FRANCIELLE BRANDALISE WIONZEK

INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS E BIOMASSA DE *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage

MESTRADO EM BIOENERGIA

GUARAPUAVA

2014

FRANCIELLE BRANDALISE WIONZEK

INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS E BIOMASSA DE *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage

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

Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick

Orientador

Prof. Dr. Everton Hillig

Co – Orientador

GUARAPUAVA

2014

Catalogação na Publicação
Biblioteca Central da Unicentro, Campus Cedeteg

W796i

Wionzek, Francielle Brandalise

Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage / Francielle Brandalise Wionzek. – – Guarapuava, 2014

xi, 64 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, 2014

Orientador: Luciano Farinha Watzlavick

Co-orientador: Everton Hillig

Banca examinadora: Fernando Luís Dlugosz, Gabriel de Magalhães Miranda, Edson Perez Guerra

Bibliografia

1. Bioenergia. 2. Biocombustíveis. 3. Energias renováveis. 4. Florestas energéticas. 5. Características físico-químicas. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.

CDD 660

FRANCIELLE BRANDALISE WIONZEK

INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS E BIOMASSA DE *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage

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

Aprovada em 04 de julho de 2014.

Prof. Dr. Fernando Luís Dlugosz – CAMPO REAL

Prof. Dr. Gabriel de Magalhães Miranda – UNICENTRO

Prof. Dr. Edson Perez Guerra – UNICENTRO

Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick

Orientador

GUARAPUAVA-PR

2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por guiar meus passos sempre no caminho certo.

À minha família, que é a base de tudo, pela compreensão e apoio.

Ao meu noivo Jackson, não só pela compreensão, apoio e paciência, mas principalmente porque foi a pessoa que mais me incentivou a começar o Mestrado e que não me permitiu desistir nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick, pela confiança depositada para a realização deste trabalho, pelos ensinamentos repassados, pela paciência, apoio e amizade.

Aos Professores Sebastião, Gabriel, Éverton e Dimas, por todo apoio e ajuda em diferentes etapas do trabalho, pela atenção, disponibilidade, sugestões e aprendizado.

Aos colegas de mestrado do Laboratório de Ciências Florestais e Forrageiras, em especial ao Saulo, Joelmir, Cris e Werner, pelo incentivo e ajuda nas coletas de campo e momentos de conversas, troca de informações e de conhecimento.

Às demais pessoas que me ajudaram com a coleta de dados, meu pai Zico, minha irmã Eloisa e Luiz Carlos.

À Unicentro e ao Programa de Pós Graduação em Bionergia, pela oportunidade.

À CAPES, pela concessão de bolsa.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para realização e concretização desta dissertação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **i**
LISTA DE TABELAS ..... **ii**
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ..... **iii**
RESUMO ..... **iv**
1. INTRODUÇÃO **1**
2. OBJETIVOS **3**
2.1 Geral 3
2.2 Específicos 3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **4**
3.1. O gênero *Eucalyptus* 4
3.1.1. Principais espécies de Eucalyptus utilizadas no Brasil 5
3.1.2. Efeito do espaçamento 7
3.2. Espécie: *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage 7
3.3. Biomassa para fins energéticos 9
3.4. Florestas Plantadas ou artificiais 12
3.5. Florestas Energéticas 14
3.6. Propriedades físicas da madeira 16
3.6.1. Densidade básica 16
3.7. Propriedades químicas e energéticas da madeira 17
3.7.1. Teor de materiais voláteis (MV) 17
3.7.2. Teor de carbono fixo (CF) ou coque 17
3.7.3. Teor de cinzas (A) 18
3.7.4. Teor de umidade 18
3.7.5. Poder calorífico 19
3.8. O uso de biomassa em caldeiras 20
4. MATERIAIS E MÉTODOS **22**
4.1. Caracterização da área de estudo 22
4.2. Características gerais do experimento 23
4.3. Coleta de dados para estimativa de biomassa e realização das análises químicas, físicas e energéticas 24
4.4. Estimativa da biomassa nos diferentes compartimentos 25
4.5. Estimativa da biomassa total e nos diferentes compartimentos 28
4.6. Análise de densidade básica da madeira 29
4.7. Preparação das amostras para as análises químicas e energéticas 30
4.7.1. Análise química imediata 30
4.7.2. Poder calorífico superior (PCS) 31
4.8. Análise de custos 32
4.9. Análises estatísticas 36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO **37**
5.1. Estimativa de biomassa 37
5.2. Propriedades físicas da madeira 39
5.2.1. Densidade básica 39
5.3. Propriedades químicas e energéticas 43
5.3.1. Análise química imediata 43

5.3.2. Poder calorífico superior (PCS) 46
5.3.3. Poder calorífico superior (PCS) x teor de umidade 47
5.4. Análise de custos 48
6. CONCLUSÕES 51
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 52
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53
ANEXO 63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2012. Fonte: EPE (2013). Adaptado. 11
Figura 2. Distribuição em % de plantios florestais com *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies não convencionais no Brasil em 2012. Fonte: ABRAF (2013). Adaptado. 13
Figura 3. Área e distribuição de plantios florestais com *Eucalyptus* e *Pinus* nos Estados do Brasil, no ano de 2012 (ABRAF, 2013). 15
Figura 4. Mapa de Localização do Município de Guarapuava-PR e da área experimental no campus Cedeteg, UNICENTRO. 22
Figura 5. Croqui da área experimental com *E. benthamii*. 24
Figura 6. Etapas realizadas a campo: a) corte da árvore; b) medição da altura total para marcação da amostragem em diferentes alturas; c) medição dos diâmetros em diferentes alturas; d) pesagem de galhos e folhas; e) corte do fuste para pesagem; e f) pesagem da madeira com casca. 26
Figura 7. Amostragem realizada para estimativa da biomassa seca da madeira com casca: discos retirados em alturas diferentes ao longo do fuste. 27
Figura 8. Amostragem realizada para estimativa da biomassa seca de galhos e folhas. 27
Figura 9. Localização das cunhas (corpos de prova) retiradas dos discos para realização da análise de densidade básica da madeira. 29
Figura 10. Distribuição da biomassa de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade, em %. 39
Figura 11. Comparação da densidade básica da madeira em posições de amostragem ao longo do fuste para *E. benthamii* do presente estudo, com diferentes espécies de eucalipto avaliadas por Sturion et al., 1987. DAP-diâmetro a altura do peito. 42
Figura 12. Comparação entre as médias para o teor de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (A) para *E. benthamii* do presente estudo, com diferentes espécies de eucalipto avaliadas por Brito e Barrichelo (1978). 45
Figura 13. Relação entre o teor de umidade (a) e poder calorífico (b) dos compartimentos casca, madeira e galhos e folhas de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais usos do eucalipto e espécies recomendadas no Brasil. 6
Tabela 2. Espaçamentos utilizados no plantio experimental com *E. benthamii*, com suas respectivas áreas vitais e número de árvores por hectare. 23
Tabela 3. Resumo da estatística da equação ajustada para *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. 28
Tabela 4. Características dos diferentes modelos de caldeiras utilizadas nos cálculos de viabilidade econômica. 33
Tabela 5. Valores médios de biomassa seca total e por compartimento em função dos diferentes tratamentos avaliados para *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. 37
Tabela 6. Valores médios da densidade básica em função dos diferentes pontos de amostragem ao longo do fuste de *E. benthamii*. 40
Tabela 7. Valores médios de teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas nos compartimentos casca, madeira, galhos e folhas de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. Guarapuava – PR, 2014. 43
Tabela 8. Valores médios de poder calorífico superior (kcal kg-1) para galhos e folhas, madeira e casca de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. 46
Tabela 9. Custos de implantação e custos mensais com combustível, total e custo de produção de vapor para os três modelos de caldeiras analisadas. 49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - cinzas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

cm - centímetros

CO_2 - dióxido de carbono

DAP - diâmetro a altura do peito

DIC - delineamento inteiramente casualizado

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

F - carbono fixo

g - gramas

g cm^{-3} - grama por centímetro cúbico

GLP - gás liquefeito de petróleo;

ha - hectare

IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná

IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

Kcal kg^{-1} - quilocaloria por quilograma

Kg - quilogramas

Kg m^3 - quilograma por metro cúbico

kJ kg^{-1} - quilojoule por quilograma

m^2 - metros quadrados

m^3 - metros cúbicos

mg - miligramas

Mg ha^{-1} - Megagrama por hectare

mm - milímetros

NBR - Norma Brasileira da ABNT

PCI - poder calorífico inferior

PCS - poder calorífico superior

V - materiais voláteis

WIONZEK, Francielle Brandalise. **Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2014. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava-PR. 2014.

RESUMO

A queima de combustíveis fósseis tem gerado grandes problemas ambientais, dentre os quais se destaca o aquecimento global. A utilização de fontes renováveis de energia como a biomassa, deve ser cada vez mais difundida com intuito de minimizar esses impactos. O potencial energético da biomassa, sobretudo na forma de lenha, é avaliado a partir de suas propriedades físicas, químicas e energéticas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes espaçamentos nas propriedades energéticas e na produção de biomassa de *Eucalyptus benthamii*, aos seis anos de idade. O experimento foi conduzido no município de Guarapuava-PR, no delineamento em blocos ao acaso, com quatro tratamentos, que correspondem aos espaçamentos de plantio: 3 x 2m, 3 x 3m, 4 x 3m e 4 x 4m, em quatro repetições com 20 árvores cada. Foram obtidas pela equação de Sturges cinco classes diamétricas de maior frequência, totalizando uma amostragem de 60 árvores. Essas árvores foram cortadas e seus compartimentos madeira, casca, galhos e folhas pesados separadamente. As amostras de cada compartimento foram utilizadas para determinação da estimativa da biomassa seca, análise de poder calorífico, análise química imediata e densidade básica da madeira. Uma análise econômica também foi realizada para verificar a viabilidade de substituir o óleo BPF por biomassa como cavacos e lenha em toras. A biomassa seca total estimada por hectare foi maior no espaçamento 3 x 2m com 184,16 Mg ha^{-1}. Para a densidade básica, a média encontrada foi de 0,500 g cm^{-3} e não foi observada diferença entre os espaçamentos, contudo, houve diferença significativa nas diferentes alturas ao longo do fuste. Para o poder calorífico superior, a maior média encontrada foi para galhos e folhas com 4.731 kcal kg^{-1} e não houve diferença entre os espaçamentos. Para a análise química imediata, não houve diferença significativa entre os espaçamentos, mas os compartimentos avaliados apresentaram diferenças para o teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. A utilização da biomassa na forma de lenha em substituição ao óleo BPF e biomassa de cavaco foi considerada economicamente viável.

Palavras-chave: Energias renováveis. Florestas energéticas. Características físico-químicas. Bioenergia.

WIONZEK, Francielle Brandalise. **The influence of spacing in the energetic properties and biomass of *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2014. Dissertation (Master's degree in Bioenergy) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava, Paraná, Brazil. 2014.

ABSTRACT

The burning of fossil fuels has generated environmental problems of great impact, among them the global warming stands out. The usage of renewable sources of energy, such as the biomass, must be widely spread with the objective of minimizing these impacts. The energetic potential of biomass, mainly in the form of firewood, is evaluated for its physical, chemical and energetic properties. The aim of this study was to evaluate the influence of different spacings in the energetic properties and in the production of biomass of *Eucalyptus benthamii*, at the age of 6. The experiment was carried out in Guarapuava municipality, Paraná, in a randomized block design (DBA), with 4 treatments, which correspond to the planting spacing: 3 x 2m, 3 x 3m, 4 x 3m and 4 x 4m, being the treatment composed of 4 repetitions with 20 trees each. Five more frequent diametric classes were obtained through Sturges equation totaling 60 trees. These trees were cut and their compartments – wood, bark, branches and leaves were weighed separately. Samples for each compartment were utilized to estimate the dry biomass, energetic analysis of calorific value, immediate chemical analysis and basic density of the wood. An economic analysis was also carried out to verify the viability of substituting BPF oil by biomass such as wood chips and firewood in logs. The total dry biomass estimated by hectare was higher for spacing 3 x 2m with 184.16 Mg ha^{-1}. For the basic density, the average found was 0.500 g cm^{-3} and no difference among spacings was found. Nevertheless, there was significant difference in the different heights along the stem. For the gross calorific value, the highest average found was for branches and leaves with 4.731 kcal kg^{-1} and there was no significant difference between the spacings. For the immediate chemical analysis, there was no significant difference among the spacings, but the assessed compartments showed differences for the contents of volatile materials, fixed carbon and ashes. The usage of biomass as firewood, substituting the BPF oil and wood chips biomass, was economically viable.

Key words: Renewable energies. Energy forest. Physical-chemical characteristics. Bioenergy.

1. INTRODUÇÃO

O consumo mundial de combustíveis fósseis tem acarretado sérios problemas ambientais, principalmente, o aquecimento global, devido às emissões de gases do efeito estufa, os quais são gerados pela queima de combustíveis, como o petróleo, gás natural e carvão mineral. A utilização desses combustíveis deve ser minimizada com a substituição por fontes renováveis de energia, as quais são obtidas da natureza, de diversas maneiras e em grande quantidade, produzindo energia de maneira limpa e sustentável. Dentre as energias renováveis destacam-se a hidráulica, eólica, solar, maremotriz e biomassa. O uso dessas energias deve ser cada vez mais difundido e o conhecimento sobre as diferentes formas de se obter energia limpa, cada vez mais explorado.

No Brasil, a matriz energética é composta por combustíveis renováveis, sendo que a energia hidráulica é responsável por mais de 50% dessa matriz. O petróleo e seus derivados constituem uma pequena parcela da matriz energética brasileira. Outra fonte de energia renovável que tem se destacado no país é a energia de biomassa. A biomassa pode ser caracterizada por todo material vegetal e os resíduos gerados a partir da sua utilização podendo ser de origem florestal e de resíduos agrícolas, agroindustriais e urbanos.

A biomassa florestal corresponde a todo material orgânico encontrado em florestas e em resíduos de base florestal. Nas florestas, a biomassa pode ser obtida de diversos componentes das árvores: madeira, galhos, folhas, frutos e extrativos; já os resíduos de base florestal são caracterizados por serragem, refilo e casca. A partir desses resíduos pode-se obter também outras fontes de energia, como briquetes e pellets.

A principal fonte de energia de biomassa florestal e mais consumida pelo homem é a lenha. Seu uso pode ser feito diretamente para queima em caldeiras ou atividades domésticas como aquecimento e cocção de alimentos. Muitas empresas ainda utilizam derivados do petróleo, como o óleo de baixo ponto de fluidez (BPF), para queima em caldeiras, portanto, faz-se necessário estudos de viabilidade econômica, ambiental e social da substituição desses combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, como a biomassa.

A maioria da biomassa florestal é retirada de florestas plantadas ou energéticas. Os plantios florestais são aqueles implantados pelo homem, com finalidade de aproveitamento de produtos madeireiros e não madeireiros. Já as florestas energéticas são aquelas implantadas com o objetivo exclusivo de produção de energia. Nessas florestas, as espécies exóticas

arbóreas são as mais utilizadas, destacando-se as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que possuem crescimento rápido e elevada produtividade.

Para implantação de florestas com finalidade energética, as espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas em várias regiões do Brasil. A região Sul é considerada a mais fria do país, com invernos rigorosos, ocorrência de geadas e até mesmo neve, portanto, não são todas as espécies deste gênero que se adaptam a esse clima. Uma das espécies que vem se destacando em plantios nessa região é o *Eucalyptus benthamii*, o qual tolera a ocorrência de geadas e temperaturas negativas, sem causar danos no desenvolvimento da planta.

Para implantação dessas florestas é necessário a aplicação de técnicas silviculturais, dentre as quais, o espaçamento é o que tem maior influência no crescimento, produção e qualidade final do produto. Geralmente, para produção de energia, são utilizados espaçamentos menores, que produzem maior quantidade de biomassa por hectare.

Além das técnicas silviculturais, as propriedades da madeira devem ser conhecidas pelos produtores, a fim de proporcionar melhorias na qualidade do produto final desejado e uma melhor utilização da madeira, seja para produção de energia, fabricação de móveis, papel e celulose, estruturas para construção civil ou extração de óleos essenciais. Para o conhecimento da melhor espécie a ser utilizada com finalidade energética, além da densidade básica da madeira, é necessário analisar suas propriedades químicas, como o poder calorífico e teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Assim, é de suma importância avaliar as características físicas e químicas de cada espécie para poder indicar o seu melhor uso, favorecendo um melhor aproveitamento do recurso florestal.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o efeito de diferentes espaçamentos nas propriedades energéticas e na produção de biomassa da espécie *Eucalyptus benthamii.*

2.2 Específicos

1. Quantificar a biomassa dos compartimentos: madeira, casca, galhos e folhas de *Eucalyptus benthamii* em diferentes espaçamentos;
2. Determinar a variação da densidade básica da madeira em função do espaçamento;
3. Avaliar as características químicas da madeira, casca, galhos e folhas de *E. benthamii* quanto aos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas;
4. Determinar o poder calorífico superior (PCS) dos compartimentos: galhos e folhas, madeira e casca de acordo com a variação dos espaçamentos de plantio;
5. Analisar a viabilidade econômica com a substituição do óleo de baixo ponto de fluidez (BPF) em caldeiras, por biomassa de cavacos e lenha em toras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O gênero *Eucalyptus*

O Gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, sendo descrito, primeiramente, por L'Héritier em 1788. No ano de 1852, foi reconhecido seu grande potencial para fins industriais (ANDRADE, 1936). O gênero possui cerca de 700 espécies, as quais são adaptadas a diversas condições de clima e solo. As espécies são nativas da Oceania, quase todas originárias da Austrália, existindo apenas um pequeno número de espécies na Nova Guiné e Indonésia, e outra espécie no Sul das Filipinas (ARANTES, 2009). O eucalipto se desenvolveu bem nos climas europeus, tanto em terras férteis, como em solos arenosos, alcalinos e alagadiços. Foi cultivado, primeiramente, para fins ornamentais e por suas propriedades medicinais (LEÃO, 2000).

A disseminação de sementes de eucalipto no mundo começou no início do século XIX. Na América do Sul, o primeiro país a introduzir a espécie foi o Chile, em 1823, e próximo a 1850, países como Portugal, Espanha e Índia começaram a explorar espécies de eucalipto (MORA e GARCIA, 2000).

Na Índia, os primeiros plantios ocorreram em 1843. Na Europa, os primeiros ensaios aconteceram em 1854, utilizando principalmente o *Eucalyptus globulus*, plantados em Portugal. Em 1863, foi introduzido na Espanha e, em 1869, na Itália (MARTINI, 2004).

No Brasil, há registros de que as primeiras introduções de eucalipto ocorreram no ano de 1868, no estado do Rio Grande do Sul (LIMA, 1993). A disseminação do gênero em larga escala foi devida ao trabalho do pioneiro Edmundo Navarro de Andrade, em 1904. Inicialmente, o propósito dos plantios era a produção de dormentes, postes e lenha para as locomotivas das estradas de ferro paulistas. No entanto, a madeira possui diversos usos, podendo ser utilizada como recurso para energia na forma de lenha e carvão vegetal, escoras para construção civil, chapas de fibra, celulose e papel, e até mesmo para a fabricação de móveis finos e como produto não madeireiro, é possível a extração de óleos essenciais, plantio para quebra ventos, entre outros (WILCKEN et al., 2008).

Devido às características de crescimento rápido, elevada produtividade em povoamentos homogêneos e por serem pouco exigentes quanto às condições de plantio, o gênero tornou-se uma importante alternativa para a recuperação de áreas degradadas, estabilização de dunas, controle de erosão, formação de quebra ventos e equilíbrio

hidrológico. Sua produtividade também contribui para suprir a demanda crescente de madeiras, favorecendo a preservação de florestas nativas (MARCHORI e SOBRAL, 1997).

A Companhia Paulista de estradas de ferro foi a primeira empresa a plantar eucalipto para fins comerciais e em grande escala (MARTINI, 2004). Essas plantações paulistas serviram de exemplo para outros estados brasileiros como, Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Dentre as primeiras espécies bem sucedidas plantadas no Brasil estão: *E. saligna, E. botryoides*, *E. viminalis*, *E. robusta*, *E. alba*, *E. grandis*, *E. paniculata*, *E. camaldulensis*, *E. triantha* e *E. punetata.* O crescimento do uso dessas espécies foi devido à utilização da biomassa como lenha e carvão vegetal e para fabricação de papel e celulose *(*FOELKEL, 2005).

Na região Sul do Brasil, devido às suas condições climáticas, poucas são as espécies de eucalipto que se adaptam e que são economicamente importantes: *E. viminalis*, *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *E. badjensis,* e ainda, *Corymbia citriodora* (antiga denominação para *E. citriodora*), além das espécies que possuem boa aptidão para produção de madeira para fins energéticos ou sólidos madeiráveis: *E. dunni*, *E. benthamii*, *E. saligna* e *E. grandis* (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

Atualmente, o Brasil se destaca na produção de eucalipto e segundo a ABRAF (2013), a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* totaliza em 6.664.812 hectares, sendo 76,6% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 23,4% aos plantios de *Pinus*.

Em 2012, de toda a madeira produzida em florestas plantadas no Brasil, 35,2% foi destinada a produção de celulose, 7,1% para a produção de painéis de madeira industrializada, 16,4% para serrados e 2,7% para compensados. O restante, 38,7%, foi destinado a produção de lenha, carvão vegetal e outros produtos florestais (ABRAF, 2013).

3.1.1. Principais espécies de Eucalyptus utilizadas no Brasil

O gênero *Eucalyptus* compreende uma grande diversidade de espécies, com características físico-mecânicas e estéticas diferenciadas. Portanto, para produzir uma madeira de boa qualidade é necessário identificar as características de cada espécie e associar a finalidade desejada (PEREIRA et al., 2000). As principais finalidades de cada espécie podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais usos do eucalipto e espécies recomendadas no Brasil.

Usos	Espécies Mais Recomendadas
Papel e celulose	*E. grandis, E. globulus, E. urophylla e híbridos "urograndis" (E. urophylla x E. grandis)*
Chapas de fibra	*E. grandis, E. urophylla, híbridos "urograndis"*
Móveis	*E. saligna, E. urophylla, E. grandis, E. dunnii, híbridos "urograndis", E. pilularis*
Postes, dormentes, mourões	*C. citriodora, E. cloeziana, E. urophylla, E. camaldulensis, E. paniculata, E. benthamii*
Energia (carvão, lenha)	*E. cleozina, E. camaldulensis, E. urophylla, E. grandis, C. citriodora, E. tereticornis, E. benthamii*
Estruturas construção civil	*C. citriodora, E. cloeziana, E. urophylla, E. paniculata, E. pilularis*
Óleos essenciais	*C. citriodora, E. staigeriana, E. camaldulensis, E. globulus*

Fonte: WILCKEN et al. (2008). Adaptado.

Por apresentar essa diversidade de espécies e a flexibilidade em seus usos, a seleção de espécies deve ser de acordo com as condições do clima e solo do local escolhido pelo produtor (MORA e GARCIA, 2000). A maioria das espécies do gênero permitem um ciclo de corte curto e uma elevada produtividade, assim, apresentam grande importância do ponto de vista econômico e silvicultural (SILVA et al., 1983).

Além desses aspectos, deve-se considerar a finalidade principal da matéria-prima a ser produzida, o mercado consumidor, a espécie e demais aspectos correlacionados, como o grau de melhoramento genético (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

O *Eucalyptus spp.* tem se tornado uma das melhores opções para a produção de energia devido à sua adaptação em regiões edafoclimáticas e por sua madeira possuir características químicas e físicas, como a densidade e o poder calorífico, que contribuem para a sua utilização energética (CORTEZ et al., 2008).

Conhecendo as características de cada espécie, é necessário aplicar técnicas de plantio e manejo para produção do eucalipto, que são conhecidas e difundidas mundialmente, dentre

as quais destacam-se a produção e a qualidade da muda, preparo do solo, fertilização, espaçamento e tratos silviculturais (VIEIRA, 2011).

3.1.2. Efeito do espaçamento

Uma das principais decisões silviculturais no planejamento da produção florestal está na escolha do espaçamento de plantio, que está diretamente relacionado com questões silviculturais, tecnológicas e econômicas. O espaçamento afeta as práticas de manejo florestal, as taxas de crescimento das plantas, qualidade da madeira, idade de corte e também os custos de produção (KRONKA et al., 2005; BALLONI e SIMÕES, 1980).

Para a escolha do espaçamento ideal, é necessário considerar a qualidade e o volume da madeira que será produzida, o local de plantio, características da espécie, objetivo do produto final e o tipo de equipamento a ser empregado na implantação e colheita (COUTO, 1977).

A escolha do espaçamento tem como objetivo proporcionar para cada árvore espaço suficiente para se obter o máximo crescimento e com a melhor qualidade. Os espaçamentos mais amplos proporcionam maior crescimento em diâmetro das árvores do que espaçamentos menores (CHIES, 2005), além disso, nestes são encontrados maiores volumes individuais e facilidade de mecanização das atividades e tratos silviculturais (BERGER, 2000).

Os espaçamentos mais reduzidos, em termos de produção total por hectare, apresentam maior área basal, maior volume e biomassa, árvores com melhor forma em função de apresentar poucos galhos, porém, diâmetros reduzidos (BERGER et al., 2002; FISHWICK, 1976).

A diferença entre espaçamentos foi observada por Santos (2011), que ao avaliar a produção de *E. grandis* e *E. urophylla*, aos 72 meses, constatou que espaçamentos mais amplos produzem árvores com maiores diâmetros e volumes individuais, já espaçamentos menores produzem maior volume por hectare, em função do maior número de indivíduos.

3.2. Espécie: *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage

Esta espécie foi classificada por Pryor & Johnson, em 1971, na série Viminales, subsérie Viminalinae. É botanicamente similar às espécies *E. dorrigoensis* e *E. kartzoffiana*. Até pouco tempo, *E. dorrigoensis* era considerada como subespécie de *E. benthamii*, no

entanto, as duas espécies apresentam diferenças acentuadas na estrutura externa do opérculo (HIGA e PEREIRA, 2003).

Ainda de acordo com os autores Higa e Pereira (2003), o *Eucalyptus benthamii* é de ocorrência natural na Austrália, encontrado apenas em áreas limitadas a oeste da cidade de Sydney, em planícies ao longo do Rio Nepean. Originalmente, a espécie ocorria em solos férteis, com latitude aproximada de 34°S e altitudes inferiores a 100m, onde a temperatura média máxima é 26°C e a temperatura média mínima é 4°C, com ocorrência de geadas leves e precipitação média anual de 1100mm. Entretanto, a maior parte da população original foi cortada para a formação de pastagens ou foi inundada com a construção da represa de Warragamba.

Em 1988, a EMBRAPA Florestas importou para o Brasil sementes da espécie de *E. benthamii*, que correspondem a 10 matrizes de procedência Wentworth Falls, NSW, Austrália. Realizou-se plantios em regiões com ocorrência de geada nos três estados da região Sul e os resultados indicaram que a espécie é tolerante a geadas e que temperaturas negativas não causam efeitos negativos na fase inicial de desenvolvimento da planta. A espécie também apresentou um bom crescimento, atingindo um incremento médio anual de 45 m^3 (ALVES, 2010; GRAÇA et al., 1999).

O *E. benthamii* é indicado para plantios em regiões com temperaturas mínimas de até -10ºC, e suporta até 25 geadas anuais, diferentemente do *E. saligna*, que suporta apenas oito geadas anuais. Em plantios realizados com a espécie nos municípios de Colombo e Guarapuava, no estado do Paraná, foi comprovada a tolerância a geadas e o crescimento médio foi superior ao *E. dunni* (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

No município de Colombo, no Paraná, uma primeira avaliação demonstrou que a espécie cresceu, em oito anos, 2,3 metros em altura e 2,7 centímetros em diâmetro ao ano. A densidade básica da madeira aos sete anos de idade foi próxima a 477 kg m^{-3} e o volume comercial com casca foi de aproximadamente 0,285 m^3 (PEREIRA et al., 2000).

Em avaliações iniciais realizadas aos 24 e 36 meses com *E. benthamii*, no município de Guarapuava, a espécie demonstrou diferença no incremento diamétrico em função de diferentes espaçamentos. O espaçamento 4 x 4m apresentou um crescimento superior em diâmetro, com 3,43 cm ano^{-1}, seguido dos espaçamentos 4 x 3m, com 3,24 cm ano^{-1} e 3 x 2m, com 2,85 cm ano^{-1} (BENIN et al., 2012).

Com relação ao volume médio individual e por hectare, Benin (2014), avaliou o *E. benthamii*, aos seis anos de idade, no município de Guarapuava, área experimental do Campus Cedeteg e observou diferença entre espaçamentos. O maior espaçamento, equivalente a 4 x 4m, obteve a maior média de volume individual, com 0,386 m^3 por árvore, já para o volume por hectare, o menor espaçamento, correspondente a 3 x 2m, obteve o maior volume com 392,08 m^3.

O *E. benthamii* é uma boa alternativa para regiões frias, pois apresenta tolerância a geadas, crescimento rápido e ainda, é considerada uma espécie de interesse para os melhoristas, por apresentar vantagens em relação a outras espécies como o *E. viminalis*, que embora também seja tolerante a geadas, apresenta baixa taxa de crescimento (BACCARIN, 2012).

A espécie é adequada para a produção de lenha, carvão, estacas, postes e mourões. Só não é recomendada para uso em serrarias, pois a madeira apresenta rachaduras internas e de topo nas toras e tábuas, além de empenamentos (HIGA et al., 2000; HIGA e PEREIRA, 2003).

3.3. Biomassa para fins energéticos

A biomassa da madeira, principalmente na forma de lenha, foi a primeira fonte energética empregada pelo homem, pois servia para o cozimento de alimentos e para o seu próprio aquecimento. Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007).

Em muitos países, a principal fonte de energia ainda é a biomassa, sobretudo como lenha. Aproximadamente a metade da população da Terra depende da biomassa para o cozimento de alimentos, aquecimento e iluminação, mostrando que o uso tradicional passou recentemente a ser considerado também como uma forma moderna e limpa de fornecimento energético (NOGUEIRA e LORA, 2003). O uso da biomassa também promove a geração de empregos no campo e renda adicional (CORTEZ et al., 2008).

Os combustíveis derivados da biomassa, também chamados de biocombustíveis, são oriundos da biomassa florestal, resíduos agrícolas, agroindustriais e urbanos. A biomassa agrícola é caracterizada por combustíveis produzidos a partir de plantações energéticas, como álcool da cana-de-açúcar e seus resíduos. Já os resíduos agroindustriais são compostos por

casca de arroz, palha de milho e subprodutos animais, entre outros (CORTEZ et al., 2008; BRAND, 2010).

Ainda de acordo com Brand (2010), a biomassa florestal é constituída por diferentes componentes da árvore como, a madeira ou lenha, galhos, folhas, raízes, frutos e extrativos; por resíduos de base florestal: casca, serragem, refilos, além dos produtos obtidos a partir desses resíduos como briquetes e pellets. Essa biomassa poder ser derivada de florestas nativas ou plantadas. Nos sistemas nativos, a biomassa é substituída por culturas agrícolas ou florestais, tornando-se um sistema não sustentável, a qual não será reconstituída em sua forma original. Já a biomassa oriunda de florestas plantadas tem como base o plantio de espécies geralmente exóticas, com uso exclusivo para geração de energia.

A energia de biomassa pode ser classificada em energia primária, existente no seu estado natural, como nos resíduos sólidos ou na madeira, ou em energia secundária, como no carvão vegetal ou na eletricidade (VIDAL e HORA, 2011).

A utilização da biomassa como fonte de energia limpa possui vantagens ambientais, sociais e econômicas. A biomassa se for utilizada de maneira sustentável, gera menos gases causadores do efeito estufa do que combustíveis fósseis, reduz a quantidade de resíduos agrícolas, agroindustriais, florestais e sólidos urbanos, diminuindo a dependência por combustíveis não renováveis. Essa energia também cria milhares de empregos e ajuda a revitalizar comunidades rurais (DERMIBAS, 2001).

Como a biomassa, em sua maioria, é originária de florestas plantadas ou energéticas, a implantação destas preserva florestas nativas, melhoram a qualidade dos recursos hídricos e promovem a manutenção da fertilidade do solo, além de contribuir com o balanço neutro de emissões e fixação de gases poluentes, como o dióxido de carbono (BRAND, 2010; GARLIPP e FOELKEL, 2009).

Com base no contexto de fixação de carbono em florestas plantadas, o carbono estocado no eucalipto, se distribui por todas as partes: a parte aérea representa 67,06% do carbono estocado, as raízes apresentam em média, 20,68% e a manta orgânica 12,26% (VILLELA et al., 2012). Quantificando o estoque de carbono de *E. grandis*, aos 72 meses, Paixão et al. (2006) constataram que a madeira sem casca é o compartimento que melhor contribui com o estoque de carbono, atingindo uma média de 81,84%; os demais compartimentos casca, galhos e folhas apresentaram médias de 8,05%, 7,74% e 2,57%, respectivamente.

Como vantagens sociais, a utilização de biomassa advinda de florestas plantadas pode proporcionar uma melhoria na qualidade de vida de pequenos produtores, pois oferece geração de emprego e a inserção destes produtores no ramo florestal, além disso, os produtores podem consumir e vender os produtos produzidos por essas florestas, tanto os madeiráveis como os não madeiráveis.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2013), o Brasil apresenta uma matriz de geração de energia elétrica predominantemente renovável, incluindo as importações que também são de origem renovável. Pode-se afirmar que 85% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis (Figura 1). A biomassa, considerando a lenha e bagaço de cana, corresponde a 6,8% de toda essa energia produzida no país. A biomassa de base florestal representa 15,8% da energia elétrica gerada a partir de biomassa, enquanto outras biomassas como o biogás, a casca de arroz, o capim elefante e o óleo de palma, representam apenas 1,8% (ABRAF, 2013).

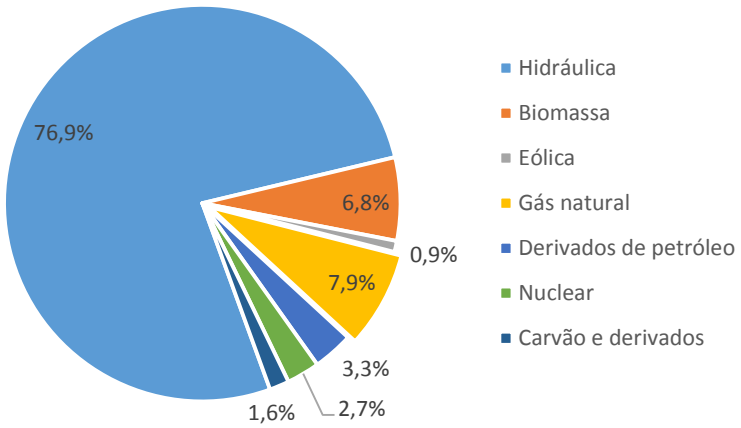

Figura 1. Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2012. Fonte: EPE (2013). Adaptado.

Dentre os métodos possíveis para obtenção de energia a partir da biomassa, os processos são classificados em combustão, pirólise ou carbonização, gaseificação e hidrólise (BRAND, 2010). A combustão direta é a maneira mais antiga e a mais utilizada até hoje, sendo responsável por mais de 97% de toda energia produzida no mundo (DERMIBAS et al., 2009).

O processo de combustão aplica-se para a madeira e para diversos resíduos agroindustriais como bagaço de cana e casca de arroz. Este processo ocorre em seis etapas consecutivas: secagem, emissão dos voláteis, ignição dos voláteis, queima dos voláteis em chama, extinção da chama dos voláteis e combustão do carbono ou coque (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.4. Florestas Plantadas ou artificiais

As florestas plantadas ou artificiais são aquelas produzidas por intervenção humana e, na grande maioria, são formadas por uma única espécie, que têm como objetivo a produção de produtos madeireiros e não madeireiros, embora existam florestas plantadas com fins de recuperação de áreas degradadas. Essas florestas são plantadas em grande escala por empresas que irão utilizar os produtos gerados ou até mesmo por pequenos produtores, para consumo próprio e venda da madeira. As florestas plantadas podem suprir a demanda de produtos derivados da madeira, bem como a utilização das mesmas como fonte de energia, favorecendo assim, a diminuição do corte das florestas nativas. As principais espécies utilizadas para esse fim são as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (PUENTES, 2010).

As florestas plantadas são introduzidas com o mesmo espaçamento de plantio, mesma idade e, geralmente, mesma espécie. Sua principal característica é a versatilidade em termos de tratos culturais, além de proporcionar benefícios ambientais, sociais e econômicos (GARLIPP e FOELKEL, 2009).

O setor de florestas plantadas é importante para a economia brasileira e para a sociedade em geral, pois contribui para a geração de empregos, produtos, tributos e bem estar, além de atuar diretamente na conservação e preservação dos recursos naturais (ABRAF, 2012).

Além das espécies exóticas dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, outra espécie importante para a produção de biomassa energética é a *Acacia measrnsii*, principalmente cultivada, na região Sul do Brasil e produz lenha e carvão vegetal de excelente qualidade. Sua madeira é densa, com valores entre 0,7 e 0,85 g cm^{-3} e o poder calorífico varia entre 3.500 a 4.000 kcal kg^{-1}. O incremento médio anual varia de 13,3 a 20,0 m^3 ha^{-1} ano, podendo alcançar valores ainda maiores dependendo da qualidade do sítio (CORTEZ et al., 2008).

A produtividade em florestas plantadas é diretamente influenciada pelas características de cada espécie, por condições edafoclimáticas de diversas regiões e pela densidade do plantio, determinada pelo número de árvores por hectare (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Em 2012, segundo a ABRAF (2013), a área de florestas plantadas com *Eucalyptus* no Brasil, totalizou 5.102.030 hectares, 70,8% do total, apresentando um crescimento de 4,5%, quando comparado ao ano de 2011. Já a área de florestas com plantios de *Pinus* totalizou 1.562.782 hectares, 22,0% do total, valor 5,1% inferior ao registrado em 2011. A área com plantios florestais de espécies não convencionais, como acácia, araucária, pópulus, teca, seringueira e paricá foi de 521.131 hectares, representando 7,2% do total de plantios florestais (Figura 2).

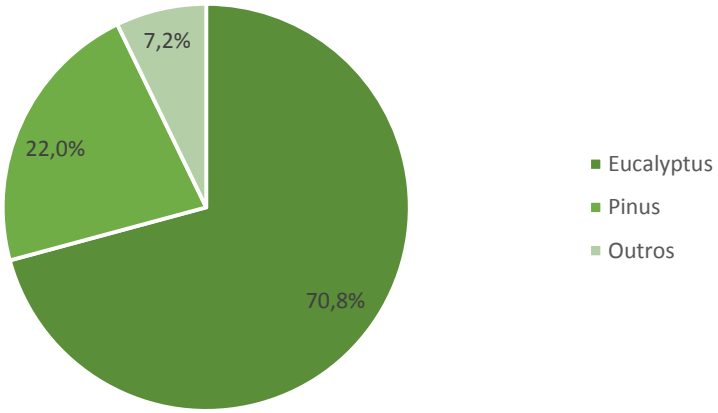

Figura 2. Distribuição em % de plantios florestais com *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies não convencionais no Brasil em 2012. Fonte: ABRAF (2013). Adaptado.

De toda a madeira produzida de florestas plantadas no Brasil, 35,2% é para a produção de celulose, 7,1% para painéis de madeira industrializada, 16,4% para serrados e 2,7% para compensados. O restante, correspondente a 38,7%, é destinado à produção de carvão vegetal, lenha e outros produtos florestais (ABRAF, 2013).

3.5. Florestas Energéticas

O conceito de florestas energéticas é usado para definir as plantações florestais com grande número de árvores por hectare e de curta rotação, que produzem o maior volume de biomassa por área, em menor espaço de tempo. O ciclo de corte nessas florestas varia entre dois e quatro anos de idade e os espaçamentos utilizados são geralmente inferiores a 2 x 2m, alcançando mais de 2.500 árvores por hectare (NOGUEIRA e LORA, 2003; CORTEZ et al., 2008).

Devido à grande representatividade que o setor de florestas energéticas tem em relação às áreas plantadas, alternativas e métodos silviculturais estão sendo testados e adaptados para a produção de madeira. Através das técnicas de manejo é possível alcançar uma elevada produção de biomassa em menor escala de tempo (MACHADO et al., 2012).

O plantio de florestas energéticas é comum no Brasil, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul, que juntos somam 87,1% da área total com plantios florestais (Figura 3). Essa maior concentração nas regiões Sul e Sudeste do país, que chega a 72,3%, é devido à localização das principais unidades industriais dos setores de celulose e papel, painéis de madeira industrializada, siderurgia a carvão vegetal e madeira mecanicamente processada (ABRAF, 2013).

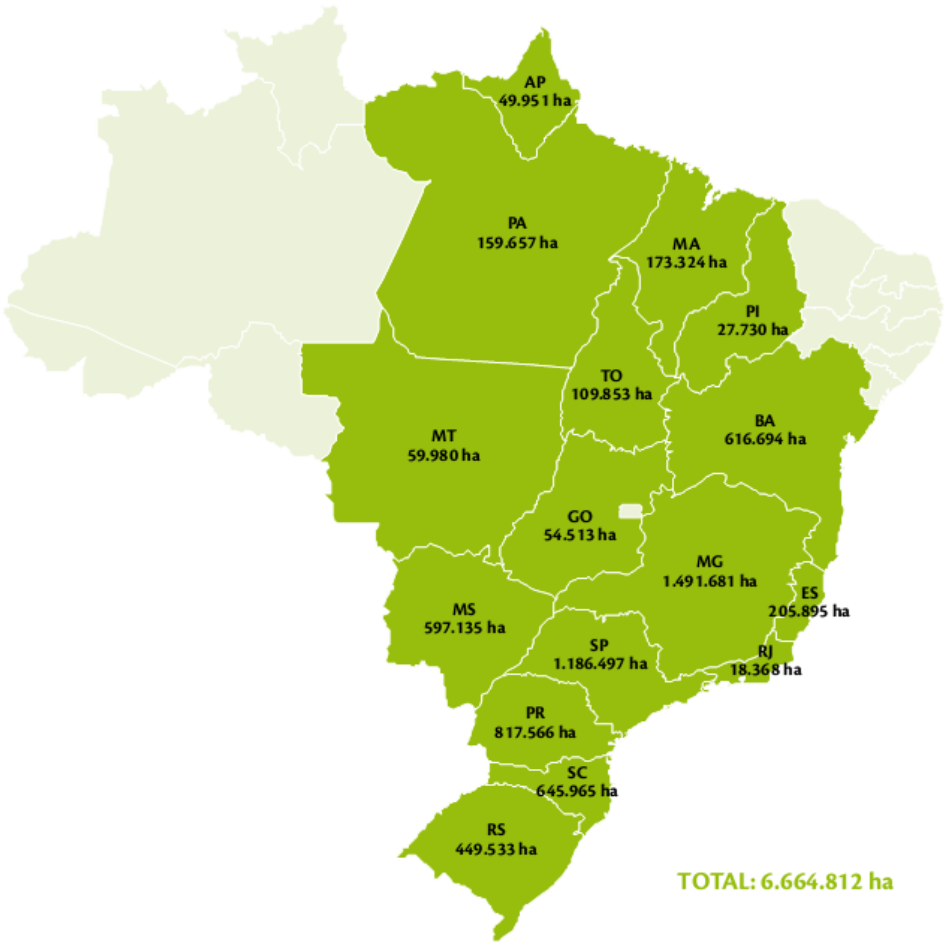

Figura 3. Área e distribuição de plantios florestais com *Eucalyptus* e *Pinus* nos Estados do Brasil, no ano de 2012 (ABRAF, 2013).

As espécies mais usadas em plantios energéticos são as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que apresentam elevada produtividade, curta rotação e características energéticas (CORTEZ et al., 2008). Além do rápido crescimento, a espécie deve apresentar uma alta densidade da madeira, pois esta característica está diretamente relacionada ao poder calorífico volumétrico, que relaciona a quantidade de energia por unidade de volume (BRAND, 2010).

São recomendados também menores espaçamentos de plantio, pois estes possuem a maior quantidade de indivíduos por hectare que, consequentemente, aumentam a produção volumétrica e de biomassa para fins energéticos. Essa influência do espaçamento na produção volumétrica e na biomassa foi comprovada em estudos desenvolvidos por Machado et al. (2012) e Müller et al. (2005).

3.6. Propriedades físicas da madeira

3.6.1. Densidade básica

Entre as propriedades físicas da madeira, a que mais se destaca é a densidade básica ou massa específica, pois é de fundamental importância para a produção tecnológica e utilização correta da madeira (GONÇALVES et al., 2009). A densidade é calculada por meio da Equação 1, que é a relação entre a massa seca da madeira e o volume saturado (SHIMOYAMA e BARRICHELO, 1989), sendo expressa em gramas por centímetro cúbico. Essa variável pode ser alterada em função das características da própria espécie ou de variações ambientais (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2000).

$$Db = \frac{massa\ seca}{volume\ saturado} \qquad \text{(Equação 1)}$$

em que: Db: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); massa seca (g): determinada por meio da pesagem do corpo de prova após secagem em estufa; volume saturado (cm^3): determinado pelas dimensões do corpo de prova após imersão em água durante 30 dias.

A densidade é de fácil determinação e está diretamente correlacionada com outras propriedades da madeira (BATISTA et al., 2010). Os valores encontrados na literatura para densidade variam de 200 até valores acima de 1.000 kg m^{-3}. Quando se trata de biomassa, a densidade expressa a quantidade de massa da madeira, desconsiderando a influência da umidade (BRAND, 2010).

A determinação da densidade da madeira, principalmente a sua variação dentro da árvore, é fundamental para conhecer sua qualidade. Madeiras mais homogêneas tendem a se comportar melhor nas operações de processamento e refletir maior uniformidade nas propriedades tecnológicas (OLIVEIRA et al., 2005).

Para fins energéticos, o uso de madeiras com altas densidades apresenta algumas vantagens, como: menor área de estocagem e manuseio da madeira, maior rendimento energético no transporte e maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira (PEREIRA et al., 2000). Ainda, os valores obtidos em plantios florestais para densidade e volume, são utilizados em equações para estimativa de biomassa (FEARNSIDE, 1997).

3.7. Propriedades químicas e energéticas da madeira

3.7.1. Teor de materiais voláteis (MV)

Durante a queima da madeira, conforme o aumento da temperatura, vapores e outros gases são liberados no processo de combustão. Uma parte desses gases é combustível e corresponde à queima na fração gasosa e são chamados materiais voláteis que emitem energia na forma de luz e calor, gerando as chamas (CINTRA, 2009).

As características de queima de um combustível são influenciadas pela proporção entre os materiais voláteis e o carbono fixo. Os materiais voláteis, quando aquecidos, são desprendidos da madeira e queimam-se rapidamente na forma gasosa, já o carbono fixo queima-se lentamente na fase sólida (BRITO e BARRICHELO, 1978).

O teor de materiais voláteis expressa a facilidade de queima de um material (BRAND, 2010; NOGUEIRA e LORA, 2003), além de ter um papel importante durante as etapas iniciais de combustão e ignição da biomassa (CORTEZ et al, 2008). De um modo geral, madeiras com elevados teores de materiais voláteis queimam mais rapidamente (PEREIRA et al, 2000).

3.7.2. Teor de carbono fixo (CF) ou coque

Durante a queima de uma amostra de combustível, o primeiro material que se evapora são os materiais voláteis. A fração de carbono que permanece na amostra logo após este aquecimento é chamada de carbono fixo ou coque (BRAND, 2010; NOGUEIRA e LORA, 2003). O rendimento em carbono fixo apresenta relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e massa específica da madeira, e relação inversamente proporcional ao teor de holocelulose (BARCELLOS, 2007).

O porcentual de carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido. Combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo são preferíveis, porque queimam mais lentamente. O seu teor é de grande importância para a redução de óxidos de ferro, em altos-fornos de siderurgias (PEREIRA et al, 2000).

3.7.3. Teor de cinzas (A)

As cinzas são compostas por todo o material que não queima, tornando-se o resíduo do processo de combustão (BRAND, 2010) e correspondem aos minerais presentes na madeira e, do ponto de vista energético, esses minerais quando queimados formam incrustações nos equipamentos e tubulações de caldeiras ou fornalhas, portanto, é recomendado que a madeira possua um baixo teor de minerais para que não venha a causar problemas nesses equipamentos (BARCELLOS et al., 2005).

Na maioria das espécies, as folhas e a casca apresentam maior teor de cinzas do que os outros compartimentos da árvore: as folhas, porque transformam os nutrientes em componentes vegetais por meio da fotossíntese e a casca, por apresentar maior quantidade de materiais inorgânicos (BRAND, 2010).

Os teores de cinzas variam de 0,5% a mais de 5%, dependendo da espécie, idade e local do plantio (PEREIRA et al., 2000, BRAND, 2010). Quanto maior a proporção de minerais na madeira, maior a produção de cinzas, portanto, é preciso adubar corretamente o solo para que os níveis de minerais na madeira sejam aceitáveis, principalmente os de enxofre e fósforo (BARCELLOS et al., 2005).

O processo de combustão da biomassa gera uma quantidade relativamente baixa de cinzas, diferentemente de valores encontrados para a queima de outros materiais, como por exemplo, o carvão mineral (CAPOTE, 2012).

3.7.4. Teor de umidade

A umidade pode ser definida como a quantidade de água disponível na biomassa e é calculada pela diferença entre os pesos da amostra antes e depois do processo de secagem, conforme Equação 2 (NOGUEIRA e LORA, 2003; CAPOTE, 2012).

$$TU = \frac{Pu - Ps}{Pu} x100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

em que: TU: teor de umidade (%); Pu: peso úmido (g); Ps: peso seco (g).

O teor de umidade é o fator de maior variação e efeito em todos os aspectos da madeira como combustível. Os valores encontrados variam entre 45 e 55% de umidade na maioria de suas aplicações, sendo considerado em projetos de caldeiras um teor de umidade de 50% (ROCHA e KLITZKE, 1998).

A umidade é uma das variáveis mais importantes para a determinação do potencial energético da biomassa, pois influencia diretamente no poder calorífico: quanto maior o teor de umidade, menor é o poder calorífico dos combustíveis. Também dificulta a queima do combustível, principalmente na primeira etapa da combustão, onde ocorre a evaporação e eliminação de toda água presente no combustível. Se o teor de umidade for elevado, este processo requer um longo tempo, o que gasta uma quantidade significativa de energia. Além de diminuir o poder calorífico, ocorre aumento do consumo e do volume dos combustíveis (BRAND, 2010). Quando a madeira úmida é queimada, esta proporciona menos energia devido ao consumo no aquecimento e vaporização da água. Para uma boa combustão, a madeira deve ser utilizada com umidade abaixo de 25% (PEREIRA et al, 2000).

3.7.5. Poder calorífico

O poder calorífico é quantidade de calor liberado durante a combustão de uma unidade de massa, que pode ser expresso em kcal kg^{-1} ou kJ kg^{-1}. O poder calorífico inferior (PCI) não considera a quantidade de energia necessária para evaporação da umidade contida em materiais no processo de combustão, ao contrário do poder calorífico superior (PCS) (CORTEZ et al, 2008; BRAND, 2010).

De uma outra maneira, Brand (2010), refere-se ao PCI como o calor possível de ser usado nos combustíveis e o PCS, resultado de avaliação em laboratório, o qual é de 10 a 20% mais elevado que o PCI.

O PCS pode ser definido também como o total de calor liberado na combustão. Já o PCI corresponde a quantidade de calor útil liberado na queima do combustível, descontando o calor necessário para vaporizar a água e a umidade proveniente da combustão do hidrogênio. Fatores como a composição química da madeira, tipo da biomassa, teor de umidade e de cinzas, podem influenciar diretamente o poder calorífico dos combustíveis (CALEGARI et al., 2005). Juntamente com o potencial de produção da biomassa, o poder calorífico superior

está entre as variáveis mais utilizadas e estudadas para determinar a qualidade da madeira para fins energéticos (SILVA et al., 2012).

3.8. O uso de biomassa em caldeiras

Com intuito de diminuir os impactos ambientais causados pelos combustíveis de origem fóssil e atender à demanda de energia calorífica das indústrias, os combustíveis utilizados nas caldeiras têm sido substituídos por fontes alternativas de energia, como o álcool, a lenha e o cavaco (ROCHA et al., 2009), que possuem características menos poluidoras, principalmente, por possuir baixos teores de enxofre em sua composição (BALBINOT et al., 2010).

De acordo com Francisco (2012), as caldeiras são utilizadas em diversos setores industriais e podem ser abastecidas com combustíveis sólidos, líquidos e gasosos para produção de vapor, o qual pode ser aproveitado de diferentes maneiras dentro da indústria. As caldeiras são projetadas para queimar diversos combustíveis, a fim de aproveitá-los com maior benefício econômico.

As caldeiras ou geradores de vapor são classificadas em dois tipos: as flamotubulares e aquatubulares. Nas caldeiras flamotubulares, para produção de vapor, os gases da combustão circulam no interior de tubos que atravessam o reservatório de água a ser aquecida. Esse tipo de caldeira, geralmente é de pequeno porte e seus principais campos de aplicação são as pequenas e médias agroindústrias. Já nas caldeiras aquatubulares, a água a ser vaporizada circula pelo interior dos tubos, que recebem calor externamente dos gases resultantes da combustão (NOGUEIRA e LORA, 2003; NASCIMENTO, 2007).

Dentre as opções de combustíveis para a queima em caldeiras, Nascimento (2007), destaca o gás liquefeito de petróleo - GLP, gás natural, biomassa e óleos pesados como o de baixo ponto de fluidez (BPF). As três formas mais utilizadas de biomassa em caldeiras são a lenha, o cavaco e o briquete (ARRUDA, 2009).

Geralmente, as caldeiras são projetadas prevendo a possibilidade da queima de diferentes tipos de biomassa e há modelos que incluem a lenha, o bagaço e variados resíduos agrícolas, como também podem ser encontrados projetos de caldeiras específicos para a queima de lenha ou cavaco (CORTEZ et al., 2008).

Como cada caldeira é projetada para queima de combustíveis específicos, para garantir que a substituição de caldeiras a óleo BPF por caldeiras a biomassa de cavacos e lenha em toras seja viável para empresas, é necessário realizar uma análise de viabilidade econômica. De acordo com Zago et al. (2009), a análise de viabilidade econômica busca identificar quais são os benefícios esperados de investimentos para compará-los com investimentos e custos associados ao mesmo, a fim de verificar a sua viabilidade de implantação.

A avaliação econômica de um investimento consiste na determinação de todas as suas vantagens e desvantagens, na comparação e escolha da melhor alternativa (FERREIRA, 2001). Essas análises são importantes para as empresas, pois auxiliam na tomada de decisões quanto ao melhor investimento a ser implantado (GUIMARÃES NETO et al., 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido no Campus Universitário Cedeteg da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, município de Guarapuava, terceiro planalto paranaense, Centro Sul do Estado do Paraná, entre as coordenadas 450030 E, 7192169 N; e 450199 E, 7192253 N, com altitude de 1.120 metros (Figura 4).

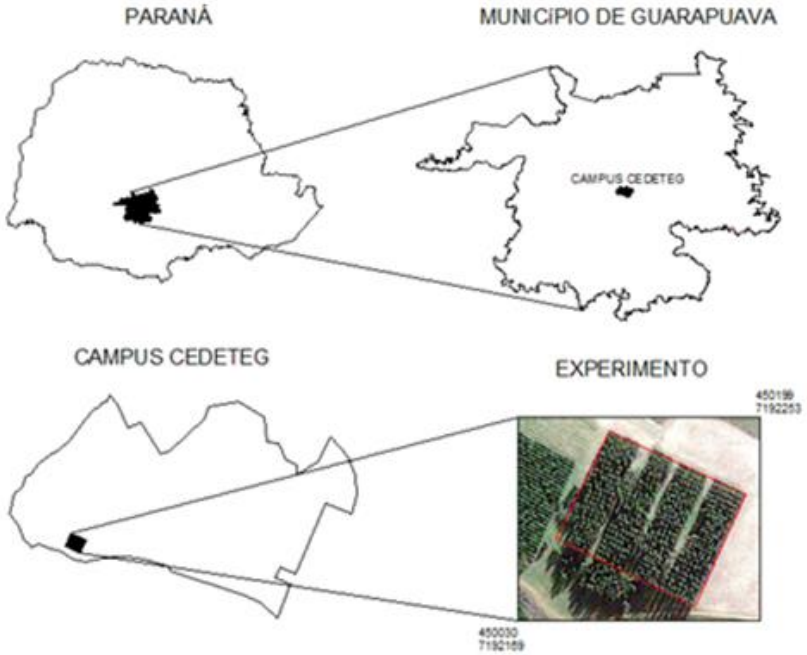

Figura 4. Mapa de Localização do Município de Guarapuava-PR e da área experimental no campus Cedeteg, UNICENTRO.

O clima da região, de acordo com a classificação de *Köppen*, é Cfb, subtropical úmido mesotérmico, com verões frescos e sem estação seca definida, temperatura média anual de 17 a 18ºC e com precipitação média anual de 1.800 a 2.000mm (IAPAR, 2014). A ocorrência de geadas é frequente nessa região, principalmente nos meses de inverno, podendo ocorrer também no fim do outono. A ocorrência média anual de geadas em Guarapuava é de 13 a 15 eventos (THOMAZ e VESTENA, 2003).

Os solos observados na região de Guarapuava-PR, de acordo com o mapa simplificado de solos do estado do Paraná, são principalmente os latossolos, cambissolos e afloramentos

rochosos e neossolos litólicos (EMBRAPA, 2012). O solo do local do experimento é caracterizado como Latossolo Bruno distrófico típico.

A vegetação predominante do município é de campos limpos, que constituem um aspecto singular, caracterizando-se por extensas áreas de gramíneas baixas desprovidas de arbustos, ocorrendo apenas matas ou capões limitados nas depressões em torno das nascentes. Também predomina a mata com araucária (*Aracucaria angustifolia*), cujo desenvolvimento está intimamente relacionado com a altitude (MAACK, 1968).

4.2. Características gerais do experimento

A espécie utilizada no experimento foi *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage, proveniente de mudas seminais da cultivar EBC 06 Candói, doadas pela Reflorestadora Golden Tree Ltda. O experimento foi implantado em dezembro de 2006, com os seguintes espaçamentos: 3 x 2m, 3 x 3m, 4 x 3m e 4 x 4m, com áreas vitais úteis de 6, 9, 12 e 16m², respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Espaçamentos utilizados no plantio experimental com *E. benthamii*, com suas respectivas áreas vitais e número de árvores por hectare.

Tratamentos	Espaçamentos (m)	Área vital (m^2)	Árvores por hectare
1	3 x 2	6	1666
2	3 x 3	9	1111
3	4 x 3	12	833
4	4 x 4	16	625

Para o plantio das mudas, foi escolhido o sistema de plantio direto sem preparo do solo, com uso de dessecação da vegetação com herbicida glifosato. Posteriormente, o coveamento foi realizado por meio de um motocoveador. O combate a formigas foi efetuado no pré-plantio, com o uso de MIP's (microporta-iscas), do ingrediente ativo Fipronil 0,03 g kg^{-1} na dosagem de 5g 10^{-1} m^{-2}.

Realizou-se adubação em cobertura após o plantio, utilizando-se NPK na formulação 04-14-08, com a aplicação feita em covetas laterais, na dosagem de 200 g planta^{-1}. A recomendação de adubação foi realizada de acordo com análise de solo do local.

Os tratos culturais empregados foram: o coroamento das mudas para controle de mato-competição, aos três e seis meses, com capina manual; foi utilizada roçadeira para o controle de plantas daninhas nas entre linhas dos espaçamentos; e a desrama foi realizada aos dois anos de idade, deixando-se até dois metros de fuste limpo.

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições por quatro tratamentos e vinte árvores por repetição, sendo que cada repetição foi isolada com linhas duplas de árvores de bordadura da mesma espécie (Figura 5).

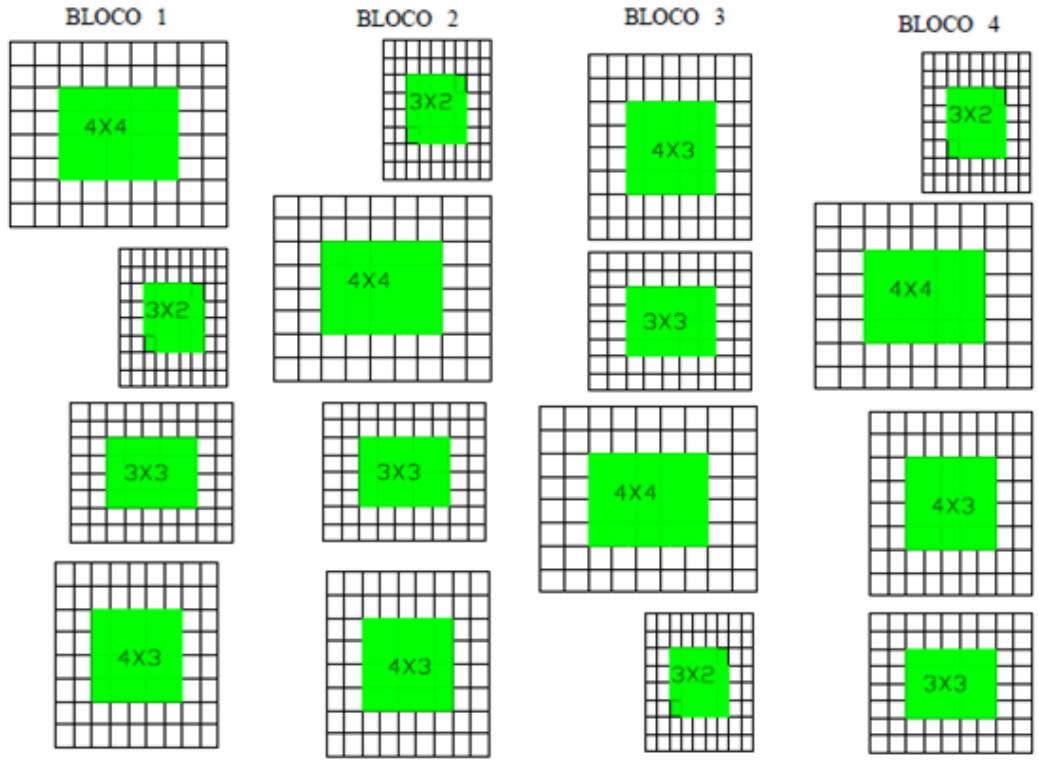

Figura 5. Croqui da área experimental com *E. benthamii*.

4.3. Coleta de dados para estimativa de biomassa e realização das análises químicas, físicas e energéticas

Em janeiro de 2013, foram coletados os dados dendrométricos de diâmetro à altura do peito (DAP - 1,30m de altura) e altura total de todas as árvores da área experimental. Para isso

foram utilizados a suta para medição do DAP e clinomêtro eletrônico Haglof para determinação da altura. Posteriormente esses dados foram digitados em planilhas eletrônicas. Com as informações coletadas a campo, os diâmetros foram divididos em classes diamétricas, utilizando-se a Equação (3), proposta por Sturges:

$$k = 1 + 3{,}322\ (\log n) \qquad \text{(Equação 3)}$$

em que: k: número de intervalos em classes de frequência; n: número de observações.

E os intervalos das classes foram obtidos pela Equação (4):

$$Ic = \frac{dmáx - dmín}{nc} \qquad \text{(Equação 4)}$$

em que: Ic: intervalo de classes; dmáx: diâmetro máximo; dmín: diâmetro mínimo; nc: número de classes.

Foram obtidas cinco classes diamétricas de maior frequência. As árvores foram selecionadas de maneira aleatória dentro de cada classe de diâmetro, sendo três árvores para cada classe, totalizando 15 árvores por tratamento/ espaçamento, em uma amostragem total de 60 árvores.

As 60 árvores selecionadas foram utilizadas para estimativa de biomassa nos seus diferentes compartimentos e para a realização da análise de densidade básica da madeira. Para as análises químicas e energéticas, dentro da amostragem de 60 árvores foram selecionadas apenas 20 árvores, sendo escolhida a árvore que representava o centro de cada classe diamétrica.

4.4. Estimativa da biomassa nos diferentes compartimentos

Para estimar a biomassa nos diferentes compartimentos da árvore, utilizou-se como base a metodologia proposta por Watzlawick (2003). As 60 árvores selecionadas foram cortadas e os seus compartimentos madeira com casca, galhos e folhas, foram pesados

separadamente no campo, com o auxílio de um tripé e um dinamômetro com capacidade para 500 kg, para obtenção da massa úmida de biomassa (Figura 6).

Figura 6. Etapas realizadas a campo: a) corte da árvore; b) medição da altura total para marcação da amostragem em diferentes alturas; c) medição dos diâmetros em diferentes alturas; d) pesagem de galhos e folhas; e) corte do fuste para pesagem; e f) pesagem da madeira com casca.

Após a determinação da biomassa úmida no campo, foram retiradas amostras de cada compartimento da árvore, para determinação do teor de umidade e, consequentemente, estimativa da biomassa seca total e de cada compartimento, por meio da Equação (5):

$$BS = BV\ x\ (1 - Tu) \qquad \text{(Equação 5)}$$

onde: BS: biomassa seca (kg); BV: biomassa verde ou úmida (kg); Tu: teor de umidade (%).

Para estimativa da biomassa da madeira com casca, foram retirados discos de aproximadamente cinco centímetros de espessura em diferentes alturas do fuste: base a 0,10cm do solo, DAP a 1,30m do solo e nas posições relativas a 25%, 50% e 75% da altura total da árvore, conforme a Figura 7. Os discos obtidos foram utilizados para determinação da biomassa seca e análises químicas, físicas e energéticas.

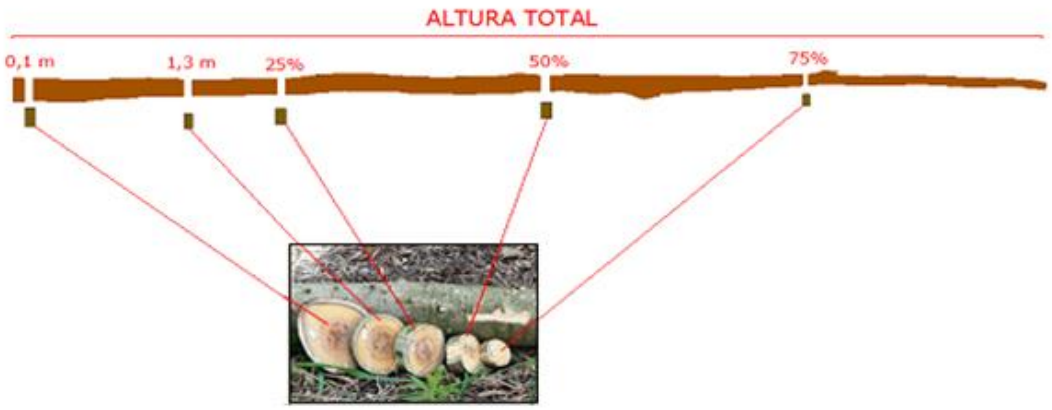

Figura 7. Amostragem realizada para estimativa da biomassa seca da madeira com casca: discos retirados em alturas diferentes ao longo do fuste.

Os discos foram devidamente identificados e levados ao laboratório para retirada da casca da madeira, ainda úmida, para posterior secagem individual de cada compartimento. Para a estimativa de biomassa de galhos e folhas, foram retirados aproximadamente 2 kg do terço médio de cada copa (Figura 8).

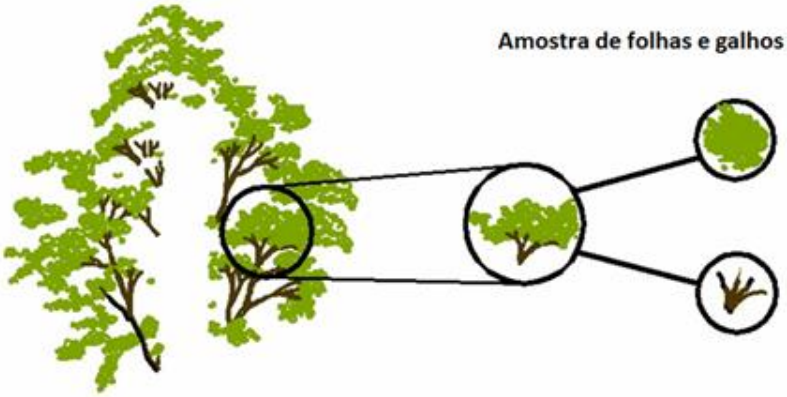

Figura 8. Amostragem realizada para estimativa da biomassa seca de galhos e folhas.

Todo o material coletado dos compartimentos da árvore foram acondicionados em sacos de papel para secagem em estufa no Laboratório de Ciências Florestais e Forrageiras, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO.

Para determinação do teor de umidade, as amostras foram secas em estufa a 65ºC, durante cinco dias. Em seguida, foram realizadas pesagens de dois em dois dias até as amostras obterem peso seco constante. Para a pesagem do material foi utilizada balança analítica com precisão de 0,1 g - modelo BK5005, com peso máximo de 5.100 gramas.

4.5. Estimativa da biomassa total e nos diferentes compartimentos

Para a estimativa da biomassa foi utilizado o método da regressão linear. A equação utilizada neste trabalho foi ajustada por SILVA (2014), e corresponde ao melhor ajuste encontrado para biomassa total e para cada compartimento das árvores de *E. benthamii*. A equação utiliza as variáveis independentes DAP e a altura total de todas as árvores, conforme apresentado na Equação 6:

$$LnB = ln\ b_0 + b_1\ ln\ DAP + b_2\ ln\ Ht \qquad \text{(Equação 6)}$$

em que: B: biomassa estimada (m³); ln: logaritmo neperiano; DAP: diâmetro a 1,30 m do solo (cm); h: altura total da árvore (m); bi: parâmetros do modelo.

Para cada ajuste foi calculado o coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa e estatística F. Estes valores podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo da estatística da equação ajustada para *E. benthamii*, aos 6 anos de idade.

Biomassa	Coeficiente de determinação R^2	Erro padrão da estimativa Syx	Estatística F	Coeficientes		
				b_0	b_1	b_2
Total	98,63%	9,91%	2771,89	-3,635	1,929	0,940
Madeira	98,31%	10,67%	2247,35	-4,355	1,712	1,276
Casca	96,02%	14,47%	929,56	-3,991	1,968	0,369
Galhos	93,66%	24,13%	569,43	-5,783	3,394	-0,562
Folhas	92,15%	21,72%	452,92	-6,101	3,053	-0,315

Os coeficientes de determinação (R^2) dos ajustes foram superiores a 90% para os todos os compartimentos, sendo os melhores resultados para biomassa total e madeira. No entanto, o erro padrão de estimativa (Syx) para galhos e para folhas foi consideravelmente mais alto, e indica que a equação não conseguiu estimar de uma forma muito precisa a biomassa para esses compartimentos. Silva (1996) encontrou resultados semelhantes em um trabalho utilizando modelos matemáticos para estimar biomassa de *E. grandis*, com Syx para galhos e folhas de 23,86% e 26,93%, respectivamente.

4.6. Análise de densidade básica da madeira

O procedimento utilizado no ensaio de densidade básica da madeira foi uma adaptação da norma NBR 7190 para estruturas de madeira (ABNT, 1997). O ensaio físico foi realizado no laboratório de Propriedades da Madeira, na UNICENTRO, *Campus* Irati.

Para determinação da densidade básica foram utilizados os discos retirados no campo das 60 árvores coletadas, em diferentes alturas. A partir de cada disco foram confeccionadas duas cunhas opostas, com um ângulo de 30º, totalizando 600 amostras, sendo 150 para cada espaçamento (Figura 9).

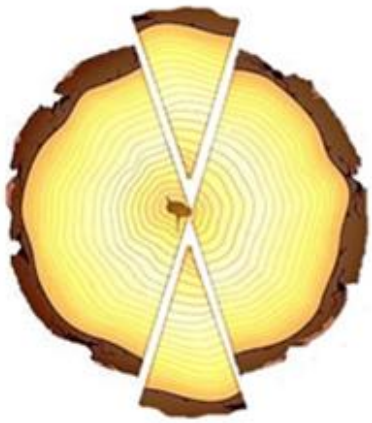

Figura 9. Localização das cunhas (corpos de prova) retiradas dos discos para realização da análise de densidade básica da madeira.

Após secagem em estufa a 103 ± 2ºC, por um período de 48 horas e estabilização do peso, foi obtida a massa seca (g), por meio de pesagem das cunhas (corpo de prova) em balança de precisão e o volume seco por balança hidrostática. Após este procedimento, os corpos de prova foram imersos em água durante 30 dias para obtenção do volume saturado pelo método estereométrico.

4.7. Preparação das amostras para as análises químicas e energéticas

Para realização dessas análises, amostras das 20 árvores selecionadas como árvore central de cada classe de diâmetro, foram moídas em um moinho de facas com peneira de 1mm.

Todo material coletado de casca, galhos e folhas foram moídos. Das amostras da madeira, apenas 10% da massa seca de cada disco foram moídos, em suas diferentes alturas. Depois da moagem da madeira, as amostras de cada altura foram misturadas, compondo uma única amostra para este compartimento. Procedimento similar ocorreu com as amostras de casca.

Os compartimentos galhos e folhas foram misturados, obtendo-se uma amostra composta, equivalente a 60% para os galhos e 40% para as folhas, de acordo com a média geral obtida para estes compartimentos.

As análises consideraram todo o material com 0% de umidade. As amostras ficaram na estufa por, aproximadamente, duas horas a 103 ± 2ºC, e posteriormente foram colocadas em dessecadores de vidros com sílica gel para que não houvesse alteração dos resultados, conforme determinam as normas da ABNT/NBR seguidas para cada análise.

4.7.1. Análise química imediata

As determinações de carbono fixo (F), materiais voláteis (V) e cinzas (A) foram realizadas no laboratório de Energia de Biomassa, da UFPR, em Curitiba - PR, utilizando-se a norma NBR 8112/86.

Foram utilizados aproximadamente três gramas de amostra para cada compartimento, colocadas em cadinhos e pesadas em balança analítica. A determinação de materiais voláteis consistiu em colocar o material por sete minutos em uma Mufla a 900 ± 10ºC, depois desse

tempo, os cadinhos com as amostras foram colocados em dessecadores de vidro para que esfriassem para a realização de outra pesagem.

As determinações foram realizadas em duplicata, ou seja, as análises foram repetidas duas vezes para cada amostra. Para calcular o teor de materiais voláteis foi utilizada a Equação (7):

$$MV = \frac{m2 - m3}{m} \qquad \text{(Equação 7)}$$

onde: MV: teor de materiais voláteis (%); m_2: massa inicial do cadinho + amostra (g); m_3: massa final do cadinho + amostra (g); m: massa da amostra (g).

Já para determinação das cinzas, o mesmo material incinerado para determinar os materiais voláteis foi colocado em outra Mufla a 700 ± 10ºC, onde permaneceu por aproximadamente 8 horas. Após esse tempo, deixou-se o material esfriar em um dessecador de vidro e então foi pesado novamente. O teor de cinzas foi calculado de acordo com a Equação (8):

$$CZ = \frac{m1-m0}{m} x100 \qquad \text{(Equação 8)}$$

onde: CZ: teor de cinza (%); m_0: massa do cadinho (g); m_1: massa do cadinho + resíduo (g); m: massa da amostra (g).

O carbono fixo é a soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas, subtraído de um valor total que seria 100, utilizando-se para isso a Equação (9):

$$CF = 100 - (CZ + MV) \qquad \text{(Equação 9)}$$

em que: CF: teor de carbono fixo (%); CZ: teor de cinza (%); MV: teor de materiais voláteis (%).

4.7.2. Poder calorífico superior (PCS)

A análise de poder calorífico superior (PCS) tomou como base a norma NBR 8633/84 da ABNT, utilizando-se um calorímetro (bomba) automático, marca IKA WORKS, modelo C5000.

Para realização da análise foi utilizado aproximadamente 0,5 gramas de cada amostra dos diferentes compartimentos galhos e folhas, madeira e casca, as quais foram primeiramente secas em estufa e resfriadas em um dessecador de vidro para pesagem em balança analítica. Posteriormente foram colocadas na bomba calorimétrica para obtenção do PCS. Esta determinação foi realizada no laboratório de Energia da Biomassa, da UFPR, em Curitiba – PR.

4.8. Análise de custos

A análise de viabilidade econômica foi elaborada para verificar se é vantajoso ou não substituir a caldeira alimentada com óleo BPF por caldeiras alimentadas com biomassa. Para isso, foi comparado o custo de produção por tonelada de vapor, para três diferentes modelos de caldeiras, utilizando-se como base parâmetros utilizados por Balbinot et al. (2010) e a metodologia sugerida por Silva et al. (2005), para o cálculo do custo operacional de máquinas.

Adotou-se como cenário de referência a instalação das caldeiras com vida útil estimada em 15 anos. A operação das caldeiras foi estabelecida em 16 horas diárias, com funcionamento em dois turnos de oito horas cada, sendo considerados 22 dias úteis por mês, totalizando 352 horas programadas de trabalho por mês.

Também foi considerada a quantidade de mão de obra necessária para operar cada caldeira: no modelo a óleo é preciso um operador por turno; já nas caldeiras a biomassa são dois operadores por turno. O valor do salário de cada operador foi estipulado como dois salários mínimos vigentes no mês de fevereiro de 2014, acrescentando 68% de encargos sociais e 25% de benefícios.

Foram utilizados três modelos de caldeiras, selecionados de forma específica, de acordo com o tipo de combustível utilizado, como segue: Caldeira modelo M3P-10, alimentada com óleo BPF; Cadeira modelo HBFS-25, alimentada com cavaco; e Caldeira modelo LHC-10, alimentada com lenha. Os três modelos de caldeiras, com as respectivas características e preços são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Características dos diferentes modelos de caldeiras utilizadas nos cálculos de viabilidade econômica.

Modelo	Produção de Vapor (t h^{-1})	Eficiência térmica (%)	Consumo máximo de combustível (t h^{-1})	Valor estimado de aquisição (R$)
M3P-10	10	90	0,755	470.925,00
HBFS-25	25	80	10	2.900.000,00
LHC-10	10	80	2,93	707.500,00

O custo de produção, em reais por tonelada de vapor produzido, foi calculado com base no custo operacional de cada modelo de caldeira, em reais por hora efetiva de trabalho. O custo operacional total foi calculado com base na metodologia descrita a seguir:

a) Custos fixos: são os custos que incidem sobre o processo produtivo, independente do nível de produção (SILVA et al., 2005).

- Depreciação

A depreciação representa a perda de valor de um bem em decorrência do desgaste pelo uso, pela ação do tempo ou pela obsolescência (SILVA et al., 2005). A depreciação foi calculada com base na equação (10):

$$Dh = \frac{Va - Vr}{n \; x \; he} \qquad \text{(Equação 10)}$$

onde: Dh: depreciação do equipamento por hora de trabalho (R$ he^{-1}); Va: valor de aquisição do equipamento (R$); Vr: valor de revenda do equipamento (R$); n: vida útil (meses); he: horas efetivas de uso mensal.

O valor de revenda foi estabelecido em 20% do valor de aquisição do equipamento, propriamente dito, porém, no cálculo da depreciação o valor de aquisição contemplou também o custo de implantação da caldeira (aquisição + instalação).

Para todos os modelos de caldeiras, o custo de instalação levou em consideração os custos de obras, transporte, alimentação e hospedagem de pessoal, com valores aproximados de 20% do valor de aquisição das caldeiras, segundo informações dos fabricantes.

- Juros:

A taxa de juros utilizada foi de 0,95% ao mês e os valores dos custos de juros e seguros foram obtidos por meio da Equação (11):

$$JS = \frac{IMM\ x\ i}{he} \qquad \text{(Equação 11)}$$

onde: JS: é o valor dos juros e seguros por hora efetiva de trabalho (R$); i: taxa percentual de juros acrescida da taxa de seguros (%); IMM: investimento médio mensal (R$); he: total de horas efetivas de trabalho por mês.

O investimento médio mensal foi calculado por meio da Equação (12):

$$IMM = \frac{Va - Vr\ (n+1)}{2\ x\ n} + Vr \qquad \text{(Equação 12)}$$

em que: IMM: investimento médio mensal (R$); Va: valor de aquisição do equipamento (R$); Vr: valor de revenda do equipamento (R$); e n: vida útil (meses).

- Salários:

Os custos de salários correspondem aos salários dos operadores, acrescidos dos encargos sociais obrigatórios e benefícios, sendo normalmente considerados como um percentual sobre os salários. Para efeito deste estudo, foram considerados o salário dos operadores de R$724,00 equivalente ao salário mínimo com base em fevereiro de 2014; os encargos obrigatórios correspondentes a 68% do salário e mais 25% de benefícios, que poderiam corresponder a vale transporte, vale alimentação, plano de saúde, entre outros. Os custos de salários foram calculados por meio da Equação (13):

$$CS = \frac{SO \text{ x } (1+ES)}{he} \quad \text{(Equação 13)}$$

em que: CS é o custo com salários por hora efetiva de trabalho (R$ he^{-1}); ES são os encargos sociais e benefícios em relação aos salários (%); e *he* é o total de horas efetivas de trabalho por mês.

b) Custos variáveis:

São os custos que variam de acordo com a quantidade de horas trabalhadas.

- Custos de combustíveis:

Os custos de combustíveis foram calculados com base no preço de mercado do combustível e no consumo de combustível por hora de operação de cada caldeira, e foram calculados por meio da Equação (14):

$$CC = Pc \text{ x } C \quad \text{(Equação 14)}$$

em que: *CC* é custo de combustível (R$ t^{-1}); *Pc* é o preço do combustível (R$ t^{-1}); e *C* é consumo de combustível (t he^{-1}).

- Manutenção e reparos:

Os custos relacionados com a manutenção e reparos mecânicos normalmente são estipulados como valor percentual sobre a depreciação, e referem-se ao custo de mão-de-obra, peças de reposição e outros materiais. O custo de manutenção mensal foi estimado em 50% do valor da depreciação de cada modelo, sendo calculado por meio da Equação (15):

$$MR = Dh \text{ x } f \quad \text{(Equação 15)}$$

em que: MR é o custo de manutenção e reparos (R$ he^{-1}); Dh = Depreciação (R$ he^{-1}); *f* é o coeficiente de reparos e manutenção (%).

c) Custo de administração:

São os custos indiretos relacionados com a administração do trabalho e do maquinário, obtido por meio da aplicação de um coeficiente sobre o custo operacional total (custos fixos + custos variáveis). Normalmente, o coeficiente aplicado varia entre 5 e 15% (HARRY et al., 1991). Neste trabalho foi considerado um valor de k = 5 %. Os custos de administração podem ser calculados por meio da Equação (16):

$$CA = CT \text{ x } k \qquad \text{(Equação 16)}$$

em que: CA é o custo de administração (R$ he^{-1}); CT: Somatório dos custos fixos e variáveis (R$ he^{-1}); k é o coeficiente de administração (%).

4.9. Análises estatísticas

Para a biomassa total e dos diferentes compartimentos da árvore, foi utilizado o delineamento em blocos ao acaso, com 4 blocos e 4 tratamentos.

Na análise das propriedades físicas da madeira, os dados de densidade básica foram comparados em arranjo fatorial: 4 x 5 (4 espaçamentos, 5 posições de alturas no fuste), com 15 repetições.

Para as análises das propriedades químicas e energéticas foi utilizado o arranjo fatorial 4 x 3 (4 espaçamentos, 3 compartimentos – galhos e folhas, casca e madeira), com 5 repetições.

Todas as avaliações foram submetidas ao teste de Bartlett para comprovar a homogeneidade das variâncias, análise de variância ANOVA e ao teste de comparação de médias Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro. As análises foram realizadas com o auxílio do *software* estatístico ASSISTAT versão 7.7 beta. Os coeficientes de correlação de Pearson para o poder calorífico e teor de umidade foram obtidos no Microsoft Excel 7.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Estimativa de biomassa

Os diferentes espaçamentos avaliados influenciaram a estimativa de biomassa seca total e por compartimento da árvore. A partir da análise estatística em blocos ao acaso, foi possível observar que não houve diferença entre os blocos avaliados, mas somente entre os tratamentos ($p < 0,01$) e, além disso, a homogeneidade das variâncias foi comprovada pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$). As médias correspondentes a cada tratamento e de biomassa seca por compartimento são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios de biomassa seca total e por compartimento em função dos diferentes tratamentos avaliados para *E. benthamii*, aos 6 anos de idade.

Espaçamento (m)	Biomassa Seca (Mg ha^{-1})				
	Total	Madeira	Casca	Galhos	Folhas
3 x 2	184,164 a	139,668 a	23,776 a	12,634 a	7,845 a
3 x 3	147,294 ab	111,125 ab	18,742 ab	10,866 a	6,443 a
4 x 3	133,508 b	99,720 b	16,691 b	10,860 a	6,181 a
4 x 4	109,323 b	80,518 b	13,606 b	9,831 a	5,436 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

A biomassa seca total, assim como a biomassa da madeira e da casca apresentaram diferença significativa entre os espaçamentos. O espaçamento correspondente a 3 x 2m foi o que apresentou a maior quantidade de biomassa estimada por hectare e o espaçamento 4 x 4m teve a menor quantidade de biomassa, e tal fato pode ser explicado pelo maior número de árvores por hectare no menor espaçamento.

Este resultado condiz com Leite et al. (1997), que ao avaliarem a biomassa seca total e de diferentes compartimentos da espécie *E. grandis*, aos 6 anos de idade, constataram que a maior produção de biomassa ocorreu no menor espaçamento correspondente a 2 x 1m com 15,5 t ha^{-1}, e a produção mais baixa foi observada no maior espaçamento com 8,3 t ha^{-1}. Ainda, Santos (2011), ao observar o efeito de 16 espaçamentos na produtividade de biomassa

das espécies de *E. grandis* e *E. urophylla*, aos 72 meses, confirmou que a maior produção de biomassa ocorreu nos menores espaçamentos.

Tal fato também foi observado por Ladeira (1999), avaliando o crescimento e a produção de biomassa de *E. camaldulensis, E. pellita e E. urophylla*; por Hegazy et al. (2008), com a espécie *Conocarpus erectus* L., na Arábia Saudita e por Chotchutima et al., (2013), com a espécie *Leucaena leucocephala* na Tailândia.

A variação na densidade populacional de plantas, normalmente, afeta a quantidade de biomassa obtida por unidade de tempo e a qualidade do produto final (LEITE et al., 1997). O aumento da densidade populacional nos espaçamentos adensados proporciona uma redução na produção de biomassa por árvore, no entanto, ocorre um aumento da produção dessa biomassa por hectare (SANTOS, 2011).

A produção de biomassa está diretamente relacionada com fatores de sítio, tratos silviculturais e, principalmente, com a densidade da população e fatores ambientais. À medida que o espaçamento diminui tem-se uma maior densidade populacional, o que aumenta a competição entre plantas por água, luz e nutrientes (SCHNEIDER, 2008).

Em espaçamentos mais amplos, há uma maior disponibilidade de recursos para cada árvore, favorecendo o incremento em diâmetro, grande área de copa com muitas ramificações, proporcionando melhor desenvolvimento da planta e contribuindo diretamente na qualidade e quantidade da produção em termos individuais. Já em povoamentos mais densos, há predominância de árvores com diâmetros menores (SANTOS, 2011; LIMA et al., 2013; PAULESKI, 2010). Nesse caso, não se preza pela qualidade do produto e sim a quantidade de madeira produzida, assim, em questões energéticas, é recomendado a utilização de espaçamentos menores, os quais produzem maior número de indivíduos por hectare.

Com relação aos diferentes compartimentos de *E. benthamii*, estes apresentaram diferença entre a madeira, casca, galhos e folhas, além disso, a madeira foi o compartimento que mais produziu biomassa por hectare. Em média, a madeira representa 75% da biomassa total, a casca 13%, galhos e folhas com 8 e 4%, respectivamente (Figura 10).

Resultados semelhantes foram encontrados por Bernardo et al. (1998), que ao avaliarem o efeito do espaçamento no crescimento e produção de biomassa, observaram que, conforme o espaçamento aumenta ocorre uma diminuição da produção por hectare, nos diversos compartimentos das árvores das espécies de *E. urophylla*, *E. pellita* e *E. camaldulensis*.

Na madeira está concentrado o maior peso de biomassa, este fato também foi verificado nos trabalhos de Leite et al. (1997), com *E. grandis*; Schumacher e Caldeira (2001), com *E. globulus* subespécie *maidenii*; Valerio (2009) e Giongo et al. (2011) com *Pinus elliottii*; Coelho et al. (1970), com *E. grandis*, *E. alba*, E. *saligna* e *E. propínqua*; e por Müller (2005) com híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*.

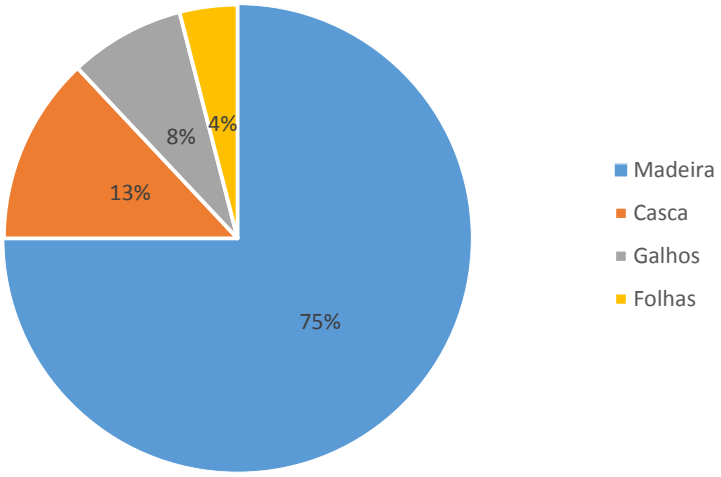

Figura 10. Distribuição da biomassa de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade, em %.

A porcentagem encontrada para os compartimentos avaliados de *E. benthamii* condiz com os resultados de trabalhos desenvolvidos por Müller (2005), com híbrido das espécies de *E. grandis* x *E. camaldulensis*; por Rondon (2006), com a espécie *Tectona grandis*; e por Pereira et al. (1997), com *Acacia mearnsii*. Müller (2005), ainda menciona que, geralmente, a madeira e a casca representam cerca de 70 a 80% da biomassa e os galhos e folhas representam de 20 a 30% do total.

5.2. Propriedades físicas da madeira

5.2.1. Densidade básica

Os dados referentes à densidade básica da madeira apresentaram homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$). A partir da análise em esquema fatorial, foi possível observar que o fator espaçamento não foi significativo para a densidade ($p > 0,01$). O fator posição de amostragem ao longo do fuste apresentou diferença significativa ($p < 0,01$).

Ainda, não houve interação entre os fatores espaçamento x posição de amostragem. Na Tabela 6 são apresentados os valores médios da densidade básica em função da posição de amostragem ao longo do fuste.

Tabela 6. Valores médios da densidade básica em função dos diferentes pontos de amostragem ao longo do fuste de *E. benthamii*.

Posição de amostragem	Altura média correspondente a posição de amostragem	Densidade Básica (g cm^{-3})
BASE	0,10 cm	0,523 a
DAP	1,30 m	0,511 ab
25%	5,76 m	0,503 b
50%	11,52 m	0,499 b
75%	17,29 m	0,470 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

A densidade básica média da madeira de *E. benthamii* foi de 0,500 g cm^{-3}, não apresentando diferença para os espaçamentos avaliados. Quando se considerou as posições de amostragem ao longo do fuste, observou-se uma tendência de diminuição da densidade encontrada no sentido base - topo da árvore. A base (0,10cm) apresentou a maior densidade básica de 0,523 g cm^{-3}, seguida pelas alturas equivalentes a 1,30m, 25% e 50%, e por último a amostragem do ponto de 75% da árvore, que apresentou um valor equivalente a 0,470 g cm^{-3}.

Em um estudo desenvolvido por Pereira et al. (2000), no município de Colombo-PR, a madeira de *E. benthamii*, aos 7 anos de idade, apresentou uma densidade básica média de 0,477 ± 0,009 g cm^{-3}, ou seja, valor inferior ao encontrado no presente estudo. O autor também observou a mesma tendência de diminuição da densidade no sentido da base para o topo: a densidade da base foi maior em relação aos outros pontos de amostragem, enquanto a altura correspondente a 100% apresentou menor densidade básica da madeira.

A diferença entre a densidade básica da madeira de diferentes localidades pode estar associada a qualidade das sementes utilizadas no plantio ou relacionada com as diferenças ecológicas de cada região, como clima e solo (BRASIL e FERREIRA, 1971).

O espaçamento pode ou não influenciar a densidade básica da madeira. Para as espécies de *E. grandis*, *E. alba* e *E. saligna*, aos 5 anos de idade, avaliadas em função dos

espaçamentos 3 x 1,5m e 3 x 2m, não foi constatada diferença da densidade básica entre os espaçamentos avaliados (BRASIL e FERREIRA, 1971).

No entanto, Goulart et al. (2003), avaliando o efeito de diferentes espaçamentos de plantio na densidade básica de *E. grandis*, aos 10 anos de idade, observaram diferença para a densidade nos espaçamentos. As áreas vitais utilizadas no estudo foram 1,00, 1,50, 2,00, 3,00, 4,00, 5,00, 3,75, 6,25, 6,00, 7,50, 9,00 e 12,00m^2, sendo que os espaçamentos 1,5 x 1,0m e 2,0 x 1,5m, com as áreas vitais de 1,5 e 3,00m^2, apresentaram os maiores valores de densidade básica, correspondentes a 0,440 e 0,470 g cm^{-3}, respectivamente.

Quanto às diferentes posições de amostragem ao longo do fuste, não há uma maneira específica de variação da densidade básica no sentido base-topo da árvore (SOUZA et al., 1986). Para a espécie *E. grandis*, aos 18 anos de idade, a densidade obteve um decréscimo até a região do DAP, seguido de acréscimo até a altura correspondente a 100% (TREVISAN et al., 2012).

Sturion et al. (1987), estudando a variação da densidade básica da madeira de diferentes espécies de eucalipto, aos 10 anos e meio de idade, observaram que ocorreram variações na densidade ao longo do fuste. Para o *E. grandis*, a densidade decresceu da base para a posição relativa a 25% da altura, aumentou até a posição de 50% e novamente voltou a decrescer. Para as espécies de *E. urophylla e E. saligna*, a densidade mostrou tendência decrescente no sentido da base para o topo da árvore; *E. pellita* não apresentou variação ao longo do fuste; *E. maculata*, teve um decréscimo da base para a posição relativa a 25% e, posteriormente, um acréscimo até o topo.

Comparando os resultados obtidos para densidade básica, em diferentes posições de amostragem ao longo do fuste para o *E. benthamii* com outras espécies de eucalipto, avaliadas por Sturion et al. (1987), *E. urophylla e E. saligna* foram as espécies que apresentaram a mesma tendência de decrescer no sentido base-topo da árvore, sendo que os maiores valores de densidade foram encontrados na base e os menores nas alturas correspondentes a 75% (Figura 11).

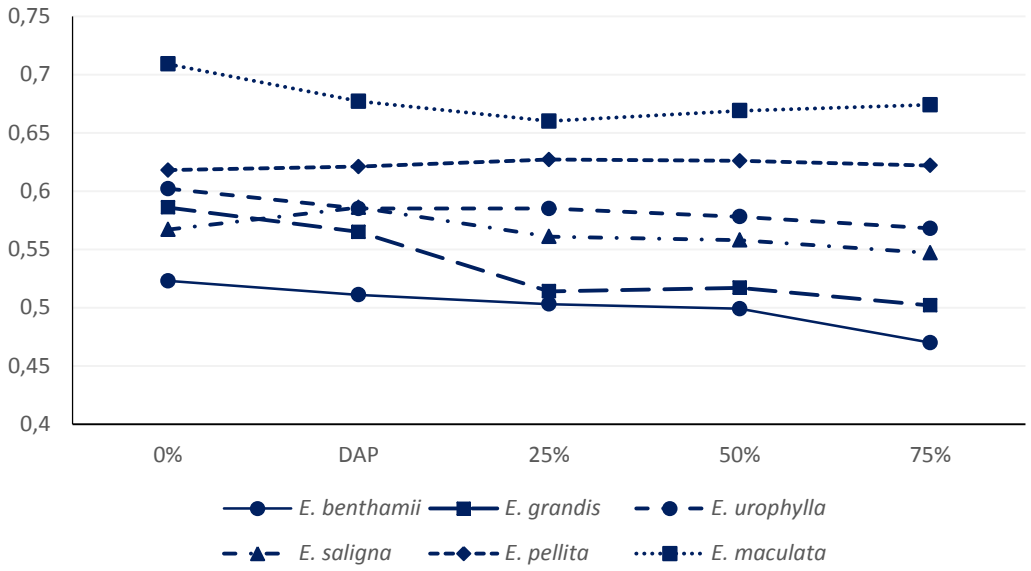

Figura 11. Comparação da densidade básica da madeira em posições de amostragem ao longo do fuste para *E. benthamii* do presente estudo, com diferentes espécies de eucalipto avaliadas por Sturion et al., 1987. DAP-diâmetro a altura do peito.

A densidade básica pode variar entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e dentro de uma mesma árvore, em função, principalmente, do ciclo de vida da árvore e das condições edafoclimáticas do povoamento (VITAL et al., 2006). As variações radial e longitudinal são as principais variações que ocorrem dentro do fuste (COUTO et al., 2012). As variações na densidade também são provocadas por diferenças nas dimensões celulares e pela quantidade de componentes extratáveis presentes por unidade de volume (ROCHA, 2011).

A base da árvore é a que apresenta os maiores valores de densidade, este fato pode ser justificado pela influência do sistema radicular (SOUZA et al., 1986) e às exigências mecânicas de sustentação do fuste (TREVISAN et al., 2012). Quanto à densidade no sentido longitudinal do fuste, esta pode variar de acordo com características relacionadas ao seu crescimento como, tortuosidade e formação de galhos e folhas; e incidência de agentes externos como o vento, que podem atuar de diferentes maneiras sob o fuste (PALERMO et al., 2006).

5.3. Propriedades químicas e energéticas

5.3.1. Análise química imediata

A análise química imediata avaliou os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos diferentes compartimentos da árvore e os dados referentes a essa análise apresentaram variâncias homogêneas conforme observado no teste de Bartlett ($p > 0,05$). Para esses mesmos teores, não foi observada diferença estatística entre os diferentes espaçamentos avaliados ($p > 0,01$). Houve diferença somente entre os compartimentos das árvores ($p < 0,01$). Também não houve interação entre os fatores espaçamento x compartimentos. Os valores médios com os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos diferentes compartimentos da árvore são apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Valores médios de teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas nos compartimentos casca, madeira, galhos e folhas de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. Guarapuava – PR, 2014.

Compartimentos	Médias (%)		
	Materiais Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas
Casca	71,852 c	22,271 a	5,878 a
Madeira	82,032 a	17,619 c	0,349 c
Galhos e Folhas	75,472 b	21,105 b	3,422 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

Em outro estudo sobre as características energéticas do *E. benthamii*, aos 5 anos de idade, Silva et al. (2012) avaliaram, separadamente, a casca e a madeira, obtendo médias para a madeira de 16,0% para carbono fixo, 84,0% de materiais voláteis e 0,25% para as cinzas; já para a casca 23,9% de carbono fixo, 76,1% de materiais voláteis e 4,4% de cinzas. Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, também foram verificados por Chrisostomo et al. (2013), para *E. grandis* e por Scremin (2012), para *E. dunii*.

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos diferentes compartimentos não sofreram influência do espaçamento. Isso pode ser justificado pela relação desses teores com a constituição química da madeira, como lignina e holocelulose e pela quantidade de

nutrientes presentes na árvore. Reis et al. (2012), também não observou diferença entre os espaçamentos 3 x 3m e 3 x 4m, para os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas de *E. urophylla*, aos 7 anos de idade.

A relação entre a lignina e o carbono fixo foi verificada por Brito e Barrichelo (1977), em que os autores encontraram uma correlação positiva entre o teor de lignina da madeira e o teor de carbono fixo e para os teores de materiais voláteis e de cinzas, a correlação com a lignina foi negativa. Para Trugilho et al. (1996), a lignina apresentou correlação negativa com o teor de holocelulose. Isto sugere que madeiras com maior teor de lignina têm maior porcentagem de carbono fixo, consequentemente, menor teor de materiais voláteis.

A relação entre teor de carbono fixo e teor de materiais voláteis, também foi verificada por Chaves et al. (2013), ao avaliarem clones de *Eucalyptus spp*., quando constataram que o teor de carbono fixo depende do teor de materiais voláteis e que madeiras com maiores teores de material volátil tem menores teores de carbono fixo.

Os resultados encontrados na análise imediata da madeira e de galhos e folhas de *E. benthamii* estão de acordo com a porcentagem considerada ideal para o teor de materiais voláteis, que varia entre 75 e 85% e para o carbono fixo entre 15 e 25% (BRAND, 2010; CORDER, 1976). A casca apresentou valor inferior a esta porcentagem para materiais voláteis e o carbono fixo está dentro dessa faixa de porcentagem.

Considerando os compartimentos avaliados, a casca apresentou maiores teores de carbono fixo e cinzas, e a madeira apresentou maior média para o teor de materiais voláteis. Brito e Barrichelo (1978) avaliaram as características de oito espécies de eucalipto, entre quatro e cinco anos de idade, e também constataram teor de carbono fixo para a casca superior ao da madeira e o contrário também ocorre com o teor de materiais voláteis, onde a madeira obteve as maiores médias (Figura 12). Outros autores também encontraram essa variação entre a madeira e a casca para o *Pinus* (SOUZA et al., 2012) e para espécies nativas (VALE et al., 2002).

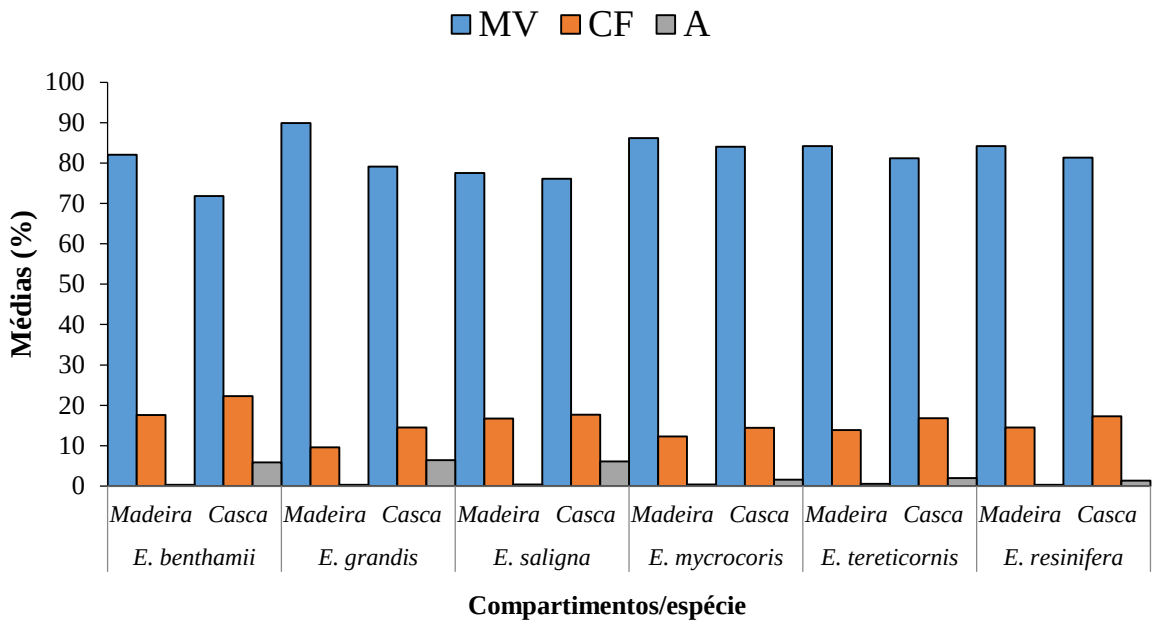

Figura 12. Comparação entre as médias para o teor de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (A) para *E. benthamii* do presente estudo, com diferentes espécies de eucalipto avaliadas por Brito e Barrichelo (1978).

Os valores apresentados no gráfico mostram que a madeira de diferentes espécies de eucalipto apresentaram maiores de teores de materiais voláteis, as cascas maiores teores de carbono fixo e cinzas foram maiores na casca. O *E. benthamii* apresentou teores de materiais voláteis e carbono fixo inferiores quando comparado as demais espécies. E as cinzas variaram de uma espécie para outra, sendo que *E. benthamii* obteve médias inferiores para a madeira e casca das espécies *E. grandis*, *E. saligna*; e superiores para a espécie *E. resinifera*.

As cinzas correspondem à quantidade de minerais presentes na madeira (BARCELLOS et al., 2005) e variam conforme os compartimentos da árvore, além de ser uma característica intrínseca da madeira de diferentes espécies (ANDRADE e CARVALHO, 1998). Na maioria das espécies, as folhas e a casca apresentam maior teor de cinzas do que os outros compartimentos da árvore: as folhas porque transformam os nutrientes em componentes vegetais por meio da fotossíntese e a casca por apresentar maior quantidade de materiais inorgânicos (BRAND, 2010). O teor de cinzas ainda pode variar com a idade da árvore, posição ao longo do fuste e fatores ambientais, como clima e solo (ROSA, 2003).

5.3.2. Poder calorífico superior (PCS)

O poder calorífico superior apresentou homogeneidade das variâncias conforme observado no teste de Bartlett ($p > 0,05$). Quanto aos espaçamentos, estes não influenciaram no poder calorífico dos compartimentos das árvores ($p > 0,01$). Ocorreu diferença significativa somente para os diferentes compartimentos avaliados ($p < 0,01$). A interação entre os fatores espaçamentos x compartimentos também não foi observada.

A maior média encontrada para o poder calorífico superior foi para o compartimento de galhos e folhas com 4.732 kcal kg^{-1}, seguido da madeira com 4.534 kcal kg^{-1}, e por último, a casca com 3.904 kcal kg^{-1} (Tabela 8).

Tabela 8. Valores médios de poder calorífico superior (kcal kg-1) para galhos e folhas, madeira e casca de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade.

Compartimentos	Média PCS (kcal kg^{-1})
Galhos e folhas	4.732 a
Madeira	4.534 b
Casca	3.904 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$).

Os resultados encontrados para o poder calorífico superior são similares aos encontrados por Lima et al. (2011), com *E. benthamii*, aos 6 anos de idade, onde este obteve valores para o PCS de 4.681 kcal kg^{-1}. Para outras espécies de eucalipto, Silva et al. (2012) observaram valores também muito semelhantes, sendo que, para *E. urophylla* o PCS foi de 4.637 kcal kg^{-1}, para *E. grandis* de 4.687 kcal kg^{-1} e *E. citriodora* de 4.625 kcal kg^{-1}. O valor médio da casca foi similar ao encontrado por Miranda (2000), com híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*, aos 9 anos de idade.

O espaçamento não influenciou o poder calorífico dos compartimentos da árvore de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade. Rocha (2011), avaliando o poder calorífico superior de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, nas idades de 4, 5, 6 e 7 anos, também não observou influência do espaçamento no poder calorífico.

O fato do espaçamento não alterar o poder calorífico pode ser justificado pela relação desta variável com constituintes químicos da madeira como a lignina e extrativos, os quais

variam notavelmente entre as espécies coníferas, como o *Pinus*, para as folhosas, como o *Eucalyptus* (ROCHA, 2011; BRAND, 2010), mas não são alterados por tratos silviculturais, como o espaçamento.

Essa relação entre o poder calorífico e a composição química da madeira foi comprovada em estudos desenvolvidos por Doat e Petroff (1975), que ao pesquisarem espécies tropicais, observaram que uma madeira rica em lignina e extrativos solúveis possuem elevado poder calorífico.

O poder calorífico da casca de *E. benthamii* observado neste estudo, foi inferior aos demais compartimentos. Esta diferença entre o PCS da casca e da madeira também foi comprovada por Brand (2010) e Couto et al. (1984). Geralmente, o PCS da casca é superior ao da madeira, porém algumas espécies não apresentam este comportamento. Esta diferença está relacionada aos compostos orgânicos que possuem quantidades variáveis na casca das diferentes espécies (BRAND, 2010).

Essas variações observadas de poder caloríficos nos diferentes compartimentos das árvores podem ser justificadas pela sua composição química, que pode variar entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e dentro da própria árvore (ROWELL, 2005).

5.3.3. Poder calorífico superior (PCS) x teor de umidade

A umidade e o poder calorífico apresentaram uma correlação de Pearson negativa, de -0,8218, confirmando assim, a existência de uma relação inversamente proporcional entre essas duas propriedades da madeira. De acordo com Ferreira et al. (2009), essa relação indica que quanto maior o teor de umidade, menor será o poder calorífico. Os valores médios e a relação entre o teor de umidade (TU) e poder calorífico superior (PCS) para os compartimentos madeira, casca, galhos e folhas são apresentados na Figura 13.

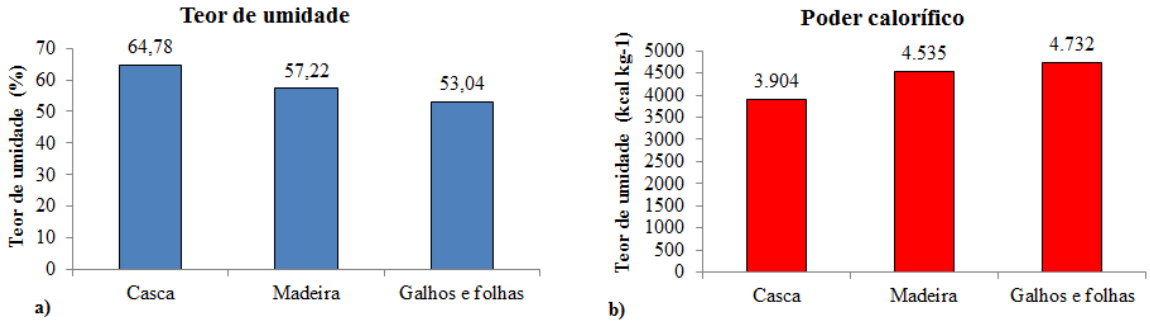

Figura 13. Relação entre o teor de umidade (a) e poder calorífico (b) dos compartimentos casca, madeira e galhos e folhas de *E. benthamii*, aos 6 anos de idade.

A partir das médias obtidas para o teor de umidade e o poder calorífico é possível observar que o compartimento casca apresentou maior teor de umidade, consequentemente, menor poder calorífico. Para a madeira e para galhos e folhas, o teor de umidade encontrado variou de 51,99 a 56,84%, e o poder calorífico também apresentou médias próximas para estes compartimentos.

Os resultados encontrados dessa influência e da relação inversamente proporcional entre a umidade no poder calorífico para o *E. benthamii*, também foram encontradas nos resultados observados por Furtado et al. (2012), Ferreira et al. (2009), Couto et al. (2013) e Calegari et al. (2005).

Uma das principais relações da umidade com o poder calorífico é que esta dificulta a queima do combustível, visto que no processo de combustão, quanto maior for a umidade, mais energia será gasta para a evaporação e eliminação da água que está presente no combustível. Além disso, é necessário considerar que a umidade varia amplamente nos compartimentos da árvore, sendo maior nas raízes e copa (galhos e folhas) e menor no caule e tronco (BRAND, 2010).

5.4. Análise de custos

Para os três modelos de caldeiras avaliados, valores como o de custo de implantação, custo total de operação e custo de produção para cada tonelada de vapor apresentaram diferenças para cada modelo. O modelo HBFS-25, alimentada com cavaco, obteve os maiores valores para todos os custos avaliados, com exceção do custo de produção mensal de vapor. Os modelos M3P-10, alimentada com óleo BPF, apresentou maior custo de produção de

vapor e o modelo LHC-10, alimentada com lenha em toras, apresentou os menores valores para todos os custos. Os valores correspondentes ao custo de implantação, custo total, do combustível e da tonelada de vapor produzida, conforme metodologia descrita, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Custos de implantação e custos mensais com combustível, total e custo de produção de vapor para os três modelos de caldeiras analisadas.

Especificação dos custos	Combustível das caldeiras		
	Óleo BPF	Cavaco	Lenha
Implantação (R$)	565.110,00	3.480.000,00	849.000,00
Custo do combustível (R$ t^{-1})	852,50	960,00	204,96
Quantidade de vapor produzida (t $mês^{-1}$)	9	20	8
Custo total da produção (R$)	933,55	1.208,64	314,68
Custo da produção por tonelada de vapor (R$ t^{-1})	103,73	60,43	39,32

Os resultados indicam que, o custo total de produção de vapor para a caldeira a cavaco é superior ao custo total das caldeiras a óleo BPF e a lenha. Da mesma forma que, o custo do combustível cavaco também foi superior quando comparado aos outros combustíveis utilizados. Já o custo para cada tonelada de vapor produzido foi menor na caldeira a lenha e a caldeira a óleo foi a que apresentou o maior custo de produção para cada tonelada de vapor.

Dessa maneira, mostra-se praticamente inviável a utilização de uma caldeira a óleo, pois o custo para cada tonelada de vapor produzido é muito alto, quando comparado aos custos observados para as caldeiras a biomassa. Comparando as caldeiras de biomassa, o custo do cavaco e custo da sua produção por tonelada de vapor é maior em relação a lenha, tornando-se menos vantajoso economicamente a utilização desta caldeira.

A caldeira a lenha foi a que obteve os menores custos total, do combustível por tonelada de vapor produzido, mostrando-se economicamente vantajoso o seu uso em empresas. No entanto, a utilização de uma caldeira a lenha dependerá das necessidades de cada empresa. Desse modo, faz-se necessário estudos que viabilizem os custos e ganhos obtidos com a implantação de cada modelo de caldeira.

Além disso, essa análise foi feita com base apenas na eficiência das caldeiras e em cada caso deve ser realizada uma análise complementar de forma a contemplar o custo da terra na região de implantação do projeto para a criação de pátio de armazenagem do combustível, bem como o custo do sistema de armazenamento de óleo combustível.

Avaliando economicamente dois modelos de caldeiras, uma a óleo e outra a cavaco, Balbinot et al. (2010), obtiveram um custo médio de produção por tonelada de vapor de R$ 8,47 para o cavaco e R$ 12,42 para o óleo, mostrando que a utilização da caldeira a cavaco é mais viável economicamente.

Comparando a queima de óleo BPF e de lenha em caldeiras, Caetano e Duarte Junior (2004), concluíram que óleo representa maior custo operacional para a empresa, e a lenha apesar de exigir maior mão de obra e maior espaço físico para armazenamento, ainda é o combustível mais barato.

Além de apresentar uma vantagem econômica sobre o óleo, a biomassa, tanto o cavaco quanto a lenha, está diretamente relacionada a outras vantagens ambientais e sociais, visto que é um combustível renovável, e se retirada de forma sustentável de florestas plantadas ou energéticas, pode suprir as demandas atuais e futuras.

6. CONCLUSÕES

- O espaçamento influenciou a produção de biomassa seca por hectare, a qual também teve diferença significativa entre os compartimentos da árvore;

- A densidade não se diferenciou conforme o espaçamento, somente entre as diferentes posições de amostragem ao longo do fuste;

- Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas não sofreram influência dos espaçamentos avaliados, foi observada diferença apenas entre os compartimentos casca, madeira e galhos + folhas;

- O poder calorífico apresentou diferença somente entre os compartimentos, sendo que os galhos + folhas apresentaram maior média;

- A utilização de uma caldeira a lenha mostrou-se economicamente viável quando comparada a outros modelos de caldeiras a cavaco e a óleo BPF.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a composição química da madeira de *E. benthamii*: teores de lignina, celulose e hemicelulose;

- Avaliar a qualidade do carvão vegetal de *E. benthamii* e as suas propriedades químicas, como: teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas;

- Para fins energéticos, implantar a espécie em espaçamentos menores aos estudados neste trabalho, para verificar se há influência deste sob as características químicas, físicas e energéticas de *E. benthamii*;

- Analisar a viabilidade econômica de projetos com a espécie.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR - 7190/97. Projeto de Estrutura de Madeira**. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112/86. Carvão vegetal: análise imediata**. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633/84. Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.

ABRAF – **Anuário estatístico da associação brasileira de produtores de floresta plantada.** Brasília: ABRAF, ano base 2012. 146p. 2013.

ABRAF: **Anuário estatístico da associação brasileira de produtores de floresta plantada.** Brasília: ABRAF, ano base 2011. 150p. 2012.

ALVES, I.C.N. **Potencial da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage visando à produção de celulose kraft**. 2010. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, A.M.; CARVALHO, L.M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. **Floram**, 5 (1), p. 24-42, 1998.

ANDRADE, E.N. **Instruções para a cultura do *Eucalyptus*.** São Paulo, 1936, 57p.

ARANTES, M.C. **Variação as características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden *x Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.** 2009, 137 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ARRUDA, M.Z. **Análise de combustíveis de caldeiras**. 2009. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.

BACCARIN, F.J.B. **Métodos para resgate, conservação e multiplicação em larga escala de matrizes de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage**. 2012. 77 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

BALBINOT, R.; WINCKLER, W.A.; MIRANDA, G.M.; SCHIRMER, W.N. Avaliação econômica e ambiental da substituição do óleo BPF por cavaco como combustível em caldeiras. **Revista Petro & Química**, ed. 323, 2010.

BALLONI, E.A.; SIMÕES, J.W. **O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais**. São Paulo, IPEF, 1980, p. 1-16. (Série técnica, IPEF, v.1, n.3).

BARCELLOS, D.C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BARCELLOS, D.C.; COUTO, L.C.; MÜLLER, M.D.; COUTO, L. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, v.2, n.2, p. 141-158, 2005.

BATISTA, D.C.; KLITZKE, R.J.; SANTOS, C.V.T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.4, p. 665-674, 2010.

BENIN, C.C. **Efeito do espaçamento na produção, variáveis dendrométricas e propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii***. 2014, 94p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, PR.

BENIN, C.C.; WIONZEK, F.B.; WATZLAWICK, L.F. Incremento anual em diâmetro e altura em plantios de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage sob diferentes espaçamentos. In: 4º Congresso Florestal Paranaense, 2012, Curitiba. **Artigos...** Curitiba: 2012.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

BERNARDO, A.; REIS, M.G.F.; REIS, G.G.; HARRISON, R.B. FIRME, D.J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, 104, p 1–13, 1998.

BRAND, M.A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010, 131p.

BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. **Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill Ex-Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento**. São Paulo, IPEF, 1971, p. 129-149. (Série técnica, IPEF, n.2/3).

BRITO, J.O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, v.21, n. 59, p. 185-193, 2007.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. São Paulo, IPEF, 1978, p. 63-70. (Série técnica, IPEF, n.16).

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto**. São Paulo, IPEF, 1977, p. 9-20. (Série técnica, IPEF, n.14).

CAETANO, L.; DUARTE JUNIOR, L.A. **Estudo comparativo da queima de óleo BPF e de lenha em caldeiras – estudo de caso**. Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2 p. 2004.

CALEGARI, L.; FOELKEL, C.E.B.; HASELEIN, C.R.; ANDRADE, J.L.S.; SILVEIRA, P. SANTINI, E.J. Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no sul do Brasil. **Biomassa & Energia**, v.2, n.1, p. 37-46, 5005.

CAPOTE, F.G. **Caracterização e classificação de co-produtos compactados da biomassa para fins energéticos**. 2012. 71 p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

CHAVES, A.M.B.; VALE, A.T.; MELIDO, R.C.N.; ZOCH, V.P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp*. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n.17, p. 533-542, 2013.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L**. 2005. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

CHOTCHUTIMA, S.; KANGVANSAICHOL, K.; TUDSRI, S.; SRIPICHITT, P. Effect of spacing on growth, biomass yield and quality of Leucaena (*Leucaena leucocephala*(Lam.) de Wit.) for renewable energy in Thailand. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, 3, p. 48-56, 2013.

CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.M.; YAMAMOTO, H.; CARVALHO, A.J.F. Determinação da análise imediata do eucalipto por termogravimetria. In: Congresso Florestal no Cerrado e 3º Simpósio sobre eucaliptocultura. 2013, Goiânia. **Resumos...** trab. 168, p. 341-342, Goiânia, 2013.

CINTRA, T.C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

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

CORDER, S.E. **Properties and uses of bark as an energy source**. Forest Research Laboratory, School of Forestry, Oregon State University, 21 p. 1976.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008, 733p.

COUTO, A.M.; PROTÁSIO, T.P.; REIS, A.A.; TRUGILHO, P.F. Amostragens longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus sp*. **Floram**, 19 (2), p. 184-193, 2012.

COUTO, C.M.; PILOTTO, M.V.T.; GATTO, D.A.; BELTRAME, R. Estimativa do poder calorífico de madeiras de *Acacia measrnsii* e *Eucalyptus grandis*. In: XXII Congresso de

Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. 2013, Pelotas. **Artigos...** Pelotas, 2013.

COUTO, H.T.Z.; BRITO, J.O.; TOMAZELLO FILHO, M. **Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de *Eucalyptus saligna***. São Paulo, IPEF, 1984, p. 19-23. (Série técnica, IPEF, n.26).

COUTO, L. **Influência do espaçamento no crescimento do *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida cultivado na região de Coronel Fabriciano – Minas Gerais**. 1977. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, MG.

DERMIBAS, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, 42, p. 1357-1378, 2001.

DERMIBAS, M.F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy Conversion and Management**, 50, p. 1746-1760, 2009.

DOAT, J.; PETROFF, G. La carbonisation des bois tropicaux. **Revue Bois el Forêls des Tropiques**, n.159, p.55-72, 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Mapa simplificado de solos do estado do Paraná**. Disponível em < http:/www.escola.agrarias.ufpr.br/arquivospdf/mapa_solos_pr.pdf>. Acesso em 24.09.2013.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013** - Ano base 2012. Rio de Janeiro, 283 p. 2013.

FEARNSIDE, P.M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, 50, p. 59-87, 1997.

FERREIRA, J.C.; FURTADO, T.S.; NEVES, M.D.; BRAND, M.A. Influência do teor de umidade no poder calorífico em diferentes idades e componentes de árvores de *Pinus taeda*. In: 1º Congresso Brasileiro sobre Floresta Energéticas. 2009, Belo Horizonte-MG. **Artigos...** Belo Horizonte, 2009.

FERREIRA, T.C. **Análise econômica de plantios de eucaliptos para produção de celulose**. 2001. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, MG.

FISHWICK, R. W. Estudos de espaçamentos e desbastes em plantações brasileiras. **Brasil Florestal**, v.7, n.26, p.13-23, 1976.

FOELKEL, C.E.B. Eucalipto no Brasil – história de pioneirismo. **Visão Agrícola 2**. 66-69 p., Jun/Dez, 2005.

FRANCISCO, R.P. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia**. 2012. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais, MG.

FURTADO, T.S.; FERREIRA, J.C.; BRAND, M.A.; NEVES, M.D. Correlação entre teor de umidade eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v.36, n.3, p. 577-582, 2012.

GARLIPP, R.; FOELKEL, C.E.B. O papel das florestas plantadas para atendimento das demandas futuras da sociedade. In: XIII Congresso Florestal Mundial/ FAO, 2009. Buenos Aires. **Artigos...** Buenos Aires, Argentina, 2009.

GIONGO, M.; SILVA, D.B.; KOEHLER, H.S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* engelm. aos 23 anos de idade. **J. Biotec. Biodivers.** v.2, n.3, p. 81-86, 2011.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; LUCIA, R. M. D.; SARTÓRIO, R. C. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.33, n.3, p. 501-509, 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, v.13, n.2, p. 167-175, 2003.

GRAÇA, M.E.C.; SHIMIZU, J.Y.; TAVARES, F.R. **Capacidade de rebrota e de enraizamento de *Eucalyptus benthamii***. 1999, p. 135-138. (Boletim de Pesquisa Florestal, n. 39).

GUIMARÃES NETO, R.M.; PIMENTA, A.S.; SILVA, M.L.; SOARES, N.S.; VITAL, B.R.; SILVA, J.C. Avaliação econômica e financeira de projetos de fornos dos tipos *container* industrial e retangular de 40 estéreos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.4, p. 709-715, 2007.

HARRY G.G.; FONTES J.M.; MACHADO C.C.; SANTOS S.L. Análise dos efeitos da eficiência no custo operacional de máquinas florestais. In: Anais do I Simpósio Brasileiro sobre exploração e transporte florestal, 1991, Belo Horizonte. **Artigos...** Belo Horizonte, 1991, p. 57-75.

HEGAZY, S.S.; AREF, I.M.; AL-MEFARREJ, H.; EL-JUHANY, L.I. Effect of spacing on the biomass production and allocation in *Conocarpus erectus* L. Trees Grown in Riyadh, Saudi Arabia. **Saudi Journal of Biological Sciences**, vol. 15, n. 2, p.315-322, 2008.

HIGA, R.C.V.; MORA, A.L.; HIGA, A.R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. 2000. 31 p. (Embrapa Florestas, Documentos, 54).

HIGA, R.C.V.; PEREIRA, J.C.D. **Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2003. 4 p. (Embrapa Florestas, Comunicado Técnico, 100).

Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**, 2000. Disponível em <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>. Acesso em 24.03.2014.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCER, R.H. **A Cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

LADEIRA, B. C. **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus spp.*, sob três diferentes espaçamentos, em uma sequência de idades**. 1999. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LATORRACA, J.V.F.; ALBUQUERQUE, C.E.C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v.7, n.1, p. 279-291, 2000.

LEÃO, R.M. **A floresta e o homem**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000, 448p.

LEITE, F.P.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SANS, L.M.A.; FABRES, A.S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v.21, n.3, p. 313-321, 1997.

LIMA, E.A.; SILVA, H.D.; LAVORANTI, O.J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesq. flor. bras**., Colombo, v.31, n.65, p. 09-17, 2011.

LIMA, R.; INOUE, M.T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARAÚJO, A.J.; MACHADO, S.A. Efeito do espaçamento no desenvolvimento volumétrico de *Pinus taeda* L. **Floram**, 20 (2), p. 223-230, 2013.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993, 301 p.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. BRDE/ IBPT/ UFPR, Editora Max Roesner, Curitiba, 350 p., 1968.

MACHADO, F.C.; GUERRA, S.P.S.; CERAGIOLI, N.; OGURI, G.; DENADAI, M.S. Influência do espaçamento na produtividade e alocação de biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis*. In: 7º Congresso Internacional de Bioenergia. 2012. São Paulo. **Artigos...** São Paulo, 2012.

MARCHIORI, J.N.; SOBRAL, M. **Dendrologia das Angiospermas** – Myrtales. Santa Maria, RS. Editora UFSM, 1997, 304p.

MARTINI, A.J. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 320p. Dissertação (Mestrado em História Social) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MIRANDA, G.M. **Análise econômica de dois sistemas de descascamento de madeira de eucalipto**. 2000. 45p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MORA, A.L.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo, SP, 2000, 112p.

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

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

NASCIMENTO, M.D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica**. 2007. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, SP.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, 199 p.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p. 115-127, 2005.

PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L. LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v.30, n.3, p. 411-420, 2006.

PALERMO, J.P.M.; LATORRACA, J.V.F.; REZENDE, M.A.; NASCIMENTO, A.M.; SEVERO, E.T.D.; ABREU, H.S. Análise da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista da Madeira**, versão online, ed. 99, 2006.

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

PAULESKI, D.T. **Influência do espaçamento sobre o crescimento e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L**. 2010. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS.

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

PEREIRA, J.C.D.; STURIONL J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** 2000, 114 p. (Embrapa Florestas, Documentos, 38).

PUENTES, R.S.E.S. **Expansão das florestas plantadas com fins energéticos no Brasil e sua influência nas emissões dos gases de efeito estufa** – GEE: análise de dois cenários futuros. 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

REIS, A.A.; MELO, I.C.N.A.; PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; CARNEIRO, A.C.O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Floram**, 19 (4), p. 497-505, 2012.

ROCHA, E.P.A.; SOUZA, D.G.; DAMASCENO, S.M. Estudo da viabilidade da utilização de briquete de capim como fonte alternativa de energia para queima em alto-forno. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. 2009. Minas Gerais. **Artigos...** Minas Gerais, 2009.

ROCHA, M.F.V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROCHA, M.P.; KLITZKE, R.J. **Energia da madeira**. Curitiba, FUPEF, 1998, 86 p. (FUPEF, série didática nº 03).

RONDON, E.V. Estudo de biomassa de *Tectona grandis* L.f. sob diferentes espaçamentos no estado de Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.3, p.337-341, 2006.

ROSA, C.A.B. **Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft**. 2003. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

ROWELL, R.M. (Ed**.) Handbook of wood chemistry and wood composites**. CRC Press, 2005, 487 p.

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

SCHNEIDER, P.S.P. **Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade em povoamentos de *Pinus taeda* L**. 2008. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS.

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

SCREMIN, A.L.T. **Estudo energético e fisicoquímico do carvão vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Guarapuava, PR.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. **Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal**. Piracicaba, IPEF, 1989, p. 1-22. (Série técnica IPEF, v. 6, n. 20).

SILVA, C.R.A.; GARRAFA, M.T.F.; NAVARENHO, P.L.; GADO, R.; YOSHIMA, S. Energia e Ambiente: A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 2, p. 25-36, 2005.

SILVA, D.A.; CARON, B.O.; BEHLING, A.; SOUZA, V.Q.; ELOY, E. Ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.9, p. 1588-1595, 2012.

SILVA, D.A.; MÜLLER, B.V.; KUIASKI, E.C.; CUNHA, A.B. Caracterização energética do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. In: 4º Congresso Florestal Paranaense, 2012, Curitiba. **Artigos...** Curitiba: 2012.

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

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

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia Florestal**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2005. 178p.

SILVA, S.V.K. **Produção de biomassa e quantificação de nutrientes em *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage sob diferentes densidades de plantio**. 2014. Trabalho não publicado.

SOUZA, M.M.; SILVA, D.A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R.C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba/PR, v.42, n.2, p. 325-334, 2012.

SOUZA, V.R.; CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L.E.G. **Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna***. São Paulo, IPEF, 1986, p. 65-72. (Série técnica, IPEF, n.33).

STURION, J.A.; PEREIRA, J.C.D.; ALBINO, J.C.; MORITA, M. **Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG**. Colombo, 1987, p. 28-38. (Boletim de Pesquisa Florestal, n.14).

THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. **Aspectos Climáticos de Guarapuava – PR**, Guarapuava: UNICENTRO, 2003, 105p.

TREVISAN, R.; DENARDI, L.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Efeito do desbaste e variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.40, n.95, p. 393-399, 2012.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 2 n. 1. p. 94-111. 1996.

VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; LEÃO, A.L. Quantificação e caracterização energética da madeira e a casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.1, p. 71-80, 2002.

VALERIO, A.F. Q**uantificação e modelagem da biomassa e carbono em plantações de *Pinus elliottii* Eng. com diferentes idades**. 2009. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Irati, PR.

VIDAL, A.C.F.; HORA, A.B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. BNDES Setorial 33, p. 261-314, 2011.

VIEIRA, E.H.F. **Produção de biomassa de *Eucalyptus spp*. sob diferentes manejos e espaçamentos.** 2011. 40 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES.

VILLELA, A.A.; FREITAS, M.A.V.; ROSA, L.P. **Emissões de carbono na mudança de uso do solo.** (Mudanças globais; v.2). Rio de Janeiro: Interciência, 2012, 210p.

VITAL, B.R.; MACIEL, A.S.; DELLA LUCIA, R.M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.4, p. 637-644, 2006.

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

WILCKEN, C.F.; LIMA, A.C.V.; DIAS, T.K.R.; MASSON, M.V.; FERREIRA FILHO, P.J.; DAL POGETTO, M.H.F.A. **Guia prático de manejo de plantações de eucalipto**. FEPAF - Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. Botucatu, SP, 2008, 25 p.

ZAGO, C.A.; WEISE, A.D.; HORNBURG, R.A. A importância do estudo de viabilidade econômica de projetos nas organizações contemporâneas. In: VI CONVIBRA – Congresso Virtual Brasileiro de Administração. 2009. São Paulo. **Artigos...** São Paulo, 2009.

ANEXO – Curriculum Vitae

Dados Pessoais

Nome: Francielle Brandalise Wionzek

Nascimento: 09/06/1990 – Guarapuava, Paraná – Brasil

Formação Acadêmica/ Titulação

2012-2014: Mestrado em Bioenergia. Bolsista Capes.

Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, Guarapuava, PR, Brasil.

Título: Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage.

Orientador: Luciano Farinha Watzlawick

2008-2011: Graduação em Ciências Ambientais.

Faculdades Guarapuava, Guarapuva, PR, Brasil

Título: Análise do Programa de Coleta Seletiva em um bairro do município de Guarapuava-PR.

Orientador: Bettina Heerdt.

Produção em C, T & A

Produção Bibliográfica

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1. Trabalho apresentado no 4º Congresso Florestal Paranaense, intitulado "Incremento anual em diâmetro a altura em plantios de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage sob diferentes espaçamentos". Curitiba, 2012.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

1. Resumo publicado no III SIEPE – Semana de Integração Ensino, Pesquisa e Extensão, com o título "Resposta à adubação de *Pinus taeda* L. no município de Guarapuava-PR". Guarapuava, 2013.

2. Resumo apresentado no IX Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, com o título "Grupos Ecológicos e Síndromes de Dispersão de Espécies Arbóreas em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista em Sistema Faxinal, no Centro Sul do Paraná". Ilhéus, 2013.

3. Resumo apresentado no IX Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, com o título "Caracterização do Potencial de uso de Gêneros Arbóreos em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista em Sistema Faxinal no Centro Sul Do Paraná". Ilhéus, 2013.

4. Resumo apresentado no 22 Encontro Anual de Iniciação Científica - 22 EAIC e 3 Encontro Anual de Iniciação Tecnológica e Inovação - 3 EAITI, com o título "Propriedades físicas da madeira de árvores jovens de *Eucalyptus benthamii*". Foz do Iguaçú, 2013.

Artigos aceitos para publicação

1. Artigo intitulado "Avaliações iniciais em plantios de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage implantados em diferentes espaçamentos" aceito na Revista Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia (online), 2014.

Bancas

Participação em bancas de trabalho de conclusão

Trabalhos de conclusão de curso de graduação

1. Participação em banca de Camila Malherbi Bortoluzzi, intitulada "Produção e avaliação das características energéticas de briquetes de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) Saint- Hilaire, 1820". Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Faculdade de Guairacá, 2013.

2. Participação em banca de Norma Regiane Winck Kubiak, intitulada "Caracterização morfológica de jabuticabeiras em diferentes em diferentes fases de desenvolvimento no município de Virmond, Paraná". Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Faculdade de Guairacá, 2013.