	13%	62,34	14%	443,15
	4x3	234,30	58%	55,61	14%	57,23	14%	59,46	15%	406,59
	4x4	189,18	56%	45,29	13%	51,45	15%	51,79	15%	337,70
	Média	253,27	58%	60,61	14%	58,14	14%	62,34	14%	434,36
Cu	3x2	838,20	56%	326,54	22%	273,05	18%	52,14	3%	1.489,93
	3x3	667,20	56%	256,56	21%	234,35	20%	42,90	4%	1.201,01
	4x3	598,20	54%	229,12	21%	234,35	21%	40,92	4%	1.102,59
	4x4	483,00	53%	186,59	20%	210,70	23%	35,64	4%	915,93
	Média	646,65	55%	249,7	21%	238,11	21%	42,9	4%	1.177,37
Fe	3x2	1.827,28	27%	3.252,27	48%	609,98	9%	1.106,24	16%	6.795,76
	3x3	1.454,50	27%	2.555,36	47%	523,53	10%	910,20	17%	5.443,57
	4x3	1.304,08	26%	2.282,06	46%	523,53	11%	868,19	17%	4.977,84
	4x4	1.052,94	25%	1.858,44	45%	470,69	11%	756,16	18%	4.138,24
	Média	1.409,70	26%	2.487,03	46%	531,93	10%	910,20	17%	5.338,85
Mn	3x2	2.807,97	14%	12.280,56	62%	2.057,40	10%	2.821,96	14%	19.967,89
	3x3	2.235,12	14%	9.649,01	60%	1.765,80	11%	2.321,87	15%	15.971,80
	4x3	2.003,97	14%	8.617,03	59%	1.765,80	12%	2.214,70	15%	14.601,51
	4x4	1.618,05	13%	7.017,46	58%	1.587,60	13%	1.928,93	16%	12.152,05
	Média	2.166,28	14%	9.391,92	60%	1.794,15	12%	2.321,97	15%	15.673,31
Zn	3x2	2.166,75	68%	452,91	14%	237,36	7%	317,42	10%	3.174,45
	3x3	1.724,71	68%	355,86	14%	203,72	8%	261,17	10%	2.545,46
	4x3	1.546,35	67%	317,80	14%	203,72	9%	249,12	11%	2.316,99
	4x4	1.248,56	65%	258,81	14%	183,16	10%	216,97	11%	1.907,50
	Média	1.771,59	67%	346,35	14%	206,99	8%	261,17	11%	2.486,10

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutriente presente na biomassa de cada compartimento em relação ao conteúdo total.

Poggiani et al. (1983), avaliando a exportação de biomassa e nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus saligna* aos oito anos de idade, encontraram resultado semelhante em relação à quantidade de micronutrientes armazenada na biomassa acima do solo. Com

exceção do B, que não foi avaliado, eles chegaram à seguinte ordem: Mn > Fe > Zn > Cu. Vieira et al. (2013), analisando o teor de nutrientes em um plantio híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* aos dez anos de idade, encontraram a mesma ordem de conteúdo para os micronutrientes e a seguinte ordem de conteúdo para os compartimentos: casca > madeira > galhos > folhas.

Os maiores conteúdos de B, Cu e Zn se encontram no compartimento madeira, que estoca em média 58%, 55% e 67% desses elementos, respectivamente. A casca estoca 46% do conteúdo total de Fe e 60% de Mn. A biomassa da casca, dos galhos e das folhas estoca praticamente a mesma quantidade de B, contribuindo em média com 14% desse elemento cada um. O mesmo acontece para o Cu na casca e nos galhos, que contêm 21% em média desse elemento. Já a madeira participa com 14% do Mn e as folhas com 15%.

5.7. Exportação de nutrientes pela exploração da biomassa

Foram analisadas as exportações de nutrientes levando em consideração os diferentes sistemas de colheita, dividindo a exploração da biomassa da seguinte maneira:

- Exploração da biomassa total acima do solo (madeira, casca, galhos e folhas);
- Exploração do fuste (madeira com casca);
- Exploração da madeira (fuste sem casca).

Para exploração somente da madeira, foi utilizada uma eficiência de descascamento de 95%, considerando condições ideais para essa operação (FOELKEL, 2012).

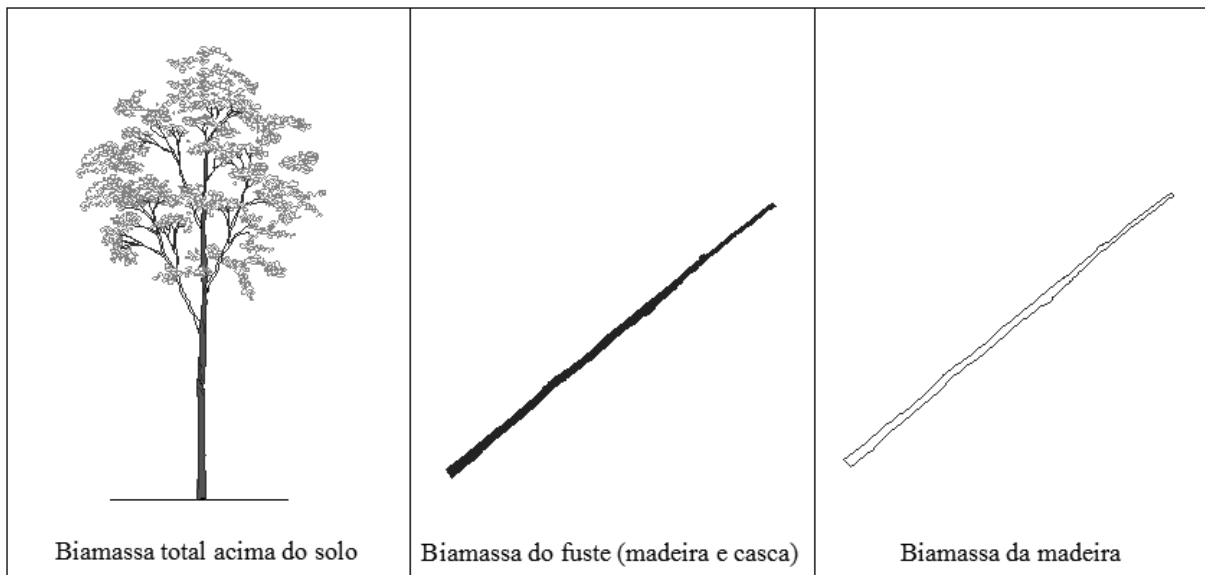


Figura 11. Diferentes tipos de exploração da biomassa analisados para avaliação da exportação de nutrientes.

5.7.1. Exploração da biomassa total acima do solo

Esse tipo de exploração, que colhe toda a biomassa acima do solo, é realizada pelo sistema de colheita de árvores inteiras, podendo ser associado ao sistema de cavaqueamento verde, onde toda árvore é transformada em cavaco por meio de picadores. Nesse caso, a totalidade do conteúdo de nutrientes presentes na biomassa é exportada.

Nas tabelas 14 e 15 vistas anteriormente, que mostram o conteúdo de nutrientes da biomassa, podem ser visualizadas as quantidades de cada nutriente exportado com a colheita total da biomassa acima do solo. Já as quantidades totais e percentagens de macronutrientes e micronutrientes exportados por compartimento e espaçamento podem observadas na Tabela 16.

Tabela 16. Nutrientes exportados pela colheita da biomassa total acima do solo nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Tratamento Espaçamento (m)	MACRONUTRIENTES (kg ha ⁻¹)								Total (kg ha ⁻¹) (g ha ⁻¹)	
	Compartimentos									
	madeira		casca		galhos		folhas			
1	3x2	1.030,99	42%	863,94	36%	244,86	10%	288,98	12%	2.428,76
2	3x3	820,66	42%	678,81	35%	210,15	11%	238,10	12%	1.947,71
		<i>(-20%)</i>		<i>(-21%)</i>		<i>(-14%)</i>		<i>(-18%)</i>		<i>(-20%)</i>
3	4x3	735,79	41%	606,21	34%	210,15	12%	227,11	13%	1.779,25
		<i>(-29%)</i>		<i>(-20%)</i>		<i>(-14%)</i>		<i>(-22%)</i>		<i>(-27%)</i>
4	4x4	594,09	40%	493,68	33%	188,94	13%	197,80	13%	1.474,52
		<i>(-42%)</i>		<i>(-43%)</i>		<i>(-23%)</i>		<i>(-32%)</i>		<i>(-39%)</i>
	Média	795,38	42%	660,66	34%	213,53	11%	238,10	13%	
MICRONUTRIENTES (g ha ⁻¹)										
1	3x2	7.968,49	25%	16.391,54	51%	3.244,47	10%	4.373,52	14%	31.978,01
2	3x3	6.342,85	25%	12.879,06	50%	2.784,62	11%	3.598,47	14%	25.605,00
		<i>(-20%)</i>		<i>(-21%)</i>		<i>(-14%)</i>		<i>(-18%)</i>		<i>(-20%)</i>
3	4x3	5.686,89	24%	11.501,62	49%	2.784,62	12%	3.432,38	15%	23.405,52
		<i>(-29%)</i>		<i>(-20%)</i>		<i>(-14%)</i>		<i>(-22%)</i>		<i>(-27%)</i>
4	4x4	4.591,72	24%	9.366,59	48%	2.503,61	13%	2.989,49	15%	19.451,41
		<i>(-42%)</i>		<i>(-43%)</i>		<i>(-23%)</i>		<i>(-32%)</i>		<i>(-39%)</i>
	Média	6.147,49	24%	12.534,70	50%	2.829,33	11%	3.598,47	14%	

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa de cada compartimento em relação ao conteúdo total. Valores entre parênteses correspondem à redução percentual de exportação de nutrientes em relação ao tratamento 1.

Quanto à exportação total de nutrientes, é possível observar uma relação direta entre a quantidade exportada de nutrientes e o espaçamento de plantio, com o tratamento 1 apresentando o maior conteúdo total e por compartimento em razão da maior produção de biomassa no espaçamento 3x2. Já os tratamentos 2, 3 e 4, exportam respectivamente 20%, 27% e 39% menos nutrientes por hectare em relação ao tratamento 1. Por armazenarem a maior parte da biomassa, essa tendência também ocorreu para os compartimentos madeira e casca, apresentando resultados percentuais de redução muito próximos. A mesma relação ocorre para os compartimentos galhos e folhas, porém de forma menos expressiva em razão do maior desenvolvimento da copa nos espaçamentos maiores, principalmente galhos, que apresentaram uma redução de 14%, 14% e 23% respectivamente, tendo como referência o tratamento 1.

As diferenças nos valores totais de nutrientes exportados sempre serão proporcionais à quantidade de biomassa produzida em cada tratamento, já que o conteúdo depende da

produção de matéria seca, e também por não haver diferenças significativas na concentração dos nutrientes entre os tratamentos testados.

Pode-se notar, de maneira geral, à medida que o espaçamento aumenta, que o conteúdo dos nutrientes no compartimento madeira e casca tende a diminuir sua participação em relação ao conteúdo total. O contrário acontece com os compartimentos galhos e folhas, com suas contribuições tendendo a aumentar com a diminuição da densidade de plantas. Isso se explica devido a esses compartimentos terem uma contribuição menor ou maior em relação à biomassa total, à medida que o espaçamento fica mais amplo (Tabela 11).

Considerando as quantidades totais de macronutrientes exportados pela exploração de toda a biomassa acima do solo por espaçamento, a madeira, apesar de apresentar em média 75% da biomassa total, contém em média 42% do total dos macronutrientes exportados. No entanto, a casca, que contribui em média apenas com 13% da biomassa total, exporta cerca de 34% dos macronutrientes. Já as folhas exportam 13% e os galhos 11%.

No entanto, para os micronutrientes, a casca é o compartimento que mais exporta, mesmo contribuindo em média com apenas com 13% da biomassa total, retira junto com ela na colheita, cerca de 50% do total desses elementos. A madeira contribui com 24%, as folhas com 14% e os galhos com 11% do total de micronutrientes exportados.

5.7.2. Exploração da biomassa do fuste (madeira e casca)

Esse tipo de exploração, que colhe somente o fuste, pode ser realizada pelo sistema de colheita de tora curtas ou longas, podendo ser associado ao sistema de cavaqueamento marrom, onde o fuste é transformado em cavaco por meio de picadores. Nesse caso, somente os nutrientes contidos na madeira e na casca são exportados.

Podem ser visualizadas na Tabela 17 as quantidades de macronutrientes exportados pela colheita do fuste e o percentual deles em relação ao conteúdo total. Nota-se uma redução de 3% a 5% na exportação com o aumento do espaçamento do plantio dependendo do nutriente avaliado.

Tabela 17. Quantidades de macronutrientes exportados pela colheita da biomassa do fuste nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nutriente (kg ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Compartimentos				Exportado (kg ha ⁻¹)	Remanescente (kg ha ⁻¹)		
		madeira		casca					
N	3x2	431,67	55%	155,89	20%	587,56	75%	192,51	25%
	3x3	343,61	54%	122,49	20%	466,09	74%	160,87	26%
	4x3	308,07	54%	109,39	19%	417,46	73%	156,22	27%
	4x4	248,75	52%	89,08	19%	337,83	71%	137,75	29%
	Média	333,02	54%	119,21	19%	452,23	73%	161,84	27%
	% Fuste	(74%)		(26%)					
P	3x2	171,83	72%	36,41	15%	208,25	87%	30,16	13%
	3x3	136,78	72%	28,61	15%	165,39	87%	25,42	13%
	4x3	122,63	71%	25,55	15%	148,18	86%	24,91	14%
	4x4	99,02	70%	20,81	14%	119,82	84%	22,11	16%
	Média	132,56	71%	27,85	15%	160,41	86%	25,65	14%
	% Fuste	(83%)		(17%)					
K	3x2	152,27	38%	126,85	32%	279,13	70%	117,78	30%
	3x3	121,21	38%	99,67	31%	220,88	69%	99,23	31%
	4x3	108,67	37%	89,01	30%	197,68	67%	97,24	33%
	4x4	87,75	36%	72,49	29%	160,23	65%	86,27	35%
	Média	117,47	37%	97,01	31%	214,48	68%	100,13	32%
	% Fuste	(55%)		(45%)					
Ca	3x2	194,18	25%	473,86	61%	668,04	86%	108,16	14%
	3x3	154,57	25%	372,32	60%	526,89	85%	91,27	15%
	4x3	138,58	25%	332,50	59%	471,08	84%	89,61	16%
	4x4	111,90	24%	270,78	59%	382,67	83%	79,60	17%
	Média	149,81	25%	362,36	60%	512,17	85%	92,16	15%
	% Fuste	(29%)		(71%)					
Mg	3x2	53,09	33%	67,59	42%	120,68	75%	39,24	25%
	3x3	42,26	33%	53,11	41%	95,36	74%	32,97	26%
	4x3	37,89	32%	47,43	40%	85,31	73%	32,21	27%
	4x4	30,59	31%	38,62	40%	69,21	71%	28,51	29%
	Média	40,95	32%	51,69	41%	92,64	73%	33,23	27%
	% Fuste	(44%)		(56%)					
S	3x2	27,94	36%	3,33	4%	31,27	40%	46,38	60%
	3x3	22,24	35%	2,62	4%	24,86	39%	38,48	61%
	4x3	19,94	34%	2,34	4%	22,28	38%	37,07	62%
	4x4	16,10	32%	1,90	4%	18,00	36%	32,50	64%
	Média	21,56	34%	2,55	4%	24,10	38%	38,61	62%
	% Fuste	(89%)		(11%)					

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa de cada compartimento em relação ao conteúdo total. Valores entre parênteses correspondem ao percentual de nutrientes presentes na madeira e na casca em relação ao fuste.

Isso se explica quando se considera a maior proporção de biomassa da copa em relação ao fuste nos diferentes tratamentos, o que diminui relativamente a exportação de nutrientes nesse tipo de exploração à medida que espaçamento fica mais amplo, já que os galhos e folhas são considerados resíduos da colheita nesse caso. Com o aumento do espaçamento de plantio há uma redução de 3 % na exportação de P e Ca, 4% para os nutrientes, N, Mg e S, e de 5% para o K.

Na Figura 12 pode ser melhor visualizada a relação entre a exportação e o remanescente de cada macronutriente nos diferentes tratamentos analisados.

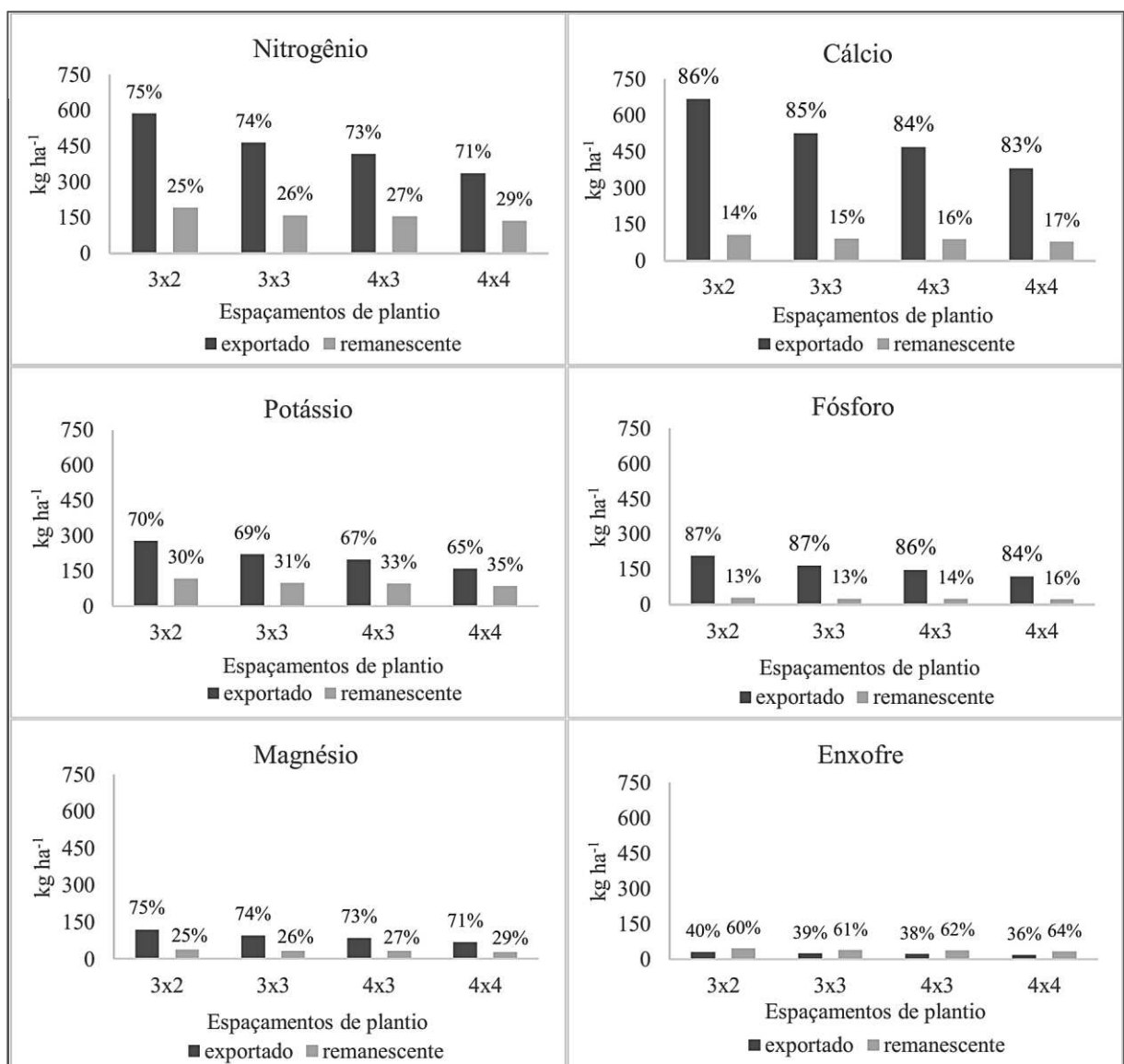


Figura 12. Macronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa do fuste em diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

A madeira e a casca, que compõem o fuste, contribuíram de maneira diferente com a exportação de cada macronutriente devido ao teor distinto que cada compartimento apresenta. A madeira, que contém em média 75% da biomassa total, foi responsável por exportar 89% do S, 83% do P, 74% do N e 55% do K. Já a casca, mesmo apresentando em média apenas 13% da biomassa, contribui com 71% do Ca e com 56 % do Mg exportados.

Em termos percentuais, para cada macronutriente, foi encontrada a seguinte ordem de exportação: $P > Ca > N > Mg > K > S$. Com em média 86% do conteúdo do P sendo extraído do campo, seguido do Ca, com 85%, do N e do Mg com 73%, do K com 68% e do S com 38% do seu montante sendo exportado. Esse último apresentando a menor percentagem em razão de seu conteúdo estar mais acumulado na biomassa dos galhos e folhas.

Com relação aos micronutrientes, podem ser visualizadas na Tabela 18 tanto as quantidades exportadas pela colheita do fuste, como o percentual deles em relação ao conteúdo total.

O Mn é o micronutriente que mais se exporta por esse sistema de exploração, chegando a $15.088,53 \text{ g ha}^{-1}$ no espaçamento que mais produziu biomassa. A ordem das quantidades exportadas desses elementos apresentou-se da seguinte forma: $Mn > Fe > Zn > Cu > B$.

Proporcionalmente, a madeira contribuiu mais com a exportação os elementos Zn, B e Cu, chegando em média a conter 83%, 81% e 72% desse nutrientes, respectivamente. A casca, apesar da baixa produção de biomassa, contribui com a exportação de 81% do Mn e com 64% do Fe (Tabela 18).

Já a percentagem de cada nutriente extraído em relação ao seu conteúdo total apresentou esta ordem: $Zn > Cu > Fe > Mn > B$. Em média, 81% do Zn é exportado, em seguida vem o Cu com 76%, o Fe e o Mn com 73%, e o B com 72%. Nota-se, pelo mesmo motivo que nos macronutrientes, um diferencial na exportação de micronutrientes, chegando, do menor para maior espaçamento de plantio, a uma redução de 5% na retirada dos elementos B, Cu, Fe e Mn, e de 4% para o Zn. A relação entre exportação e remanescente dos micronutrientes pode ser melhor visualizada na Figura 13.

Tabela 18. Quantidades de micronutrientes exportados pela colheita da biomassa do fuste nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nutriente (kg ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Compartimentos				Exportado (g ha ⁻¹)	Remanescente (g ha ⁻¹)		
		madeira		casca					
B	3x2	328,295	60%	79,254	14%	407,55	74%	142,44	26%
	3x3	261,32	59%	62,271	14%	323,59	73%	119,56	27%
	4x3	234,295	58%	55,611	13%	289,91	71%	116,68	29%
	4x4	189,175	56%	45,288	13%	234,46	69%	103,24	31%
	Média	253,27	58%	60,61	14%	313,88	72%	120,48	28%
	% Fuste	(81%)		(19%)					
Cu	3x2	838,2	56%	326,536	22%	1164,74	78%	325,19	22%
	3x3	667,2	56%	256,564	21%	923,76	77%	277,25	23%
	4x3	598,2	54%	229,124	21%	827,32	75%	275,27	25%
	4x4	483	53%	186,592	20%	669,59	73%	246,34	27%
	Média	646,65	55%	249,70	21%	896,35	76%	281,01	24%
	% Fuste	(72%)		(28%)					
Fe	3x2	1827,276	27%	3252,27	48%	5079,55	75%	1716,22	25%
	3x3	1454,496	27%	2555,355	47%	4009,85	74%	1433,72	26%
	4x3	1304,076	26%	2282,055	46%	3586,13	72%	1391,71	28%
	4x4	1052,94	25%	1858,44	45%	2911,38	70%	1226,86	30%
	Média	1409,70	26%	2487,03	46%	3896,73	73%	1442,13	27%
	% Fuste	(36%)		(64%)					
Mn	3x2	2807,97	14%	12280,562	62%	15088,53	76%	4879,36	24%
	3x3	2235,12	14%	9649,013	60%	11884,13	74%	4087,67	26%
	4x3	2003,97	14%	8617,033	59%	10621,00	73%	3980,50	27%
	4x4	1618,05	13%	7017,464	58%	8635,51	71%	3516,53	29%
	Média	2166,28	14%	9391,02	60%	11557,30	73%	4116,02	27%
	% Fuste	(19%)		(81%)					
Zn	3x2	2166,747	68%	452,914	14%	2619,66	83%	554,79	17%
	3x3	1724,712	68%	355,861	14%	2080,57	82%	464,89	18%
	4x3	1546,347	67%	317,801	14%	1864,15	81%	452,84	19%
	4x4	1248,555	65%	258,808	14%	1507,36	79%	400,13	21%
	Média	1671,59	67%	346,35	14%	2017,94	81%	468,16	19%
	% Fuste	(83%)		(17%)					

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa de cada compartimento em relação ao conteúdo total. Valores entre parênteses correspondem ao percentual de nutrientes presentes na madeira e na casca em relação ao fuste.

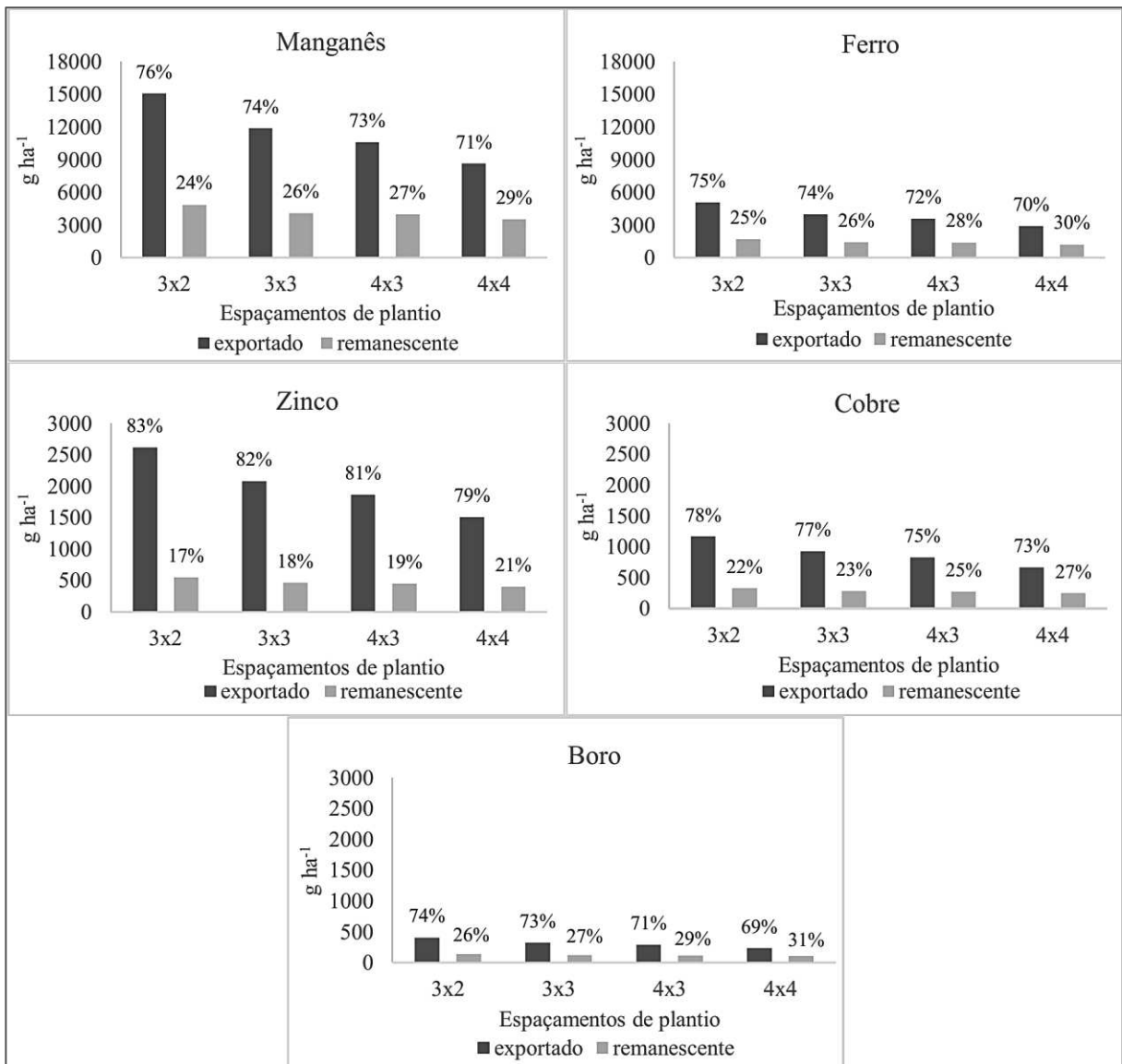


Figura 13. Micronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa do fuste em diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

As quantidades totais de macronutrientes e micronutrientes exportados pela colheita do fuste e o percentual deles em relação ao conteúdo total podem ser observadas na Tabela 19.

Nota-se que na exploração do fuste, em média 76% do total dos macronutrientes são exportados na colheita, chegando, na maior densidade de plantio, a exportar 1.894,93 kg ha⁻¹ e na menor 1.087,77 kg ha⁻¹. A contribuição da madeira com essas quantidades foi de 55% e a da casca 45%.

Para micronutrientes, a percentagem exportada foi semelhante e chegou a uma média de 73%. O menor espaçamento de plantio alcançou um valor exportado de 24.360,02 g ha⁻¹ e o maior 13.958,31 g ha⁻¹. No entanto, para esses elementos, a casca é o compartimento que mais exporta, chegando a 67% do total, ficando a madeira responsável por 33%.

Tabela 19. Quantidades totais de nutrientes exportados pela colheita da biomassa do fuste nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Tratamento Espaçamento (m)	MACRONUTRIENTES (kg ha ⁻¹)								Total (kg ha ⁻¹) (g ha ⁻¹)	
	Compartimentos				Exportado	Remanescente				
	madeira		casca							
1	3x2	1.030,99	42%	863,94	36%	1894,93	78%	534,23	22%	2.429,16
2	3x3	820,66	42%	678,81	35%	1499,47	77%	448,25	23%	1.947,71
3	4x3	735,79	41%	606,21	34%	1342,00	75%	437,26	25%	1.779,25
4	4x4	594,09	40%	493,68	33%	1087,77	74%	386,75	26%	1.474,52
	Média	795,38	42%	660,66	34%	1.456,04	76%	451,62	24%	1.907,66
	% Fuste	(55%)		(45%)						
MICRONUTRIENTES (g ha ⁻¹)										
1	3x2	7.968,49	25%	16.391,54	51%	24.360,02	76%	7.617,99	24%	31.978,01
2	3x3	6.342,85	25%	12.879,07	50%	19.221,91	75%	6.383,09	25%	25.605,00
3	4x3	5.686,89	24%	11.501,62	49%	17.188,51	73%	6.217,01	27%	23.405,52
4	4x4	4.591,72	24%	9.366,59	48%	13.958,31	72%	5.493,10	28%	19.451,41
	Média	6.147,49	24%	12.534,70	50%	18.682,19	74%	6.427,80	26%	25.109,99
	% Fuste	(33%)		(67%)						

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa em relação ao conteúdo total. Valores entre parênteses correspondem ao percentual de nutrientes presentes na madeira e na casca em relação ao fuste.

5.7.3. Exploração da biomassa da madeira (fuste sem casca)

Esse tipo de exploração, que utiliza somente a madeira, pode ser realizada pelo sistema de colheita de tora curtas ou longas, podendo ser associado ao sistema de cavaqueamento branco, onde a madeira é transformada em cavaco por meio de picadores após ser descascada. Para esse trabalho, o descascamento foi considerado como uma operação realizada no campo, com uma eficiência de 95%. Nesse caso, somente os nutrientes contidos na madeira são exportados; o remanescente permanece na área como resíduo da colheita.

Podem ser visualizadas na Tabela 20, tanto as quantidades exportadas de macronutrientes pela extração somente da madeira, como o percentual deles em relação ao conteúdo total.

Para a exploração da madeira o N foi o nutriente que mais se exportou, alcançando 439,47 kg ha⁻¹ no menor espaçamento e 253,20 kg ha⁻¹ no maior; isso em razão de ser o macronutriente com maior teor no compartimento madeira. Já a ordem decrescente de quantidades exportadas apresentou-se dessa forma: N > Ca > P > K > Mg > S.

Com relação à percentagem exportada de cada macronutriente, a ordem encontrada foi a seguinte: P > N > K > Mg > S > Ca. Com, em média, 72% do P sendo exportado, 55% do N, 39% do K, 34% do Mg e do S, e 28% do Ca. Com exceção do N e do P, a exportação do conteúdo total dos demais macronutrientes pode ser reduzida para menos de 40% com a exploração somente da madeira (Figura 14).

A operação de descascamento reduziu a exportação de Ca em 57%, devido a seu alto teor nesse compartimento. O Mg foi o segundo macronutriente que mais teve sua exportação afetada, tendo uma redução de 39% com a exploração somente da madeira. Em seguida vem o K, com 29%, o N com 18%, o P com 14% e o S com apenas 4% de redução em sua exportação, principalmente devido a seu baixo teor na casca.

Tabela 20. Quantidades de macronutrientes exportados pela colheita da biomassa da madeira nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nutriente (kg ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Exportado* (kg ha ⁻¹)	Remanescente (kg ha ⁻¹)
N	3x2	439,47 56%	340,60 44%
	3x3	349,73 56%	277,23 44%
	4x3	313,54 55%	260,14 45%
	4x4	253,20 53%	222,38 47%
	Média	338,99 55%	275,09 45%
P	3x2	173,65 73%	64,76 27%
	3x3	138,21 72%	52,60 28%
	4x3	123,91 72%	49,19 28%
	4x4	100,06 70%	41,87 30%
	Média	133,96 72%	52,10 28%
K	3x2	158,62 40%	238,29 60%
	3x3	126,19 39%	193,92 61%
	4x3	113,12 38%	181,80 62%
	4x4	91,37 37%	155,14 63%
	Média	122,33 39%	192,29 61%

Continuação.

Nutriente (kg ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Exportado*		Remanescente	
		(kg ha ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)	
Ca	3x2	217,88	28%	558,32	72%
	3x3	173,18	28%	444,97	72%
	4x3	155,21	28%	405,48	72%
	4x4	125,43	27%	336,84	73%
	Média	167,93	28%	436,40	72%
Mg	3x2	56,47	35%	103,46	65%
	3x3	44,91	35%	83,42	65%
	4x3	40,26	34%	77,26	66%
	4x4	32,52	33%	65,21	67%
	Média	43,54	34%	82,34	66%
S	3x2	28,11	36%	49,55	64%
	3x3	22,37	35%	40,97	65%
	4x3	20,06	34%	39,29	66%
	4x4	16,20	32%	34,31	68%
	Média	21,68	34%	41,03	66%

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa em relação ao conteúdo total. *Valor ajustado considerando 95% de eficiência na operação de descascamento do fuste.

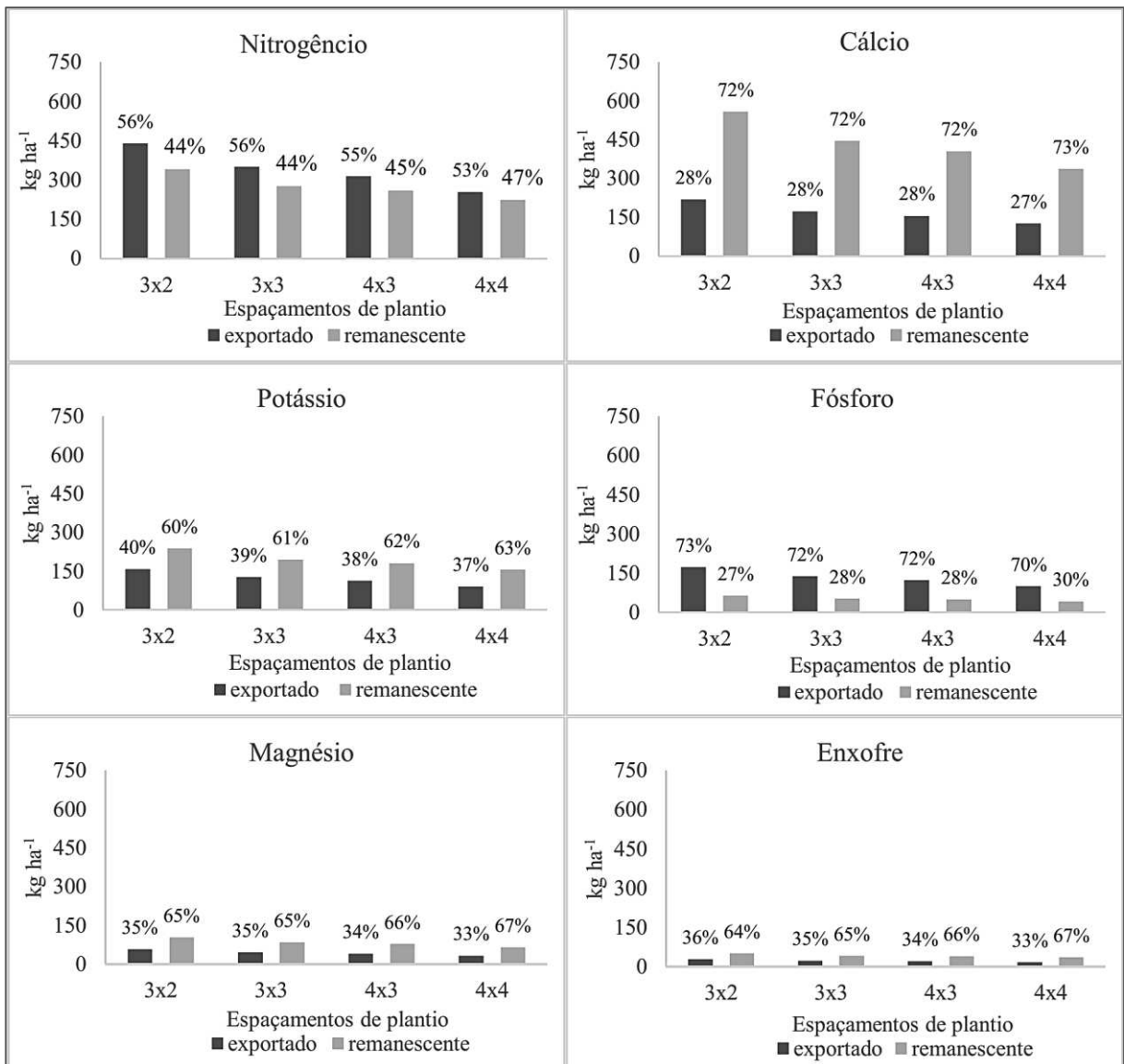


Figura 14. Macronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa da madeira em diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Podem ser visualizadas na Tabela 21, tanto as quantidades exportadas de micronutrientes pela extração somente da madeira, como o percentual deles em relação ao conteúdo total.

Tabela 21. Quantidades de micronutrientes exportados pela colheita da biomassa da madeira nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Nutriente (g ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Exportado* (g ha ⁻¹)	Remanescente (g ha ⁻¹)
B	3x2	332,26 60%	217,73 40%
	3x3	264,43 60%	178,72 40%
	4x3	237,08 58%	169,51 42%
	4x4	191,44 57%	146,26 43%
	Média	256,30 59%	178,05 41%
Cu	3x2	854,53 57%	635,40 43%
	3x3	680,03 57%	520,99 43%
	4x3	609,66 55%	492,94 45%
	4x4	492,33 54%	423,60 46%
	Média	659,14 56%	518,23 44%
Fe	3x2	1.989,89 29%	4.805,87 71%
	3x3	1.582,26 29%	3.861,31 71%
	4x3	1.418,18 28%	3.559,67 72%
	4x4	1.145,86 28%	2.992,37 72%
	Média	1.534,05 29%	3.804,81 71%
Mn	3x2	3.422,00 17%	16.545,89 83%
	3x3	2.717,57 17%	13.254,23 83%
	4x3	2.434,82 17%	12.166,68 83%
	4x4	1.968,92 16%	10.183,12 84%
	Média	2.635,83 17%	13.037,48 83%
Zn	3x2	2.189,39 69%	985,05 31%
	3x3	1.742,51 68%	802,96 32%
	4x3	1.562,24 67%	754,75 33%
	4x4	1.261,50 66%	646,00 34%
	Média	1.688,91 68%	797,19 32%

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa em relação ao conteúdo total. *Valor ajustado considerando 95% de eficiência na operação de descascamento do fuste.

Em termos de quantidades exportadas, o Mn é o elemento que mais é retirado na colheita, principalmente em razão da maior quantidade de biomassa produzida no compartimento madeira, e também por ser o micronutriente com o maior teor nesse compartimento. O B foi o elemento menos exportado em razão desse ter a menor concentração média na árvore, e maiores concentrações nos compartimentos caca, galhos e folhas em relação ao compartimento madeira. A ordem de quantidades exportadas apresentou-se da seguinte maneira: Mn > Zn > Fe > Cu > B.

No entanto, pode ser melhor visualizado na Figura 15, que o micronutriente mais exportado em termos percentuais foi o Zn e o menos foi o Mn, já que o primeiro apresenta um maior teor na madeira e segundo um maior teor na casca, que, nesse caso, não é explorada. Com exceção do Mn e do Fe, mais de 50% dos demais micronutrientes ainda são retirados com a exploração somente da biomassa da madeira. A ordem, em termos percentuais, de exportação desses elementos foi a seguinte: $Zn > B > Cu > Fe > Mn$. Com em média sendo extraído pela colheita 68% do Zn, 59% do B, 56% do Cu, 29% do Fe e 17% do Mn.

Apesar do Mn ainda ser o micronutriente mais exportado em termos de conteúdo, a grande diferença do teor de Mn na casca em relação à madeira foi o motivo desse elemento ser o menos exportado em termos percentuais, sendo sua retirada reduzida em 56% com a operação de descascamento. Pelo mesmo motivo houve uma redução de 44% na exportação do elemento Fe. Já os elementos B e Zn tiveram sua exportação reduzida em 13%, e o Cu em 20%.

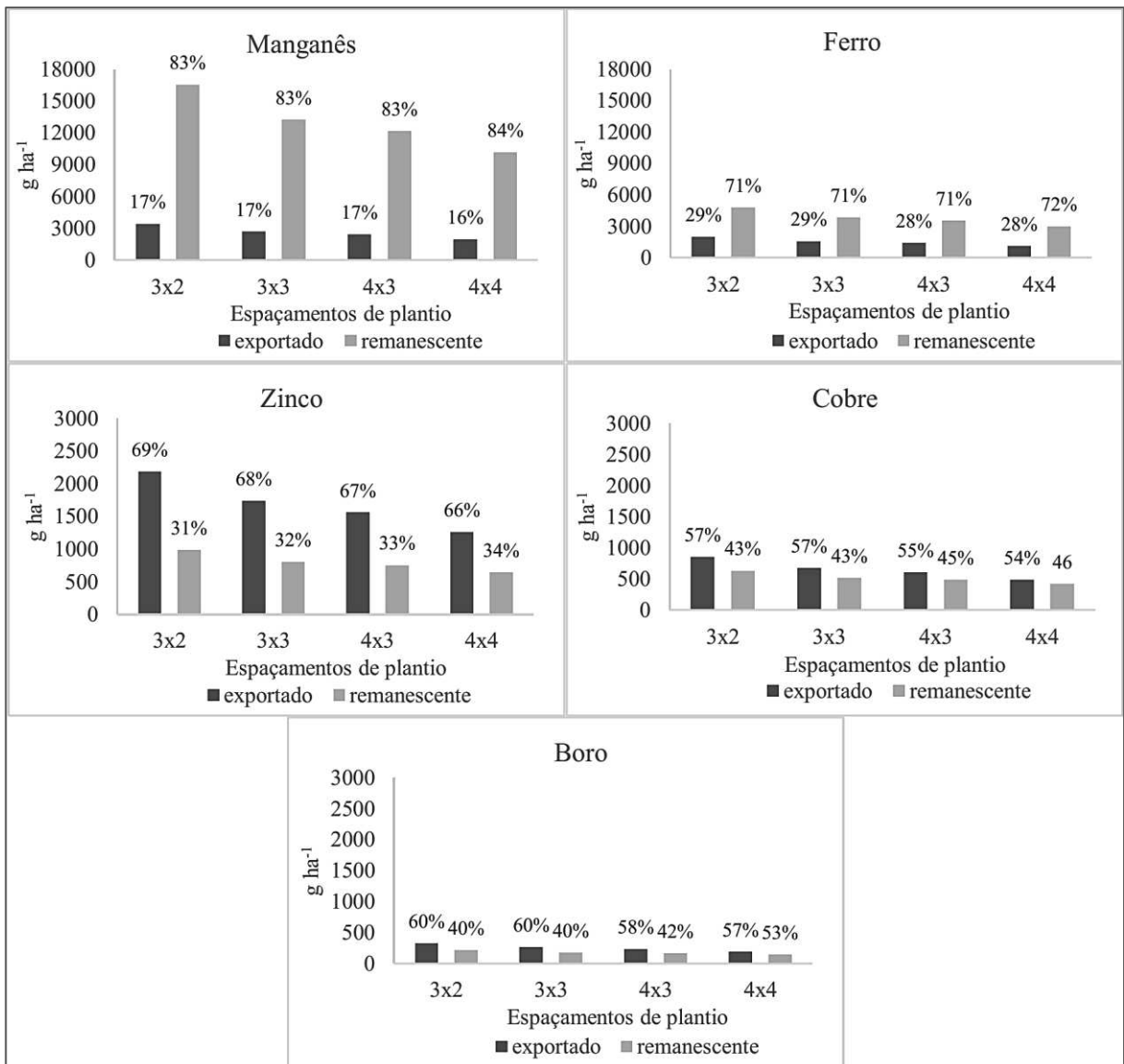


Figura 15. Micronutrientes exportados e remanescentes após a colheita da biomassa da madeira em diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade.

Podem ser visualizadas na Tabela 22 as quantidades totais de macronutrientes e micronutrientes exportados pela colheita da madeira e o percentual deles em relação ao conteúdo total.

Na exploração da madeira, em média 43% do total de macronutrientes é exportada, chegando a 1.074,18 kg ha⁻¹, no menor espaçamento, e a 618,77 kg ha⁻¹ no maior. Apesar de ainda ser uma quantidade expressiva, a operação de descascamento pode reduzir em média de 73% para 43% a exportação de macronutrientes.

Para micronutrientes, a percentagem exportada foi em média de 27%, com o menor espaçamento de plantio alcançando um valor exportado de 8.788,06 g ha⁻¹ e o maior 5.060,05 g ha⁻¹. Em razão da maior concentração desses elementos na casca, principalmente Fe e Mn, a operação de descascamento pode reduzir de 74% para 27% as quantidades totais de micronutrientes exportados.

Tabela 22. Quantidades totais de nutrientes exportados pela colheita da biomassa da madeira nos diferentes espaçamentos para *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade

Tratamento Espaçamento (m)	MACRONUTRIENTES (kg ha ⁻¹)				Total (kg ha ⁻¹) (g ha ⁻¹)	
	Exportado*		Remanescente			
1	3x2	1.074,18	44%	1.354,98	56%	2.429,16
2	3x3	854,60	44%	1.093,12	56%	1.947,71
3	4x3	766,10	43%	1.013,16	57%	1.779,25
4	4x4	618,77	42%	855,74	58%	1.474,52
	Média	828,41	43%	1.079,25	57%	1.907,66
MICRONUTRIENTES (g ha⁻¹)						
1	3x2	8.788,06	27%	23.189,95	73%	31.978,01
2	3x3	6.986,80	27%	18.618,20	73%	25.605,00
3	4x3	6.261,97	27%	17.143,55	73%	23.405,52
4	4x4	5.060,05	26%	14.391,36	74%	19.451,41
	Média	6.774,22	27%	18.335,76	73%	25.109,99

Valores em itálico correspondem ao percentual de nutrientes presentes na biomassa em relação ao conteúdo total. *Valor ajustado considerando 95% de eficiência na operação de descascamento do fuste.

6. CONCLUSÕES

O modelo 2 ajustado, que utiliza as variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito e altura total, foi o que apresentou os melhores resultados para a estimativa da biomassa total e de seus compartimentos.

Para os compartimentos galhos e folhas, o ajuste das equações apresentaram $Sy_x\%$ e distribuições gráficas dos resíduos considerados pouco satisfatórios.

As densidades de plantio testadas afetaram significativamente a produção de matéria seca total de biomassa por hectare e por compartimento, além da produção média de biomassa seca por árvore e, conseqüentemente, nas quantidades totais de nutrientes exportados.

A ampliação do espaçamento de plantio produz em média árvores maiores e com uma tendência de aumento na contribuição da biomassa de galhos e folhas, e uma redução na contribuição da biomassa da madeira e da casca, o que também interfere no percentual de nutrientes exportados e remanescentes em relação à biomassa total.

Os tratamentos testados não afetaram significativamente o teor de macronutrientes e micronutrientes.

O sistema de colheita de árvores inteiras, que extrai toda a biomassa acima do solo, deve ser tratado com cautela em razão da grande quantidade de nutrientes exportados.

A operação de descascamento reduz significativamente a quantidade de nutrientes exportados pela exploração da biomassa, principalmente de Ca e Mn, que possuem os maiores teores nesse compartimento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 146 p.
- AHRENS, S. Importância da distribuição de resíduos de regressão na seleção de equações de volume. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 609-614, 1983.
- ALVES, I. C. N.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; SILVA, H. D. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose Kraft. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 167-174, 2011.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.
- AUSTRALIA. Department of the Environment. **Approved Conservation Advice for *Eucalyptus benthamii***. Parkes, 2014. 5 p.
- BACCARIN, F. J. B. **Métodos para resgate, conservação e multiplicação em larga escala de matrizes de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2012. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP.
- BAGGIO, A. J.; CARPANEZZI, A. A.; SANMIGUEL, A. A. Equações estimativas do peso seco da biomassa aérea da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) na idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 30/31, p. 37-49, 1995.
- BALLONI, E. A.; SIMÕES, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 1, n. 3, p. 1-16, 1980.
- BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecology: from individuals to ecosystems**. 4. ed. Malden: Blackwell Publishing, 2006. 752 p.
- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 56, p. 31-41, 2008.
- BELLOTE, A. F. J.; SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. de. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 1 – macronutrientes. **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 1-23, 1980.
- BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

BERGER, R.; SCHNEIDER, R. P.; 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. 75-87, 2002.

BERNARDO, A.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B. ; FIRME, D. J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 104, n. 1 - 3, p. 1 - 3, 1998.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CHARNET, R.; FREIRE, C. A. L.; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H. **Análise de modelos de regressão linear**. Campinas: UNICAMP, 2008. 356 p.

COELHO, A. S. R.; MELLO, H. A.; SIMÕES, J. W. Comportamento de espécies de eucaliptos face ao espaçamento. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 1, p. 29-55, 1970.

COUTO, H. T. Z.; BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; CORRINI, L.; FAZZIO, E. C. M. Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, n. 26, p. 19-23, 1984.

DOSSA, D.; SILVA, H.D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHERI, H. R. **Produção e rentabilidade do eucalipto em empresas florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 4 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 83).

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 284 p.

FOELKEL, C. Descascamento de toras de eucalipto. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 131, Maio de 2012. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1604&subject=Toras&title=Descascamento%20de%20toras%20de%20eucaliptos. Acesso em: 05 de out. 2014.

FREITAS, R. A.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W.; SPATHELF, P. Estudo da biomassa e do conteúdo de nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden plantado em solo sujeito à arenização, no município de Alegrete-RS. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 93-104, 2004.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 2, n. 3, p. 81-86, 2011.

- GONÇALVES, J. L. M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. ESALQ/USP. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 15, p. 1-23, 1995.
- GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003.
- GRAÇA, M. E. C.; SHIMIZU, J. Y.; TAVARES, F. R. Capacidade de rebrota e de enraizamento de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 135-138, 1999.
- HARRIS, F. C. **The effect of competition on stand, tree, and wood growth and structure in subtropical *Eucalyptus grandis* plantations**. 2007. 193 p. Tese (Doctorate in Environmental Science and Management) – Southern Cross University, Lismore, NSW.
- HIGA, R. C. V. Aspectos ecológicos e silviculturais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 38, p. 121-123, 1999.
- HIGA, R. C. V.; PEREIRA, J. C. D. **Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 4 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 100).
- IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. 2000. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1 CD-ROM. Versão 1.0.
- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012. 431 p.
- KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R. M.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 251-262.
- LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Dordrecht: Springer, 2007. 389 p.
- LAMBERT, M. J. **Inorganic constituents in wood and bark of some NSW forest species**. Sydney: Forestry Commission of NSW, 1981. 15 p. (Forestry Commission of NSW. Research Note, 45)
- Larcher, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531p.
- LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 77-87, 2001.

- LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2010.
- MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S. O setor florestal brasileiro. In: MACHADO, C. C. (Ed.) **Colheita florestal**. 2ª ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 15-42.
- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006. 316 p.
- MAGALHÃES, W. M.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIM, N.; HIGASHIKAWA, E. M.; YOSHITANI JÚNIOR, M. Desempenho silvicultural de espécies de *Eucalyptus* spp. em quatro espaçamentos de plantio na região noroeste de Minas Gerais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 1-7, 2006.
- MAGALHÃES, W. M.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIM, N.; HIGASHIKAWA, E. M.; YOSHITANI JÚNIOR, M. Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 368- 375, 2007.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p. 145-164.
- MARTINI, A. J. **O plantador de *Eucalyptus*: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 320 p. Dissertação (Mestrado em História Social) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.
- MICHALOVICZ, L. **Atributos químicos do solo e resposta da sucessão milho-cevada-feijão-trigo influenciados por doses e parcelamento de gesso em plantio direto**. 2012. 41 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNICENTRO, Guarapuava, PR.
- MIRANDA, M. J. A.; NAHUZ, M. A. R. Estudo da influência do espaçamento de plantio de *Eucalyptus saligna* Smith nos índices de rachamento após o desdobro e após a secagem. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 55, p. 107-116, 1999.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2012**. Brasília: MME, 2013. 26 p.
- MORAIS, V. M. **Dinâmica de crescimento de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos na região noroeste do Estado de Minas Gerais**. 2006. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MORO, L.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da; REISSMANN, C. B. Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. baseada em volume estimado pelo sistema Sispinus. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 465-477, 2008.

MOTTA, A. C. V.; SERRAT, B. M. Princípios de adubação. In: LIMA, M. R. (Ed.). **Diagnóstico e recomendação de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR, 2006. p. 143-190.

MOURA, O. N.; PASSOS, M. A. A.; FERRERIA, R. L. C.; MOLICA, S. G.; LIRA JUNIOR, M. A.; SANTOS, M. V. F. Distribuição da biomassa e nutrientes na parte aérea de *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 877-884, 2006.

MÜLLER, M. D.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no Município de Itamarandiba - MG. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 91-101, 2005.

MÜLLER, M. D.; COUTO, L. **Avaliação de densidades de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para a produção de biomassa**. Viçosa: RENABIO, 2006. 58 p. (Documento Técnico nº 002).

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B.; KLOCK, U. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 67-76, 1998.

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.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. **Programa de melhoramento genético de eucalipto da Embrapa Florestas: resultados e perspectivas**. Colombo: Embrapa Florestas - CNPF, 2011. 66 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 214).

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T.; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas - CNPF, 2006. 45 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 129).

PATRÍCIO, H. S. M. **Caracterização anatômica da casca de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) e *Eucalyptus rudis* Endl. para identificação das espécies**. 2014. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) – Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, PT.

PAULA, J. A. M.; ROCHA, J. B.; NASCIMENTO, P. M. S.; REZENDE, M. H.; PAULA, J. R. Estudo farmacognóstico da casca de *Pimenta pseudocaryophyllus* (Gomes) L. R. Landrum – Myrtaceae. **Revista Eletrônica de Farmácia**, Goiânia, v. 3, n. 2, p. 1-3, 2006.

PAULINO, E. J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantios de eucalipto**. 2012. 54 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina, MG.

PEREIRA, A. P.; ANDRADE, D. C.; LEAL, P. G. L.; TEIXEIRA, N. C. S. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus saligna* cultivados na região de cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 15, n. 1, p. 8-16, 1984.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E. C. M. Exploração de biomassa e nutrientes através da exportação dos troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 25, p. 37-39, 1983.

POGGIANI, F.; ZEN, S.; MENDES, F. S.; SPINA-FRANÇA, F. Ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos. **IPEF**, Piracicaba, n. 27, p. 17-30, 1984.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z.; SIMÕES, J. W. **Aspectos ecológicos das “mini-rotações” e do aproveitamento dos resíduos florestais**. Piracicaba: IPEF, 1979. 7 p. (IPEF. Circular Técnica, 74)

RICHARDSON, M. Tree Descriptions for the National Arboretum Guidebook, Forest Signs and Website. **National Arboretum Canberra**. Canberra, dez. 2012. Disponível em: <http://www.nationalarboretum.act.gov.au/visit/trees/tree_stories/camden_white_gum> Acesso em: 15 jan. 2014.

SAIDELLES, F. L. F. **Determinação da biomassa e altura de amostragem para a quantificação de nutrientes em *Acacia mearnsii* De Wild**. 2005. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R. M.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 119-140.

SANT’ANNA, C. de M. Corte Florestal. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p. 55-88.

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**, n. 56, p. 155-169, 1999.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, número especial, p. 2723-2734, 2008.

SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETTI JUNIOR, A. **Doenças do eucalipto no sul do Brasil: identificação e controle**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 20 p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 45).

SANTOS, M. D. **Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. 2011. 140 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria: UFSM, 1997. 217 p.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie *maidenii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

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.

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi - SP. **Ciência florestal**, Santa Maria, v. 3, n.1, p. 21-34, 1993.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul-RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 321-332, 2013.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: parte I: modelos de regressão linear e não-linear; parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p. (Textos Acadêmicos).

SEIXAS, F. Aspectos atuais e perspectivas de desenvolvimento em exploração florestal. **IPEF**. Piracicaba, 1983. 10 p. (IPEF. Circular Técnica, 25)

SILVA, C. R. **Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região nordeste do Estado de São Paulo**. 2005. 50 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; CUNHA, A. B. Caracterização energética do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 2012, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Trabalhos/05-Silvicultura/SIL-Artigo-36.pdf>>. Acesso em: set. 2013.

SILVA, F. A. S. **ASSISTAT versão 7.6 beta (2012)**. Disponível em: <<http://www.assistat.com/index.html>>. Acesso em: 15 fev. 2014.

SILVA, H. D. **Modelos matemáticos para a estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill (ex- Maiden) em diferentes idades**. 1996. 101 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Biomassa, concentração e conteúdo de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus* plantadas em solos de baixa fertilidade. **Boletim Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 6/7, p. 9-25, 1983.

SILVA, M. L. M. DA; 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.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2º ed., Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312 p.

VIANA, H.; CARDOSO, A.; CORREIA, R.; LOPES, D.; ARANHA, J. Estabelecimento de modelos alométricos para predição da biomassa aérea de *Eucalyptus globulus*. In: CONGRESSO FLORESTAL NACIONAL: A FLORESTA NUM MUNDO GLOBALIZADO, 6., 2009, Ponta Delgada. **Actas do...** Ponta Delgada: SPCF, 2009. p. 765-770.

VIEIRA, M. **Dinâmica nutricional em povoamento híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* em Eldorado do Sul – RS, Brasil**. 2012. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

VIEIRA, M. V.; 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, 2013.

VIEIRA, M.; BONACINA, D. M.; SCHUMACHER, M. V.; CALIL, F. N.; CALDEIRA, M. V.; WATZLAWICK, L. F. Biomassa e nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste – RS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, suplemento 1, p. 2481-2490, 2012.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 685-692, 1998.

WATZLAWICK, L.F. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite IKONOS II**. 2003. 120 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WEINER, J.; FRECKLETON, R. P. Constant Final Yield. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 41, p. 173-192, 2010.

WEST, P. W. **Tree and forest measurement**. 2. ed. New York: Springer, 2009. 190 p.

ZAGONEL, R. **Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de *Pinus taeda***. 2005. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que se possa obter melhores ajustes dos modelos para estimativa da biomassa de galhos e folhas em povoamentos florestais, deve-se coletar no campo mais variáveis dendrométricas, como diâmetro da copa ou o diâmetro e altura do fuste no início da copa.

Estudos sobre a sustentabilidade nutricional do solo, analisando a dinâmica da ciclagem de nutrientes, seus estoques em profundidades maiores que as usuais, irão auxiliar na aplicação de técnicas de manejo mais adequadas, evitando a degradação do solo e futuras deficiências nutricionais.

Com relação à manutenção da capacidade do sítio florestal, o manejo dos resíduos da colheita é uma medida essencial para garantir que o remanescente da biomassa explorada possa retornar ao solo e garantir parte da necessidade de nutrientes das próximas rotações.

Porém, tanto na exploração do fuste com casca como somente da madeira, a permanência dos nutrientes nas áreas exploradas implica na operação de distribuição dos resíduos, o que envolve gastos financeiros, devendo ser analisada economicamente, considerando o número de rotações que o solo suporta para cada nutriente e o custo reposição desses. Também deve-se considerar o uso alternativo da casca, como para geração de energia ou compostagem.

Deve-se também avaliar, no caso do uso da biomassa para energia, a utilização das cinzas como fertilizante alternativo, que é considerada um resíduo da indústria e muitas vezes até mesmo um passivo ambiental. Essa seria uma alternativa para o retorno desses elementos ao campo, minimizando os efeitos da exportação de nutrientes. Porém, nesse caso também deverão ser analisadas as questões ambientais e nutricionais envolvidas no uso desse material, assim como os custos de operação, principalmente a distância de transporte até as áreas de cultivo e a forma de aplicação.

APÊNDICE I

Resultado do ajuste do Modelo de Curtis para estimativa de alturas de árvores de *Eucalyptus benthamii* aos 6 anos de idade.

Modelo	Coeficientes		R ² ajust.	Syx (m)	Syx (%)
	b ₀	b ₁			
$\ln H = b_0 + b_1 \ln DAP^{-1}$	3,611	-7,852	0,897	1,45	6,29

Syx: erro padrão da estimativa.

APÊNDICE II

Resumo da análise de variância dos dados referentes à biomassa total e dos compartimentos madeira, casca, galhos e folhas, em *Eucalyptus benthamii* sob diferentes densidades de plantio aos 6 anos de idade.

BIOMASSA TOTAL				
Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Blocos	3	2412,718	804,239	1,613 ^{ns}
Tratamentos	3	11743,355	3914,451	7,852*
Resíduos	9	4486,251	498,472	
Total	15	18642,324		
BIOMASSA DA MADEIRA				
Blocos	3	1403,244	467,748	1,646 ^{ns}
Tratamentos	3	7344,890	2448,296	8,617*
Resíduos	9	2557,119	284,124	
Total	15	11305,254		
BIOMASSA DA CASCA				
Blocos	3	27,691	9,230	1,299 ^{ns}
Tratamentos	3	219,080	73,026	10,281*
Resíduos	9	63,925	7,102	
Total	15	310,697		
BIOMASSA DOS GALHOS				
Blocos	3	16,195	5,398	1,634 ^{ns}
Tratamentos	3	16,262	5,420	1,641 ^{ns}
Resíduos	9	29,727	3,303	
Total	15	62,186		
BIOMASSA DAS FOLHAS				
Blocos	3	7,057	2,352	1,765 ^{ns}
Tratamentos	3	12,177	4,059	3,045 ^{ns}
Resíduos	9	11,994	1,332	
Total	15	31,229		

*Valores significativos a 1% de probabilidade pelo teste F; ns: não significativo ($p \geq 0,05$).