

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**QUALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO
ESPAÇAMENTO, DA ADUBAÇÃO E DA IDADE CONDUZIDA NO SISTEMA
FLORESTAL DE CURTA ROTAÇÃO**

ÉDER APARECIDO GARCIA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP
Novembro – 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**QUALIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO,
DA ADUBAÇÃO E DA IDADE CONDUZIDA NO SISTEMA DE CURTA ROTAÇÃO**

ÉDER APARECIDO GARCIA

Orientador: Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças
Co-orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP
Novembro – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G216q Garcia, Éder Aparecido, 1983-
Qualidade da madeira de eucalipto em função do espaçamento, da adubação e da idade conduzida no sistema de curta rotação / Éder Aparecido Garcia. - Botucatu : [s.n.], 2013
xii, 71 f. : fots. color., tabs., grafs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013
Orientador: Kléber Pereira Lanças
Coorientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
Inclui bibliografia

1. Biomassa florestal. 2. Silvicultura. 3. Energia - Fontes alternativas. 4. Viabilidade econômica. I. Lanças, Kléber Pereira. II. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “QUALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM
FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO, DA ADUBAÇÃO E DA IDADE
CONDUZIDO NO SISTEMA FLORESTAL DE CURTA ROTAÇÃO”

ALUNO: ÉDER APARECIDO GARCIA


ORIENTADOR: PROF. DR. KLÉBER PEREIRA LANÇAS

COORIENTADOR: PROF. DR. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA



PROF. DR. FABIO MINORU YAMAJI



PROF. DR. JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA



PROFA. DRA. FRANCIANE ANDRADE DE PÁDUA



PROF. DR. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO

Data da Realização: 12 de novembro de 2013.

“Só Deus é minha rocha e a minha salvação, é minha defesa; não serei abalado”.

(Sl. 62:6)

DEDICO

Aos meus pais, Herondino Aparecido Garcia e Devanilda Bernardo Garcia.

À minha esposa, Rosiane Vaz de Lima Garcia e aos meus filhos, Lucas e Davi.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela força.

Aos meus pais, minha esposa e companheira Rosiane.

Aos funcionários do Departamento de Recursos Naturais/Ciências Florestais e aos funcionários do Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial, pelo convívio e suporte as atividades essenciais para realização deste trabalho de pesquisa.

Aos professores orientadores Kléber Pereira Lanças e Saulo Philipe Sebastião Guerra, pela amizade, paciência e apoio em todos os momentos da condução do trabalho.

À Universidade Estadual Paulista, pela oportunidade dada a mim.

Ao Valdir Aparecido Antunes, na época da coleta de dados, gerente da empresa Santo Amaro Reflorestamento, pelo apoio ao trabalho.

Aos colegas Fabrício, Indiamara, Guilherme, Montanha, Buri, Mariana Montelatto, Natália, Guilherme (Dose), Romulo, Felipe Machado, Felipe Masiero, Humberto e tantos outros amigos que colaboraram nos trabalhos durante a condução da pesquisa.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro, por meio da bolsa de estudos concedida.

Aos coordenadores do curso de pós-graduação em Ciência Florestal.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação pela ajuda no bom andamento das formalizações durante o curso.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | VI |
| LISTA DE TABELAS | VII |
| RESUMO | IX |
| SUMMARY | XI |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1 Efeito da adubação e do espaçamento | 3 |
| 2.2 Biomassa Florestal..... | 7 |
| 2.3 Densidade da Madeira | 8 |
| 2.4 Energia e Química da Madeira | 10 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 14 |
| 3.1 Área Experimental..... | 14 |
| 3.2 Práticas Silviculturais e Delineamento | 15 |
| 3.3 Dendrometria..... | 16 |
| 3.4 Coleta de árvores-amostra e estimativa da biomassa de madeira..... | 17 |
| 3.5 Densidade Básica e Energia da Madeira com Casca | 18 |
| 3.6 Química da Madeira | 20 |
| 3.7 Exportação de Nutrientes..... | 21 |
| 3.8 Análise Estatística | 21 |
| 3.9 Viabilidade Econômica: Estudo de Caso | 21 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 24 |
| 4.1 Volume por área | 24 |
| 4.2 Densidade da madeira..... | 26 |
| 4.3 Massa Seca por Área | 27 |
| 4.4 Poder calorífico superior da madeira com casca | 30 |
| 4.5 Produtividade Energética..... | 31 |
| 4.6 Características Químicas da Madeira | 32 |
| 4.6.1 Acúmulo de extrativos totais, lignina e cinza..... | 35 |
| 4.7 Exportação de Nutrientes..... | 38 |
| 4.8 Viabilidade Econômica: estudo de caso | 42 |
| 5. CONCLUSÕES | 46 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 48 |
| 7. APÊNDICE | 57 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Aspecto geral da área experimental, em (A) uma das parcelas com espaçamento 2,8x0,5 m com maior variabilidade dos diâmetros e em (B) uma das parcelas com espaçamento 2,8x1,5 m. | 15 |
| Figura 2. Discos coletados do tronco em vários pontos considerando a porcentagem da altura total da árvore-amostra. | 17 |
| Figura 3. Medição da altura total da árvore-amostra abatida. | 18 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Produção de madeira, em m ³ .ha-1, de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> nos distintos espaçamentos, níveis de adubação e idade de colheita..... | 25 |
| Tabela 2. Incremento corrente anual (ICA) e incremento médio anual (IMA) da floresta de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> | 26 |
| Tabela 3. Análise de variância dos dados de densidade básica média – DBM (kg.m-3) da madeira com casca | 26 |
| Tabela 4. Densidade básica média, kg.m-3, da madeira com casca de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i> | 27 |
| Tabela 5. Resultados da análise de variância dos dados de produção de madeira (t.ha-1) . | 28 |
| Tabela 6. Produção de madeira, em t.ha-1, de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> nos distintos espaçamentos, níveis de adubação e idade de colheita..... | 29 |
| Tabela 7. Resultado da análise de variância para poder calorífico superior..... | 30 |
| Tabela 8. Poder calorífico superior da madeira com casca (MJ.kg-1) de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> | 30 |
| Tabela 9. Produtividade energética, em GJ.ha-1 e em tep.ha-1, do povoamento de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> nos distintos espaçamentos, níveis de adubação e idade de colheita | 32 |
| Tabela 10. Teor de extrativos totais (%) na madeira com casca | 34 |
| Tabela 11. Teor de lignina (%) na madeira com casca..... | 34 |
| Tabela 12. Teor de cinzas (%) na madeira com casca..... | 35 |
| Tabela 13. Acumulo de extrativos totais na madeira com casca (kg.ha ⁻¹) | 36 |
| Tabela 14. Acumulo de lignina na madeira com casca (kg.ha-1)..... | 37 |
| Tabela 15. Acumulo de cinza na madeira com casca (kg.ha-1) | 38 |
| Tabela 16. Quantidade média de nutrientes na madeira com casca, em kg.ha-1 | 39 |
| Tabela 17. Indicadores econômicos, para corte aos 18 meses, com diferentes taxas de juros | 42 |
| Tabela 18. Indicadores econômicos, para corte aos 24 meses, com diferentes taxas de juros | 43 |

| | |
|---|----|
| Tabela 19. Indicadores econômicos, para corte aos 30 meses, com diferentes taxas de juros | 44 |
|---|----|

RESUMO

A crescente demanda por recursos energéticos renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de plantios florestais com maior eficiência na produção de madeira com qualidade para este fim, mas com viabilidade econômica e com mínimos danos a sustentabilidade dos sítios de produção, fatores que objetivaram e justificaram o presente trabalho com *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em sistemas de curta rotação. O experimento foi instalado em 2008, nos espaçamentos de 2,8x0,5 m, 2,8x1,0 m, 2,8x1,5 m, 2,8x2,0 m e 2,8x2,5 m, com três níveis de adubação. A aplicação de adubos foi NPK 6-30-6 no plantio nas doses de 70, 140 e 280 g.planta⁻¹ e na cobertura foi de NPK 20-0-20 nas doses de 25, 50 e 100 g.planta⁻¹ aos 60 dias, 35, 70 e 140 g.planta⁻¹ aos 140 dias e 50, 100 e 200 g.planta⁻¹ aos 360 dias após o plantio. Árvores amostra foram colhidas em três ocasiões, aos 18 meses, 24 meses e 30 meses para avaliações de volume, massa seca de madeira e atributos energéticos produtividade energética, acúmulo de cinzas, lignina e extrativos na madeira e exportação de nutrientes. Baseando-se no estudo de caso dos custos operacionais da empresa para a produção de briquetes, foram simulados os indicadores econômicos valor presente líquido, razão benefício custo e custo médio de produção. A maior produção de volume de madeira com casca ocorreu aos 30 meses, no espaçamento de 2,8x0,5 m e 2,8x1,0 m, considerando que nesta idade a média estimada foi de 167 m³.ha⁻¹. Com relação a massa seca de madeira, médias de 70 e 90 t.ha⁻¹ foram encontradas nos espaçamentos mais adensados e com maior aplicação de adubo. A produtividade energética foi maior em espaçamentos mais adensados, 2,8x0,5m e

2,8x1,0 m, especialmente quando colhido aos 30 meses, no caso de 0,5 m entre árvores atingiu média de 40 tep.ha⁻¹. Os compostos lignina, extrativos e cinzas foram encontrados em maior acúmulo nas árvores colhidas de espaçamento mais amplos, sendo o teor de cinzas em torno de 1% devido a presença da casca na amostra. Quanto à simulação da exportação de nutrientes, a ordem K>N>P>B>Zn foi observada na maioria dos tratamentos, sendo que os espaçamentos mais adensados exportaram mais, isto influencia na decisão de espaçamento, devido a possível necessidade de reposição de nutrientes. Por isso o aspecto econômico do processo foi considerado, sendo os maiores valor presente líquidos (VPL) observados nos tratamentos colhidos aos 30 meses, quando se simulou colheita aos 18 meses, alguns tratamentos do espaçamento 2,8x0,5 m foram considerados inviáveis. O melhor VPL estimado foi de R\$ 4442.ha⁻¹ no espaçamento de 2,8x1,0 m, nível 2 de adubação, e com colheita aos 30 meses, para este caso a razão benefício custo foi de 1,7 e o custo de produção foi de R\$ 217 por tonelada de briquete, sendo assim o tratamento recomendado.

Palavras-chave: biomassa florestal, silvicultura, energia, viabilidade econômica.

SUMMARY

THE ENERGY QUALITY OF EUCALYPTUS WOOD AS A FUNCTION OF SPACING, FERTILIZATION AND AGE FOR FOREST SYSTEM SHORT ROTATION

Tesis (Doctor Science in Forest Science) – Agronomical Science College, Universidade Estadual Paulista

Author: ÉDER APARECIDO GARCIA

Advisor: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

Co-advisor: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

The growing demand for renewable energy resources has driven the development of forest plantations with greater efficiency in the production of quality wood for this purpose, but with economic viability and sustainability with minimal damage to the sites of production, factors that objected and justified the present work. The experiment was installed in 2008 on a farm in which it produces wood briquettes, the spacing of 2.8x0.5 m, 2.8x1.0 m, 2.8x1.5 m, 2.8x2.0 m and 2.8x2.5 m, with three levels of fertilization. The application of fertilizers was NPK 30-6 at planting at doses of 70, 140 and 280 g/plant and the coverage was NPK 20-0-20 at doses of 25, 50 and 100 g/plant at 60 days, 35, 70 and 140 g/plant at 140 days and 50, 100 and 200 g/plant at 360 days after planting. Sample trees were harvested on three occasions, at 18 months, 24 months and 30 months for evaluation of volume, dry mass and the energy attributes energy productivity, accumulation of ash, lignin and extractives in wood and

nutrient export. Based on the case study of the company's operating costs for the production of briquettes, economic indicators were simulated net present value, benefit cost ratio and average cost of production. The largest production volume of wood with bark occurred at 30 months, spaced 2.8x0.5 m and 2.8x1.0 m, whereas this age the estimated average was 167 m³/ha. With respect to dry mass, averaging 70 and 90 t/ha were found in denser spacing and greater application of fertilizer. The productivity was higher in energy narrower spacing plant, 2.8x0.5 m and 2.8x1.0 m, especially when obtained at 30 months in the case of trees planting between 0.5 m of space reached average 40 tep/ha. Already compounds lignin, extractives and ash were found in greater accumulation in trees harvested wider spacing, and the ash content of around 1% due to the presence of bark in the sample. As the simulation of export of macronutrients, the narrower spacing plant export more, that influences the decision of spacing, due to the possible need for replacing nutrients. So the economics of the process was considered, being the highest net present value (NPV) observed in the treatments harvested at 30 months when harvesting was simulated at 18 months, some treatments of spacing 2.8x0.5 m were inviable. The best NPV was estimated at R\$ 4442/ha spacing of 2.8x1.0 m, level 2 fertilization, and harvesting at 30 months, in this case the benefit cost ratio was 1.7 and the production cost was R\$ 217/ton briquette, so the recommended treatment.

Keywords: forest biomass, energy, economic viability

1. INTRODUÇÃO

Os plantios florestais de eucalipto, no Brasil, são dos mais produtivos do mundo e destinam-se principalmente à produção de celulose, serraria e também para fins energéticos. Em estados mais industrializados ou em outros com muita atividade siderúrgica, é grande a demanda de madeira para energia, havendo um aumento ano após ano, por isso a maior produtividade dos sítios florestais torna-se fundamental.

O estado de Minas Gerais detém cerca de 30 % da área plantada com espécies de eucalipto, seguido por São Paulo, com 17,3 %. Dos plantios florestais em todo País, 54% estão na região sudeste e 18,4 % de toda área plantada é destinada ao setor de bioenergia (ABRAF, 2013).

O briquete é um biocombustível sólido oriundo de um processo de conversão, a densificação da biomassa, por isso, a briquetagem é considerada uma das formas de se concentrar a energia contida no material lignocelulósico. Além disso, os briquetes podem ser estocados e transportados com custos operacionais menores (LIPPEL, 2013).

Para que a madeira seja colhida de forma precoce para a produção de briquetes, uma grande produtividade ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) ou alta produção torna-se necessária para o abastecimento da fábrica, buscando não comprometer muito as qualidades físicas da madeira, tais como a densidade e seu poder calorífico. Neste contexto, a adubação e o espaçamento podem influenciar na dinâmica de crescimento das árvores alterando as

características anatômicas da madeira e suas propriedades tecnológicas. As árvores com menor área útil competem mais pelos recursos naturais promovendo maior incremento em altura do que em diâmetro, todavia, espaçamentos mais adensados podem gerar maior produção por área e adiantamento da idade de corte o que promoveria amortização do maior custo de implantação.

Desta forma, a definição do espaçamento e da adubação torna-se fundamental para a produção de biomassa visto que o adensamento pode gerar maior nível de competição, por outro lado, acarreta maior produtividade, intensificada pelo manejo da adubação, por unidade de área.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a produção e as características tecnológicas da madeira pertinentes ao seu uso energético testando a hipótese de que ocorre influência da adubação, do espaçamento e da idade de colheita.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Efeito da adubação e do espaçamento

O espaçamento praticado no plantio é importante porque afeta a formação das florestas, seus tratos culturais, a qualidade da madeira, sua extração e, por conseqüência, os custos de produção. Do ponto de vista energético, as pesquisas precisam ser direcionadas no sentido de caracterizar qual a melhor forma de implantar a floresta, com adubação e espaçamento adequados, sem prejudicar as propriedades relacionadas a esse fim, como é o caso do poder calorífico da madeira. Apesar de haver muita competição entre plantas nos plantios adensados (RECH, CITADO POR CARDOSO JÚNIOR, 2004), para o objetivo de produção de biomassa é aceitável e, com os dados do presente trabalho, espera-se contribuir para indicação do melhor espaçamento e adubação para produção de biomassa.

A competição entre as árvores inicia-se quando um único fator de crescimento cai abaixo da demanda de cada planta. Em alguns trabalhos a taxa de crescimento relativo (TCR) é adotada como parâmetro para detectar se ocorre competição entre as plantas. O início de uma competição fica caracterizada quando as árvores de menor porte têm TCR menor que o resto da população. Outro aspecto a ser considerado é que um aumento na fertilidade proporciona crescimento mais rápido, conseqüentemente, ocorre o adiantamento da taxa de concorrência em plantações florestais (FORD, 1984). Por outro lado, a fertilização aumenta a produção e reduz a alocação de metabólitos para as raízes, proporcionando o crescimento de madeira. É importante a aplicação planejada de adubos no meio agrícola e

florestal, especialmente em solos mais arenosos, porque estudos têm comprovado que uma porcentagem baixa dos nutrientes aplicados no solo é realmente absorvida na árvore (FISCHER e BINFLEY, 2000).

A espécie, o espaçamento e a idade têm que nortear os programas de implantação de florestas para energia; na década de 1980 recomendava-se evitar plantios com espaçamentos menores que $3 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$ vistas ao material genético disponível na época. Em uma comparação entre *Eucalyptus grandis* e o *E. saligna*, o primeiro apresentou menor número de árvores mortas e de dominadas em espaçamentos adensados (BALLONI et al., 1980).

Numa avaliação de plantas de *Eucalyptus saligna*, clone 4013II, cultivadas em solo de textura argilosa, no período que compreendeu dos três aos dez anos de idade, com diferentes espaçamentos e doses de 400 e 800 kg.ha^{-1} de fosfato natural aplicado a lanço, Berger et al. (2002) observaram que o fator adubação não influenciou significativamente a maioria das variáveis por eles avaliadas; em contrapartida, o espaçamento influenciou, de forma marcante, no crescimento em diâmetro e volume comercial sem casca.

Avaliando a influência de diferentes doses de potássio e fósforo para o DAP, altura e volume cilíndrico de *Acacia mearnsii*, aos 61 meses de idade, Andrade et al. (2004) encontraram aumento nos volumes cilíndricos das árvores em relação à testemunha tanto na presença de doses crescentes de P e ausência de K quanto nos tratamentos com doses crescentes de potássio e ausência de P. Afirmam que a aplicação em conjunto de P e K foi mais eficiente para ganhos em volume da madeira ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), embora a interação fósforo x potássio não tenha sido estatisticamente significativa.

Em plantio de *Acacia mearnsii*, o crescimento do diâmetro teve influência direta do espaçamento, com o maior diâmetro encontrado no espaçamento de $3 \times 2 \text{ m}$ e o menor, no espaçamento de $1 \times 1 \text{ m}$, diante de tais resultados, Schneider et al. (2000) constataram que a densidade da população não afeta, de fato, o crescimento em altura do povoamento; todavia, uma variável como a área basal é inversamente proporcional ao espaçamento, como foi o de $1 \times 1 \text{ m}$ da acácia, aos nove anos de idade.

A adubação fosfatada em *Eucalyptus dunnii* resultou em ganhos de volume cilíndrico arbóreo de 38% a 61% da menor para a maior dose de fósforo aplicada em região de Latossolo Vermelho-Amarelo, no estado do Paraná (ANDRADE et al., 2003).

Plantios de *Eucalyptus grandis* em diferentes locais no estado de São Paulo receberam adubação com NPK e foi avaliada a relação entre teores de nutrientes nas folhas e no solo (BELLOTE et al., 1993). Os teores foliares de Ca, S, Fe, Mn e Zn apresentaram baixa correlação com o crescimento das árvores. Por outro lado, uma boa correlação positiva foi encontrada entre teores de N e crescimento das árvores, o mesmo ocorrendo com o P. Isso indicou que em locais de baixa produtividade a população responde mais à aplicação de adubos nitrogenados e fosfatados. Não foram detectadas correlações entre teores de B e Ca com a altura dos eucaliptos, contrariando uma resposta fisiológica esperada, Bellote et al. (1993) explicam que este resultado deve-se a diluição destes elementos no material vegetal analisado. O aumento do teor de potássio repercutiu mais quando comparado ao Mg no crescimento em altura de *Eucalyptus grandis*. Os teores de P, K e Al no solo influenciaram o crescimento das árvores, destacando que o aumento da oferta de P e K no solo evidenciou melhor incremento em plantios de *Eucalyptus grandis* em regiões de menor produtividade.

As aplicações de adubos químicos em plantios florestais podem influenciar a forma e o afilamento das árvores, sendo que a forma é a relação entre o diâmetro e a sua distância do topo da árvore e o afilamento é a taxa de alteração do diâmetro com uma unidade de incremento em altura. Procurando descobrir o efeito de doses crescentes de NPK (10-34-06) na forma e afilamento do tronco de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, Ferreira e Silva (2002) aplicaram doses de 0 a 350 g.planta⁻¹ no momento do plantio no *E. grandis* e doses de 0 a 400 g.planta⁻¹ no momento do plantio e ao longo da rotação no *E. saligna*. Na análise de regressão para avaliação do afilamento médio de *E. saligna* considerando apenas diâmetro e altura o R² foi de 0,984, semelhante ao ocorrido quando se considerou diâmetro, altura, idade e dose de adubo, por outro lado, ao se considerar apenas o diâmetro, a análise de regressão resultou em R² de 0,20. Os autores relatam que, apesar das duas espécies de eucalipto estudado ser semelhantes, o afilamento médio foi distinto para parcelas com mesmo diâmetro médio. Entretanto ocorreu aumento do afilamento médio do sexto para o oitavo ano de idade, para as duas espécies de eucalipto, variação esta acelerada pela aplicação de fertilizantes. O fator de forma não sofreu influencia das doses de adubos porque, segundo Ferreira e Silva (2002), a resposta das adubações foi distribuída uniformemente pelo fuste.

Ao avaliar crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, Rodrigues (2009) observou que a aplicação de Cu e Zn em vários tipos de solos do bioma cerrado não influenciou positivamente no crescimento das mudas; ele explica que as espécies do gênero *Eucalyptus* têm baixa demanda por micronutrientes e facilidade de absorção pelo seu sistema radicular.

Em plantios de *Eucalyptus urograndis*, no espaçamento de 3 x 2,25 m, aos 18 meses de idade, foi estimada uma produção 6,8 t.ha⁻¹ de madeira e 1,4 t.ha⁻¹ de casca, sendo a madeira representada por 37 % da biomassa total das árvores (VIEIRA et al., 2012).

Em experimentações mais antigas, como o de Coelho et al. (1970), os espaçamentos diferentes resultaram em distintos diâmetros para algumas espécies de eucaliptos estudadas, aos quatro anos de idade. A média das alturas para o espaçamento de 3x2m era de 10,97m e para o espaçamento de 3x1,5m, de 10,82m. O mesmo fenômeno ocorrendo para diâmetros, sendo a média de 10,72 cm no espaçamento de 3x2 m, enquanto que no espaçamento de 3x1,5 m era de 9,64 cm.

Garcia et al. (1991) avaliaram o desenvolvimento do *Eucalyptus saligna* e do *Eucalyptus grandis* em diferentes espaçamentos. Para o *Eucalyptus grandis*, as maiores produtividades em volume de madeira ocorreram nos espaçamentos de 3x1 m e 3x1,5 m, para o *Eucalyptus saligna*, o espaçamento 3x2 m é mais adequado para um povoamento conduzido até 10 anos.

Pode-se considerar na avaliação do efeito do espaçamento para o crescimento de árvores as variáveis como superfície da copa, diâmetro e comprimento da copa porque estão relacionadas com o crescimento e produção de matéria seca das culturas florestais. Nutto et al. (2001) estudaram estes parâmetros em povoamentos de *Pinus elliotti*, no Rio Grande do Sul, sugerindo que o comprimento da copa em relação ao DAP foi o modelo que melhor estimou o espaço vital necessário para se obter um determinado diâmetro esperado.

A produção de matéria seca é outra abordagem de destaque; estudando a variação da produção de biomassa, devido ao espaçamento, do *Eucalyptus camaldulensis* e do *E. pellita* em região de cerrado, Leles et al. (2001) constataram que as espécies respondem de maneira diferenciada na alocação da biomassa em resposta ao espaçamento de plantio adotado.

Em outro trabalho conduzido por Oliveira Neto et al. (2003), a produção de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis*, por unidade de área, aos 32 meses de idade, aumentou com a aplicação de níveis crescentes de fertilizantes e diminuiu com o aumento do espaçamento entre plantas. Considerando-se as idades de 20 e 32 meses após o plantio, a biomassa média de madeira por área, em quatro níveis de adubação, corresponderam a 34%, 43%, 42% e 44% da biomassa total, incrementos estes ocasionados pelo aumento de aplicação de adubo. Oliveira Neto et al. (2003) salientam que ocorreu um aumento da biomassa média de madeira contribuindo para a biomassa total com o acréscimo de adubação.

Silva (2005) avaliou dois clones de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, aos seis anos de idade, constatando que a maior produção, em volume e biomassa de lenho, ocorreu no espaçamento de 6,0 m².planta⁻¹, com valores médios de 212 Mg.ha⁻¹ e 92 Mg.ha⁻¹ para os clones C219 e C041. Este trabalho de Silva (2005) mostra que plantios florestais adensados podem produzir maior biomassa, mesmo em rotações mais longas. Neste caso os espaçamentos mais adensados tinham 6 m² de área útil, correspondente aos arranjos 3 x 2 m, 6 x 1 m e 9 x 0,67 m.

Ainda, para Stape (1995), citado por Silva (2005), para um mesmo espaçamento, é possível a utilização de diferentes arranjos de plantio, ou seja, diferentes distancias entrelinhas e entre plantas. Nesta experimentação com clones, houve a interação significativa clone x arranjo de plantio para as variáveis área basal, volume e percentagem de quebra. Não houve diferença significativa para sobrevivência entre os espaçamentos e arranjos estudados (espaçamentos de 6, 10,5 e 15 m².planta⁻¹ e arranjos de 3, 6 e 9 m estabelecidos para as entrelinhas), todos apresentaram, aos 6 anos de idade, valores maiores que 91%.

2.2 Biomassa Florestal

Para florestas estabelecidas, ou seja, acima de dois anos após o plantio, a massa seca do tronco é relativamente maior quando comparado aos outros compartimentos da árvore, isto foi constatado por Rondon (2006), ao relatar que as árvores de *Tectona grandis* (teca) em povoamentos estabelecidos apresentam, em média, biomassa de tronco de 74,57% em relação à total.

Schneider et al. (2000) comentam que o incremento em volume pode não ser influenciado por diferentes densidades de plantio, a longo prazo; isso se deve ao fato de que, à partir de uma determinada idade, o povoamento alcança o nível de equilíbrio com relação a competição entre as árvores. A avaliação do volume e da biomassa de casca de *Acácia mearnsii* mostrou que os espaçamentos de 1x1m e 2x1m apresentaram valores próximos, aos 8 e 9 anos após o plantio.

A massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis*, por hectare, diminuiu com o aumento do espaço vital (m^2), mas pode ocorrer uma tendência de igualar com a idade (GOULART et al., 2003). Os maiores valores de massa seca por hectare foram obtidos nos tratamentos com menos área vital (1,5x1,0m e 2,0x1,5m), até os 10 anos após o plantio, sendo estes indicados para a implantação de florestas para fins energéticos.

Leles et al. (2001) avaliaram a biomassa de *Eucalyptus camaldulensis* e de *Eucalyptus pellita*, aos 52 meses de idade, cultivados em diferentes espaçamentos; ocorreu a tendência de maior matéria seca de fuste em relação à total, todavia, foi detectada diferença significativa entre as espécies de eucalipto, com maior produção do fuste do *E. camaldulensis*. As maiores produções, em massa de madeira por hectare, foram encontradas nos espaçamentos de 3x1m, 3x1,5m e 3x2m.

Para o aproveitamento da biomassa florestal destinada a bioenergia, o mais adequado seria ter árvores em que o compartimento madeira com casca tivesse sua participação otimizada em relação à biomassa total. Rezende et al. (1980) consideram que o espaçamento de plantio de 1,0x1,5m, ou seja, área útil de $1,5 m^2.planta^{-1}$, o *Eucalyptus grandis* obteve, nos 3 anos após o plantio, maior incremento médio anual de matéria seca e maior quantidade de material aproveitável para energia porque as árvores apresentaram copa menor em relação às demais áreas de 2 a $6 m^2.planta^{-1}$.

2.3 Densidade da Madeira

A densidade da madeira não pode ser avaliada de forma independente das outras características tecnológicas, pois os atributos físicos da madeira e sua constituição química e anatômica estão interligados. Trugilho et al. (2003) avaliaram as características da madeira de duas espécies de *Eucalyptus*, cultivadas no espaçamento 3x1,5 m, concluindo que

a madeira com fibras mais compridas e parede celular mais espessa possui maior valor de densidade básica. Já em avaliação da madeira de *Acacia melanoxylom*, Igartúa et al. (2009) encontraram uma densidade média de 604 kg.m^{-3} , aumentando da medula para o córtex, porém não encontraram correlação da densidade com as alterações dimensionais desta madeira.

Avaliando clones de *Eucalyptus grandis* e clones de *Eucalyptus saligna*, aos sete anos de idade, implantados em espaçamento 3x2m, Trugilho et al. (2001) observaram que as características químicas e de densidade da madeira foram maiores no *E. grandis*; que a densidade básica da madeira está correlacionada com os teores de carbono fixo, materiais voláteis e quantidade de cinzas no carvão vegetal e que as características de crescimento (DAP, altura, volume e biomassa) precisam ser estudadas simultaneamente a avaliação da qualidade energética da madeira.

A correlação entre a densidade básica de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* e seus diâmetros foi pesquisada por Raymond (2002), que constatou independência entre estas duas variáveis, sugerindo que elas podem ser estudadas simultaneamente em testes de campo. Quanto mais cedo a propriedade da madeira é avaliada, maior será o ganho genético da espécie; no caso da densidade básica, Raymond (2002) aponta que os três anos é a idade mínima para estudar o potencial desta propriedade da madeira.

Tanto a densidade básica como a densidade seca da madeira de *Sclerolobium paniculatum* (carvoeiro) não foi influenciada pela adubação, obtendo-se a média entre os tratamentos de $0,52 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,58 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade básica e seca, respectivamente (OLIVEIRA et al., 2008).

Avaliando clones de *Eucalyptus grandis* e clones de *Eucalyptus saligna*, aos sete anos de idade, implantados em espaçamento 3x2m, Trugilho et al. (2001) observaram que as características químicas e de densidade da madeira foram maiores no *E. grandis*; que a densidade básica da madeira está correlacionada com os teores de carbono fixo, materiais voláteis e quantidade de cinzas no carvão vegetal e que as características de crescimento (DAP, altura, volume e biomassa) precisam ser estudadas simultaneamente a avaliação da qualidade energética da madeira.

A densidade da madeira é determinante na avaliação da qualidade, sendo um fator crítico para a silvicultura de curta rotação, podendo ser relacionada com fatores ambientais tais como a pluviosidade da região. Um povoamento de *Eucalyptus nitens*, aos seis

anos, foi submetido à irrigação, de forma que uma parcela foi irrigada e outras duas foram manejadas para que houvesse ciclos de seca. A mensuração do crescimento radial foi realizada utilizando-se dendrômetros cujos dados foram coletados no período de dois anos. Uma baixa densidade de madeira foi registrada durante os primeiros meses de cada estação de crescimento com posterior aumento. Nas árvores irrigadas, a densidade da madeira ficou em torno de 500 kg.m^{-3} , com o máximo estimado de 900 kg.m^{-3} no final da estação de crescimento, sendo os maiores valores estimados na época de déficit hídrico. Já no tratamento em que havia ciclos de seca, a densidade ficou entre 270 e 850 kg.m^{-3} , a queda da densidade estimada está ligada ao período de retomada da irrigação. Em outra parcela com tratamento que consistia em maiores períodos de déficit hídrico, o crescimento foi bem reduzido e, conseqüentemente, os valores de densidade da madeira foram os maiores, entre 400 e 1150 kg.m^{-3} (WIMMER et al., 2002).

O número de amostras a serem coletadas no campo para fins de análises tecnológicas da madeira foi o tema abordado por Hamza e Lewark (1994). Estes autores afirmam que, em povoamentos de espécies de *Eucalyptus*, são necessárias sete árvores-amostra para se determinar a densidade básica, considerando uma precisão requerida de 5%.

2.4 Energia e Química da Madeira

Uma característica essencial da biomassa utilizada como fonte de energia, segundo Nogueira e Lora (2003), é o poder calorífico, este parâmetro define a quantidade de energia térmica que se libera durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível. Quando não se considera o calor latente de condensação da umidade presente nos produtos de combustão, tem-se o poder calorífico inferior e quando este calor latente é considerado, tem-se o poder calorífico superior, que é um valor em torno de 10 a 20% mais elevado que o poder calorífico inferior.

A energia da madeira pode ser expressa pelo seu poder calorífico, que é classificado em três tipos, a exemplo do trabalho que foi realizado por Gonçalves et al. (2009), no qual se determinou: o poder calorífico superior (PCS), utilizando uma bomba calorimétrica; o poder calorífico inferior (PCI), por um modelo matemático que

considera o teor de hidrogênio e o PCS; o poder calorífico útil, por meio de um modelo que considera a umidade e o PCI. Gonçalves et al. (2009) avaliaram briquetes fabricados com madeira de *Eucalyptus grandis* misturado a materiais de rejeitos de resíduo urbano mostrando uma não significância entre as médias de poder calorífico superior nos tratamentos cujos briquetes eram constituídos por 100%, 95%, 90%, 85% e 80% de madeira. A média obtida de PCS dos briquetes com 100% de madeira foi de 19544,20 kJ.kg⁻¹.

Para se determinar a potencialidade de um combustível e avaliar se este está sendo utilizado dentro de sua plena capacidade, deve-se primeiramente conhecer as suas características fundamentais, dentre elas a análise imediata e o poder calorífico. Em trabalho de avaliação do potencial energético de espécies florestais amazônicas, Seye et al. (2008) concluíram que as melhores espécies foram aquelas que apresentaram baixa presença de materiais voláteis e cinzas, assim como altos valores de carbono fixo.

As características químicas da madeira podem interferir na qualidade energética da mesma, sendo elas diferenciadas pelas condições edafoclimáticas. Há estudos que mostram a importância do sítio de produção, tais como a pesquisa realizada por Sansígolo e Ramos (2011), na qual um clone de *Eucalyptus grandis* apresentou madeira com maior teor de extrativos totais em região de solo de baixa fertilidade em relação a madeira do mesmo clone localizado em região com solo mais fértil.

Outras espécies potenciais para energia têm sido investigadas do ponto de vista de suas características físicas e químicas. Vale et al. (2010) analisaram teores de lignina e de extrativos totais em madeira de árvores de jacarandá do cerrado, sucupira, carvoeiro, barbatimão e gomeira. Estes pesquisadores encontraram médias dos teores de lignina de 31,74% para sucupira, 32,31% para o jacarandá e 31,42% para o carvoeiro, médias estimadas não distintas estatisticamente. As outras espécies, barbatimão e gomeira, apresentaram madeira com menores teores de lignina. Os teores de extrativos totais foram similares para todas as espécies avaliadas. Vale et al. (2010) ainda afirmam que existem correlações entre os teores de lignina e extrativos com outras características físicas da madeira importantes para o uso energético tais como a densidade básica.

A qualidade da madeira é afetada pela idade de corte, Trugilho et al. (1996) avaliaram a madeira de *Eucalyptus saligna* cultivado em espaçamento 3x1,5m, nas idades de 12, 24, 36 e 48 meses. Estes autores observaram que a densidade básica, a espessura

de parede celular e o comprimento das fibras aumentaram em função da idade, enquanto que a quantidade de cinzas, extrativos totais e a porcentagem de lignina decresceram com a idade das árvores.

Lima et al. (2007) avaliaram o poder calorífico de amostras coletadas na região do diâmetro a altura do peito (DAP) das árvores de *Eucalyptus benthamii*, aos seis anos de idade; encontraram poder calorífico de $4681 \pm 487,6 \text{ kcal.kg}^{-1}$. A densidade energética média, que é a energia contida em um determinado volume de madeira, foi de $2222 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

A quantidade de calor liberada pela madeira é afetada pela sua umidade, Lima et al. (2008) constataram que, para cada unidade de umidade que aumenta, diminui-se $0,1858 \text{ kJ.kg}^{-1}$ no poder calorífico do *Eucalyptus benthamii*. A madeira a 0% de umidade teria 19264 kJ.kg^{-1} de poder calorífico, mas, na umidade de equilíbrio da madeira, este poder está em torno de 15549 kJ.kg^{-1} .

Os valores de poder calorífico superior (PCS) de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* ficaram entre 4501 e $4790 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e 4422 e $4595 \text{ kcal.kg}^{-1}$ respectivamente; várias espécies nativas têm PCS no intervalo de 4000 e $5000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (QUIRINO et al., 2005).

As procedências de *Eucalyptus dunnii*, aos quatro anos e meio de idade, não apresentaram diferenças entre as densidades e entre os teores de lignina; ao se comparar com outras espécies florestais, as variáveis foram inferiores, todavia, a produtividade é mais alta (PEREIRA et al., 1986).

As características energéticas podem se influenciadas pelos níveis de N, P, K e calcário dolomítico por causa de suas interferências na anatomia da madeira, porém, Vale et al. (2000) não encontraram diferença estatística dos tratamentos. Os valores médios gerais de potencial energético foram de 4619 e $4641 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para a *Acacia mangium* e o *Eucalyptus grandis*, respectivamente; somente o estudo isolado das doses de fósforo em *E. grandis* evidenciou diferença entre a quantidade de energia liberada pelo fuste. Vale et al. (2000) salientam que a produção de energia do eucalipto foi 2,4 vezes maior que a de acácia.

Em ensaio com madeira de *Sclerolobium paniculatum* (carvoeiro), com 18 anos de idade, manejado com diferentes doses de adubação, Oliveira et al. (2001) constataram que não ocorreu diferença entre as médias de poder calorífico, sendo a média dos

tratamentos no valor de $4671 \text{ kcal.kg}^{-1}$, já o carbono fixo foi uma variável influenciada pela adubação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área Experimental

O experimento foi realizado na Fazenda Três Sinos, localizada na Rodovia Gastão dal Farra, km 5, no município de Botucatu, estado de São Paulo, numa área de aproximadamente 5,8 ha, com solo do tipo Latossolo Vermelho Amarelo, textura média. O local tem sido preparado com técnicas de cultivo mínimo do eucalipto, ou seja, preparo somente da linha de plantio com adubação individual das mudas.

A área experimental está localizada numa altitude aproximada de 875 m e situa-se entre as longitudes 48°24'43" W e 48°26'21" W e entre as latitudes 22°58'10" S e 22°59'25" S, estas coordenadas foram obtidas através dos mapas da região disponível no Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP. A área experimental está posicionada numa região de drenagem do rio Pardo, por isso pertence à bacia do Paranapanema. O clima predominante no município, segundo os critérios adotados por Koppen é Cfa, clima mesotérmico, com temperaturas médias superiores a 10°C, cuja temperatura do mês mais quente é igual ou superior a 22°C e o índice pluviométrico anual está em torno de 1516 mm.

3.2 Práticas Silviculturais e Delineamento

Na área experimental foram plantadas, em dezembro de 2008, as mudas de clones do híbrido de *Eucalyptus urophylla* vs. *Eucalyptus grandis* (C219), destinado à colheita precoce para produção de briquetes utilizados na geração de bioenergia, que receberam adubações de plantio e de cobertura. A aplicação consistiu em NPK (6-30-6), no plantio, nas doses de (1) 70, (2) 140 e (3) 280 g.planta⁻¹; na cobertura, a adubação foi feita com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%), aos 60, 140 e 360 dias de idade. Aos 60 dias, as doses foram de (1) 25, (2) 50 e (3) 100 g.planta⁻¹; aos 140 dias, (1) 35, (2) 70 e (3) 140 g.planta⁻¹; aos 360 dias, (1) 50, (2) 100 e (3) 200 g.planta⁻¹. As fontes de N, P e K eram ureia, MAP e KCl, respectivamente. Ainda havia 0,5 % B e 0,3 % de Zn na composição do fertilizante utilizado na cobertura, ou seja, durante o 1º ano do povoamento.



(A)

(B)

Figura 1. Aspecto geral da área experimental, em (A) uma das parcelas com espaçamento 2,8x0,5 m com maior variabilidade dos diâmetros e em (B) uma das parcelas com espaçamento 2,8x1,5 m.

Os cinco espaçamentos entre plantas ficaram nos valores de 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m e a distância entre as linhas de plantios fixadas em 2,80 m para todos os tratamentos.

Os seguintes códigos foram fixados nas parcelas:

A = espaçamento de 2,8 x 0,5 m

B = espaçamento de 2,8 x 1,0 m

C = espaçamento de 2,8 x 1,5 m

D = espaçamento de 2,8 x 2,0 m

E = espaçamento de 2,8 x 2,5 m

1 = dosagem 1

2 = dosagem 2

3 = dosagem 3

As parcelas receberam os seguintes códigos que foram distribuídos por sorteio: A1; A2; A3; B1; B2; B3; C1; C2; C3; D1; D2; D3; E1; E2 e E3. Quando necessário, foram feitas capinas químicas nas entrelinhas, utilizando-se herbicida com o princípio ativo glifosate, e controle de formigas cortadeiras com inseticida a base de sulfuramida.

Desta forma, o experimento foi instalado no delineamento inteiramente casualizado, em fatorial 3x5x3, ou seja, três doses de adubação, cinco espaçamentos e três idades (1,5 ano; 2 anos; 2,5 anos) nas quais foram realizadas a cubagem rigorosa e a coleta de árvores-amostra.

3.3 Dendrometria

Sessenta árvores na região central de cada parcela foram avaliadas, o que consistiu de medições trimestrais de DAP (diâmetro a altura do peito), utilizando-se suta, e de altura total, utilizando-se um clinômetro digital. Os valores de DAP foram utilizados nos cálculos do diâmetro médio ou quadrático, este foi direcionado como critério para seleção das árvores a serem abatidas para as avaliações de produção de madeira e qualidade energética.

A estimativa de volume das árvores foi efetuada pelo método de Smalian. O incremento corrente anual (ICA, $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) e o incremento médio anual (IMA, $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) foram estimados para verificar o processo de crescimento em volume da floresta, já que a idade em que o ICA for igual ao IMA é aquela na qual a floresta alcança o

máximo de produção (CAMPOS e LEITE, 2006; SOARES et al., 2006). Campos e Leite (2006) afirmam que, para gerenciar florestas é necessário compreender os processos de crescimento e produção.

3.4 Coleta de árvores-amostra e estimativa da biomassa de madeira

As árvores foram colhidas desconsiderando-se duas linhas de plantio e dez árvores limítrofes no sentido longitudinal à linha de plantio; foram abatidas 4 árvores-amostra por tratamento para a realização da cubagem rigorosa e para a coleta de amostras destinadas às avaliações químicas e físicas da madeira com casca e ao cálculo de biomassa. A escolha das árvores-amostras levou em consideração o DAP próximo do diâmetro médio ou quadrático de cada tratamento.



Figura 2. Discos coletados do tronco em vários pontos considerando a porcentagem da altura total da árvore-amostra.



Figura 3. Medição da altura total da árvore-amostra abatida.

3.5 Densidade Básica e Energia da Madeira com Casca

Os discos de madeira com casca foram coletados nas posições DAP, 0, 25, 50, 75 e 100% da altura total (PEREIRA et al., 1986; PEREIRA et al., 2002; VALE et al., 2000; GOULART et al., 2003), sendo que todos os discos tinham cerca de 3cm de espessura e os discos coletados na região do topo tinham, no mínimo, 3cm de diâmetro.

A metade de cada disco foi retirada para se determinar a densidade básica da madeira com casca seguindo-se o método do máximo teor de umidade (Equação 1), cujo modelo matemático considera a massa saturada e a massa seca, e consiste no seguinte procedimento (VITAL, 1984): as amostras são retiradas dos discos e colocadas em recipiente com água, permanecendo por cerca de 20 dias (COSTA, 2006); as amostras saturadas são colocadas em bancadas e retirado o excesso de água com papel toalha; a massa saturada é determinada em balança digital; após obtenção da massa saturada, as amostras ficam secando ao ar por 7 dias e depois colocadas em estufa a $103 \pm 2^\circ \text{C}$; algumas amostras são pesadas de 24 em 24 horas até atingir massa constante; a massa foi considerada constante quando a diferença entre pesagens de dias consecutivos for menor que 0,5%.

$$DB = 1/((Mst/Msc) - 0,346) \quad (1)$$

Em que:

DB = densidade básica (g.cm^{-3})

Mst = massa saturada (g)

Msc = massa seca (g)

A biomassa da madeira e da casca foi calculada pelo produto resultante dos valores de volume obtido na cubagem rigorosa e de densidade básica média da madeira com casca de cada árvore-amostra.

Para o cálculo da densidade básica média das árvores foi efetuada uma média ponderada que considerava a densidade dos discos coletados e o volume entre dois discos consecutivos (Equação 2).

$$DBM = \frac{\frac{(db0\% + db1,30) \times V1 + \dots + (db75\% + db100\%) \times Vn}{2}}{V_{total}} \quad (2)$$

Em que:

DBM = densidade básica média (kg.m^{-3})

Db0% = densidade básica a 0% da altura total (kg.m^{-3})

Db1,30 = densidade básica no DAP (kg.m^{-3})

V1 = volume de madeira entre 0% da altura e o DAP (m^3)

DB75% = densidade básica a 75% da altura total (kg.m^{-3})

Db100% = densidade básica a 100% da altura total, inclusão 3 cm de diâmetro (kg.m^{-3})

Vn = volume de madeira entre 75% e 100% da altura total (m^3)

A outra metade do disco foi utilizada para a determinação do poder calorífico. A qualidade de combustível pode ser rotulada pelo poder calorífico superior (PCS), que é definido como sendo a quantidade de energia liberada na forma de calor por unidade de massa de combustível, quando submetido à combustão completa. Para a determinação do PCS

foi utilizado um instrumento denominado calorímetro e a metodologia adotada é denominada de “Método da Bomba Calorimétrica”. O método consiste em queimar o combustível, no caso a madeira, em um sistema aproximadamente adiabático, e medir a variação de temperatura de uma massa de água pré-estabelecida proporcionada pela queima da madeira. A variação de temperatura registrada na água por um termômetro de mercúrio é proporcional ao calor liberado pelo combustível.

O poder calorífico superior foi determinado pela Equação 3:

$$PCS = [(K + M_{H_2O}) / (M_c)] * (T_f - T_i) \quad (3)$$

onde:

K = constante do calorímetro determinada previamente, utilizando-se o ácido benzóico com PCS de 6318 cal/g; neste trabalho o valor de K é 489.

M_{H₂O} = massa de água pré-estabelecida em gramas (2500 g).

M_c = massa seca da amostra de madeira.

T_i = temperatura da água antes da combustão.

T_f = temperatura da água obtida após a combustão.

Seguindo o procedimento explicado por Vale et al. (2000), com os valores de poder calorífico (kcal.kg⁻¹) da madeira com casca e a produção de massa seca (kg) obter-se-á a produção de energia (kcal).

3.6 Química da Madeira

A metade do disco coletado na altura do DAP era cortada na forma de palitos, moídos no moinho tipo Wiley, reduzindo-se o material à serragem. Esta serragem foi classificada em um conjunto de peneiras sob vibração para obtenção da fração 40/60. As quatro amostras de cada tratamento formaram uma amostra composta, da qual se retirou uma subamostra para as análises químicas.

As análises foram efetuadas no Departamento de Recursos Naturais, Ciência Florestal, no Laboratório de Análises Químicas, Faculdade de Ciências Agronômicas

da UNESP. A análise de extrativos totais foi realizada seguindo-se a norma TAPPI T264cm-97 e a análise de lignina insolúvel seguiu a norma TAPPI T222om-83. O teor de cinzas foi calculado após as amostras ficarem na mufla a uma temperatura de 575°C durante três horas.

Os teores de extrativos totais, lignina e cinzas foram expressos em porcentagem da massa seca de madeira com casca. À partir destes teores foi possível obter o acúmulo dos referido componentes da biomassa seca do fuste.

3.7 Exportação de Nutrientes

Para a determinação do conteúdo de nutrientes na madeira com casca utilizaram-se amostras do disco coletadas na posição DAP dos fustes das árvores-amostra, no entanto, foi preparada uma amostra composta originada de quatro árvores-amostra em cada tratamento nas idades de colheita. O material seco, moído e peneirado foi encaminhado ao Laboratório de Análises do Departamento de Recursos Naturais/Ciência do Solo, da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, local onde se realizaram as análises dos macroelementos nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Elementos estes aplicados nos tratamentos do presente trabalho e comumente utilizados em manejo de adubação nas empresas florestais.

3.8 Análise Estatística

Todas as variáveis obtidas sobre a energia e a biomassa foram avaliadas considerando-se o esquema fatorial 3x5x3, ou seja, três níveis de adubação, cinco espaçamentos e três idades, sendo elas 1,5 anos, 2,0 anos e 2,5 anos.

3.9 Viabilidade Econômica: Estudo de Caso

Os métodos de avaliação econômica utilizados no presente trabalho estão no grupo de métodos nos quais se considera a variação do capital no tempo (SILVA et

al., 2005), foram eles: valor presente líquido (VPL), índice de relação benefício custo (IBC) e custo médio de produção (CMP).

O VPL é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos (Equação 2). Os tratamentos que apresentam o VPL maior do que zero são economicamente viáveis, sendo considerado o mais viável aquele que apresenta maior VPL. Foi considerada uma taxa de desconto (i) de 6 %, 9% e 12% ao ano.

$$VPL = \Sigma R(1 + i)^{-j} - \Sigma C(1 + i)^{-j} \quad (2)$$

Em que:

R = valor atual das receitas

C = valor atual dos custos

i = taxa de juros

j = período em que a receita ou o custo ocorrem

O índice de relação benefício custo foi obtido a partir da razão entre o valor atual das receitas e o valor atual dos custos (Equação 3). O tratamento é economicamente viável se o IBC for maior que 1.

$$IBC = \Sigma R(1 + i)^{-j} / \Sigma C(1 + i)^{-j} \quad (3)$$

O custo médio de produção consistiu em dividir o valor atual do custo pela produção total equivalente conforme Equação 4 (SILVA et al., 2005). Para que o tratamento ou trabalho seja viável, o CMP deve ser abaixo do preço do briquete no mercado, R\$ 380.tonelada⁻¹, informado pelos administradores da empresa Santo Amaro Reflorestamento.

$$CMP = \Sigma CT(1 + i)^{-j} / \Sigma PT(1 + i)^{-j} \quad (4)$$

Em que:

CT = custo total atualizado em cada período

PT = produção total equivalente em cada período que, no presente artigo, foi a produção de briquetes de madeira, 1,5 ano, 2 anos e 2,5 anos após o plantio. Sendo que a PT é a quantidade produzida descontada pela taxa de juros.

A receita analisada foi a possibilidade de produção de briquetes com madeira colhida aos 1,5 anos, 2 anos e 2,5 anos após o plantio. Os custos contabilizados na idade 0 foram mudas, adubo, herbicida, inseticida, trator, todos dados fornecidos pela empresa. Os custos contabilizados nas idades 0,2, 0,4 e 1 ano foram referentes à adubação de cobertura, já o custos nas idades 1,5 ano, 2 anos e 2,5 anos foram referentes à produção do briquete, informado pela gerência da empresa.

O volume de 6 m³ de lenha resulta, após o processo de conversão energética da densificação, 25 sacos de 40 kg com briquetes. O cálculo da receita foi efetuado da seguinte forma: com os dados de inventário, estimou-se o volume de madeira com casca, em m³.ha⁻¹, que multiplicado por 6, resultou na produção de briquetes, em t.ha⁻¹, que multiplicado pelo preço de mercado de R\$ 380.tonelada⁻¹ (Empresa Santo Amaro Reflorestamento), resultou na receita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Volume por área

Em relação ao nível de adubação, o crescente aporte de nutrientes foi significativo para o volume por área, como pode ser observado na Tabela 1, na qual se encontram os volumes médios estimados em cada tratamento. Pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$) o maior volume médio estimado foi de $290,11 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, no espaçamento de $2,8 \times 0,5 \text{ m}$, com nível 3 de aplicação de adubo e colhido aos 30 meses (Apêndice 4).

Schumacher et al. (2011) levantaram as características dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus spp.* em pequenas propriedades rurais e estimaram um volume com casca de $48,4 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ aos 2 anos, $80,2 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ aos 4 anos e $344,4 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ aos 6 anos. Os autores destacam que, na maioria das propriedades, a área útil das árvores era inferior a 3 m^2 . No presente trabalho, a marca dos $100 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ foi superada já aos 18 meses de idade, nos tratamentos mais adensados, de $0,5$ e $1,0 \text{ m}$ entre plantas.

Müller (2005) avaliou plantio de *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* para produção de biomassa para energia com idade de 2 anos e verificou uma produção de $100 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ apenas no espaçamento de $3 \times 0,5 \text{ m}$, outros espaçamentos tiveram produção volumétrica inferior.

Tabela 1. Produção de madeira, em m³.ha⁻¹, de *E. urophylla* x *E. grandis* nos distintos espaçamentos, níveis de adubação e idade de colheita

| Espaçamento (m) | Nível de adubação* | Idade de colheita (meses) | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|--------|--------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8x0,5 | 1 | 96,04 | 110,51 | 201,56 |
| | 2 | 118,27 | 142,98 | 234,80 |
| | 3 | 151,87 | 239,67 | 290,11 |
| 2,8x1,0 | 1 | 87,81 | 89,21 | 153,26 |
| | 2 | 102,27 | 186,29 | 189,73 |
| | 3 | 102,33 | 114,21 | 197,61 |
| 2,8x1,5 | 1 | 75,81 | 100,39 | 140,33 |
| | 2 | 87,70 | 97,33 | 152,67 |
| | 3 | 88,16 | 110,49 | 157,99 |
| 2,8x2,0 | 1 | 62,09 | 76,31 | 121,07 |
| | 2 | 70,67 | 100,48 | 141,24 |
| | 3 | 72,55 | 90,74 | 155,41 |
| 2,8x2,5 | 1 | 46,09 | 67,35 | 107,71 |
| | 2 | 59,48 | 74,68 | 124,73 |
| | 3 | 65,27 | 89,31 | 146,96 |
| Média | | 85,76 | 106,03 | 167,68 |
| CV (%) | | 31,72 | 39,34 | 29,28 |

*O nível 1 consistiu em 70 g.planta⁻¹ de NPK 6-30-6 no plantio e total na adubação de cobertura de 110 g.planta⁻¹ de NPK 20-0-20 com B e Zn, sendo que o nível 2 foi o dobro do nível 1 e o nível 3, quatro vezes o nível 1.

O maior incremento médio anual (IMA) foi obtido no espaçamento 2,8x0,5 m, com maior aplicação de fertilizante, povoamento conduzido até os 2 anos (Tabela 2). Observa-se que os menores incrementos em volume ocorreram nos espaçamentos tradicionais como 2,8x2,0 m e 2,8x2,5 m.

Tabela 2. Incremento corrente anual (ICA) e incremento médio anual (IMA) da floresta de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*

| Espaçamento (m) | Idade (anos) | ICA (m ³ /ha) | | | IMA (m ³ /ha.ano) | | |
|--------------------|-----------------|--------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 2,8x0,5 | 1,5 | ... | ... | ... | 64,03 | 78,85 | 101,25 |
| | 2,0 | 14,47 | 24,71 | 87,80 | 55,26 | 71,49 | 119,84 |
| | 2,5 | 91,01 | 91,54 | 50,44 | 80,61 | 93,81 | 116,04 |
| 2,8x1,0 | 1,5 | ... | ... | ... | 58,54 | 68,18 | 68,22 |
| | 2,0 | 1,40 | 84,02 | 11,88 | 44,61 | 93,15 | 57,11 |
| | 2,5 | 64,05 | 3,44 | 83,40 | 61,30 | 75,89 | 79,04 |
| 2,8x1,5 | 1,5 | ... | ... | ... | 50,54 | 58,47 | 58,77 |
| | 2,0 | 24,58 | 9,63 | 22,33 | 50,22 | 48,67 | 55,25 |
| | 2,5 | 39,94 | 55,34 | 47,50 | 56,13 | 61,07 | 63,20 |
| 2,8x2,0 | 1,5 | ... | ... | ... | 41,39 | 47,11 | 48,37 |
| | 2,0 | 14,22 | 29,81 | 18,19 | 38,16 | 50,24 | 45,37 |
| | 2,5 | 44,76 | 40,76 | 64,67 | 48,43 | 56,50 | 62,16 |
| 2,8x2,5 | 1,5 | ... | ... | ... | 30,73 | 37,39 | 43,51 |
| | 2,0 | 21,26 | 11,26 | 24,04 | 33,68 | 33,68 | 44,66 |
| | 2,5 | 40,36 | 40,36 | 57,65 | 43,08 | 43,08 | 58,78 |

O nível 1 consistiu em 70 g.planta⁻¹ de NPK 6-30-6 no plantio e total na adubação de cobertura de 110 g.planta⁻¹ de NPK 20-0-20 com B e Zn, sendo que o nível 2 foi o dobro do nível 1 e o nível 3, quatro vezes o nível 1.

4.2 Densidade da madeira

A análise de variância mostra que a densidade básica média da madeira com casca nas árvores foi influenciada pelos fatores espaçamento e adubação, sendo que, das interações, apenas idade x espaçamento foi significativa, ao nível de 5% (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância dos dados de densidade básica média – DBM (kg.m-3) da madeira com casca

| Fator | G.L. | S.Q. | Q.M. | F | p-valor |
|-----------------|------|-------|-------|-------|---------|
| Idade (I) | 2 | 28114 | 14057 | 25,91 | 0,00 |
| Espaçamento (E) | 4 | 81367 | 20342 | 37,50 | 0,00 |
| Dose (D) | 2 | 1686 | 843 | 1,55 | 0,22 |
| I x E | 8 | 8513 | 1064 | 1,96 | 0,05 |
| I x D | 4 | 1154 | 288 | 0,53 | 0,71 |
| E x D | 8 | 5260 | 657 | 1,21 | 0,30 |
| I x E x D | 16 | 5075 | 317 | 0,58 | 0,89 |

G.L.: graus de liberdade; S.Q.: soma de quadrados; Q.M.: quadrado médio; F: valor de F calculado

A interação idade x espaçamento foi testada pelo Teste de médias, Tukey ($\alpha = 0,05$), conforme segue na Tabela 4.

Tabela 4. Densidade básica média, kg.m⁻³, da madeira com casca de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*

| Espaçamento (m) | Idade (meses) | | |
|-----------------|---------------|-------------|------------|
| | 18 | 24 | 30 |
| 2,8x0,5 | 431,20 C a | 409,80 C a | 427,07 B a |
| 2,8x1,0 | 464,34 B a | 432,07 BC b | 447,13 B b |
| 2,8x1,5 | 485,71 AB a | 447,45 AB b | 443,43 B b |
| 2,8x2,0 | 486,80 AB a | 453,72 AB b | 488,67 A a |
| 2,8x2,5 | 497,56 A a | 469,60 A a | 478,62 A a |

Médias seguidas de mesma letra maiúscula, nas colunas, não se diferem. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, nas linhas, não se diferem pelo teste Tukey ($\alpha = 0,05$).

A maior densidade básica média ocorreu no espaçamento 2,8x2,5m, aos 18 meses após o plantio, sendo que os espaçamentos 2,8x2,0 m e 2,8x1,5 m resultaram em densidades estatisticamente iguais para esta idade (Tabela 4). Aos 24 meses ocorreu uma tendência semelhante à ocorrida aos 18 meses. Aos 30 meses de idade, as maiores densidades foram de 478,62 e 488,67 kg.m⁻³, nos espaçamentos maiores, não se diferenciando pelo teste Tukey. Oliveira et al. (2010), avaliando madeira para produção de carvão vegetal, encontraram 558 kg.m⁻³ de densidade para a madeira de *Eucalyptus pellita*, em povoamento de 3x2 m, aos 5 anos de idade. Oliveira e Silva (2003) avaliaram a densidade básica da madeira, na posição DAP, em árvores de *Eucalyptus saligna* cultivadas em Colombo-PR, por 16 anos; neste caso, encontraram um valor médio de 470 kg.m⁻³.

4.3 Massa Seca por Área

A massa seca por área foi afetada pela interação espaçamento x adubação x idade de colheita, conforme os resultados da análise de variância (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados da análise de variância dos dados de produção de madeira (t.ha⁻¹)

| Fator de variação | G.L. | S.Q. | Q.M. | F calculado | p-valor |
|-------------------|------|----------|----------|-------------|---------|
| Idade (I) | 2 | 41772,69 | 20886,35 | 397,19 | 0,00 |
| Espaçamento (E) | 4 | 23405,47 | 5851,37 | 111,28 | 0,00 |
| Dose (D) | 2 | 7051,63 | 3525,82 | 67,05 | 0,00 |
| I x E | 8 | 3074,14 | 384,27 | 7,31 | 0,00 |
| I x D | 4 | 656,35 | 164,09 | 3,12 | 0,02 |
| E x D | 8 | 4966,16 | 620,77 | 11,81 | 0,00 |
| I x E x D | 16 | 1788,61 | 111,79 | 2,13 | 0,01 |

G.L.: graus de liberdade; S.Q.: soma de quadrados; Q.M.: quadrado médio; F: valor de F calculado

Na Tabela 6 fica evidente o aumento significativo da massa seca, em t.ha⁻¹, em relação à idade de colheita, o mesmo ocorreu para os níveis crescentes de adubação. O estudo da interação espaçamento x adubação x idade, pelo teste Tukey ($\alpha = 0,05$) mostrou que os tratamentos mais promissores, por esta ótica, são aqueles em que se adensou o plantio. Com base no teste de médias, foi possível verificar que o espaçamento 2,8x0,5 m, no nível 3 de adubação, colhido aos 24 meses apresentou 100,82 t.ha⁻¹, seguido pela média de 98,53 t.ha⁻¹ do espaçamento 2,8x0,5 m, nível 2, colhido aos 30 meses. Destaca-se o espaçamento de 2,8x0,5 m, que apresentou a maior produção de madeira em massa, 123,4 t.ha⁻¹, com maior adubação e colhido aos 30 meses, seguido pelo espaçamento 2,8x1,0 m, níveis 2 e 3 aos 30 meses, que não se distinguiram suas médias de biomassa de madeira.

Tabela 6. Produção de madeira, em t.ha⁻¹, de *E. urophylla* x *E. grandis* nos distintos espaçamentos, níveis de adubação e idade de colheita

| Espaçamento (m) | Nível de adubação* | Idade de colheita (meses) | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|-------|-------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8x0,5 | 1 | 40,8 | 46,3 | 88,1 |
| | 2 | 51,2 | 55,4 | 98,5 |
| | 3 | 66,7 | 100,8 | 123,4 |
| 2,8x1,0 | 1 | 41,0 | 39,5 | 69,0 |
| | 2 | 47,1 | 38,1 | 86,33 |
| | 3 | 47,6 | 47,3 | 86,1 |
| 2,8x1,5 | 1 | 38,0 | 45,9 | 62,5 |
| | 2 | 42,7 | 44,3 | 68,3 |
| | 3 | 41,4 | 48,5 | 70,6 |
| 2,8x2,0 | 1 | 30,1 | 35,6 | 56,5 |
| | 2 | 34,8 | 46,3 | 59,6 |
| | 3 | 34,9 | 40,3 | 76,9 |
| 2,8x2,5 | 1 | 22,6 | 31,7 | 51,7 |
| | 2 | 29,7 | 35,6 | 59,3 |
| | 3 | 32,8 | 41,2 | 70,0 |

*O nível 1 consistiu em 70 g.planta⁻¹ de NPK 6-30-6 no plantio e total na adubação de cobertura de 110 g.planta⁻¹ de NPK 20-0-20 com B e Zn, sendo que o nível 2 foi o dobro do nível 1 e o nível 3, quatro vezes o nível 1.

Uma menor produção de biomassa ocorre quando a quantidade de adubação foi menor em praticamente todas as idades de colheita. Goulart et al. (2003) avaliaram a massa seca de madeira sem casca, em povoamentos com 10 anos de idade de *Eucalyptus grandis*, no Rio Grande do Sul, nos quais encontraram médias de 168 t.ha⁻¹ e 160 t.ha⁻¹ nos espaçamentos de 3x2 m e 3x2,5m. Ainda Goulart et al. (2003) estimaram médias de massa seca de madeira de 176 t.ha⁻¹ e 158 t.ha⁻¹ nos espaçamentos de 2,5x1,5 m e 2,5x2,0 m, sendo recomendado espaçamentos ainda mais adensados.

Os níveis 3 e 2 de fertilização apresentaram a mesma tendência, ou seja, maior massa seca no espaçamento mais adensado, sendo que as distancias de 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m entre plantas apresentaram massas secas semelhantes. No caso do menor nível de aplicação de adubo, as distancias de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m entre árvores geraram médias de biomassa seca que podem ser iguais, ao nível de 5%. Adubando-se bastante, intensifica-se a quantidade de biomassa em plantios mais adensados, reservadas as questões econômicas que

estão expostas mais adiante. Trugilho (2009) estimou massa seca de madeira em árvores de *Eucalyptus grandis*, com 4 anos, em espaçamento de 3x2 m, chegando a médias de 72 kg.árvore⁻¹, o que equivale a cerca de 120 t.ha⁻¹.

4.4 Poder calorífico superior da madeira com casca

Os resultados encontrados em laboratório sobre o poder calorífico superior eram expressos em kcal.kg⁻¹, porém, foram convertidos para a unidade internacional, MJ.kg⁻¹. Estes resultados foram submetidos à análise de variância, ao nível de 5% (Tabela 7). Após a análise verificou-se que apenas os fatores idade e a interação idade x espaçamento foram significativos para o poder calorífico superior.

Tabela 7. Resultado da análise de variância para poder calorífico superior

| Fator de variação | G.L. | S.Q. | Q.M. | F calculado | p-valor |
|-------------------|------|-------|------|-------------|---------|
| Idade (I) | 2 | 11,80 | 5,90 | 48,52 | 0,00 |
| Espaçamento (E) | 4 | 0,35 | 0,09 | 0,73 | 0,58 |
| Dose (D) | 2 | 0,44 | 0,22 | 1,83 | 0,16 |
| I x E | 8 | 2,47 | 0,31 | 2,54 | 0,01 |
| I x D | 4 | 0,29 | 0,07 | 0,60 | 0,66 |
| E x D | 8 | 0,63 | 0,08 | 0,64 | 0,74 |
| I x E x D | 16 | 2,97 | 0,19 | 1,53 | 0,10 |

G.L.: graus de liberdade; S.Q.: soma de quadrados; Q.M.: quadrado médio; F: valor de F calculado

Na Tabela 8 seguem os resultados do teste Tukey ($\alpha = 0,05$) para a interação espaçamento x idade.

Tabela 8. Poder calorífico superior da madeira com casca (MJ.kg⁻¹) de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*

| Espaçamento (m) | Idade (meses) | | |
|-----------------|---------------|----------|----------|
| | 18 | 24 | 30 |
| 2,8x0,5 | 19,86 Aa | 19,90 Aa | 19,95 Aa |
| 2,8x1,0 | 20,07 Aa | 19,97 Aa | 19,34 Ab |
| 2,8x1,5 | 19,99 Aa | 20,00 Aa | 19,71 Aa |
| 2,8x2,0 | 20,15 Aa | 19,97 Aa | 19,25 Ab |
| 2,8x2,5 | 20,01 Aa | 20,02 Aa | 19,31 Ab |

Médias seguidas de mesma letra maiúscula, nas colunas, não se diferem. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, nas linhas, não se diferem pelo teste Tukey ($\alpha = 0,05$).

Não houve diferença do poder calorífico ao se considerar os espaçamentos nas idades de 18, 24 e 30 meses. Por outro lado, nas condições experimentadas no presente trabalho, a madeira com casca nos espaçamentos 2,8x1,0 m, 2,8x2,0 m e 2,8x2,5 m, aos 30 meses, apresentaram poder calorífico superior significativamente menor que nas demais idades, nestes espaçamentos.

Os valores de PCS obtidos neste trabalho estão condizentes com resultados de outras pesquisas da área de biomassa florestal para energia. Para madeira de *Eucalyptus benthamii*, aos 6 anos, Lima et al. (2007) encontraram um poder calorífico superior de 4681 kcal.kg⁻¹ (19,59 MJ.kg⁻¹). Em madeira de *Eucalyptus grandis*, Vale et al. (2000) verificaram um PCS de 4641 kcal.kg⁻¹ (19,43 MJ.kg⁻¹) e Quirino et al. (2005) estabeleceram um intervalo entre 4501 e 4790 kcal.kg⁻¹ (18,84 e 20,05 MJ.kg⁻¹) para a mesma espécie. No mesmo trabalho de Quirino et al. (2005), foi obtido um intervalo de 4422 e 4595 kcal.kg⁻¹ (18,51 e 19,24 MJ.kg⁻¹) de poder calorífico da madeira de *E. urophylla*.

4.5 Produtividade Energética

A produção de energia por área é a melhor forma de saber se a floresta implantada tem viabilidade para este fim, principalmente quando se testa práticas silviculturais. No entanto, esta abordagem não tem um padrão de unidades a ser seguido, por isso, adiante são expressos os resultados em GJ.ha⁻¹, que é uma unidade internacional, também em tep/ha, que é outra abordagem internacional, já que considera a questão da substituição dos combustíveis derivados do petróleo pela biomassa florestal.

Como a produtividade energética foi calculada à partir dos dados de biomassa e poder calorífico superior, os resultados foram semelhantes aos obtidos pela análise dos dados de biomassa. Note que a produtividade, em GJ.ha⁻¹, cresce em função da idade de colheita, a maior produtividade energética, nesta unidade de medida, ocorre no espaçamento mais adensado, que aumenta em função do nível de adubação.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da produtividade energética, sendo que a maior produtividade foi de 2452 GJ.ha⁻¹, equivalente a 54,2 tep.ha⁻¹ obtida no espaçamento de 2,8x0,5 m, nível maior de aplicação de adubo e colhido aos 30

meses, seguido da produtividade obtida aos 24 meses, com maior adubação e no 2,8x0,5 m. Ainda ocorreram outros tratamentos que tiveram produções energéticas estatisticamente iguais (teste Tukey, com nível de 5%), todos aos 30 meses, à saber: 2,8x0,5 m nas doses 1 e 2; 2,8x1,0 m nas doses 2 e 3.

Tabela 9. Produtividade energética, em GJ.ha⁻¹ e em tep.ha⁻¹, do povoamento de *E. urophylla* x *E. grandis* nos distintos espaçamentos, níveis de adubação e idade de colheita

| Espaçamento (m) | Nível de adubação* | Idade de colheita (meses) | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|-------------|-------------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8x0,5 | 1 | 809 (17,9 **) | 933 (20,6) | 1728 (38,2) |
| | 2 | 1019 (22,5) | 1098 (24,3) | 1918 (42,4) |
| | 3 | 1325 (29,3) | 1991 (44,0) | 2452 (54,2) |
| 2,8x1,0 | 1 | 821 (18,2) | 792 (17,5) | 1349 (29,8) |
| | 2 | 952 (21,0) | 761 (16,8) | 1671 (36,9) |
| | 3 | 952 (21,1) | 941 (20,8) | 1642 (36,3) |
| 2,8x1,5 | 1 | 762 (16,9) | 918 (20,3) | 1236 (27,3) |
| | 2 | 861 (19,1) | 883 (19,5) | 1358 (30,0) |
| | 3 | 817 (18,1) | 972 (21,5) | 1375 (30,4) |
| 2,8x2,0 | 1 | 609 (13,5) | 709 (15,7) | 1108 (24,5) |
| | 2 | 701 (15,5) | 920 (20,3) | 1142 (25,2) |
| | 3 | 703 (15,5) | 809 (17,9) | 1461 (32,3) |
| 2,8x2,5 | 1 | 383 (10,2) | 522 (13,9) | 830 (22,0) |
| | 2 | 486 (12,9) | 597 (15,8) | 962 (25,5) |
| | 3 | 547 (14,5) | 690 (18,3) | 1120 (29,7) |

*O nível 1 consistiu em 70 g.planta⁻¹ de NPK 6-30-6 no plantio e total na adubação de cobertura de 110 g.planta⁻¹ de NPK 20-0-20 com B e Zn, sendo que o nível 2 foi o dobro do nível 1 e o nível 3, quatro vezes o nível 1. **Valores em parêntesis estão em tep.ha⁻¹.

4.6 Características Químicas da Madeira

Para a otimização da produtividade energética é importante conhecer a constituição química da biomassa, tais como o teor de extrativos totais, teor de lignina e teor de cinzas. Os resultados obtidos nas análises químicas estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Madeira de *Eucalyptus grandis* de quatro idades, 10, 14, 20 e 25 anos, e três posições no sentido base-topo foi avaliada por Silva et al. (2005), que encontraram valor médio de extrativos totais de 4,08 %. Na árvore com 10 anos e na extremidade da tora, 2,76 %

de extrativos, já na árvore com 20 anos e disco avaliado da base, foi encontrado 6,34 % de extrativos. Os autores constataram a evidencia de este componente químico das árvores mais jovens tende a ser menor que em árvore mais maduras. O valor médio de lignina foi de 27,22 %, sendo o limite inferior de 23,78 % na idade de 10 anos e 30,70 % em uma amostra na idade de 20 anos. Silva et al. (2005) salientam que a composição química da madeira variou mais no sentido longitudinal das árvores do que no decorrer do tempo.

Em *Eucalyptus grandis*, aos 5 anos de idade, o teor de extrativos totais foi menor com adubação química que nas dosagens de 0 a 40 t/ha de biossólido; os teores de cinza da madeira aumentaram significativamente com o aumento da dose de aplicação de biossólido. Considerando apenas as doses crescentes de lodo de esgoto tratado, a lignina e os extrativos não aumentaram. O teor de cinzas foi de 0,26 %, o teor médio de lignina foi de 24 % e o teor médio de extrativos foi de 2 % (BARREIROS et al., 2007).

No presente trabalho havia amostras simples para determinação dos teores de lignina, extrativos e cinzas, mas considerando os dados apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12 percebeu-se que o teor de extrativos, para todos os espaçamentos e adubações na idade de 18 meses foi de 2,61%, passando para 3,20% aos 24 meses e 3,58% aos 30 meses. No caso do teor de lignina, aos 18 meses foi encontrada uma média geral de 22,25% passando para 22,86% aos 24 meses e 21,68% aos 30 meses. Já para os teores de cinzas, percebeu-se que o teor era de 1% aos 18 meses, 0,99% aos 24 meses e 0,74 % aos 30 meses.

Tabela 10. Teor de extrativos totais (%) na madeira com casca

| Espaçamento (m) | Nível de adubação | Idade (meses) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|------|------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8 x 0,5 | 1 | 3,15 | 2,68 | 3,12 |
| | 2 | 2,49 | 2,80 | 3,48 |
| | 3 | 3,92 | 3,37 | 2,14 |
| 2,8 x 1,0 | 1 | 2,07 | 4,10 | 3,33 |
| | 2 | 1,64 | 3,65 | 2,07 |
| | 3 | 1,80 | 3,22 | 3,81 |
| 2,8 x 1,5 | 1 | 2,06 | 2,91 | 4,63 |
| | 2 | 2,67 | 2,45 | 3,48 |
| | 3 | 3,12 | 3,64 | 3,36 |
| 2,8 x 2,0 | 1 | 2,76 | 3,26 | 2,53 |
| | 2 | 3,22 | 4,29 | 3,93 |
| | 3 | 2,19 | 2,69 | 3,02 |
| 2,8 x 2,5 | 1 | 3,41 | 3,71 | 3,83 |
| | 2 | 2,58 | 2,18 | 3,70 |
| | 3 | 2,03 | 3,11 | 7,26 |

Tabela 11. Teor de lignina (%) na madeira com casca

| Espaçamento (m) | Nível de adubação | Idade (meses) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|-------|-------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8 x 0,5 | 1 | 21,35 | 21,16 | 21,57 |
| | 2 | 22,38 | 21,82 | 23,11 |
| | 3 | 21,25 | 21,92 | 19,22 |
| 2,8 x 1,0 | 1 | 22,39 | 23,34 | 21,89 |
| | 2 | 22,34 | 22,54 | 22,08 |
| | 3 | 22,33 | 23,11 | 23,02 |
| 2,8 x 1,5 | 1 | 22,22 | 23,14 | 21,10 |
| | 2 | 22,17 | 22,97 | 19,97 |
| | 3 | 21,29 | 23,38 | 21,26 |
| 2,8 x 2,0 | 1 | 22,41 | 23,41 | 22,15 |
| | 2 | 23,36 | 22,83 | 22,91 |
| | 3 | 22,96 | 23,64 | 22,37 |
| 2,8 x 2,5 | 1 | 22,84 | 23,31 | 21,63 |
| | 2 | 22,14 | 23,34 | 22,52 |
| | 3 | 22,37 | 23,03 | 20,33 |

De acordo com Neves et al. (2011), os teores de cinzas devem ser menores por se tratar de minerais que não participam do processo de combustão da madeira. Estes autores encontraram teores entre 0,15% e 0,25% em clones testados no estado de Minas Gerais cuja madeira é destinada a produção de carvão vegetal. No presente estudo, os teores utilizados na estimativa do acúmulo das árvores ficaram entre 0,40% e 1,19% (Tabela 12) porque o material analisado era composto por madeira + casca, material este utilizado na produção de briquetes.

Tabela 12. Teor de cinzas (%) na madeira com casca

| Espaçamento (m) | Nível de adubação | Idade (meses) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|------|------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8 x 0,5 | 1 | 0,80 | 1,00 | 0,88 |
| | 2 | 0,96 | 0,87 | 0,95 |
| | 3 | 0,94 | 1,03 | 0,87 |
| 2,8 x 1,0 | 1 | 0,86 | 0,96 | 0,66 |
| | 2 | 0,86 | 0,95 | 0,86 |
| | 3 | 1,04 | 0,99 | 1,00 |
| 2,8 x 1,5 | 1 | 1,00 | 0,88 | 0,87 |
| | 2 | 1,05 | 1,14 | 0,40 |
| | 3 | 1,05 | 0,99 | 0,80 |
| 2,8 x 2,0 | 1 | 0,96 | 0,95 | 0,57 |
| | 2 | 1,19 | 0,88 | 0,52 |
| | 3 | 1,05 | 1,01 | 0,88 |
| 2,8 x 2,5 | 1 | 0,95 | 1,13 | 0,67 |
| | 2 | 1,30 | 0,96 | 0,64 |
| | 3 | 1,06 | 1,08 | 0,55 |

4.6.1 Acúmulo de extrativos totais, lignina e cinza

Na Tabela 13 estão apresentados os acúmulos de extrativos totais em função das idades de colheita testadas, na qual se observa um nítido incremento da quantidade deste componente da madeira, sendo a maior média estimada em torno de 5084 kg.ha⁻¹, no espaçamento de 2,8x2,5 m, aplicação 3 e corte aos 30 meses de idade.

Quando se avaliou a interação espaçamento x idade de colheita, percebeu-se que os extrativos totais acumulados são maiores e similares nos espaçamentos de 1,5 m entre árvores a 2,5 m na idade de 18 meses. No entanto, ao se projetar idades maiores de colheita, 24 e 30 meses, o maior acúmulo significativo fica para os espaçamentos de 2,0 m e 2,5 m aos 24 meses e apenas para o espaço de 2,5 m entre árvores na idade de 30 meses. Esta tendência é reflexo do nível de competição entre as árvores que, no caso das adensadas, crescem menos em diâmetro comparadas às aquelas de plantios convencionais, refletindo em menor massa seca individual. A relação entre idade de colheita e adubação foi significativa e demonstra que a aplicação de doses maiores de fertilizantes causa um incremento de acúmulo de extrativos.

Tabela 13. Acúmulo de extrativos totais na madeira com casca (kg.ha⁻¹)

| Espaçamento (m) | Nível de adubação | Idade (meses) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|------|------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8 x 0,5 | 1 | 1286 | 1241 | 2749 |
| | 2 | 1276 | 1551 | 3428 |
| | 3 | 2616 | 3391 | 2641 |
| 2,8 x 1,0 | 1 | 849 | 1621 | 2867 |
| | 2 | 773 | 1389 | 1787 |
| | 3 | 857 | 1522 | 3282 |
| 2,8 x 1,5 | 1 | 783 | 1335 | 3249 |
| | 2 | 1138 | 1085 | 2377 |
| | 3 | 1212 | 1765 | 2371 |
| 2,8 x 2,0 | 1 | 832 | 1160 | 1521 |
| | 2 | 1121 | 1987 | 2343 |
| | 3 | 764 | 1083 | 2321 |
| 2,8 x 2,5 | 1 | 7709 | 1175 | 2110 |
| | 2 | 765 | 776 | 2193 |
| | 3 | 667 | 1278 | 5084 |

Semelhante ao que foi constatado para extrativos totais, o acúmulo de lignina na massa seca de madeira com casca foi aumentando em função da idade de colheita, ocorreu o mesmo em função do aumento do espaçamento e em função do nível de adubação. Na Tabela 14 percebe-se que, aos 24 e 30 meses após o plantio, no espaçamento de 2,8x0,5 m,

adubado no nível 3, foram encontrados os maiores valores de acúmulo de lignina, 22098 kg.ha⁻¹ e 23717 kg.ha⁻¹, nas respectivas idades supracitadas.

Tabela 14. Acúmulo de lignina na madeira com casca (kg.ha⁻¹)

| Espaçamento (m) | Nível de adubação | Idade (meses) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|-------|-------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8 x 0,5 | 1 | 8717 | 9802 | 19006 |
| | 2 | 11466 | 12090 | 22767 |
| | 3 | 14180 | 22098 | 23717 |
| 2,8 x 1,0 | 1 | 9185 | 9229 | 18845 |
| | 2 | 10531 | 8581 | 19061 |
| | 3 | 10636 | 10928 | 19830 |
| 2,8 x 1,5 | 1 | 8451 | 10620 | 14811 |
| | 2 | 9453 | 10170 | 13642 |
| | 3 | 8817 | 11339 | 15002 |
| 2,8 x 2,0 | 1 | 6756 | 8330 | 13318 |
| | 2 | 8134 | 10579 | 13664 |
| | 3 | 8017 | 9521 | 17196 |
| 2,8 x 2,5 | 1 | 5164 | 7386 | 11920 |
| | 2 | 6569 | 8308 | 13349 |
| | 3 | 7346 | 9464 | 14239 |

Nos processos de conversão da madeira para fins energéticos, os componentes inertes da madeira, as cinzas (Tabela 15), deterioram os equipamentos. Os teores avaliados por Souza et al. (2009) em espécies florestais da região amazônica ficaram entre 0,27% e 1,82% para cinzas e 0,10% a 0,52% para a sílica. Este resíduo do processo de carbonização da madeira, a cinza, pode ser reutilizada nos povoamentos florestais como insumo, haja vista a reconhecida presença de potássio, por isso, no presente trabalho, apresentou-se os acúmulos de cinzas na massa seca de madeira com casca. Após a compilação dos dados do presente trabalho e realização do teste Tukey ($\alpha=0,05$), verificou-se que o menor acúmulo de cinza foi de 215 kg.ha⁻¹ no espaçamento 2,8x2,5 m, nível 1 de adubação e colhido aos 18 meses, enquanto o maior acúmulo foi no 2,8x0,5 m, nível 3 e colhido aos 30 meses (Tabela 15).

Tabela 15. Acúmulo de cinza na madeira com casca (kg.ha⁻¹)

| Espaçamento (m) | Nível de adubação | Idade (meses) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|------|------|
| | | 18 | 24 | 30 |
| 2,8 x 0,5 | 1 | 327 | 463 | 775 |
| | 2 | 492 | 482 | 936 |
| | 3 | 627 | 1038 | 1074 |
| 2,8 x 1,0 | 1 | 353 | 380 | 568 |
| | 2 | 405 | 362 | 742 |
| | 3 | 495 | 468 | 861 |
| 2,8 x 1,5 | 1 | 380 | 404 | 611 |
| | 2 | 448 | 505 | 273 |
| | 3 | 435 | 480 | 565 |
| 2,8 x 2,0 | 1 | 289 | 338 | 343 |
| | 2 | 414 | 408 | 310 |
| | 3 | 367 | 407 | 676 |
| 2,8 x 2,5 | 1 | 215 | 358 | 269 |
| | 2 | 386 | 342 | 379 |
| | 3 | 348 | 444 | 385 |

4.7 Exportação de Nutrientes

Houve aumento significativo da quantidade de nitrogênio presente na madeira com casca por área devido ao próprio incremento da massa seca de madeira no decorrer do experimento. Da idade de 24 meses para a idade de 30 meses, este acúmulo de N diminuiu devido à ciclagem de nutrientes e translocação dos nutrientes, desenvolvimento das copas e aporte deste nutriente para o solo por causa da senescência das folhas. Hendrickson e Richardson (1993) explicam que os nutrientes são reciclados no interior das árvores pelo seu metabolismo de forma que estes ficam prontamente disponíveis o que possibilita economia energética da planta. O nitrogênio, por exemplo, é retirado da madeira e de folhas velhas da copa, transformado em proteína e armazenado nos ramos.

A maior exportação de nitrogênio foi de 267,7 kg.ha⁻¹ no espaçamento 2,8x0,5 m, dose 2 e 24 meses, seguido do acúmulo de 223,9 kg.ha⁻¹ no espaçamento 2,8x2,5 m, com aplicação 2 e colhido aos 24 meses (Tabela 16).

A exportação de nitrogênio via madeira foi maior no espaçamento mais adensado devido a maior quantidade de massa seca neste tratamento, em contrapartida,

isto não significa que o solo está sendo prejudicado porque ocorre a ciclagem biogeoquímica dos nutrientes. Foelkel (s.d.) resumiu inúmeros resultados de pesquisa e encontrou entre 100 e 250 kg.ha⁻¹ de exportação do nitrogênio, via madeira, em várias espécies de eucalipto. Andrade et al. (2011) estimaram que havia, em média, 141,6 kg.ha⁻¹ de nitrogênio na madeira e 18,3 kg.ha⁻¹ na casca, em um povoamento de *Eucalyptus urograndis* aos 3 anos.

Tabela 16. Quantidade média de nutrientes na madeira com casca, em kg.ha⁻¹

| E (m) | N | 18 meses | | | | | 24 meses | | | | | 30 meses | | | | |
|---------|---|----------|------|-------|------|------|----------|------|-------|------|------|----------|-----|-------|------|------|
| | | N | P | K | B | Zn | N | P | K | B | Zn | N | P | K | B | Zn |
| 2,8x0,5 | 1 | 40,0 | 9,6 | 69,4 | 1,21 | 0,12 | 84,3 | 48,2 | 88,0 | 5,15 | 0,65 | 64,9 | 5,4 | 55,6 | 0,50 | 0,14 |
| | 2 | 78,9 | 12,0 | 123,0 | 0,96 | 0,15 | 267,7 | 15,8 | 116,4 | 2,68 | 0,66 | 58,2 | 4,3 | 88,7 | 0,53 | 0,17 |
| | 3 | 98,1 | 15,6 | 173,5 | 1,40 | 0,13 | 105,9 | 19,7 | 292,4 | 4,52 | 0,91 | 70,6 | 7,9 | 211,7 | 1,14 | 0,30 |
| 2,8x1,0 | 1 | 40,2 | 10,1 | 73,8 | 1,10 | 0,08 | 66,4 | 6,2 | 59,3 | 1,87 | 0,32 | 33,2 | 2,6 | 47,5 | 0,42 | 0,12 |
| | 2 | 46,2 | 11,6 | 80,1 | 1,37 | 0,09 | 42,6 | 4,9 | 57,1 | 1,89 | 0,30 | 34,6 | 2,0 | 38,1 | 0,38 | 0,11 |
| | 3 | 60,0 | 11,1 | 100,0 | 1,14 | 0,10 | 92,7 | 6,1 | 108,8 | 2,14 | 0,28 | 26,5 | 2,5 | 66,2 | 0,35 | 0,14 |
| 2,8x1,5 | 1 | 42,6 | 9,4 | 60,9 | 0,82 | 0,08 | 45,0 | 6,6 | 68,9 | 1,71 | 0,32 | 45,0 | 3,6 | 55,1 | 0,40 | 0,18 |
| | 2 | 56,7 | 10,0 | 72,5 | 0,97 | 0,09 | 49,6 | 5,2 | 88,6 | 2,19 | 0,22 | 43,4 | 2,9 | 48,7 | 0,39 | 0,13 |
| | 3 | 49,3 | 10,2 | 82,9 | 0,95 | 0,08 | 47,5 | 5,0 | 218,3 | 1,75 | 0,19 | 47,5 | 3,8 | 82,5 | 0,44 | 0,15 |
| 2,8x2,0 | 1 | 38,0 | 7,1 | 39,2 | 0,67 | 0,06 | 39,9 | 4,2 | 53,4 | 1,87 | 0,14 | 39,9 | 2,3 | 39,2 | 0,41 | 0,11 |
| | 2 | 53,7 | 8,6 | 55,7 | 0,73 | 0,07 | 58,4 | 4,8 | 69,5 | 2,15 | 0,19 | 45,4 | 3,0 | 41,7 | 0,58 | 0,14 |
| | 3 | 44,0 | 8,2 | 62,9 | 0,80 | 0,07 | 50,8 | 5,2 | 68,5 | 1,89 | 0,16 | 39,5 | 2,6 | 52,4 | 0,52 | 0,12 |
| 2,8x2,5 | 1 | 30,0 | 5,3 | 29,3 | 0,57 | 0,05 | 33,2 | 3,7 | 41,1 | 1,09 | 0,13 | 19,9 | 2,5 | 28,5 | 0,36 | 0,10 |
| | 2 | 47,7 | 6,9 | 47,4 | 0,88 | 0,06 | 223,9 | 5,1 | 46,2 | 1,62 | 0,14 | 27,4 | 1,8 | 32,0 | 0,34 | 0,11 |
| | 3 | 23,0 | 7,7 | 55,7 | 1,04 | 0,07 | 66,2 | 4,8 | 61,6 | 2,16 | 0,16 | 40,3 | 3,2 | 53,4 | 0,39 | 0,12 |

E: espaçamento; N: nível de adubação

Ao se considerar a interação tripla espaçamento x nível de adubação x idade de colheita, que foi significativa (Apêndice 3), notou-se que o espaçamento 2,8x0,5 m, no nível 2 de adubação e colhido aos 24 meses apresentou uma média estimada de exportação de nitrogênio superior as demais médias dos outros tratamentos (Tabela 16). Este resultado pode estar relacionado a fatores fisiológicos da planta ou a fatores climáticos daquele ano. Outro fator que pode ter interferido é a maneira de preparo das amostras que eram compostas por madeira + casca, o que pode ter possibilitado maior quantidade de casca na amostra aos 24 meses do que nas amostras deste espaçamento aos 18 e aos 30 meses. É importante salientar

que as amostras eram compostas porque a empresa utilizava madeira com casca em seu processo de produção de briquetes.

A aplicação 2 de fertilizante é significativo para a exportação de nitrogênio, uma provável explicação para este fenômeno pode estar na interação química dos nutrientes no solo, favorecimento ou não de um determinado nutriente em decorrência da presença de outro. Levando-se em conta a interação espaçamento e nível de adubação percebeu-se que o espaçamento mais adensado, novamente na aplicação 2 de adubo químico, apresentou média superior de exportação de nitrogênio via madeira em relação às demais médias estimadas (Apêndice 6).

O fósforo exportado via madeira com casca decresceu da segunda colheita realizada aos 24 meses para a terceira colheita realizada aos 30 meses, conforme médias estimadas apresentadas na Tabela 16.

Dos espaçamentos mais adensados, o de 2,8x1,0 m, aos 30 meses, com aplicação 2 de adubos, acumulou cerca de 2 kg.ha⁻¹, valor semelhante aos 1,18 g.planta⁻¹ encontrado por Bellote et al. (1980) quando avaliaram o acúmulo de fósforo na madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* com 36 meses.

Na Tabela 16 é possível perceber que ocorreu uma menor exportação de fósforo via madeira com casca na colheita aos 30 meses após o plantio, em relação à idade 24 meses. A média estimada ficou entre 1,8 e 7,9 kg.ha⁻¹ de fósforo via madeira com casca. Schumacher e Caldeira (2001) avaliaram a exportação via madeira e via casca de uma floresta de *Eucalyptus globulus*, separadamente, aos 4 anos, na qual identificaram que havia saída de 5,2 kg.ha⁻¹ de P via madeira e 2,7 kg.ha⁻¹ de P via casca. Pesquisas com este macronutriente evidenciam a importância de se ter informações acerca de seu manejo no sítio de produção, haja vista que os solos tropicais tendem a ter baixos níveis de disponibilidade.

A exportação de potássio do sítio de produção foi maior no espaçamento mais adensado, sendo o segundo colocado o espaçamento 2,8x1,5 m, relação direta com a produção de biomassa que gerou todas as estimativas de exportação do presente trabalho. Se considerar esta abordagem da interação espaçamento x idade de colheita, 30 meses após o plantio ocorreram médias menores de exportação de potássio (K) em todos os espaçamentos, resultado este confirmado pelo teste de médias ao nível de 5% (Apêndice 8). Andrade et al. (2011) encontraram 129,2 kg.ha⁻¹ de K na madeira e 26,6 kg.ha⁻¹ na casca em

povoamentos jovens de *Eucalyptus urograndis*, Schumacher e Caldeira (2001) chegaram as médias de $92,1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de K via madeira em plantações de *Eucalyptus globulus* com 4 anos de idade.

Adegbidi et al. (2001) observaram que, em plantios de willow (*Salix* sp), um dos clones com densidade populacional de 36960 árvores/ha colhidas aos 3 anos teve maior produção de biomassa e menores taxas de remoção de nutrientes. Adegbidi et al. (2001) estudaram a eficiência nutricional em três idades de colheita concluindo que os povoamentos de willow mostraram maior eficiência aos 3 anos, quando comparado com as eficiências nas idades de 1 e 2 anos. Os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam a mesma tendência, ou seja, as colheitas com 30 meses exportam menos que 18 e 24 meses.

Ainda em relação à Tabela 16, é possível perceber que, aos 18 meses de idade, a exportação de boro do povoamento seria de $1,37 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no espaçamento de $2,8 \times 1,0 \text{ m}$, nos demais espaçamentos não passou de $1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Com colheita aos 24 meses, a exportação deste micronutriente seria consideravelmente maior, até $5,15 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no espaçamento mais adensado. Já quando a madeira com casca fosse colhida aos 30 meses esta exportação seria menor, atingiu $1,14 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no espaçamento de $2,8 \times 0,5 \text{ m}$. Esta oscilação dos valores estimados podem estar associados aos processos biogeoquímicos, a ciclagem de nutrientes. A quantidade de zinco contida na madeira com casca é muito pequena em relação aos macronutrientes, sendo a maior quantidade em torno de $0,30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no arranjo de $2,8 \times 0,5 \text{ m}$ na maior aplicação os fertilizantes.

Para Benatti (2013), cerca de 34% dos nutrientes estão alocados no lenho e 27% na casca. Ainda destaca que, em média, as plantas de *Eucalyptus urograndis* (clones I-122 e I-144) em uma área experimental com solos Cambissolo e Latossolo, acumularam até aos 6,5 anos um total de $272 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, $34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P, $197 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de K, $482 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ de B e $482 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Zn.

Vieira et al. (2012) avaliaram o acúmulo de nutrientes em diferentes compartimentos da biomassa em árvores de *Eucalyptus urograndis*, plantadas no espaçamento $3 \times 2,25 \text{ m}$ e com idade de 18 meses. No trabalho de Vieira et al. (2012) foi verificado que a menor concentração de nutrientes estava na madeira, seguida da casca e das folhas. Em levantamento do acúmulo na biomassa, estes autores mostraram que havia $14,97 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N,

2,01 kg.ha⁻¹ de P e 24,51 kg.ha⁻¹ de K, para os micronutrientes foi 35,95 g.ha⁻¹ e 54,68 g.ha⁻¹ de B e Zn.

4.8 Viabilidade Econômica: estudo de caso

Os indicadores estimados a partir do fluxo de caixa simulado para os tratamentos testados nesta pesquisa estão organizados nas Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17. Indicadores econômicos, para corte aos 18 meses, com diferentes taxas de juros

| Espaçamento (m) | Adubação | 6% | | | 9% | | | 12% | | |
|--------------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| | | VPL | IBC | CMP | VPL | IBC | CMP | VPL | IBC | CMP |
| 2,8x0,5 | 1 | 88 | 1,0 | 374 | -50 | 1,0 | 384 | -179 | 1,0 | 393 |
| | 2 | -183 | 1,0 | 390 | -346 | 1,0 | 400 | -498 | 0,9 | 410 |
| | 3 | -1190 | 0,9 | 431 | -1383 | 0,9 | 442 | -1562 | 0,8 | 453 |
| 2,8x1,0 | 1 | 1539 | 1,4 | 265 | 1407 | 1,4 | 271 | 1284 | 1,4 | 276 |
| | 2 | 1512 | 1,3 | 283 | 1363 | 1,3 | 289 | 1225 | 1,3 | 295 |
| | 3 | 382 | 1,1 | 356 | 244 | 1,0 | 364 | 115 | 1,0 | 372 |
| 2,8x1,5 | 1 | 1668 | 1,6 | 236 | 1553 | 1,6 | 240 | 1445 | 1,6 | 245 |
| | 2 | 1732 | 1,5 | 251 | 1602 | 1,5 | 255 | 1482 | 1,5 | 260 |
| | 3 | 988 | 1,2 | 307 | 865 | 1,2 | 313 | 750 | 1,2 | 319 |
| 2,8x2,0 | 1 | 1431 | 1,7 | 229 | 1337 | 1,6 | 233 | 1249 | 1,6 | 237 |
| | 2 | 1472 | 1,6 | 244 | 1367 | 1,5 | 248 | 1270 | 1,5 | 252 |
| | 3 | 969 | 1,3 | 292 | 867 | 1,3 | 298 | 771 | 1,2 | 304 |
| 2,8x2,5 | 1 | 996 | 1,6 | 239 | 926 | 1,6 | 243 | 861 | 1,5 | 247 |
| | 2 | 1280 | 1,6 | 239 | 1191 | 1,6 | 243 | 1108 | 1,5 | 248 |
| | 3 | 1040 | 1,4 | 276 | 947 | 1,4 | 281 | 860 | 1,3 | 286 |

VPL: valor presente líquido, em R\$/ha. CMP: custo médio de produção de briquetes, em R\$/tonelada. IBC: índice de relação benefício custo.

Considerando-se o indicador VPL, o tratamento que apresentou melhor equilíbrio entre receitas e custos foi o 2,8x1,0 m, nível 2 de adubação e madeira colhida aos 30 meses após o plantio. Este tratamento gerou R\$ 4442.ha⁻¹ de valor presente líquido. O índice de relação benefício custo para esta proposta de plantio adensado foi de 1,7 e o custo de produção foi de R\$ 217.tonelada⁻¹, valor que gera uma margem positiva, haja vista que o preço de venda dos briquetes era de R\$ 380.tonelada⁻¹. O menor custo médio de produção foi de R\$ 181.tonelada⁻¹ no espaçamento 2,8x2,5 m, nível 1 de adubação e colhido aos 30 meses,

todavia o VPL ficou muito distante dos plantios adensados. A viabilidade deste tipo de trabalho está associada à dinâmica dos preços dos briquetes no mercado e ao preço do petróleo pois, quanto maior o valor da fonte não-renovável, mais pode se tornar atrativo o negócio florestal para energia, especialmente na produção de pellets e briquetes, este último que constituiu o cenário avaliado no presente trabalho.

Tabela 18. Indicadores econômicos, para corte aos 24 meses, com diferentes taxas de juros

| Espaçamento (m) | Adubação | 6% | | | 9% | | | 12% | | |
|--------------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| | | VPL | IBC | CMP | VPL | IBC | CMP | VPL | IBC | CMP |
| 2,8x0,5 | 1 | 540 | 1,1 | 347 | 328 | 1,1 | 359 | 133 | 1,0 | 371 |
| | 2 | 587 | 1,1 | 352 | 322 | 1,0 | 364 | 79 | 1,0 | 376 |
| | 3 | 1902 | 1,2 | 327 | 1464 | 1,1 | 337 | 1062 | 1,1 | 347 |
| 2,8x1,0 | 1 | 833 | 1,3 | 301 | 695 | 1,2 | 311 | 568 | 1,2 | 320 |
| | 2 | 817 | 1,2 | 316 | 655 | 1,2 | 326 | 505 | 1,1 | 336 |
| | 3 | 719 | 1,1 | 338 | 511 | 1,1 | 348 | 320 | 1,1 | 359 |
| 2,8x1,5 | 1 | 2494 | 1,8 | 213 | 2296 | 1,8 | 217 | 2113 | 1,7 | 222 |
| | 2 | 1848 | 1,5 | 247 | 1668 | 1,5 | 253 | 1502 | 1,5 | 259 |
| | 3 | 1721 | 1,4 | 275 | 1514 | 1,3 | 282 | 1323 | 1,3 | 290 |
| 2,8x2,0 | 1 | 1886 | 1,8 | 213 | 1736 | 1,7 | 218 | 1597 | 1,7 | 222 |
| | 2 | 2500 | 1,8 | 212 | 2304 | 1,8 | 217 | 2123 | 1,7 | 221 |
| | 3 | 1565 | 1,4 | 264 | 1393 | 1,4 | 270 | 1236 | 1,4 | 277 |
| 2,8x2,5 | 1 | 1755 | 1,8 | 206 | 1621 | 1,8 | 210 | 1497 | 1,8 | 214 |
| | 2 | 1776 | 1,7 | 220 | 1630 | 1,7 | 224 | 1496 | 1,7 | 229 |
| | 3 | 1858 | 1,6 | 240 | 1688 | 1,5 | 245 | 1531 | 1,5 | 251 |

VPL: valor presente líquido, em R\$/ha. CMP: custo médio de produção de briquetes, em R\$/tonelada. IBC: índice de relação benefício custo.

Tabela 19. Indicadores econômicos, para corte aos 30 meses, com diferentes taxas de juros

| Espaçamento (m) | Adubação | 6% | | | 9% | | | 12% | | |
|--------------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| | | VPL | IBC | CMP | VPL | IBC | CMP | VPL | IBC | CMP |
| 2,8x0,5 | 1 | 3689 | 1,5 | 253 | 3211 | 1,5 | 261 | 2778 | 1,4 | 270 |
| | 2 | 3754 | 1,4 | 269 | 3206 | 1,4 | 278 | 2710 | 1,3 | 288 |
| | 3 | 3447 | 1,3 | 298 | 2788 | 1,2 | 308 | 2192 | 1,2 | 320 |
| 2,8x1,0 | 1 | 3703 | 1,8 | 212 | 3336 | 1,7 | 218 | 3004 | 1,7 | 224 |
| | 2 | 4442 | 1,7 | 217 | 3993 | 1,7 | 223 | 3586 | 1,7 | 229 |
| | 3 | 3581 | 1,5 | 254 | 3125 | 1,4 | 262 | 2711 | 1,4 | 271 |
| 2,8x1,5 | 1 | 3828 | 2,0 | 191 | 3491 | 1,9 | 195 | 3185 | 1,9 | 199 |
| | 2 | 3884 | 1,9 | 203 | 3521 | 1,8 | 208 | 3192 | 1,8 | 213 |
| | 3 | 3319 | 1,6 | 234 | 2950 | 1,6 | 241 | 2616 | 1,5 | 248 |
| 2,8x2,0 | 1 | 3419 | 2,1 | 184 | 3128 | 2,0 | 188 | 2864 | 2,0 | 192 |
| | 2 | 3859 | 2,0 | 190 | 3522 | 2,0 | 194 | 3216 | 1,9 | 199 |
| | 3 | 3802 | 1,8 | 210 | 3436 | 1,8 | 216 | 3104 | 1,7 | 221 |
| 2,8x2,5 | 1 | 3010 | 2,1 | 181 | 2758 | 2,1 | 184 | 2529 | 2,0 | 188 |
| | 2 | 3496 | 2,1 | 185 | 3198 | 2,0 | 189 | 2928 | 2,0 | 193 |
| | 3 | 3841 | 1,9 | 199 | 3493 | 1,9 | 203 | 3178 | 1,8 | 208 |

VPL: valor presente líquido, em R\$/ha. CMP: custo médio de produção de briquetes, em R\$/tonelada. IBC: índice de relação benefício custo.

Os plantios de 2,8x0,5 m, apesar de terem resultado em material com qualidades tecnológicas satisfatórias para energia, são menos atrativos economicamente, pelo maior investimento inicial em insumos florestais, tais como mudas e adubação, chegando a ser inviáveis para uma colheita aos 18 meses após o plantio. Todavia, novas pesquisas podem ser realizadas a fim de otimizar o uso de fertilizantes, principal peso orçamentário do plantio adensado.

Aos 18 meses de idade, o melhor VPL foi de R\$ 1732 ha⁻¹ obtido ao se considerar a taxa de 6% a.a. no espaçamento 2,8x0,5 m, com dose 2 de adubação. Considerando o indicador benefício/custo (IBC), dos espaçamentos mais adensados, o 2,8x1,5 m na menor fertilização gerou 1,6 de IBC em todas as situações e taxas de juros; no entanto, este tratamento gerou o menor custo de produção de briquetes à taxa de juros de 6% a.a.

Aos 24 meses após o plantio, os melhores VPL estimados foram encontrados no 2,8x2,0 m, na dose 2, em todos os cenários de taxas de juros, todavia, dentre os mais adensados, o espaçamento de 2,8x1,5 m, com aplicação 1 de adubos, resultou no VPL

de R\$ 2494.ha⁻¹, próximo dos R\$ 2500.ha⁻¹ do espaçamento 2,0 m entre árvores. Ainda destaca-se que índices de benefício-custo entre 1,7 e 1,8 foram estimados para os plantios de 1,5 m entre plantas, na dose 1.

Considerando-se a colheita para 30 meses, o arranjo 2,8x1,0 m, na aplicação de fertilizantes da empresa – dose 2, gerou o melhor VPL dentre todas as possibilidades avaliadas no presente trabalho, em torno de R\$ 4442.ha⁻¹, assim como o menor custo médio de produção dos briquetes, cerca de R\$ 217. ha⁻¹.

5. CONCLUSÕES

- Nos espaçamentos 2,8x0,5 m e 2,8x1,0 m, a produção volumétrica de madeira foi maior;
- O maior IMA – Incremento médio anual foi obtido no espaçamento mais adensado;
- A maior densidade básica média da madeira com casca foi obtida no espaçamento 2,8x2,5 m;
- O poder calorífico superior não foi afetado, de maneira geral, pelos tratamentos testados, exceto para madeira aos 30 meses, dos espaçamentos 2,8x1,0 m, 2,8x2,0 m e 2,8x2,5 m, nos quais se encontrou PCS menores;
- A maior produção, em massa seca, foi obtida aos 30 meses, no espaçamento 2,8x0,5 m e com maior adubação;
- A maior produção energética foi e 54,2 tep.ha⁻¹, obtido no espaçamento 2,8x0,5 m, com maior fertilização e madeira colhida aos 30 meses;
- O maior acúmulo e extrativos totais ocorreram no espaçamento 2,8x2,5 m, para a lignina nos tratamentos em arranjo 2,8x0,5 m e 2,8x1,0 m, enquanto as cinzas acumuladas foram encontradas em maior quantidade no espaçamento mais adensado;

- Em relação à quantidade de nutrientes contidos na fitomassa da madeira com casca, foi constatado que, aos 18 meses $K > N > P$ e $B > Zn$, aos 24 meses, $K > N > P$ e $B > Zn$, com exceção dos espaçamentos $2,8 \times 0,5$ e $2,8 \times 2,5$ m, ambos na dose 2, em que o acúmulo dos macronutrientes seguiu a tendência $N > K$. A mesma tendência foi observada quando se colheu com 30 meses após o plantio;
- dentre os tratamentos testados, o $2,8 \times 1,0$ m, na fertilização já efetuada pela empresa e colhido aos 30 meses tem maior viabilidade técnica e econômica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: ABRAF. 2013.

ADEGBIDI, H. G.; VOLK, T. A.; WHITE, E. H.; ABRAHAMSON, L. P.; BRIGES, R. D.; BICKEIHAUPT, D. H. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, p. 399-411, 2001.

ANDRADE, G. C.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A. Efeito da adubação fosfatada e da aplicação de resíduo de celulose no crescimento de *Eucalyptus dunnii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 47, p. 43-54, 2003.

ANDRADE, G. C.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. Adubação fosfatada e potássica em plantios de *Acacia mearnsii* De Wild (acácia-negra). **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 48, p. 65-74, 2004.

ANDRADE, G. C.; BOGNOLA, I. A.; BELLOTE, A. F.J.; FRANCISCON, L.; WATERLOO, M. J.;BRUIJINZEEL, L. A. Site evaluation and productivity of a 3 year old stand of *Eucalyptus urograndis* in São Paulo, Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR, v. 31, n.68, p. 331-346, 2011.

BALLONI, E. A.; MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J. O. Produção de energia através de florestas de rápido crescimento. **Circular Técnica**, n. 103, IPEF, 1980.

BARREIROS, R. M.; GONÇALVES, J. L. M.; SANSÍGOLO, C. A.; POGGIANI, F. Modificações na propriedade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 103-111, 2007.

BELLOTE, A. F. J.; SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em função da idade. **IPEF**, n.20, p. 1-23, 1980.

BELLOTE, A. F. J e FERREIRA, C. A. Nutrientes minerais e crescimento de árvores adubadas de *Eucalyptus grandis*, na região de cerrado, no estado de São Paulo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 26/27, p. 17-28, 1993.

BENATTI, B. P. **Compartimentalização de biomassa e de nutrientes em estruturas de plantas de eucalipto cultivadas em solos distintos**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Lavras: UFLA, 2013. 114p.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria – RS, v. 12, n. 2, p. 75-87, 2002.

CAMPOS, J. C. C. e LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa: Editora UFV, 2006. 470p.

CARDOSO JÚNIOR, A. A. **Tensões de crescimento em *Eucalyptus* e suas relações com espaçamento, idade e material genético**. 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

COELHO, A. S. R.; MELLO, H. A.; SIMÕES, J. W. Comportamento de espécies de eucaliptos face ao espaçamento. **IPEF**, n. 1, p. 29-55, 1970.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E.urophylla***. 2006. 99f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2006.

FERREIRA, C. A. e SILVA, H. D. Afilamento e forma do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* e suas variações com a adubação. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 44, p. 87-106, 2002.

FISHER, F. R. e BINFLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. (3. Ed.) Editora John Wiley & Sons, Inc. 2000. 489p.

FOELKEL, C. **Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos**. 136 f. Eucalyptus Online Book and Newsletter. Disponível em www.eucalyptus.com.br. Acessado em 24/07/2012.

FORD, E. D. The dynamics of plantation growth. In: BOWEN, G. D. e NAMBIAR, E. K. S. (Ed.) **Nutrition of plantation forests**. London: Academic Press, 1984. p. 16-52.

GARCIA, C. H.; CORRADINE, L.; ALVARENGA, S. F. Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos. **IPEF**, Circular Técnica nº 179, dezembro de 1991.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009.

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-RS, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003.

HAMZA, K. F. S. e LEWARK, S. Sampling for wood properties in trial plots of 4 *Eucalyptus* species at Ruvu, Tanzania. **Annals of Forest Science**, n. 51, p. 233-240, Editora INRA, EDP Sciences, 1994.

HENDRICKSON, O. Q. e RICHARDSON, J. Nested forest nutrient cycles. **The forestry chronicle**, v. 69, n. 6, p. 694-698, 1993.

HUBER, M.; HALMSCHLAGER, E.; STERBA, H. The impact of forest fertilization on growth of mature norway spruce affected by *Sirococcus shoot* blight. **Forest Ecology and Management**, 2009.

IGARTÚA, D. V.; MONTEOLIVA, S.; PITER, J. C. Estudio de algunas propiedades físicas de la madera de *Acacia melanoxylon* em Argentina. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, n. 11, v. 1, p. 3-18, 2009.

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**, n. 59, p. 77-87, jun. 2001.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influencia da umidade no poder calorífico superior da madeira. **Comunicado Técnico**, n. 220, EMBRAPA Florestas, Colombo-PR, 2008.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; MAGALHÃES, W. L. E.; LAVORANTI, O. J. Caracterização individual de árvores de *Eucalyptus benthamii* para uso energético. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 35, EMBRAPA Florestas, Colombo-PR, 2007.

LIMA, J. T. The wood density of 3 *Eucalyptus saligna* Smith clones in relation to age. **Annals of Forest Science**, n. 52, p. 347-352, Editora INRA, EDP Sciences, 1995.

LOURENÇO, R. S.; MEDRADO, M. J. S.; DALZOTO, D. N. Efeito de níveis de potássio sobre a produtividade de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) no município de Ivaí-PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 39, p. 119-131, 1999.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba-MG**. 2005. 94f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, p. 319-330, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações** (2. Ed.). 199p. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliotti* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 42, p. 123-138, 2001.

OLIVEIRA, I. R. M.; VALE, A. T.; MELO, J. T.; COSTA, A. F.; GONÇALES, J. C. Biomassa e características da madeira de *Sclerolobium paniculatum* cultivado em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras-MG, v. 14, n. 4, p. 351-357, 2008.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2003.

PEREIRA, J. C. D.; HIGA, A. R.; SHIMIZU, J. Y.; HIGA, R. C. V. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Eucalyptus dunnii* Maiden, para fins energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 13, p. 9-16, 1986.

PEREIRA, J. C. D e LIMA, P. C. F. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 45, p. 99-107, 2002.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, 2005.

RAYMOND, C. A. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. **Annals of Forest Science**, n. 59, p. 525-531, Editora INRA, EDP Sciences, 2002.

REZENDE, G. C.; SUITER FILHO, W.; MENDES, C. J.; CASTRO, P. F. Exploração e rendimento de florestas de ciclo curto objetivando a produção de carvão e energia. **Circular Técnica do IPEF**, n. 96, março de 1980.

RODRIGUES, F. A. V. **Disponibilidade de cobre e zinco para mudas de eucalipto em solos de cerrado**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

SANSÍGOLO, C. A. e RAMOS, E. S. Quality of wood and pulp from a clone of *Eucalyptus grandis* planted at three locations. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 47-60, 2011.

SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; KLEIN, J. E. M. Crescimento da acácia negra, *Acacia mearnsii* De Wild em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 10, n. 2, p. 101-112, 2000.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 17-22, 2011.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M.V. N. Estimativa de biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* var *maindenii*. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p.45-53, 2001.

SEYE, O.; SANTOS, E. C. S.; SOUZA, R. C. R.; SOUZA, C. D. R.; JEFFREYS, M. F. **Caracterização da biomassa florestal do estado do Amazonas para fins energéticos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA (48), Rio de Janeiro-RJ, 2008. Disponível em <http://www.abq.org.br/cbq/2008/trabalho/3/3-199-4062.htm> , acessado em 09-03-2010.

SILVA, J. C.; MATOS, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. S.; EVANGELISTA, W. V. Influencia da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005.

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 - Silvicultura e Manejo Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 276p. Viçosa: Editora UFV, 2006.

SOUZA, S. S.; SANATOS, P. O.; VAREJÃO, M. J. C.; NASCIMENTO, C. C. Detecção do teor de cinzas e sílica em materiais lignocelulósicos. In: **REUNIÃO ANUAL DA SBPC** (61). Manaus: UFAM, 2009. Disponível: www.sbpc.net.org.br/livro/61ra/resuumos/resumos/5044.htm. Acessado em 13/10/2012.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influencia da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras-MG, v. 2, n. 1, 1996.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras-MG, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira de espécies de *Eucalyptus*. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras – MG, v. 33, 2009.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras-MG, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VIEIRA, M.; BONACINA, D. M.; SCHUMACHER, M. V.; CALIL, F. N.; CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus*

urograndis na Serra do Sudeste-RS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, Suplemento 1, p. 2481-2490, 2012.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Boletim técnico. Viçosa: SIF, 1984.

WIMMER, R.; DOWNES, G. M.; EVANS, R. High-resolution analysis of radial growth and wood density in *Eucalyptus nitens*, grown under different irrigation regimes. **Annals of Forest Science**, n. 59, p. 519-524, Editora INRA, EDP Sciences, 2002.

7. APÊNDICE

Apêndice 1. Resultado da análise de variância para produção em volume, massa seca e produção energética

| Fator de variação | Prod. (GJ/ha) | Prod. (tep/ha) | Prod. (m ³ /ha) | Prod. (t/ha) |
|-------------------|---------------|----------------|----------------------------|--------------|
| Idade (I) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Espaçamento (E) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Adubação (A) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| I x E | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| I x A | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,02 |
| I x E x A | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Prod.: produção de madeira; p-valor menor que 0,05 indica que o fator de variação foi significativo.

Apêndice 2. Resultado da análise de variância para a densidade e energia da madeira

| Fator de variação | DBM (kg/m ³) | PCS (MJ/kg) |
|-------------------|--------------------------|-------------|
| Idade (I) | 0,00 | 0,00 |
| Espaçamento (E) | 0,00 | 0,58 |
| Adubação (A) | 0,22 | 0,16 |
| I x E | 0,05 | 0,01 |
| I x A | 0,71 | 0,66 |
| I x E x A | 0,30 | 0,74 |

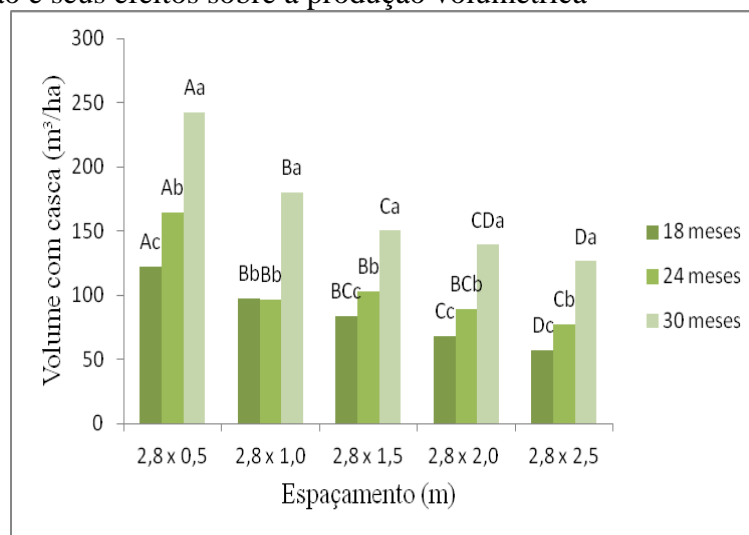
DBM: densidade básica média das árvores; PCS: poder calorífico superior; p-valor menor que 0,05 indica que o fator de variação foi significativo

Apêndice 3. Resultado da análise de variância para a exportação de N, P, K, B e Zn via Madeira com casca

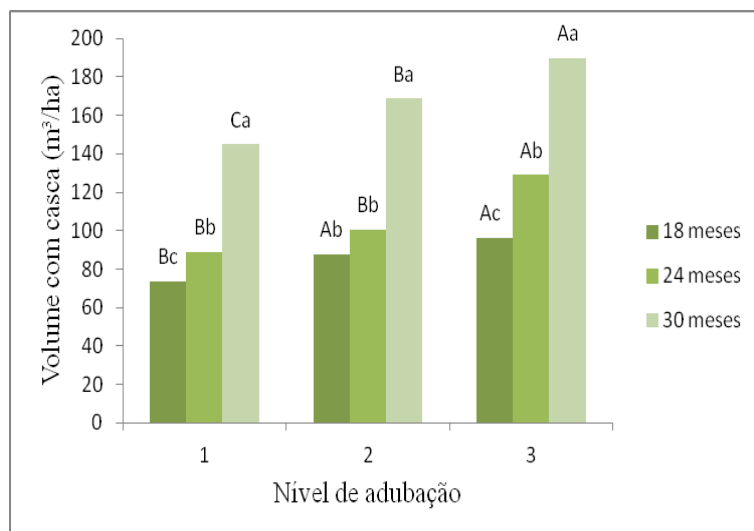
| Fator de variação | N (kg/ha) | P (kg/ha) | K (kg/ha) | B (kg/ha) | Zn (kg/ha) |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Idade (I) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Espaçamento (E) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Adubação (A) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| I x E | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| I x A | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| I x E x A | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

p-valor menor que 0,05 indica que o fator de variação foi significativo

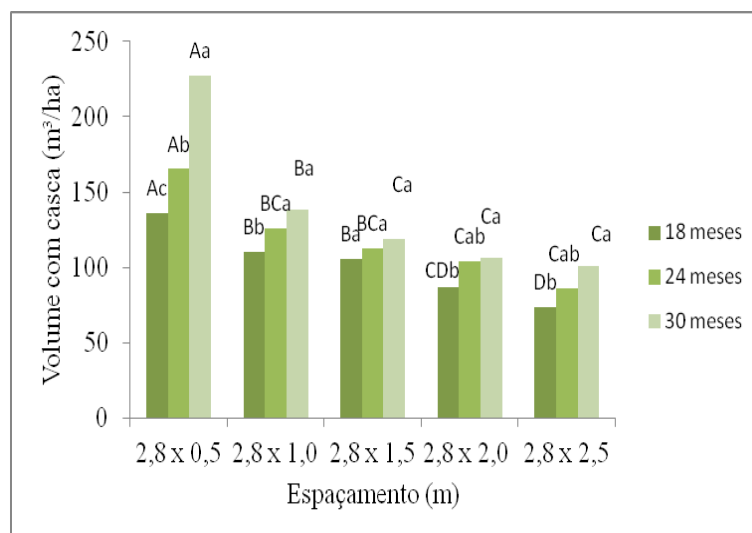
Apêndice 4. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha = 0,05$), para as interações entre os fatores de variação e seus efeitos sobre a produção volumétrica



Letras minúsculas para comparar os volumes nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar os volumes nos espaçamentos dentro das idades. Teste Tukey ($\alpha = 0,05$).

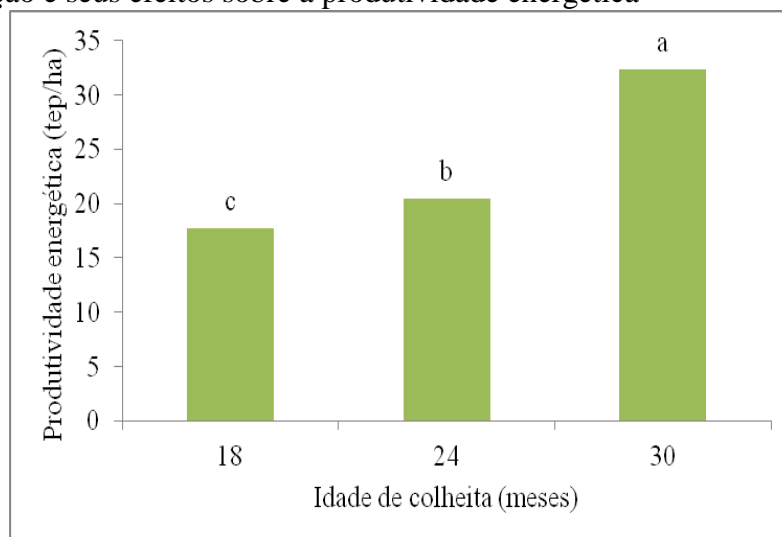


Letras minúsculas para comparar os volumes nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar o volume nos níveis de adubação em cada idade. Teste Tukey ($\alpha = 0,05$).

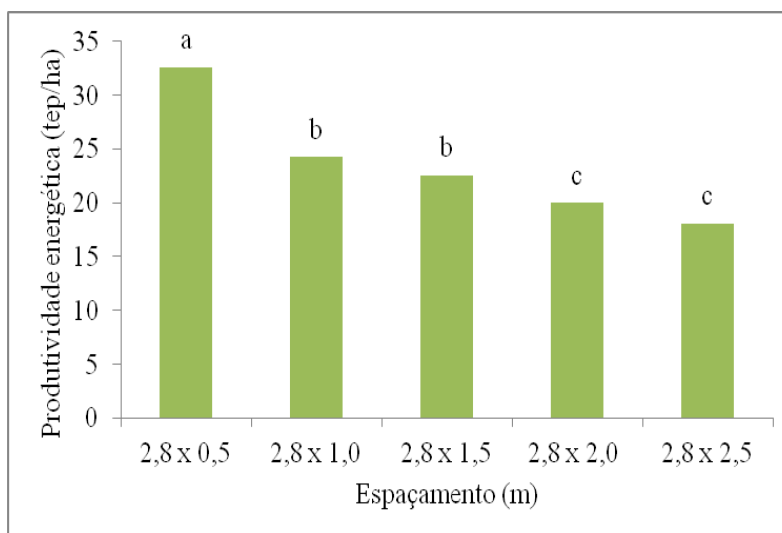


Letras minúsculas para comparar os volumes nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar os volumes nos espaçamentos em cada idade.

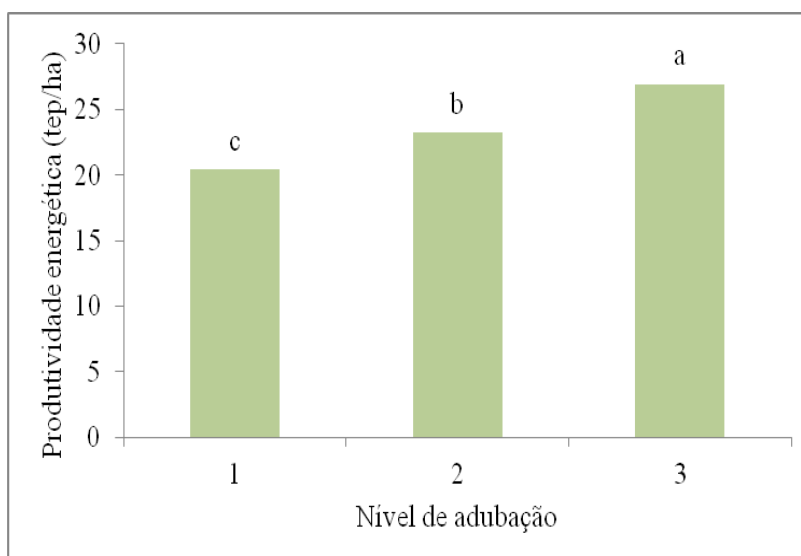
Apêndice 5. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha = 0,05$), para as interações entre os fatores de variação e seus efeitos sobre a produtividade energética



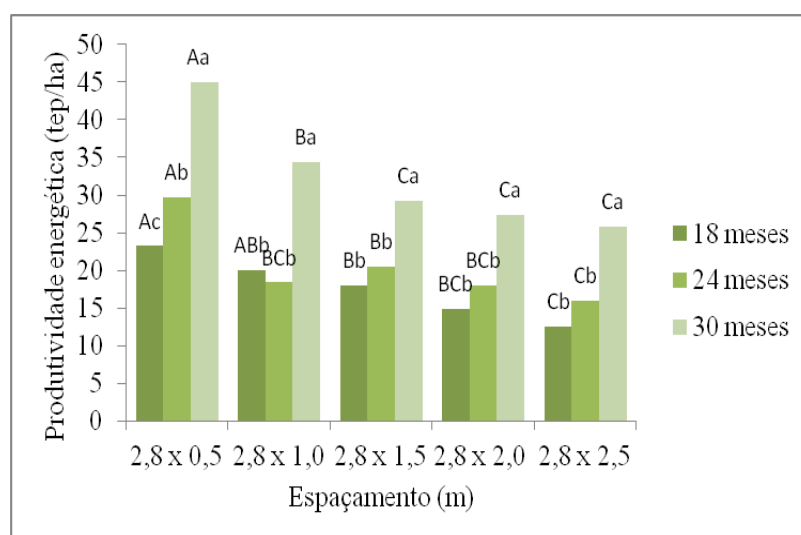
Letras diferentes indicam que houve diferença.



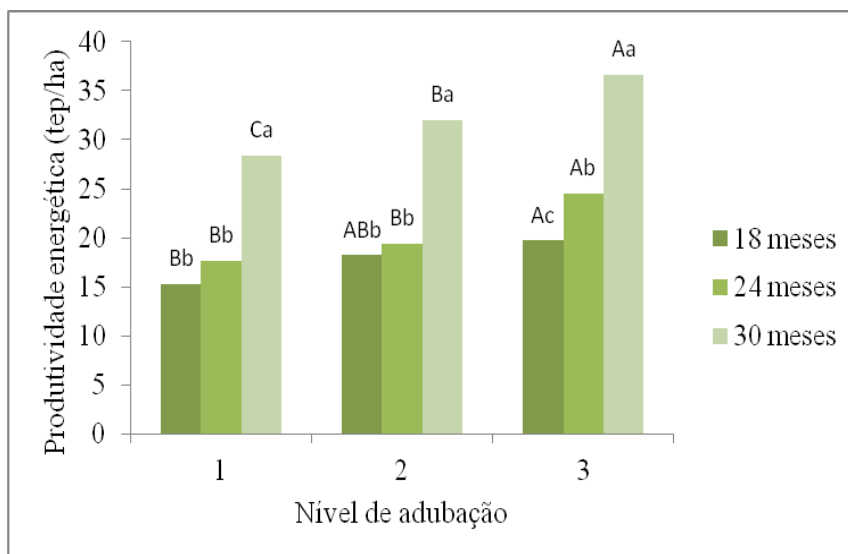
Médias seguidas da mesma letra não se diferem pelo teste estatístico.



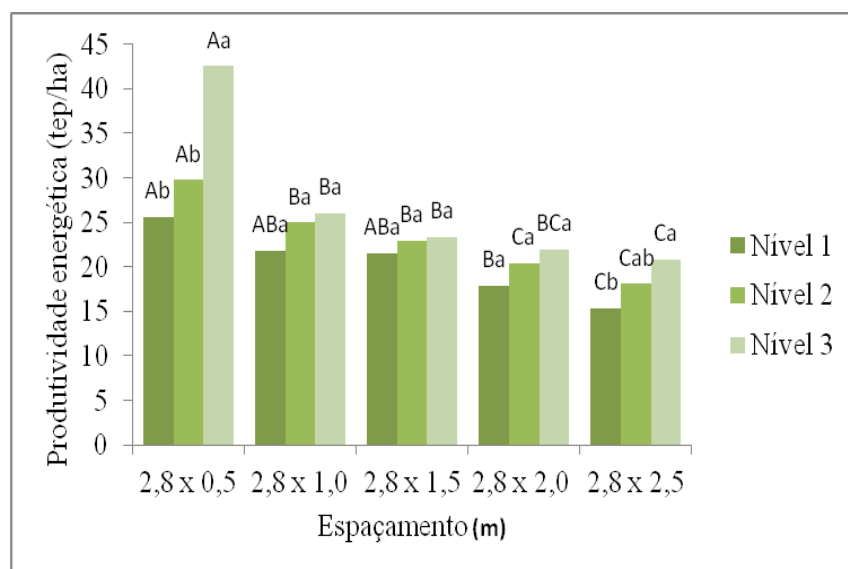
Médias seguidas da mesma letra não se diferem pelo teste estatístico.



Letras minúsculas para comparar a produtividade energética nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar a produtividade energética nos espaçamentos em cada idade.

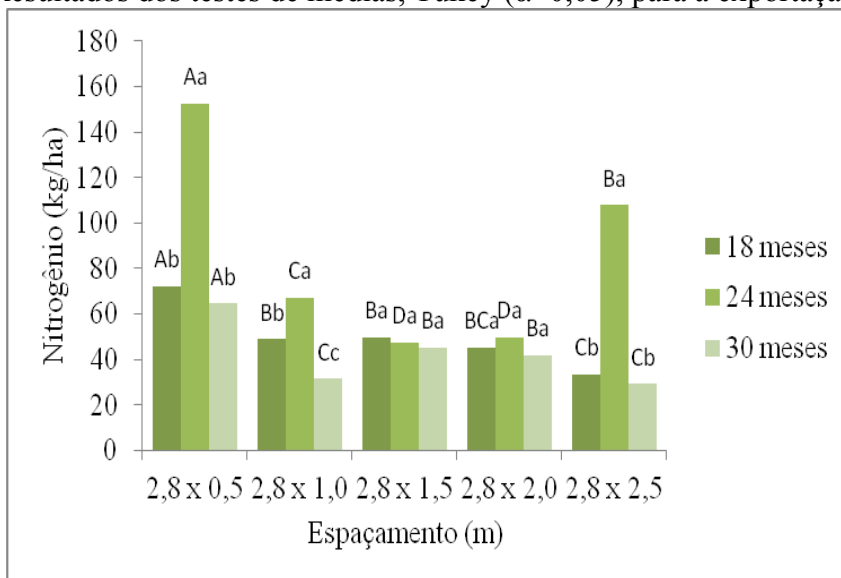


Letras minúsculas para comparar a produtividade energética nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar a produtividade energética nos níveis de adubação em cada idade. Teste Tukey ($\alpha = 0,05$).

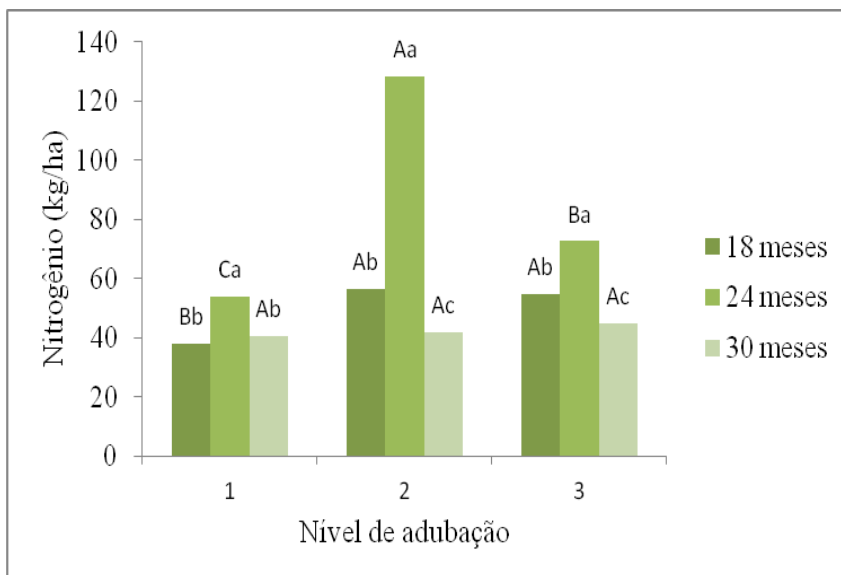


Letras minúsculas para comparar a produtividade energética nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar a produtividade energética nos espaçamentos em cada nível de adubação.

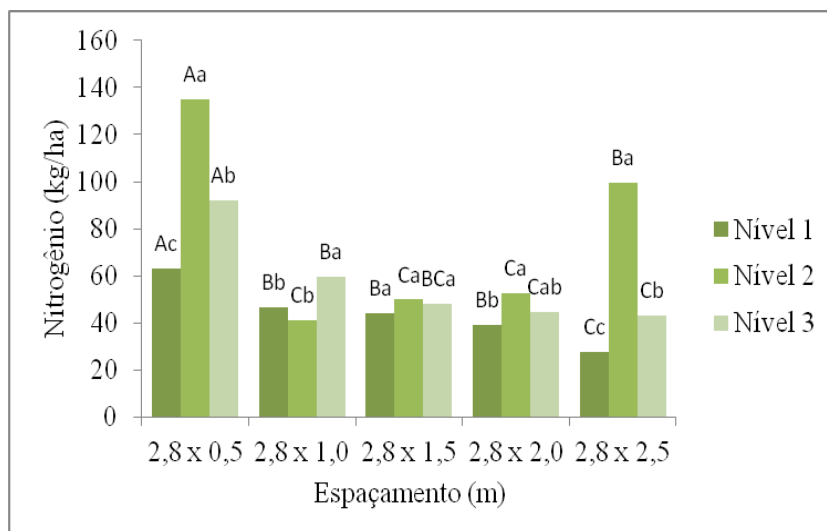
Apêndice 6. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha=0,05$), para a exportação de nitrogênio



Letras minúsculas para comparar exportação de nitrogênio nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar a exportação de nitrogênio nos espaçamentos em cada idade.

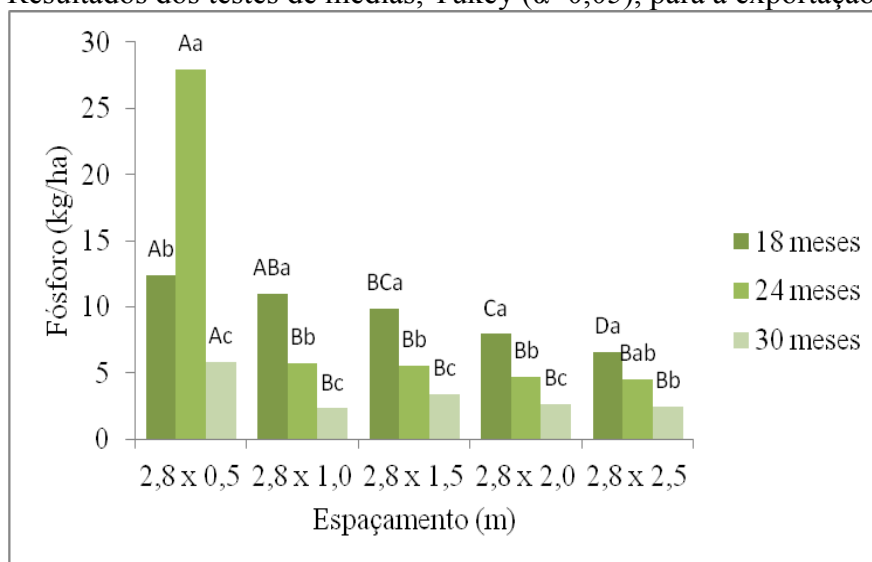


Letras minúsculas para comparar a exportação de nutrientes nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar a exportação de nutrientes nos níveis de adubação em cada idade.

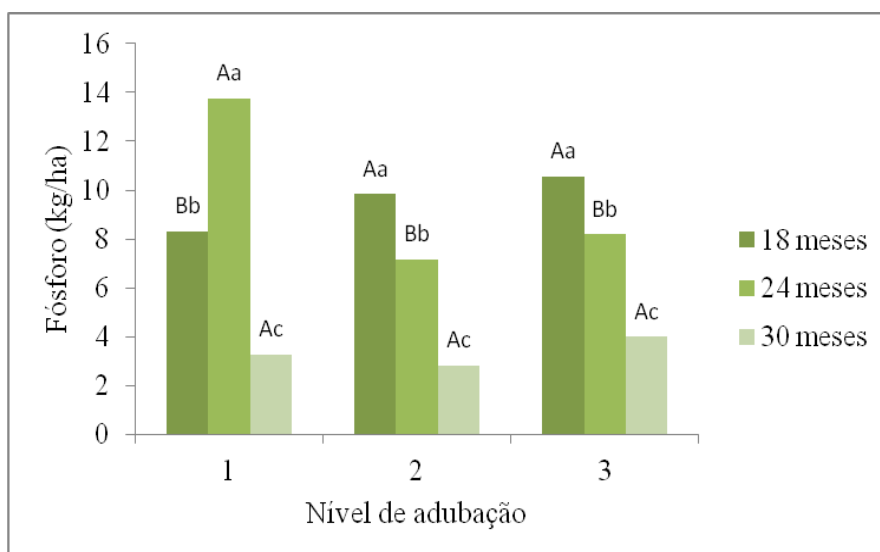


Letras minúsculas para comparar exportação de nitrogênio nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar a exportação de nitrogênio nos espaçamentos em cada nível de adubação.

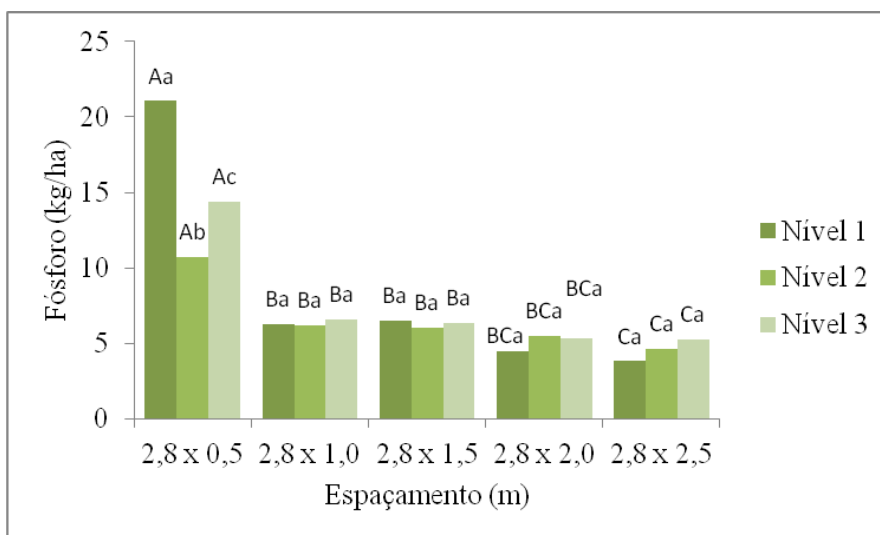
Apêndice 7. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha=0,05$), para a exportação de fósforo



Letras minusculas para comparar exportação de fósforo nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de fósforo nos espaçamentos em cada idade.

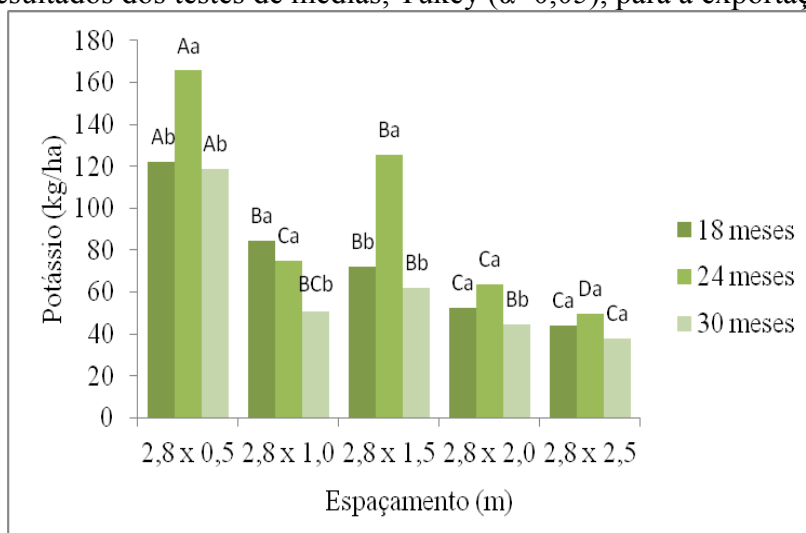


Letras minúsculas para comparar exportação de fósforo nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar exportação de fósforo nos níveis de adubação em cada idade.

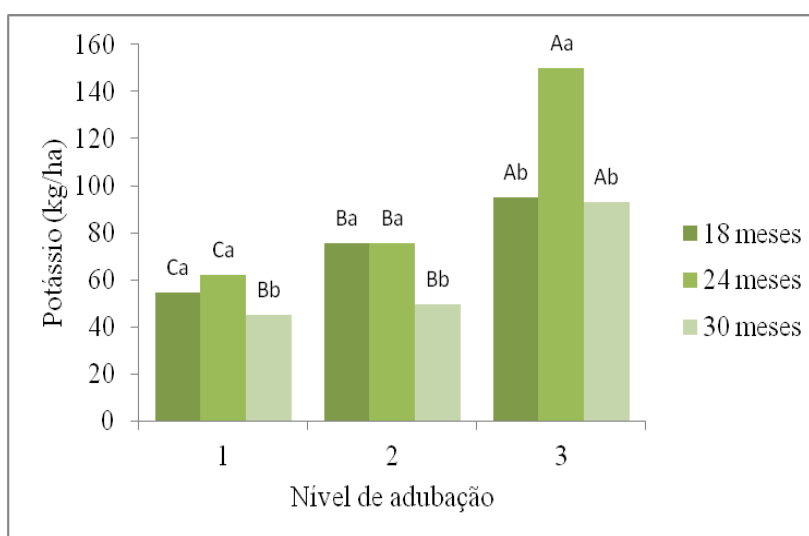


Letras minúsculas para comparar exportação de fósforo nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de fósforo nos espaçamentos em cada nível de adubação.

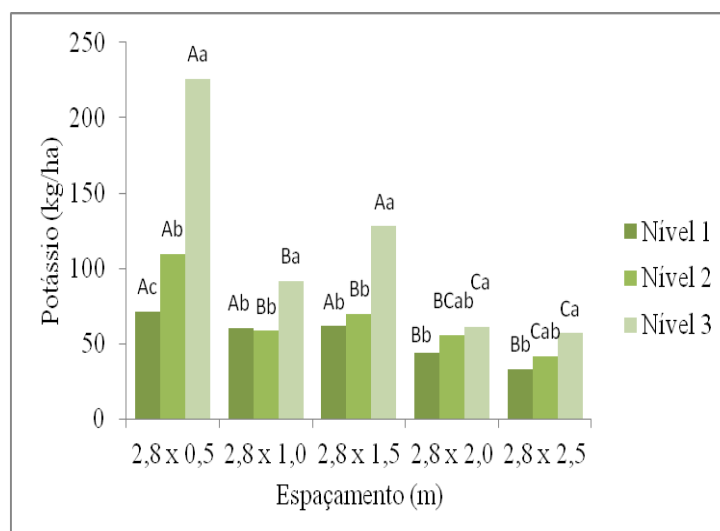
Apêndice 8. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha=0,05$), para a exportação de potássio



Letras minúsculas para comparar exportação de potássio nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de potássio nos espaçamentos em cada idade.

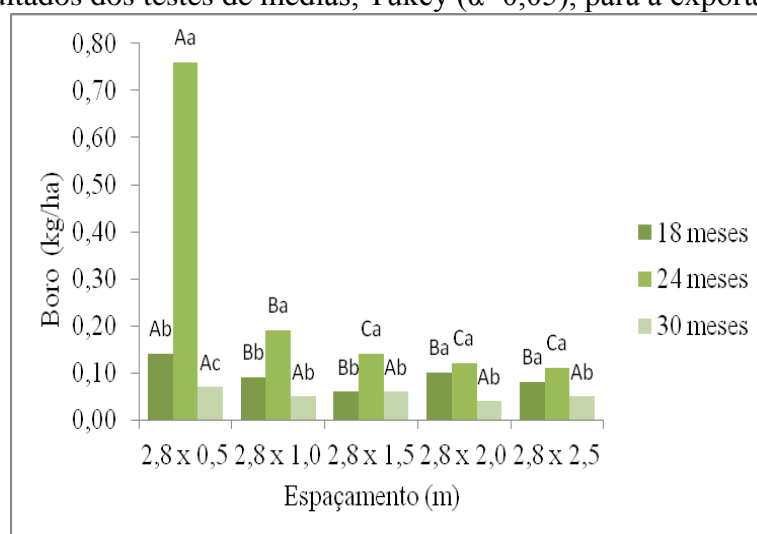


Letras minúsculas para comparar exportação de potássio nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar exportação de potássio nos níveis de adubação em cada idade.

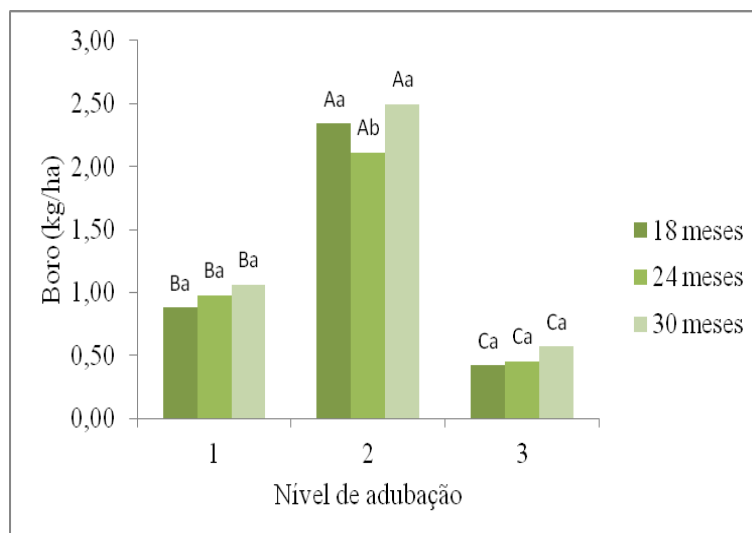


Letras minúsculas para comparar exportação de potássio nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de potássio nos espaçamentos em cada nível de adubação.

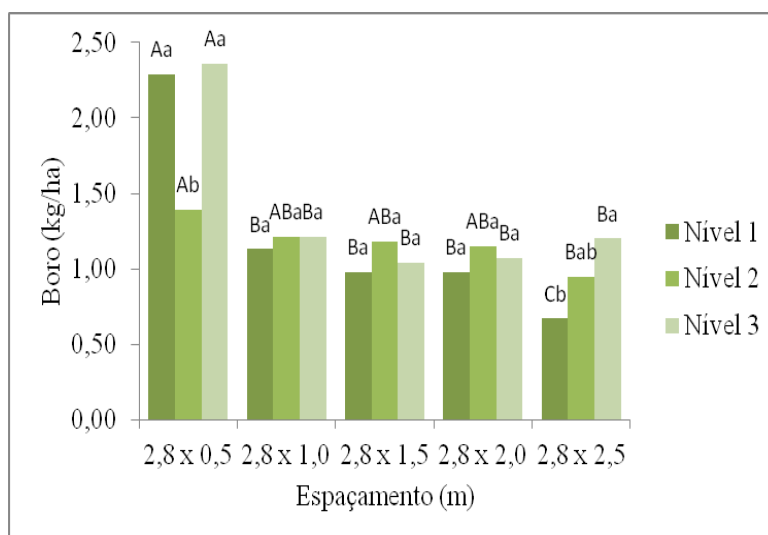
Apêndice 9. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha=0,05$), para a exportação de boro



Letras minúsculas para comparar exportação de boro nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de boro nos espaçamentos em cada idade.

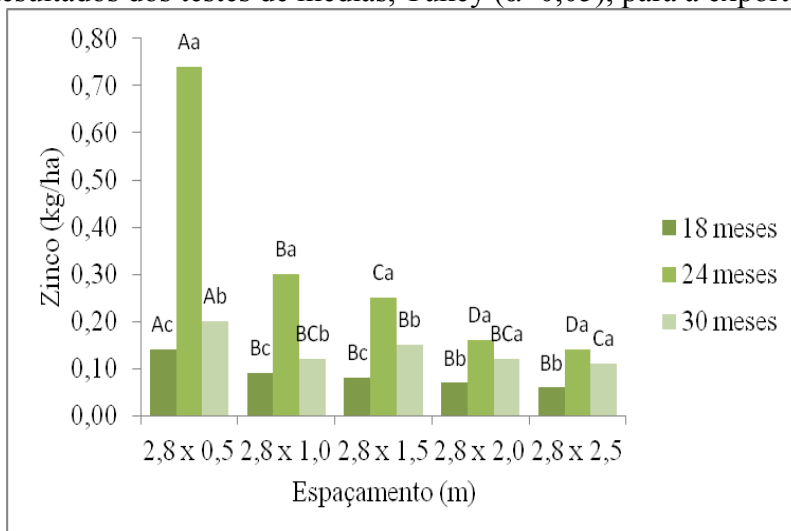


Letras minúsculas para comparar exportação de boro nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar exportação de boro nos níveis de adubação em cada idade.

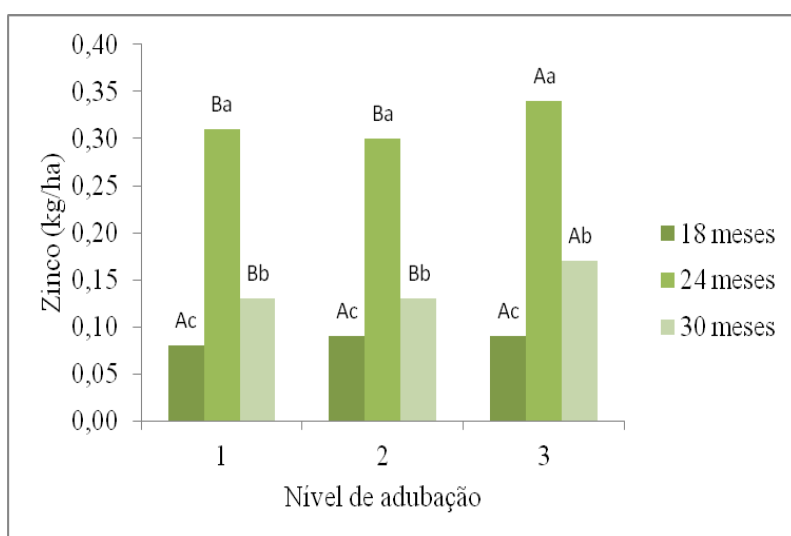


Letras minúsculas para comparar exportação de boro nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de boro nos espaçamentos em cada nível de adubação.

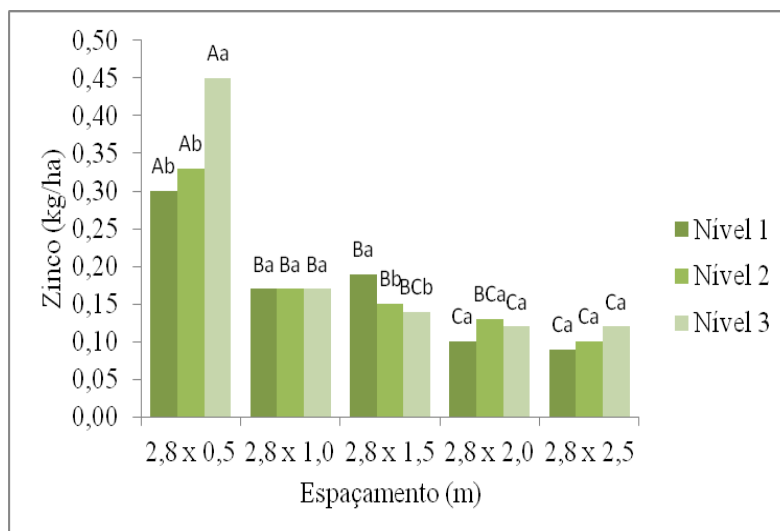
Apêndice 10. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha=0,05$), para a exportação de zinco



Letras minúsculas para comparar exportação de zinco nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar exportação de zinco nos espaçamentos em cada idade.

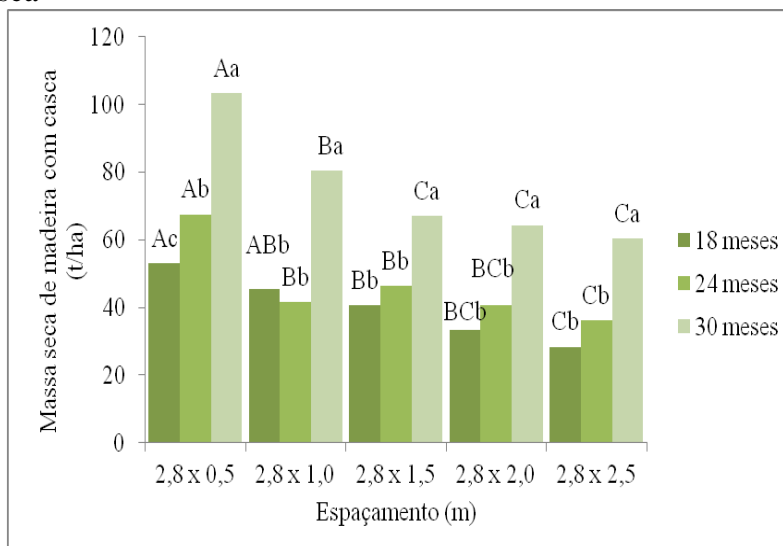


Letras minúsculas para comparar exportação de zinco nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar exportação de zinco nos níveis de adubação em cada idade.

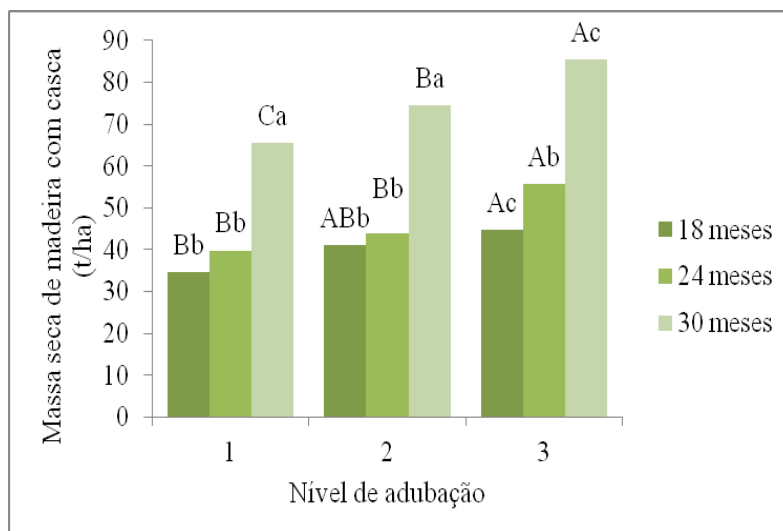


Letras minúsculas para comparar exportação de zinco nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparara exportação de zinco nos espaçamentos em cada nível de adubação.

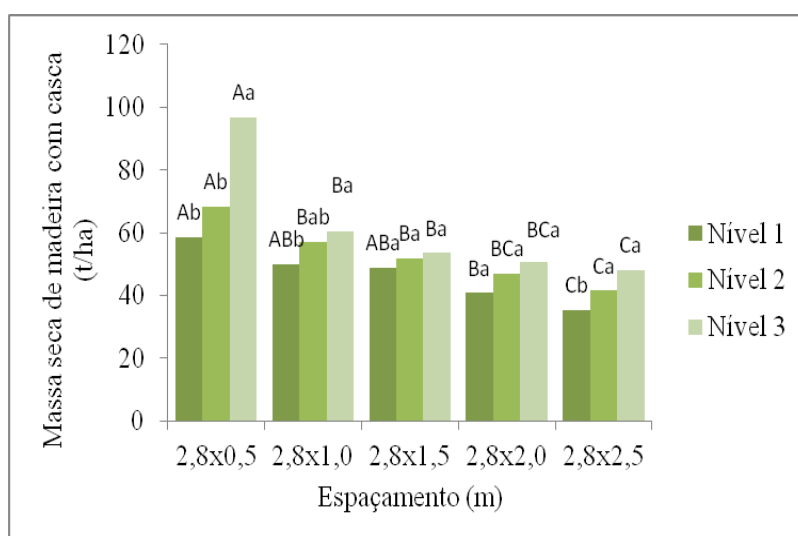
Apêndice 11. Resultados dos testes de médias, Tukey ($\alpha=0,05$), para biomassa seca de madeira com casca



Letras minúsculas para comparar produção de massa seca de madeira nas idades em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar produção de massa seca de madeira nos espaçamento em cada idade.



Letras minúsculas para comparar produção de massa seca de madeira nas idades em cada nível de adubação e letras maiúsculas para comparar produção de massa seca de madeira nos níveis de adubação em cada idade.



Letras minúsculas para comparar produção de massa seca de madeira nos níveis de adubação em cada espaçamento e letras maiúsculas para comparar produção de massa seca de madeira nos espaçamentos em cada nível de adubação.