UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

DESEMPENHO DO PROCESSAMENTO DE ÁRVORES E POTENCIAL ENERGÉTICO DE COPRODUTO NA COLHEITA DE EUCALIPTO CLONAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ELOISE PRATES GORTE

IRATI-PR

2019

ELOISE PRATES GORTE

DESEMPENHO DO PROCESSAMENTO DE ÁRVORES E POTENCIAL ENERGÉTICO DE COPRODUTO NA COLHEITA DE EUCALIPTO CLONAL

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para a obtenção do título de Mestra.

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes - UNICENTRO
Orientador

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva - UFPR
Coorientador

Dra. Carla Krulikowski Rodrigues Pelissari - UNICENTRO
Coorientadora

IRATI-PR
2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE/UNICENTRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPESP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS - PPGF

TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 136

Eloise Prates Gorte

"Desempenho do processamento de árvores e potencial energético de coproduto na colheita de eucalipto clonal"

Dissertação aprovada em 28/08/2019, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Dr. Jean Alberto Sampietro
Universidade do Estado de Santa Catarina
Primeiro Examinador

Dr. Dimas Agostinho da Silva
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador

Dr. Éverton Hillig
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Terceiro Examinador

Dr. Eduardo da Silva Lopes
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2019

Impresso com recursos públicos por amores na UNICENTRO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente, por me dar tudo que preciso para correr atrás dos meus objetivos.

Aos meus pais Josélio e Juscenei e ao meu irmão Elton, por todo o carinho, auxílio e incentivo ao longo de todos os anos desta caminhada e, principalmente, pelos exemplos de caráter e força.

Ao Rogers Gorte, meu parceiro de vida, por sempre estar ao meu lado.

Ao professor Eduardo da Silva Lopes, pela orientação, ensinamentos e confiança durante o percurso do mestrado.

Ao Dimas Agostinho da Silva e à Carla Krulikowski Rodrigues Pelissari, coorientadores, pelo apoio, conselhos e aprendizado no desenvolvimento deste trabalho.

À Klabin S/A pela concessão de suas áreas e equipamentos, permitindo a realização da pesquisa. De forma especial, agradeço aos colegas da Klabin Cristiano Miers, Gustavo Castro, Claudio Ortolan e Alexandre Andrade, pelo apoio neste projeto, incentivo e pela contribuição para minha carreira profissional.

Aos colegas Matheus Kaminski Candido da Silva pelo seu comprometimento na coleta dos dados em campo, assim como, Rudson Oliveira e Fernando Ferraz pelos ensinamentos e auxílio nas análises realizadas no laboratório de Bioenergia da Universidade Federal do Paraná - UFPR.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO e a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pelos ensinamentos repassados ao longo do Curso.

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta conquista.

RESUMO

Eloise Prates Gorte. **Desempenho no processamento de árvores e potencial energético de coproduto na colheita de eucalipto clonal.**

A necessidade da produção de energia renovável pode influenciar diretamente no manejo das florestas plantadas, por meio de multiprodutos, como madeira para fins industriais e energéticos. Neste contexto, objetivou-se avaliar a operação de processamento de árvores e o potencial energético dos coprodutos produzidos a partir de diferentes diâmetros limites da altura comercial em povoamentos clonais de eucalipto. A pesquisa foi realizada em uma empresa florestal na região dos Campos Gerais, Paraná, Brasil, em povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna,* ambos com 7 anos de idade e submetidos ao corte raso. Foram estudados quatro tratamentos definidos pelos diâmetros limites das alturas comercial entre celulose e coprodutos, sendo: T1-8 cm, T2-10 cm, T3-12 cm e T4-14 cm, bem como árvores inteiras para fins energético (T5-FT). Iniciamente, no capitulo I, realizou-se a avaliação do desempenho operacional e da qualidade da operação de processamento das árvores com uso do processador florestal, por meio de um estudo de tempos e movimentos. Em seguida, no capitulo II, procedeu-se à análise dos parâmetros energéticos dos coprodutos gerados do processamento das árvores, que foram transformados em cavacos e levados ao laboratório para determinação da umidade, química imediata e poder calorífico. Os resultados mostraram que o desempenho operacional do processador florestal foi superior no diâmetro limite de 10 cm, bem como apresentou a melhor qualidade nos produtos produzidos. Quanto as características energéticas, verificou-se que o *E. saligna* foi o clone mais susceptível aos tratamentos, devido as maiores variações entre participações dos componentes das árvores (madeira, casca, galhos e folhas), sendo as melhores características nos diâmetros acima de 10 cm. Entretanto, o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* apresentou parâmetros energéticos constantes nos diferentes diâmetros, devido a pouca variação entre a participação dos componentes das árvores. Portanto, de maneira geral, os coprodutos apresentaram melhores parâmetros de qualidade quando apresentaram diâmetros iguais ou superiores a 10 cm.

Palavras-chave: Biomassa; Colheita de Madeira; Energia; Planejamento.

ABSTRACT

Eloise Prates Gorte. **Performance in tree processing and energy potential of co-product in the harvest of clonal eucalyptus.**

The need for renewable energy production can directly influence the management of planted forests, through multi-products such as wood for industrial and energy purposes. In this context, the aim was to evaluate the tree processing operation and the energy potential of coproducts produced from different commercial height limit diameters in eucalyptus clonal stands. The research was carried out in a forestry company in the region of Campos Gerais, Paraná, Brazil, in clonal stands of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna*, both at 7 years-old under clearcutting. Four treatments defined by the commercial heights limits between pulp and coproducts were studied: T1-8 cm, T2-10 cm, T3-12 cm and T4-14 cm, as well as full trees for energy purposes (T5-FT). Initially, in Chapter I, the operational performance and quality assessment of the tree processing operation using the forest processor was performed, through a time-motion study. Then, in chapter II, the analysis of the energetic parameters of the coproducts generated from the processing of the trees, which were transformed into chips and taken to the laboratory for the determination of moisture, immediate chemistry and calorific power was carried out. The results showed that the operational performance of the forest processor was superior in the limit diameter of 10 cm, as well as presenting the best quality in the products produced. As for the energetic characteristics, it was found that *E. saligna* was the most susceptible clone to the treatments, due to the greater variations between the shares of the tree components (wood, bark, branches and leaves), being the best characteristics in the diameters above 10 cm. However, the hybrid *E. urophylla* x *E. grandis* presented constant energetic parameters in the different diameters, due to little variation between the participation of the tree components. Therefore, in general, the coproducts presented better quality parameters when they presented diameters equal or superior to 10 cm.

Keywords: Biomass; Wood Harvest; Energy; Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta brasileira de energia elétrica por fonte..... 5
Figura 2. Subsistema com cavaqueamento nas margens de estradas. 9
Figura 3. Subsistema com cavaqueamento em pátios intermediários..... 9
Figura 4. Amostragem dos diâmetros limite da altura comercial entre celulose e coprodutos com suta dendrometrica. a) 8 cm; b) 10 cm; c) 12 cm; e d) 14 cm. . 25
Figura 5. Esquema ilustrativo dos tratamentos estudados com o diâmetro limite. 26
Figura 6. Processamento de madeira para celulose e os coprodutos para energia. 27
Figura 7. Tempo médio de processamento das toras de celulose nos diferentes diâmetros limites avaliados. 33
Figura 8. Produtividade no harvester nos diferentes diâmetros limites avaliados. 34
Figura 9. Participação percentual da biomassa seca por hectare entre celulose e coprodutos para energia nos tratamentos avaliados; (a) *E. urophylla x E. grandis;* e (b) *E. saligna*. 35
Figura 10. Distribuição das classes de diâmetro limite entre celulose e coprodutos..... 39
Figura 11. Cavaqueamento dos coprodutos avaliados..... 52
Figura 12. Umidade dos coprodutos após 60 dias no campo..... 57
Figura 13. Teor de materiais voláteis (a), carbono fixo (b) e cinza (c) dos coprodutos..... 58
Figura 14. Compartimentos das árvores e teor de cinzas dos coprodutos de *E. urophylla* × *E. grandis* (a) e *E. saligna* (b). 59
Figura 15. Valores de poder calorífico superior (a) e inferior (b) dos coprodutos.. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dentrométricas dos povoamentos. 24
Tabela 2. Especificações técnicas da máquina base e implemento utilizados. . 25
Tabela 3. Escala Sigma utilizada na avaliação de qualidade..... 30
Tabela 4. Valores médios, em segundos, dos tempos consumidos pelos elementos parciais e totais do ciclo operacional do processador *harvester.* 32
Tabela 5. Produtividade do harvester no processamento de povoamentos de eucaliptos nos diferentes diâmetros limites avaliados. 34
Tabela 6. Valores médios dos diâmetros limite dos coprodutos. 36
Tabela 7. Valores médios dos comprimentos das toras processadas em cada tratamento estudado..... 39
Tabela 8. Valores médios dos comprimentos das toras processadas para celulose nos povoamentos estudados..... 39
Tabela 9. Características dos povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*. 50
Tabela 10. Classes de diâmetro e amostragem necessária de árvores em povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*. 51
Tabela 11. Biomassa seca de coprodutos de povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*. 56
Tabela 12. Potencial de energia de coprodutos por unidade de área (ha) em dois povoamentos clonais de *Eucalyptus*. 62

SUMÁRIO

RESUMO i
ABSTRACT ii
LISTA DE FIGURAS iii
LISTA DE TABELAS iv
1 INTRODUÇÃO GERAL 1
2 OBJETIVO 3
3 REVISÃO DE LITERATURA 4
3.1 Setor Florestal Brasileiro 4
3.2 Matriz Energética Brasileira 5
3.3 Biomassa 6
3.4 Colheita de Madeira 7
3.5 Sistemas de Cavaqueamento 8
3.6 Qualidade dos Produtos e Coprodutos da Colheita de Madeira 10
3.6.1 Acurácia na Medição das Toras 10
3.6.2 Características Energéticas dos Coprodutos 10
3.7 Biomassa de *Eucalyptus* Para Geração de Energia 12
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 14
CAPITULO 1 19
DESEMPENHO OPERACIONAL DO PROCESSADOR FLORESTAL E QUALIDADE DOS PRODUTOS NA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTOS CLONAIS DE EUCALIPTO 19
1 INTRODUÇÃO 22
2 MATERIAL E MÉTODO 24
2.1 Área de Estudo 24
2.2 Características dos Povoamentos 24
2.3 Sistema de Colheita e Processamento da Madeira 24
2.4 Diâmetro Limite da Altura Comercial entre Celulose e Coprodutos 25
2.5 Comprimento das Toras 26
2.6 Descrição dos Tratamentos 26
2.7 Análise Operacional do Processamento 27
2.7.1 Analise do Ciclo Operacional 27
2.7.2 Análise da Eficiência Operacional 27
2.7.3 Análise da Produtividade 28
2.7.4 Comprimento das Toras 28
2.8 Indicadores de Qualidade 29

2.8.1 Seis Sigmas 29
2.8.2 Histograma 30
2.9 Participação percentual da produção de celulose e energia 31
2.10 Análise Estatística 31
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 32
3.1 Análise Técnica 32
3.2 Participação percentual da biomassa seca entre celulose e energia ... 34
3.3 Análise de Qualidade dos Diâmetros Limites 36
3.4 Análise de Qualidade dos Comprimentos das Toras 37
4 CONCLUSÕES 41
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 42
CAPITULO 2 45
CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL ENERGÉTICO DOS COPRODUTOS DA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTOS CLONAIS DE EUCALIPTO . 45
1 INTRODUÇÃO 48
2 MATERIAL E MÉTODOS 50
2.1 Área de estudo 50
2.2 Inventário Florestal e quantificação da biomassa 50
2.3 Sistemas de colheita e cavaqueamento 52
2.4 Análise dos Parâmetros Energéticos 52
2.4.1. Umidade 52
2.4.2 Análises Química Imediata 53
2.4.3 Poder Calorifico Superior e Inferior 54
2.5 Energia Potencial da biomassa seca e úmidapor Unidade de Área 54
2.6 Análises estatísticas 54
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 56
4 CONCLUSÕES 63
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64
CONSIDERAÇÕES FINAIS 67
RECOMENDAÇÕES 68

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os povoamentos clonais de eucalipto no Brasil apresentaram franca expansão nos últimos anos, totalizando, em 2017, em torno de 7,8 milhões de hectares plantados. Além disso, destaca-se que o país apresenta elevada produtividade em seus povoamentos se comparada aos demais países, com incremento médio anual de aproximadamente 36 m^3/ha ao ano e com rotação entre 4 e 7 anos (IBÁ, 2017).

Tais povoamentos proporcionam um grande número de produtos destinados às industrias de base florestal, com ênfase para a serraria, laminação, celulose e energia (JARDIM et al., 2017; JESUS et al., 2017; MÜLLER et al., 2017). Dentre tais produtos, destacam-se a produção de madeira para produção de celulose e a biomassa residual da colheira da madeira para energia, pois o país detém uma produção anual de 18,8 milhões de toneladas de celulose, sendo 70% destinadas à exportação; bem como, são gerados em torno de 67,5 milhões de gigajoules (GJ), em que grande parte é consumida pelo próprio setor florestal, enquanto 13,9 milhões de GJ são vendidos para a rede pública (IBÁ, 2017).

Como a grande maioria da produção florestal brasileira é direcionada à produção de celulose e papel, Hunt et al. (2016) alertam que o mercado mundial está alcançando o seu limite, pois a demanda tende a diminuir com o aumento de serviços digitais. Além disso, Hora (2017), sugere que a produção de energia originada da biomassa florestal pode ser uma alternativa de mercado interessante para as indústrias de celulose e papel. Entretanto, a modificação do principal mercado consumidor pode proporcionar a necessidade do replanejamento do manejo florestal para a obtenção de multiprodutos, com sortimentos de toras destinados ao mercado de celulose e papel, e a biomassa para energia, bem como pelas próprias florestas energéticas cuja biomassa é totalmente direcionada para produção energia.

Tal modificação no manejo florestal pode, ainda, afetar diretamente as operações florestais, proporcionando o redimensionamento de máquinas de colheita da madeira, de cavaqueamento e de transporte dos produtos e coprodutos. Ao passo que, a biomassa para fins energéticos pode apresentar variação da qualidade, com destaque aos parâmetros químicos, como teores de

materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, bem como o poder calorífico superior e inferior, devido às diferentes proporções de componentes das árvores presentes na biomassa.

A modificação do diâmetro limite da altura comercial entre celulose e energia ou a decisão pela condução de florestas energéticas poderá afetar diretamente os alimentadores de rosca dos reatores das caldeiras de força. Afinal, sabe-se que quando as características da biomassa apresentam maior quantidade de pós finos, podem proporcionar o intertravamento da rosca alimentadora (RACKL; GÜNTHNER, 2016), bem como o aumento do material lenhoso na mistura com materiais finos pode evitar tais problemas (DAI et al., 2012).

Diante disso, esta pesquisa foi motivada por problemas que ocorreram na operação dos alimentadores de uma das caldeiras de uma empresa de celulose e papel no estado do Paraná. Considerando que a literatura descreve que as ocorrências de intertravamento de alimentadoras parafusos são causadas por materiais muito finos, cinzas e umidade, buscou-se então solucionar tal problema por meio da melhoria da qualidade dos coprodutos (biomassa residual) da colheita de madeira.

Inicialmente foi testado por algum tempo o uso de material proveniente somente do gênero *Pinus* e de árvores inteiras trituradas, sendo os problemas sanados. Porém, como a demanda de biomassa pela indústria é muito superior à oferta de coprodutos de *Pinus*, o uso de árvores inteiras apresentou custos elevados, e o uso de óleo de baixo ponto de fluidez (BPF) que podem aumentar em até cinco vezes o custo da produção de energia (ORTOLAN et al., 2006), buscou-se a melhoria da qualidade dos coprodutos da colheita da madeira em povoamentos de eucalipto.

Dentro deste contexto, esta pesquisa teve como hipótese de que por meio da variação do diâmetro limite da altura comercial entre celulose e energia possibilitará a melhoria da qualidade do material para aproveitamento energético na indústria, sendo a pesquisa dividida em dois capítulos: Capítulo 1 - Desempenho operacional do processador florestal e qualidade dos produtos na colheita de madeira em povoamentos clonais de eucalipto; e, Capítulo 2 - Caracterização e potencial energético dos coprodutos da colheita de madeira em povoamentos clonais de eucalipto.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a operação de processamento de árvores e os índices de qualidade energética de coprodutos produzidos a partir de diferentes diâmetros limite da altura comercial entre celulose e coprodutos em povoamentos clonais de eucalipto.

Especificamente, objetivou-se:

a) Avaliar o desempenho operacional do processador florestal no processamento de árvores em diferentes diâmetros limite da altura comercial entre celulose e coprodutos;

b) Avaliar a qualidade da operação de processamento de árvores por meio dos produtos produzidos para celulose e diâmetro limite de coprodutos;

c) Caracterizar os índices de qualidade energética dos coprodutos produzidos na colheita de madeira em povoamentos clonais de eucalipto nos diferentes diâmetros limites da altura comercial; e

d) Estimar o potencial energético dos coprodutos da colheita de madeira em povoamentos clonais de eucalipto por unidade de área.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Setor Florestal Brasileiro

Mundialmente, o setor de base florestal é responsável pelo fornecimento de energia e matéria-prima para as indústrias de transformação e construção civil. Logo, o Brasil se destaca pelo abundante recurso florestal e extensas florestas plantadas que totalizam aproximadamente 7,8 milhões de hectares, compostas, predominantemente pelos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* (IBÁ, 2017).

Essas florestas contribuem com pouco mais de 3% ao mercado mundial de produtos florestais (US$ 230 bilhões em 2015) (FAO, 2017). Entretanto, entre os produtos florestais, o segmento de celulose é muito competitivo no Brasil (ROSSATO et al., 2018), pois representa 34% da produção de árvores plantadas, e destes, mais de 70% são destinadas à exportação (IBÁ, 2017), com dominância da celulose de fibras curtas de eucalipto (CNI, 2016).

O sucesso global da silvicultura brasileira é resultado da alta produtividade de suas florestas plantadas, com uma produtividade média de 36 m³/ha ao ano das plantações de eucalipto e 31 m³/ha ao ano das plantações de pinus (IBÁ, 2017). Logo, ao fazer a projeção para 2050, estima-se que 15 milhões de hectares deverão estar ocupados por florestas plantadas para atender a demanda por recursos de base florestal.

Importante também destacar os benefícios sociais econômicos e ambientais no setor de florestas plantadas, pois este contribui com 6,2% do PIB industrial do país (IBÁ, 2017), estimando que o número de postos de trabalhos, diretos e indiretos, tenha sido na ordem de 3,7 milhões, em que a renda gerada pelo setor foi de aproximadamente R$ 10 bilhões em arrecadação de tributos ao país e a receita bruta na ordem de R$ 73 bilhões.

As florestas plantadas pelo setor oferecem diversos serviços ambientais, como a regulação dos ciclos hidrológicos, o controle da erosão e da qualidade do solo, a conservação da biodiversidade, a provisão de oxigênio para o planeta, e a inegável contribuição na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Por sua relevância para o desenvolvimento social, ambiental e econômico nacional, o setor tem investido também para transformar resíduos dos processos

industriais em produtos inovadores, renováveis e que contribuem para o fortalecimento de uma economia de baixo carbono.

3.2 Matriz Energética Brasileira

O Brasil dispõe de uma matriz energética predominantemente renovável, sendo que aproximadamente 83% da oferta interna de eletricidade é advinda de fonte hidráulica, de biomassa, eólica e solar (Figura 1) (EPE, 2019). Entretanto, as hidrelétricas são sensíveis aos períodos de estiagem, e consequentemente, a política energética brasileira prevê a diversificação de suas fontes, aproveitando as características regionais, como a biomassa florestal (HUNT et al., 2016).

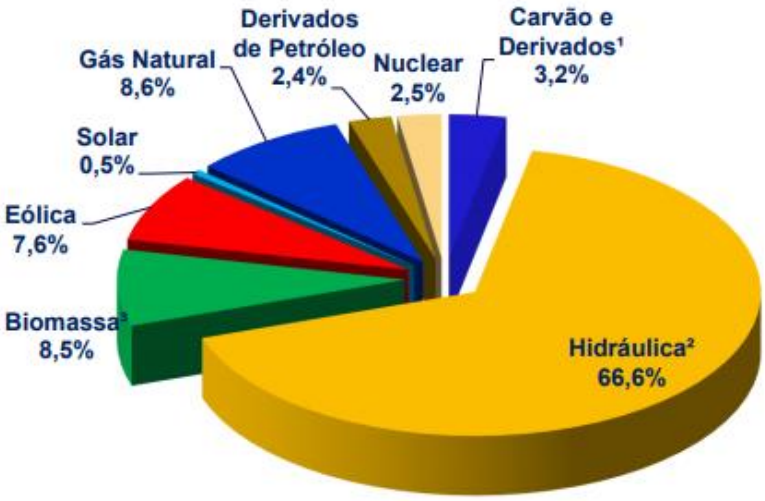


Figura 1. Oferta brasileira de energia elétrica por fonte.
Fonte: EPE (2019).

Como o país apresenta grande vocação florestal devido às extensões territoriais e ao volume de produção de madeira, este destaca-se no potencial de oferta e no uso da biomassa florestal como fonte de energia. Entretanto, para que isso seja ampliado e aproveitado é necessário que seja melhor explorado. Dentro deste contexto, pode-se mencionar que o setor florestal ao produzir madeira, gera uma grande quantidade de resíduos (troncos, galhos, casca, folhas, acículas) que podem ser melhor aproveitados como fonte de energia (CENBIO, 2003). Consequentemente, os estados com maior quantidade de reflorestamento, como Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Mato Grosso

do Sul, apresentam maior potencial para geração de energia a partir da biomassa florestal.

3.3 Biomassa

Entende-se por biomassa, todo material orgânico proveniente de espécies vegetais, que captam e armazenam energia solar por meio da fotossíntese, convertendo-a em formas úteis de energia, como calor, eletricidade e combustíveis líquidos (TOKLU, 2017). Dentre as diversas fontes de biomassa existente, insere-se os materiais lignocelulósicos, como a biomassa florestal que pode ser proveniente da colheita de madeira, dos resíduos do processamento da madeira nas indústrias ou mesmo procedentes de florestas energéticas (LAMERS et al., 2012; GUO et al., 2015).

O aumento do interesse na utilização de biomassa pelas empresas, deve-se ao apoio governamental ao uso de fontes renováveis, que se dá principalmente pelos aspectos ambientais quando comparados aos recursos não renováveis (ZABANIOTOU et al., 2014). Além disso, a biomassa florestal possui diversas características favoráveis, como a diversificação da matriz energética, a geração do balanço neutro entre emissão e geração de poluentes, a geração de emprego e renda, bem como a disponibilidade de tecnologia já desenvolvida para a conversão da biomassa em energia com elevada eficiência (VASSILEV et al., 2015).

Segundo Tavares (2014), o Brasil possui 500 milhões de toneladas de resíduos lignocelulósicos oriundos do setor agrossilvipastoril, além de matérias-primas de outras atividades. Entretanto, ao analisar somente os dados das colheitas de eucalipto e pinus, com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), a quantidade de resíduos produzidos é estimada em mais de 6 milhões de metros cúbicos (BONASSA et al., 2018).

O termo resíduo da colheita florestal para mencionar a biomassa para fins energéticos é muito empregado na literatura (SOUZA et al., 2012; SANTIAGO; REZENDE, 2014). Entretanto, tal termo é compreendido quando a biomassa permanece na área para auxiliar na conservação do solo e sem fins comerciais (SZYMCZAK et al., 2014; JESUS et al., 2017). Por isso, ao empregar tais materiais como fonte de energia, pode-se propor a modificação deste termo para

coprodutos; visto que os plantios florestais geram multiprodutos (KOHLER et al., 2015), como celulose e energia, podendo ser considerado como produto principal e secundário, respectivamente.

3.4 Colheita de Madeira

A colheita de madeira refere-se às operações que são realizadas no interior da floresta, com objetivo de preparar e levar a madeira até o local de transporte, por meio do uso de técnicas e padrões estabelecidos, para então transformá-la em produto final (TANAKA, 1986). Trata-se da parte mais importante para o setor produtivo do ponto de vista técnico-econômico, representando 50% ou mais dos custos da madeira posto fábrica, e sendo composta pelas etapas corte (derrubada, desgalhamento, descascamento e traçamento); e extração realizada na forma de baldeio, arraste ou suspenso (MACHADO et al., 2014).

O sistema de colheita da madeira é definido como um conjunto de atividades integradas entre si, que proporcionam um fluxo constante e visa a sua máxima utilização, evitando a ocorrência de pontos de estrangulamento das operações (MACHADO et al., 2014). Cada sistema de colheita da madeira tem as suas etapas de produção definidas de acordo com os tipos de equipamentos empregados na operação. Esses são classificados, segundo FAO (1977), em cinco diferentes sistemas, conforme a característica da madeira na fase de extração:

a) Sistema de toras curtas (cut-to-length): Neste sistema, a árvore é derrubada e processada no interior do povoamento, e em seguida, a madeira é extraída para a margem do talhão ou pátio temporário na forma de toras, com até seis metros de comprimento, entretanto, há tendência de aumentar o comprimento das toras, devido ao avanço tecnológico das máquinas;

b) Sistema de toras longas (tree-length): Neste sistema, as árvores são derrubadas, desgalhadas e destopadas no interior do talhão, e em seguida, a madeira na forma de toras longas ou fuste é arrastada para a margem do talhão ou pátio temporário para a execução do processamento final;

c) Sistema de árvores inteiras (full-tree): Neste sistema, as árvores são derrubadas no interior do talhão, sendo em seguida, extraída para a margem do talhão ou pátio intermediário, onde ocorre o processamento final da árvore;

d) Sistema de árvores completas (whole-tree): Neste sistema, a árvore é arrancada com parte de suas raízes e extraída para a margem do talhão ou pátio intermediário, onde ocorre o processamento final da árvore; e

e) Sistema de cavaqueamento (chipping): Neste sistema, as árvores são convertidas em cavacos, sendo posteriormente transportados para o pátio de estocagem temporário ou diretamente para a planta indústrial.

3.5 Sistemas de Cavaqueamento

O cavaqueamento pode ser definido como a redução do material lenhoso em partículas menores, ou seja, a transformação da biomassa em cavacos, com objetivo de melhorar o manuseio e garantir tamanho adequado das partículas e homogeneização para conversão energética. Para a sua execução, existem diferentes modelos de cavaqueadores sob diferentes tamanhos, sendo os maiores capazes de produzir cavacos em áreas com grande quantidade de biomassa (LEINONEN, 2004).

Os cavaqueadores são classificados em dois tipos: picadores e trituradores. A escolha depende das dimensões e da quantidade de biomassa florestal a ser processada, bem como da uniformidade desejada (CHRISTOPHERSON et al., 1993). Picadores de facas ou lâminas, geralmente são empregados quando se deseja alta velocidade e uniformidade de cavacos em formato e dimensões (POTTIE; GUIMIER, 1985). Já os picadores de disco são indicados para biomassa homogênea, como as toras, enquanto que os picadores de tambor são indicados para materiais heterogêneos, como para o processamento de resíduos da colheita de madeira (ALAKANGAS et al., 1999).

Os trituradores são compostos por martelos, que tem a função de quebrar a madeira para geração de cavacos. Esses equipamentos são mais robustos e suportam a presença de materiais sólidos, como areia e pequenas pedras. Entretanto, esses equipamentos apresentam melhor desempenho quando os materiais estão secos, pois apresentam menor consumo de energia (POTTIE; GUIMIER, 1985).

Dentre os subsistemas de cavaqueamento existentes, as empresas florestais brasileiras, geralmente, empregam o cavaqueamento na margem das estradas ou em pátios intermediários. Nessas situações, os coprodutos destinados à energia ficam dispostos na margem do talhão, onde permanecem estocados para a perda de umidade. O cavaqueamento pode ser realizado por cavaqueadores móveis, sendo os cavacos alocados diretamente em caminhões containers (Figura 2).

Figura 2. Subsistema com cavaqueamento nas margens de estradas.

Fonte: Kallio e Leinonen (2005).

Quando os resíduos são estocados em pátios intermediários para a perda de umidade, estes são empilhados com o auxílio de uma atividade adicional, o baldeio de resíduos (Figura 3). Após a perda de umidade, o cavaqueamento recomendado é o de maior capacidade produtiva, visto que é o subsistema mais adequado para abastecer grandes unidades consumidoras.

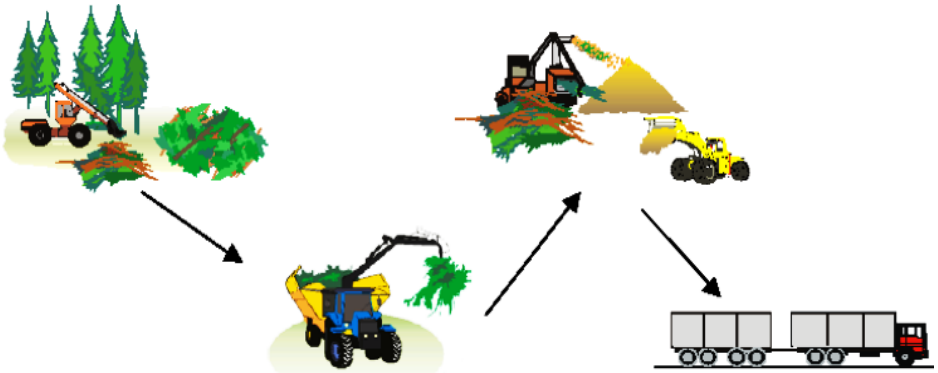


Figura 3. Subsistema com cavaqueamento em pátios intermediários.

Fonte: Ranta et al. (2001).

3.6 Qualidade dos Produtos e Coprodutos da Colheita de Madeira

3.6.1 Acurácia na Medição das Toras

Muitos autores relatam que um dos parâmetros de qualidade da colheita de madeira de grande relevância é o comprimento das toras obtidas na operação de processamento (FIEDLER et al., 2013; MEDERSKI et al., 2018; NADOLNY et al., 2019). Logo, para garantir a qualidade nessa operação, emprega-se o processador florestal *harvester*, visto que seu implemento possui ferramentas que auxiliam no controle de medição das toras, como os rolos alimentadores, as facas desgalhadoras com sensores de medição de diâmetro, e o disco medidor de comprimento (DIETZ; URBANKE, 2013).

A garantia das dimensões corretas no comprimento das toras auxiliam na otimização das operações de extração e transporte da madeira. Entretanto, alguns autores como Nieuwenhuis e Dooley (2006) e Mederski et al. (2018), relatam que, ao processar madeira destinada para celulose utilizando o *harvester*, obtiveram a maior percentagem de erros causado pela maior quantidade de galhos neste sortimento e pela perda de contato com as ferramentas do implemento, devido ao menor diâmetro do fuste.

Vale destacar que, durante a atividade de processamento da madeira em povoamentos de multiprodutos não é necessário somente garantir a qualidade da madeira, pois é essencial também garantir o diâmetro limite entre a altura comercial das toras e de coprodutos destinados à energia.

3.6.2 Características Energéticas dos Coprodutos

A qualidade de combustível adequada é essencial para a combustão de cavacos de madeira para garantir a baixa emissão de gases poluentes e evitar distúrbios da caldeira como o intupimento de roscas transportadoras (COLIN et al., 2015; RACKL; GÜNTHNER, 2016). Parâmetros relevantes de combustível incluem as suas características físicas, como umidade, massa e quantidade de pós finos nos cavacos, e também a composição química do combustível (DAI et al., 2012; RACKL; GÜNTHNER, 2016).

3.6.2.1 Características Físicas

A umidade pode ser considerada como uma das características mais relevantes ao se utilizar materiais lignocelulósicos para a geração de energia. No aspecto operacional, o aumento da umidade acentua a tendência de bloquear o sistema de alimentação de biomassa nos reatores, especialmente para partículas finas e longas (MATTSSON et al., 1990; 1997; 2003).

Diversos trabalhos, como Brand et al. (2012) e Oro et al. (2018), foram realizados para descrever a perda de umidade de biomassa florestal em função do tempo de estocagem. Entretanto, Dai et al. (2012) mencionam que é necessária uma compreensão da umidade, incluindo sua mudança em função do tempo e condições ambientais, a fim de estimar as propriedades de fluxo e para projetar um sistema de alimentação do reator de forma eficaz.

Massa e distribuição de tamanho das partículas também são parâmetros essenciais para avaliar a qualidade dos cavacos, pois Dai et al. (2012) e Rackl e Günthner (2016) relatam que, quanto maior a quantidade de pós finos na composição da biomassa, maior a probabilidade de intertravamento e atrito na alimentação do reator da caldeira. Isso, deve-se a interação entre as partículas, quando somadas a sua forma, tamanho, umidade e compressibilidade dentro do sistema de alimentação. Para evitar esse problema, Dai et al. (2012) recomendam o uso de misturas de diferentes biomassas, com tamanhos de partículas diferentes, assim como a programação adequada de secagem da matéria-prima.

Outra característica de grande relevância é o nível de contaminantes na biomassa, que não é uma propriedade verdadeira do material, porém, deve ser considerada, uma vez que influencia significativamente na alimentação de biomassa no reator (DAI et al., 2012). Os principais contaminantes são pedras, sujeitas, metais e outros materiais não combustíveis e rígidos que se misturam na colheita e transporte. Tais contaminantes devem ser eliminados, e para isso, existem diversos tipos de equipamentos disponíveis no mercado para a remoção de contaminantes da biomassa.

Dentro deste contexto, descataca-se que as características da biomassa empregada como matéria prima em caldeiras devem estar alinhadas ao seu projeto, bem como, deve ser realizada a correta operação no processo de

alimentação do reator (DAI et al., 2012). Afinal, sabe-se que quando empregado o alimentador de parafuso, a biomassa florestal pode apresentar problemas de intertravamento, sendo que tal problema poderá ser solucionado através de um projeto adequado de cavaqueamento e alimentação da caldeira, ou apenas revertendo brevemente a rotação do parafuso alimentador para interromper os bloqueios.

3.6.2.2 Características Químicas

As características químicas da biomassa podem ser obtidas por meio da análise química imediata, cujos resultados fornecem os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias que se desprendem da madeira em forma de gases durante a queima. As cinzas correspondem aos componentes que não entram em combustão, ficando na forma sólida, e ainda, são indesejáveis para uso energético (CHAVES et al., 2013). Já, o carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente na biomassa após degradação térmica, enquanto o teor de cinzas, refere-se aos componentes inorgânicos presentes na biomassa.

Tais características químicas afetam diretamente na quantidade de energia liberada, que pode ser expressa pelo poder calorífico superior, sendo o resultado da combinação entre os teores de carbono fixo e materiais voláteis. No poder calorífico superior, a água é formada durante a combustão através da reação entre o hidrogênio elementar da biomassa e o oxigênio, sendo condensada e seu calor latente recuperado e somado a energia mensurada. Para isso, torna-se interessante calcular o poder calorífico inferior, cujo calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor (CINTRA, 2009).

3.7 Biomassa de *Eucalyptus* Para Geração de Energia

Diversos trabalhos sobre quantificação de biomassa de espécies do gênero *Eucalyptus,* bem como a caracterização energética dos componentes das árvores (madeira, casca, galhos e folhas) foram realizados (ELOY et al., 2016; SALVADOR et al., 2016; SIMETTI et al., 2018). Simetti et al. (2016), ao

avaliar as características energéticas de *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla* aos seis anos de idade, mostraram que o poder calorífico superior é maior nas folhas, seguida da madeira, galhos e casca, enquanto que o teor de cinzas é superior na casca, galhos e folhas.

Para Eloy et al. (2016), ao estudarem as características energéticas de madeira, casca, galhos e folhas de *E. grandis*, em diferentes espaçamentos, encontraram poder calorífico superior que variou entre 3.805 e 5.013 kcal kg^{-1}, sendo o menor valor encontrado na casca e maior nas folhas. Tais valores estão dentro do esperado para biomassa florestal de diferentes espécies, sendo relatado por diversos autores, como Quirino et al. (2005) e Vidaurre et al. (2012).

A avaliação das características energéticas por componente arbóreo (madeira, casca, galhos e folhas) é considerada uma abordagem teórica, pois, os cavacos de coprodutos da colheita de madeira, bem como da árvore inteira é uma mistura de tais componentes. Estudos como de Baker et al. (2012) e Dukes et al. (2013), mostram que a participação percentual de componentes arbóreos podem influenciar nas características energética da biomassa florestal. Entretanto, a composição ideal entre os componentes das árvores de *Eucalyptus* para garantir a qualidade energética dos cavacos é desconhecida.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKANGAS, E. **Properties of wood fuel used in Finland**. Jyväskylä: VTT, 2005. 90 p.

BAKER, S. A.; GREENE, W. D.; WILSON, A. Fuels characteristics of woods-run whole tree southern pine chips. **Biomass and Bioenergy**, v. 37, p. 67-72, 2012.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da produção de energia e de vegetais vegetais de espécies de eucalipto. **IPEF**, n. 23, p. 53-56, 1983.

BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, J. D.; TELEKEN, J. G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 3, p. 2365-2378, 2018.

BRAND, M. A.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de estocagem na qualidade da biomassa florestal para a geração de energia. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 369-80, 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Panorama do potencial de biomassa no Brasil**. Brasília; Dupligrafica, 2003. 80 p.

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**, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.

CHRISTOPHERSON, N.; STOKES, B.; WISELOGEL, A.; WOODFINS, S.; ZERBE, J. Harvesting and handling fuelwood. In: FAZIO, J. R. (Ed.). **Trees for fuelwood: a step toward energy diversity**. Nebraska: The Arbor Day Institute, 1993. p. 34-44.

CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do médio Paranapanema**. 84 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz: Piracicaba, 2009.

COLIN, B.; DIRION, J.-L.; ARLABOSSE, P.; SALVADOR, S. Wood chips flow in a rotary kiln: experiments and modeling. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 98, p. 179-187, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Florestas e indústria: agenda de desenvolvimento**, Brasília: CNI, 2016. 60 p. Disponível em: https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/ media/filer_public/4e/e9/4ee928b9-d60b-44f3-a5c1-7cd478f3f5fe/ florestas_e_industria_web_20160919_2.pdf . Acesso: 12 Abr. 2019.

DAI, J.; CUI, H.; GRACE, J. R. Biomass feeding for thermochemical reactors. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 5, p. 716-736, 2012.

DIETZ, H.-U.; URBANKE, B. **Lastenheft *Harvester*vermessung: eine Projektarbeit des KWF**. Groβ-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, 2013.

DUKES, C. C.; BAKER, S. A.; GREENE, W. D. In-wood grinding and screening of forest residues for biomass feedstock applications. **Biomass and Bioenergy**, v. 54, p. 18-26, 2013.

ELOY, E., SILVA, D. A. D., SCHMIDT, D., TREVISAN, R., CARON, B. O., ELLI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill EX Maiden. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 749- 758, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço energético nacional 2019: Relatório Sintese / ano base 2018**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2019. 67 p.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Planning forest roads and harvesting systems**. Rome: FAO Forest Paper, 1977.

FIEDLER, N. C. CARMO, F. C. A.; SÃO TEAGO, G. B.; CAMPOS, A. A.; SILVA, E. N. ANÁLISE DA QUALIDADE DA COLHEITA FLORESTAL DE EUCALIPTO EM DIFERENTES DECLIVIDADES. **CIENTÍFICA ELETRÔNICA DE ENGENHARIA FLORESTAL**, V. 22, N. 1, P. 1-8, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Yearbook 2015 - Forest Products - 2011-2015**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712-725, 2015.

HORA, A. B. Panoramas Setoriais 2030: Papel e Celulose. In: **Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2017. p. 79-91.

HUNT, J. D.; GUILLOT, V.; FREITAS, M. A. V.; SOLARI, R. S. E. Energy crop storage: An alternative to resolve the problem of unpredictable hydropower generation in Brazil. **Energy**, v. 101, p. 91-99, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2017**. Brasília, BR: Pöyry Ltda, 2017. 77 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Extração vegetal e silvicultura**, 2014.

JARDIM, J. M.; GOMES, F. J. B.; COLODETTE, J. L.; BRAHIM, B. P. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **O Papel**, v. 78, n. 11, p. 122 – 129, 2017.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, , J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus.* **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.

KALLIO, M.; LEINONEN, A. **Production technology of forest chips in Finland**. Jyväskylä: VTT, 2005. 103 p.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; Machado, S. A. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos Estados do Paraná e Santa Catarina **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 545 - 554, 2015.

LAMERS, P.; JUNGINGER, M.; HAMELINCK, C.; FAAIJ, A. Developments in international solid biofuel trade – an analysis of volumes, policies, and market factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3176–3199, 2012.

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo: VTT, 2004. 132 p.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2014.

MATTSSON, J. E. Basic handling characteristics of wood fuels: angle of repose, friction against surfaces and tendency to bridge for different assortments. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 5, p. 583-597, 1990.

MATTSSON, J. E. Tendency to bridge over openings for chopped phalaris and straw of triticum mixed in different proportions with wood chips. **Biomass and Bioenergy**, v. 12, n. 3, p. 199-210, 1997.

MATTSSON, J. E.; KOFMAN, P. D. Influence of particle size and moisture content on tendency to bridge in biofuels made from willow shoots. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 6., p. 429-435, 2003.

MEDERSKI, P. S, BEMBENEK, M.; KARASZEWSKI, Z.; PILAREK, Z.; ŁACKA, A. Investigation of log length accuracy and *harvester* efficiency in processing of oak trees. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 39, n. 2, p. 173-181, 2018.

MÜLLER, B. V.; ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J.; SILVA, J. R. M.; CUNHA, A. B. Produção de madeira serrada com cinco espécies de eucalipto resistentes à geada. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 4, p. 195-201, 2017.

NADOLNY, A.; BERUDE, L. C.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C.; RODRIGUES, C. K. Qualidade na operação de corte florestal em povoamentos submetidos a dois modelos de desbaste mecanizado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, E201801689, P. 1-7, 2019.

NIEUWENHUIS, M.; DOOLEY, T. The effect of calibration on the accuracy of *harvester* measurements. **International Journal of Forest Engineering**, v. 17, n. 2, p. 25-33, 2006.

ORO, D.; LOPES, E. S.; SILVA, D. A.; HILLIG, E.; PELZ, S. K. Biomass energetic potential from timber harvesting at different times of storage. **Floresta**, v. 4, n. 1, p. 9-18, 2018.

ORTOLAN, C.; AZEVEDO, E. W.; ANTIQUEIRA, A. C.; ORTOLAN, F. A. S.; BONISCH, H. Aproveitamento da biomassa residual de colheita florestal. In: XIV Seminário de Atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2006. 9 p.

POTTIE, M. A.; GUIMIER, D. Y. **Preparation of forest biomass for optimal conversion**. Canada: FERIC/IEA, 1985. 112 p.

QUIRINO, WF; VALE, AT; ANDRADE, APA; ABREU, VLS; AZEVEDO, ACS Poder calorífico da madeira e dos materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 15, n. 89, p. 100-106, 2005.

RACKL, M.; GÜNTHNER, W. A. Experimental investigation on the influence of different grades of wood chips on screw feeding performances. **Biomass and Bioenergy**, v. 88, p. 106–115, 2016.

RANTA, T.; HALONEN, P.; ALAKANGAS, E. **Production of forest chips in Finland**. Finland: OPET Finland/VTT Energy, 2001. 58 p.

ROSSATO, F. G. F.S.; SUSAETA, A.; ADAMS, D. C.; HIDALGO, I. G.; ARAUJO, T. D.; QUEIROZ, A. Comparison of revealed comparative advantage indexes with application to trade tendencies of cellulose production from planted forests in Brazil, Canada, China, Sweden, Finland and the United States. **Forest Policy and Economics**, v. 97, p. 59-66, 2018.

SALVADOR, S. M.; SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; STAHL, J.; CONSENSA, C. B. Biomassa e estoque de nutrientes em plantios clonais de Eucalyptus saligna Smith. em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 311-321, 2016.

SANTIAGO, F. L. S.; REZENDE, M. A. Aproveitamento de resíduos florestais de eucalyptus spp na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 4, p. 241-253, 2014.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A.; MAYER, S. L. S.; SOUZA, H. P.; MUNIZ, G. I. B. Production of biomass and energy stock for five *Eucalyptus* species. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 9, n. 1, p. 30-36, 2018.

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

SZYMCZAK, D. A.; BRUN, E. J.; REINERT, D. J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C. C.; LÚCIO, A. D.; MARAFIGA, J. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região Sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 641-648, 2014.

TANAKA, O. P. **Exploração e transporte da cultura do eucalipto**. Informe Agropecuário, n. 141, p. 24-30, 1986.

TAVARES, S. R. L. **Biocombustíveis sólidos: fonte energética alternativa visando à recuperação de áreas degradadas e à conservação do Bioma Caatinga**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. 400 p.

TOKLU, E. Biomass energy potential and utilization in Turkey. **Renewable Energy**, v. 107, p. 235-244, 2017.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; VASSILEV, V. S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview. **Fuel**, v. 158, p. 330–350, 2015.

VIDAURRE, GB; CARNEIRO, ACO; VITAL, BR; SANTOS, RC; VALLE, MLA Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.

ZABANIOTOU, A.; BITOU, P.; KANELLIS, T.; MANARA, P.; STAVROPOULOS, G. Investigating Cynara C. biomass gasification producer gas suitability for CHP, second generation biofuels, and H2 production. **Industrial Crops and Products**, v. 61, p. 308-316, 2014.

CAPITULO 1

DESEMPENHO OPERACIONAL DO PROCESSADOR FLORESTAL E QUALIDADE DOS PRODUTOS NA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTOS CLONAIS DE EUCALIPTO

Resumo

A otimização dos recursos florestais é essencial para a excelência e competitividade das empresas, principalmente nas operações de processamento da madeira que é responsável em produzir multiprodutos destinados ao mercado. Objetivou-se neste estudo avaliar a produtividade e a qualidade do processamento de produtos de eucalipto para celulose e energia. O estudo foi realizado em uma empresa florestal no estado do Paraná, em povoamentos de clones híbridos interespecíficos de *Eucaliptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus saligna*, denominados de povoamento 1 e 2, respectivamente, com idade de 7 anos e submetidos ao corte raso pelo sistema de colheita da madeira de árvores inteiras. O processamento das árvores com o trator florestal *harvester* englobou quatro diâmetros limites da altura comercial: T1-8 cm, T2-10 cm, T3-12 cm e T4-14 cm, sendo as toras com o comprimento de 7,20 m. Foi realizada uma análise técnica da operação de processamento nos tratamentos estudados, determinando-se os tempos médios do ciclos operacionais, a eficiência operacional e a produtividade. A análise de qualidade englobou a determinação dos diâmetros limites da altura comercial para fins de produção dos coprodutos para energia e os comprimentos das toras, sendo os diâmetros limites comparados pelo teste de Tukey, e os povoamentos pelo teste t de Student (α = 0,05). Os resultados mostraram que o processamento das árvores no diâmetro limite de 10 cm proporcionou maior produtividade do *harvester*, com 59,5 m^3 pmh_0^{-1} e 62,2 m^3 pmh_0^{-1}, nos povoamentos 1 e 2, respectivamente, sendo o povoamento 1 influenciado pelo maior tempo do ciclo operacional, devido ao maior número de galhos e bifurcações das árvores. Além disso, a melhor qualidade na mensuração do diâmetro limite foi obtida aos 10 cm, enquanto que para as toras os erros nos comprimentos reduziram com o aumento do diâmetro limite, devido as dimensões do fuste sobre as ferramentas de medição do cabeçote *harvester.* Portanto, o aumento do diâmetro limite proporcionou melhorias em produtividade e qualidade dos produtos produzidos.

Palavras-chave: Colheita de madeira; Coprodutos; Produtividade.

Abstract

The optimization of forest resources is essential for the excellence and competitiveness of companies, especially in the wood processing operations that are responsible for producing multi-products for the market. The purpose of this study was to evaluate the productivity and quality of the processing of eucalyptus products for pulp and energy. The study was carried out at a forestry company in the Paraná State, in stands of interspecific hybrid clones of *Eucaliptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna*, called stands 1 and 2, respectively, at 7 years-old under clearcutting by the full tree harvesting system. The processing of the trees with the harvester forest tractor encompassed four commercial height limits: T1-8 cm, T2-10 cm, T3-12 cm and T4-14 cm, the logs being 7.20 m long. A technical analysis of the processing operation in the treatments studied was performed, determining the average operating cycle times, operating efficiency and productivity. The quality analysis included the determination of the commercial height limit diameters for energy coproducts production and the log lengths, the limit diameters being compared by Tukey's test, and the stands by Student's t test ($\alpha = 0.05$). The results showed that the processing of the trees in the 10 cm diameter limit provided higher harvester productivity, with 59.5 m^3 pmh_0^{-1} and 62.2 m^3 pmh_0^{-1}, in stands 1 and 2, respectively, with stand 1 being influenced by the longer operational cycle time, due to the higher number of branches and bifurcations of the trees. Moreover, the best quality in measuring the limit diameter was obtained at 10 cm, while for the logs the errors in lengths reduced with the increase in the limit diameter, due to the stem dimensions on the harvester head measuring tools. Therefore, the increase in the boundary diameter provided improvements in productivity and quality of the products produced.

Keywords: Wood harvesting; Coproducts; Productivity.

1. INTRODUÇÃO

Os coprodutos obtidos na colheita de madeira são importantes componentes para a geração de energia nas empresas de grande porte do setor florestal, devido às suas características renováveis. Os coprodutos são compostos pela porção final do fuste (ponteiras), galhos e casca, sendo um material orgânico gerado pela fotossíntese em povoamentos plantados. O seu uso proporciona a mitigação das emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera, por meio da liberação de carbono neutro durante o processo de combustão (GRAUER; KAWANO, 2008; IPCC, 2000; BRAND, 2010; MOREIRA, 2011).

O uso de coprodutos é geralmente associado aos povoamentos destinados aos multiprodutos, onde são obtidas toras de diversos sortimentos para processos industriais, podendo então a biomassa residual ser aproveitada para a produção de energia (CANTO, 2009). Normalmente, nesta situação é empregado o sistema de colheita de árvores inteiras, caracterizado pelo corte das árvores, seguido pelo arraste até as margens dos talhões para o processamento final da madeira, possibilitando a concentração da biomassa para a posterior cavaqueamento e transporte. Além disso, neste sistema de colheita da madeira são empregados os processadores florestais que permitem a obtenção de toras com diferentes sortimentos, conforme as necessidades do mercado consumidor (ROBERT, 2012; MALINOVSKI et al., 2014).

Entretanto, no processamento de madeira com *harvester* podem ocorrer erros no controle de medição das toras, principalmente quando são usados cabeçotes processadores multifustes (LEHTIMÄKI; NURMI, 2011; GINGRAS, 2013). Tais erros se devem às características das ferramentas de medições dendrométricas das árvores, podendo ocasionar a perda de contato dos rolos e facas do cabeçote com as árvores do feixe, ocasionados pela rugosidade da casca, resistência dos galhos e deformidades dos fustes (SIMÕES; FENNER, 2010a; 2010b). Consequentemente, esses fatores também poderão afetar a produtividade, qualidade e custos da operação florestal.

Outra variável que influencia no processamento da madeira é o diâmetro limite para obtenção dos coprodutos. Muitas empresas florestais definem 8 cm como o diâmetro limite da altura comercial entre celulose e energia, de forma a

proporcionar maior volume de toras para processos industriais. Todavia, a qualidade dos coprodutos poderá ser comprometida, proporcionando uma maior relação entre casca e madeira, dificultando, assim, a eficiência no processo de cavaqueamento no campo e os índices de qualidade energética no momento da combustão.

Por outro lado, o estabelecimento de diâmetros de maiores dimensões poderá proporcionar ganhos significativos nos parâmetros energéticos de cavacos de coprodutos no momento da combustão na indústria. Porém tal situação poderá proporcionar a redução da quantidade de toras destinadas para produção de celulose, podendo este problema ser solucionado a partir de uma posterior análise da oferta de madeira na empresa. Portanto, existe a dúvida de qual o diâmetro limite ideal que proporcionará os melhores resultados em termos de produtividade e qualidade da operação de processamento.

Diante da elevada complexidade das operações de colheita da madeira, torna-se difícil alcançar índices de produtividade e qualidade satisfatórios, sendo necessário o uso de indicadores para auxiliar no controle e nas tomadas de decisões no planejamento operacional. Para isso, Trindade et al. (2007), sugerem diversos indicadores de qualidade, podendo ser empregados os histogramas que mostram o arranjo de dados em forma gráfica e sua distribuição. Outro indicador de qualidade eficiente, porém pouco conhecido e aplicado nas operações florestais, é o seis *Sigma*, que tem por objetivo melhorar os desempenhos produtivos por meio da análise das variabilidades dos processos, enfatizando o conceito da melhoria contínua (HENDERSON; EVANS, 2000).

Portanto, diante da complexidade das operações florestais e a necessidade da busca de novas alternativas de melhorias na produtividade e na qualidade no processamento de madeira, torna-se necessária uma avaliação técnica das máquinas e de qualidade da madeira processada, contribuindo com o planejamento das operações e otimização dos recursos florestais. Assim, objetivou-se avaliar o processamento de madeira em quatro diâmetros limites da altura comercial entre celulose e coprodutos em dois povoamentos de eucalipto, visando verificar o efeito dessa variação na produtividade da máquina e na qualidade da operação.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado nas áreas operacionais de colheita da madeira pertencentes à uma empresa florestal localizada no município de Imbaú, região dos Campos Gerais, estado do Paraná, Brasil, entre as coordenadas geográficas 24° 26' S e 50° 45' W, com uma altitude média de 940 m.

O relevo dos talhões avaliados foi classificado entre plano e suavemente ondulado, com declividade média de 8%. O clima predominante da região, segundo a classificação de Köppen, está situado entre as regiões Cfa e Cfb, definido como subtropical, com temperatura média anual de entre 19 e 20 ºC e com precipitação média anual entre 1.400 e 1.600 mm (CAVIGLIONE et al., 2000; ÁGUAS PARANÁ, 2012).

2.2 Características dos Povoamentos

Os plantios florestais eram compostos de clones híbridos interespecíficos de *Eucaliptus urophylla* S. T. Blake x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e clones de *Eucalyptus saligna* Smith, ambos com 7 anos de idade e densidade inicial de plantio de 1.111 árvores por hectare (espaçamento 3,75 m × 2,40 m).

As características dendrométricas dos povoamentos estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dentrométricas dos povoamentos.

Espécie	*E. urophylla* x *E. grandis*	*E. saligna*
Idade (anos)	7	7
Diâmetro à 1,30 m do solo (cm)	18,2 ± 3,0	18,7 ± 2,6
Altura total da árvore (m)	31,7 ± 3,0	31,4 ± 3,1
Altura dominante (m)	34,1 ± 0,8	34,1 ± 0,4

2.3 Sistema de Colheita e Processamento da Madeira

O sistema de colheita da madeira utilizado no presente trabalho foi o sistema de árvores inteiras, composto pelo *feller buncher, skidder* e *processador florestal*. O processamento foi realizado pelo processador florestal *harvester*

composto por uma máquina base e equipado com um cabeçote processador, cujas especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações técnicas da máquina base e implemento utilizados.

Equipamento	Marca	Modelo	Especificações Técnicas
	Doosan	DX300	Potência: 147 kW ou 202hp. Peso operacional da máquina: 29.300 kg. Alcance máximo da grua ao nível do solo: 10 m. Rodados de esteiras.
	Waratah	622B	Peso operacional: 2.280 kg. Pressão hidráulica máxima: 32 Mpa. Abertura máx. de desgalhamento: 650 mm. Abertura máx. do rolo de alimentação: 730 mm. Capacidade máx. para serrar: 750 mm.

Fonte das imagens: Matheus Kaminski Cândido da Silva.

2.4 Diâmetro Limite da Altura Comercial entre Celulose e Coprodutos

Após o processamento das árvores, utilizou-se uma suta dendrométrica para obtenção dos diâmetros limites da altura comercial entre celulose e coprodutos (Figura 4).

a) b) c) d)

Figura 4. Amostragem dos diâmetros limite da altura comercial entre celulose e coprodutos com suta dendrometrica. a) 8 cm; b) 10 cm; c) 12 cm; e d) 14 cm.

2.5 Comprimento das Toras

O comprimento das toras destinadas à celulose foi de 7,20 m. Porém, com a aplicação dos tratamentos avaliados, o comprimento da última tora do fuste era afetado, podendo não atingir o valor esperado. Logo, para um melhor aproveitamento das árvores processadas, aceitou-se que a última tora, quando superior a 2,40 m de comprimento, fosse destinada à celulose, caso contrário, à coprodutos, devido às restrições dos fueiros dos veículos de transporte de madeira.

Portanto, para avaliar a influência do erro de medição do comprimento feito pelo processador *harvester*, assim como, a influência das toras de aproveitamento, a análise do comprimento das toras de celulose foi feita após o processamento das árvores, com uso de uma trena métrica.

2.6 Descrição dos Tratamentos

No processamento das árvores usual da empresa, o programa computacional do processador florestal *harvester* foi programado para que quando o fuste tivesse diâmetro maior ou igual a 8 cm, fosse realizado o traçamento das toras de celulose com 7,2 m, e toda a parte com diâmetro inferior a 8 cm fosse destinada para coprodutos (energia).

Na proposta deste estudo, adotou-se diferentes diâmetros limites da altura comercial entre celulose e energia, que definem os tratamentos estudados: T1-8 cm; T2-10 cm; T3-12 cm; T4-14 cm; e T5-FT árvore inteira, sendo as toras obtidas no comprimento de 7,20 m, podendo a quantidade variar com o tamanho das árvores, e apresentar tora de aproveitamento com comprimento menor que 7,20, e maior que 2,40 m (Figura 5).

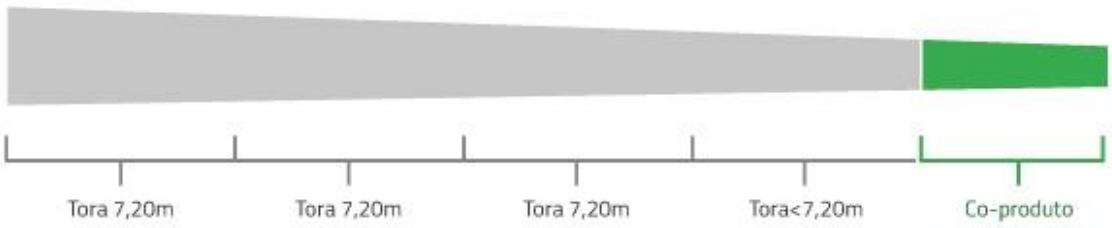


Figura 5. Esquema ilustrativo dos tratamentos estudados com o diâmetro limite.

Após o processamento, as toras de celulose ficaram armazenadas na parte da frente do talhão, próximo à estrada, e os coprodutos na parte posterior da pilha, conforme Figura 6.

Figura 6. Processamento de madeira para celulose e os coprodutos para energia.

2.7 Análise Operacional do Processamento

2.7.1 Analise do Ciclo Operacional

O ciclo operacional do processador *harvester* na realização do processamento das árvores na margem do talhão foi subdivido em elementos parciais, sendo determinados os tempos consumidos em cada fase da operação.

Os elementos parciais foram: Busca e pega (BP), tempo consumido pela máquina para buscar e fechar o cabeçote pegando uma árvore; Processamento (PR), tempo consumido pela máquina no processamento da árvore; e, Deslocamento (DE), tempo consumido pela máquina no deslocamento ao longo da pilha de processamento. Além disso, Interrupções (IN), tempo referente às paradas da máquina por motivos operacionais e não operacionais.

2.7.2 Análise da Eficiência Operacional

A eficiência operacional foi calculada pela porcentagem do tempo efetivamente trabalhado em relação ao tempo total programado para o trabalho (BIRRO et al., 2002), conforme expressão (1).

$$EO=\frac{TE}{TE+TI} \times 100 \quad (1)$$

Em que: EO = eficiência operacional (%); TE = tempo de trabalho efetivo (hora) e; TI = tempo de interrupções operacionais e não-operacionais (hora).

2.7.3 Análise da Produtividade

A produtividade por hora-máquina produtiva (m^3 pmh_0^{-1}) foi determinada em metros cúbicos de madeira processada em toras com casca, a partir do volume médio comercial obtido no computador de bordo da máquina e uso da fórmula (2), conforme proposta por Magagnotti et al. (2017).

$$P_{pmh} = \frac{N \times VMC}{pmh_0} \quad (2)$$

Em que: P_{pmh} = Produtividade por hora-máquina produtiva (m^3 pmh_0^{-1}); N = número total de árvores processadas; VMC = volume médio comercial da árvore, com casca, destinado a celulose (m^3); e pmh_0 = hora-máquina produtiva (sem interrupções).

2.7.4 Comprimento das Toras

Para avaliar a influência do erro de medição no comprimento feito pelo processador florestal *harvester*, assim como a influência das toras de aproveitamento, a análise do comprimento das toras foi realizada após o processamento das árvores com uso de uma trena métrica, obtendo-se os comprimentos das toras destinadas à celulose.

Inicialmente foi determinada a amostragem mínima necessária nas análises técnica do processador e de qualidade determinada conforme metodologia proposta por Murphy (2005), segundo a fórmula (3).

$$n = \frac{t^2 \times Var(WCT)}{\left(E \times \frac{\overline{WCT}}{100}\right)^2} \quad (3)$$

Em que: n = número de ciclos operacionais a serem estudados; t = valor de t de Student; Var (WCT) variância do tempo dos ciclos operacionais; E = nível de erro admissível (5%); e $\overline{WCT}$ = média do tempo dos ciclos operacionais (segundos).

2.8 Indicadores de Qualidade

Para avaliar a qualidade do diâmetro limite da altura comercial entre celulose e coprodutos e dos comprimentos das toras destinadas à produção de celulose foi determinada a variação das medições obtidas, e, posteriormente a determinação dos valores não conformes. Para isso, realizou-se a comparação com os valores programados, e calculado o erro, em porcentagem, conforme a expressão (4). Posteriormente foram utilizados indicadores de qualidade escala seis *Sigma* e histogramas, conforme descritos a seguir.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{Np - Nn}{Np} \times 100 \qquad (4)$$

Em que: Erro = erro obtido (%); Np = número de amostras que obtiveram o valor programado; e Nn = número de amostras que não obtiveram o valor programado.

2.8.1 Seis Sigmas

A análise seis *Sigma* refere-se à avaliação da taxa de acerto e/ou de erro, sendo os valores considerados aceitáveis aqueles esperados como padrão desejável com variabilidade de ± desvio padrão da média dos dados obtidos. Já, os valores fora desta amplitude foram considerados não conformes, determinando a taxa de erro, conforme apresentado anteriormente. Estas taxas foram comparadas com a escala proposta por Trad e Maximiano (2009) e descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Escala *Sigma* utilizada na avaliação de qualidade.

Taxa de Acerto (%)	Taxa de Erro (%)	Defeitos por Milhão de Oportunidade	Escala *Sigma*
30,9	69,1	691.462	1,0
69,1	30,9	308.538	2,0
93,3	6,7	66.807	3,0
99,38	0,62	6.210	4,0
99,977	0,023	233	5,0
99,99966	0,00034	3,4	6,0

Fonte: Trad e Maximiano (2009).

2.8.2 Histograma

O histograma é uma ferramenta que permitiu ordenar os valores dos diâmetros dos coprodutos em forma gráfica, determinando sua distribuição e facilitando o seu conhecimento. Através da forma do histograma, foi possível inferir o tipo de distribuição da população avaliada.

Inicialmente, para construção dos histogramas, calculou-se a amplitude (R) dos diâmetros limites dos coprodutos e o número de classes (K) por meio da equação de Sturges, conforme equação (5). Em seguida, determinou-se o tamanho das classes (h), obtido a partir da divisão da amplitude (R) pelo número de classes (K); sendo posteriormente, obtida a distribuição das classes e construção do quadro de frequências, marcando todos os dados. O histograma foi então construído colocando no eixo horizontal (x) os intervalos de classe (cm), e, no eixo vertical (y) as frequências relativas dos dados (%).

$$K = 1 + 3{,}3 \,.\, \log N \qquad (5)$$

Em que: K = número de classes; e log N = logaritmo do número de dados.

Sobre os histogramas, plotou-se a curva da distribuição normal dos dados, sendo calculada através de uma função de densidade massa, feita pelos valores da relação entre a média dos valores amostrados para cada tratamento, o número de valores coletados e um incremento, calculado pela fórmula (6):

$$Valor = Vmin + n \times I \quad (6)$$

Em que: Vmin = valor mínimo dos dados; n = número da amostra; e I = incremento.

2.9 Participação Percentual da Produção de Celulose e Energia

Para determinação da participação percentual da produção de biomassa seca de toras para celulose (com casca) e coprodutos (madeira, casca da seção final do fuste, galhos e folhas) por unidade de área (hectare), empregou-se os valores de biomassa seca quantificados por Rodrigues et al. (2019), sendo os dados dos mesmos povoamentos deste estudo. Para isso, utilizou-se de informações do inventário florestal de pré-corte fornecidos pela empresa, sendo os resultados apresentados em valores percentuais.

2.10 Análise Estatística

A análise estatística seguiu um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), considerando dois povoamentos florestais em quatro situações de diâmetros limites da altura comercial entre celulose e coprodutos.

Quanto ao estudo de tempos e movimentos da máquina, considerou-se como tratamentos os diâmetros limites e como repetições os ciclos operacionais, ou seja, o número de árvores processadas. Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett, seguido da ANOVA, e quando necessário, aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

As médias de produtividade da máquina, qualidade do diâmetro limite e comprimento das toras, entre povoamentos, foram avaliadas pelo teste t de *Student* ($\alpha = 0,05$), comparando-as entre diâmetros limites, sendo consideradas como repetições cada ciclo operacional efetivo da máquina, diâmetros e toras mensuradas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Técnica

Foram cronometrados entre 790 e 993 ciclos operacionais nas oito situações avaliadas (dois povoamentos e quatro diâmetros limites), sendo o número mínimo necessário pelo estudo piloto 356 e 644, atendendo limite de erro admissível.

Com o aumento do diâmetro limite dos coprodutos, houve uma redução nos tempos consumidos de processamento e no tempo total do ciclo operacional. Isto ocorreu devido à redução do volume de madeira para celulose e aumento da quantidade de coprodutos da colheita da madeira.

Tabela 4. Valores médios, em segundos, dos tempos consumidos pelos elementos parciais e totais do ciclo operacional do processador *harvester.*

D lim (cm)	*E. urophylla x E. grandis*				*E. saligna*			
	Tempos efetivos (s)							
	BP	PR	DE	TC	BP	PR	DE	TC
T1-8	6 a	18 a	9 a	24 a	5 a	16 a	7 a	22 a
T2-10	5 b	16 b	6 a	22 b	5 a	14 b	7 a	20 b
T3-12	6 ab	16 bc	6 a	22 bc	5 a	14 bc	5 a	19 bc
T4-14	5 b	13 d	7 a	19 d	5 a	12 d	6 a	18 d
Média	6	16	7	22	5	14	6	20

Em que: D lim = diâmetro limite; s = segundos; BP = busca e pega; PR = processamento; DE = deslocamento; TC = tempo total do ciclo; e as médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (α = 0,05).

A atividade de busca e pega de árvores no momento do processamento consumiu o menor tempo do ciclo operacional, sendo representada por aproximadamente 5 segundos, com diferença estatística significativa entre os quatro tratamentos no povoamento de *E. grandis* x *E. urophylla*. O tempo consumido no deslocamento do *harvester* foi em média 7 segundos, não apresentando diferença estatística significativa, devido à característica desta operação, onde a máquina trabalhava de maneira estacionária ao lado da pilha na margem do talhão durante toda a jornada de trabalho.

O tempo consumido na atividade de processamento (Figura 7) diminuiu com o aumento do diâmetro limite, sendo que os únicos tratamentos que não apresentaram diferença estatística significativa entre si foram os diâmetros limites de 10 e 12 cm, em ambos os povoamentos estudados. Além disso, o elemento processamento consumiu o maior tempo do ciclo operacional, sendo característico da operação, pois envolvia execução simultânea de atividades de desgalhamento, destopamento e traçamento da madeira, sendo ainda influenciada pelo volume médio individual das árvores, presença de galhos e comprimento das toras processadas, logo, tais resultados entram em acordo com Drinko et al. (2015) e Diniz et al. (2018).

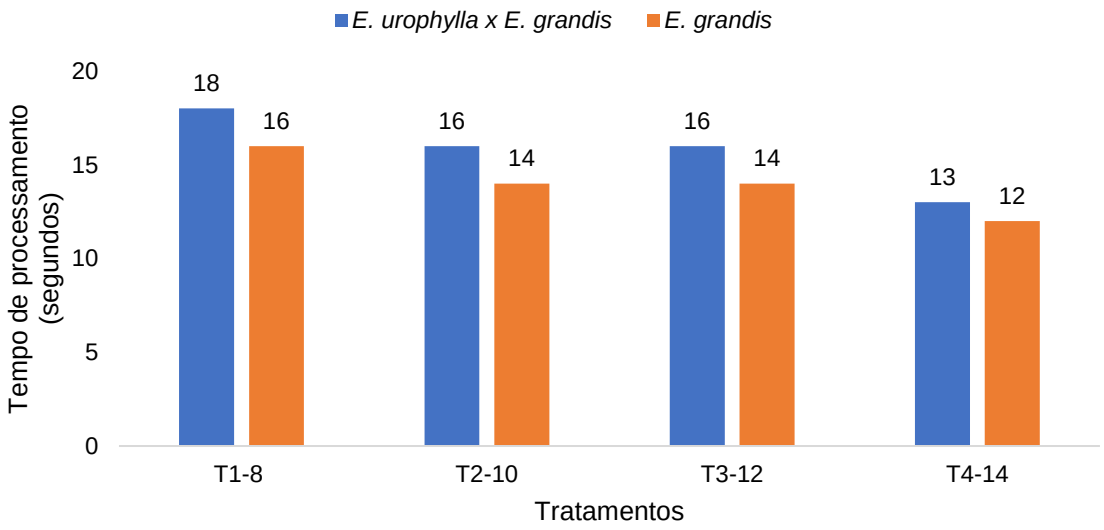


Figura 7. Tempo médio de processamento das toras de celulose nos diferentes diâmetros limites avaliados.

A maior produtividade da máquina foi obtida no diâmetro limite de 10 cm, sendo 59,5 e 66,2 m^3 pmh_0^{-1} nos povoamentos de *E. grandis* x *E. urophylla* e de *E. saligna*, respectivamente (Tabela 5). Isso mostra que é válida a adoção deste diâmetro limite, dentro do aspecto operacional, pois além do aumento da produtividade do *harvester*, pode aumentar o percentual de coprodutos com possível melhoria na qualidade energética.

Nos tratamentos de mesmo diâmetro limite, o *harvester* apresentou maior produtividade no processamento das árvores de *E. saligna* (Figura 8), sendo explicado pela menor presença de galhos e bifurcações quando comparado ao *E. urophylla x E. grandis*. Portanto, ficou evidente que, quanto maior a presença

de galhos e bifurcações nas árvores, maior o esforço demandado ao cabeçote processador na execução do desgalhamento do fuste. Consequentemente, isso acarretou na necessidade do processamento individual das seções do fuste das árvores, consumindo maior tempo, e consequentemente, reduziu da capacidade produtiva da máquina.

Tabela 5. Produtividade do *harvester* no processamento de povoamentos de eucaliptos nos diferentes diâmetros limites avaliados.

D lim (cm)	EO (%)	*E. grandis x E. urophylla*		*E. saligna*		Significância
		Produtividade (m^3 pmh_0^{-1})	VMC (m^3)	Produtividade (m^3 pmh_0^{-1})	VMC (m^3)	
T1-8	81,7	57,4	0,38	65,2	0,39	*
T2-10		59,5	0,36	66,2	0,36	*
T3-12		57,9	0,35	63,3	0,34	*
T4-14		57,3	0,3	54,7	0,27	*
Média		58	0,35	62	0,34	-

Em que: D lim = diâmetro limite; EO = eficiência operacional; VMC = volume médio comercial por árvore; e * significativo pelo teste t de Student (α = 0,05).

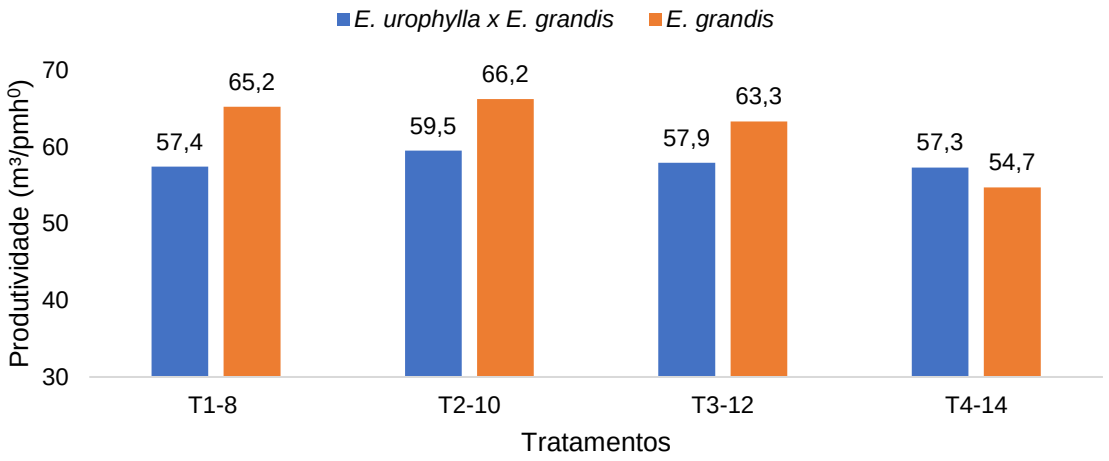
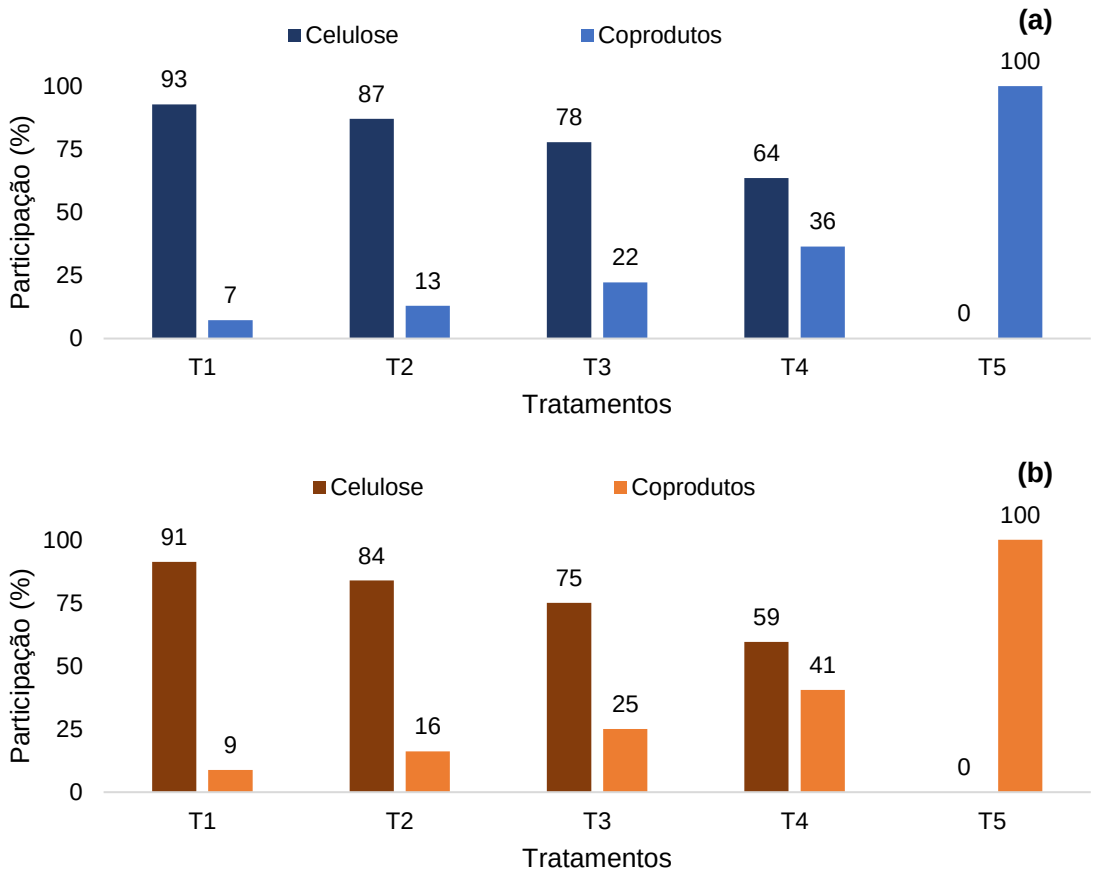


Figura 8. Produtividade no *harvester* nos diferentes diâmetros limites avaliados.

3.2 Participação Percentual da Biomassa Seca Entre Celulose e Energia

Na Figura 9 estão apresentados os valores percentuais estimados da proporção entre a produção de biomassa seca para celulose, composta por toras

com casca, e coprodutos, compostos pela madeira da seção final do fuste, casca da seção, galhos e folhas, por hectare. Nota-se que variação do diâmetro limite de 8 cm a 14 cm, apresentou um aumento de coprodutos de 7% para 36% para o *E. urophylla* x *E. grandis*, e de 9% a a 41% para o *E. saligna.*



Em que: T1 - 8 cm; T2 - 10 cm; T3 - 12 cm; T4 - 14 cm; T5 - árvores inteiras.

Figura 9. Participação percentual da biomassa seca por hectare entre celulose e coprodutos para energia nos tratamentos avaliados; (a) *E. urophylla* x *E. grandis;* e (b) *E. saligna.*

Consequentemente, a participação percentual de biomassa destinada à celulose reduziu com o aumento do diâmetro limite da altura comercial entre celulose e energia. Portanto, destaca-se que a escolha do diâmetro limite implica no dimensionamento das máquinas de colheita da madeira e cavaqueamento, pois, apesar de haver maior produtividade do processador florestal nos tratamentos com diâmetros limites maiores, e a demanda por celulose for alta, necessitará de ajustes no planejamento da colheita de madeira, através da

disponibilidade de maior área para a colheita, bem como maior necessidade de deslocamento de máquinas entre talhões.

3.3 Análise de Qualidade dos Diâmetros Limites

O tratamento cujo diâmetro limite que mais se aproximou do diâmetro programado foi de 10 cm (Tabela 6), em ambos os povoamentos, atingindo a escala *Sigma* 3, sendo um resultado considerado satisfatório, pois a operação de processamento é uma atividade afetada por diversas variáveis de difícil controle.

Tabela 6. Valores médios dos diâmetros limite dos coprodutos.

D lim (cm)	*E. urophylla x E. grandis*			*E. saligna*			Significância
	D med (cm)	Erro (%)	*Sigma*	D med (cm)	Erro (%)	*Sigma*	
T1-8	7,9	1,0	3	7,9	1,5	3	ns
T2-10	9,9	0,4	3	9,7	2,8	3	*
T3-12	11,3	5,9	2	11,3	5,9	2	ns
T4-14	13,7	2,0	2	13,7	2,5	3	ns

Em que: D lim = diâmetro limite; D med = diâmetro médio encontrado; * significativo pelo teste t de *Student* (α = 0,05); e ns não significativo (α = 0,05), entre povoamentos.

Apesar de o resultado obtido ter sido considerado satisfatório, a busca por melhorias operacionais deve ser contínua, sendo, portanto, necessária a constante atenção por parte de operadores, fazendo aferições nos diâmetros processados no decorrer do turno de trabalho, calibração e manutenção diária da máquina e cabeçote processador.

Observa-se que os diâmetros médios mensurados em todos os tratamentos, em ambos os povoamentos, ficaram abaixo do valor programado no computador de bordo da máquina. Porém, os valores estão muito próximos das metas estabelecidas, sendo que, apenas no tratamento de diâmetro limite do coproduto de 12 cm, em ambos os povoamentos, superou o erro de 5%, podendo estar relacionado com o local do fuste onde esse diâmetro estava localizado, como a base da copa ou com a presença de galhos grossos.

Burla (2001), relata que os erros nas operações mecanizadas devem ficar abaixo de 5%. Considerando a escala *Sigma*, pode se afirmar que a melhor qualidade no processamento dos fustes ocorreu nos diâmetros limite entre 8 e 10 cm, em ambos os povoamentos estudados.

Observa-se nos histogramas (a) e (b) a melhor distribuição dos valores, pois se aproximaram do programado (Figura 10). Entretanto, o histograma (c) foi o que apresentou a pior distribuição dos dados, mostrando que os valores ficaram abaixo do programado.

Conforme Trindade et al. (2007), pela forma do histograma, pode-se inferir o tipo de distribuição da população de dados. Essa distribuição deve ter a maior frequência nos valores de diâmetros programados no computador de bordo da máquina, ou seja, 8, 10, 12 e 14 cm. Porém, no tratamento de diâmetro limite de 12 cm isso não aconteceu, concordando com os resultados obtidos através do percentual de erro e da escala *Sigma* deste tratamento, em que o erro foi de 6% para ambos os povoamentos.

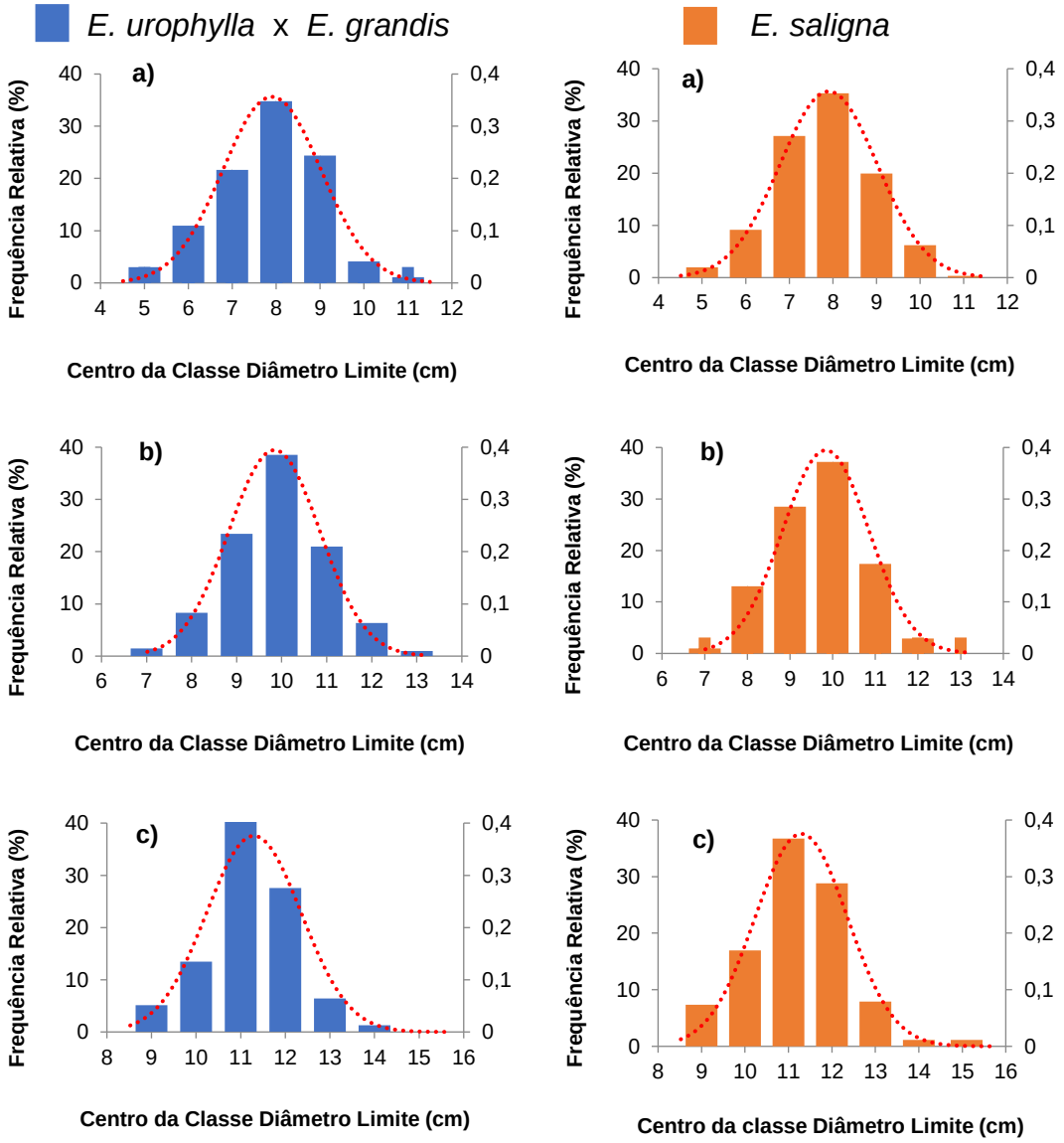
3.4 Análise de Qualidade dos Comprimentos das Toras

O tratamento de diâmetro limite de 8 cm no povoamento de *E. saligna* apresentou o valor médio mais próximo do comprimento da tora desejado (7,20 m), com menor erro (2,6%) (Tabela 7). Já, o mesmo diâmetro limite no povoamento de *E. urophylla* x *E. grandis*, apresentou o valor mais distante do valor esperado, com média de 6,27 m, explicado pelas características do povoamento, principalmente em relação à maior quantidade de galhos e bifurcações na copa das árvores.

Como houve grande aproveitamento do fuste no diâmetro limite de 8 cm, a não conformidade pode ser atribuída ao fato que o local do corte da última tora, muitas vezes, encontrava-se em meio à bifurcações. Portanto, era necessário cortar o fuste antes da bifurcação e o restante era destinado aos coprodutos. Este problema pode ser mitigado por meio do aumento do valor do diâmetro limite dos coprodutos, pois o último corte poderia se localizar mais abaixo no fuste, evitando assim as bifurcações.

Na Tabela 8 estão descritos os valores médios do comprimento das toras processadas por povoamento, o desvio padrão e o erro calculado. O sortimento

realizado durante a avaliação foi exclusivamente para produção de celulose, sendo o comprimento limite máximo de 7,20 m. Este comprimento é utilizado para otimizar a caixa de carga dos veículos de transporte. Outro fator limitante para o comprimento é o espaço entre os fueiros do veículo de transporte, por isso o valor mínimo aceitavel foi de 2,40 m, que influenciou na média do comprimento das toras.



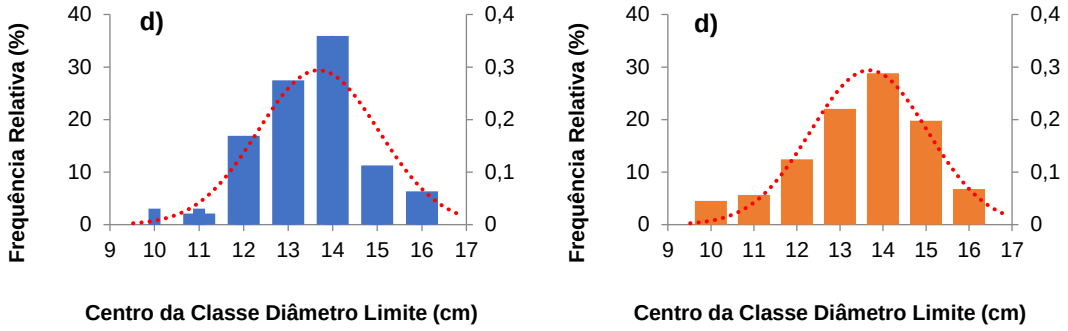


Figura 10. Distribuição das classes de diâmetro limite entre celulose e coprodutos; a) 8 cm; b) 10 cm; c) 12 cm; e d) 14 cm; e, linha vermelha tracejada refere-se a curva de distribuição normal.

Tabela 7. Valores médios dos comprimentos das toras processadas em cada tratamento estudado.

Comprimento programado (m)	D lim (cm)	*E. urophylla* x *E. grandis*		*E. saligna*		Significância
		Comprimento (m)	Erro (%)	Comprimento (m)	Erro (%)	
7,20	T1-8	6,27	11,7	7,06	0,6	*
	T2-10	6,40	9,8	6,92	2,6	*
	T3-12	6,62	6,8	6,79	4,3	ns
	T4-14	6,72	5,4	6,91	2,7	ns
Média		6,50	8,4	6,92	2,6	-

Em que: D lim = diâmetro limite; * significativo pelo teste t de *Student* (α = 0,05); e ns não significativo (α = 0,05).

Tabela 8. Valores médios dos comprimentos das toras processadas para celulose nos povoamentos estudados.

Comprimento programado (m)	*E. grandis* x *E. urophylla*		*E. saligna*		Significância
	Comprimento (m)	Erro (%)	Comprimento (m)	Erro (%)	
7,20	6,51	8,4	6,89	3,0	*

Em que: * significativo ao nível de 5% pelo teste t de *Student* (α = 0,05); e ns não significativo (α = 0,05).

Os resultados mostram que as toras do povoamento de *E. saligna* foram aquelas que mais se aproximaram do comprimento desejado, também com o menor erro percentual. Quanto mais próximo o valor do comprimento de 7,20 m, mais favorecida serão as operações de extração, carregamento e transporte final

das toras, pois a caixa de carga dos veículos de transporte será bem utilizada. Conforme Lopes et al. (2016), o comprimento da madeira influencia os tempos consumidos pelos veículos de transporte, principalmente na produtividade do carregamento e descarregamento.

De maneira geral, os resultados obtidos sobre os erros nas medições dos comprimentos de toras processadas entram em acordo com diversos autores como Nieuwenhuis e Dooley (2006), Rosa e Oliveira (2014), Mederski et al. (2018) e Nadolny (2019). Tais autores relatam que existe maior variação de comprimento das toras quando as mesmas são destinadas à celulose, devido as dimensões do fuste e presença de galhos. Os comprimentos tendem a ser menores que o programado, devido a necessidade de movimentação inversa dos rolos de alimentação do cabeçote e facas que não conseguem entrar em contato com fustes de menores dimensões. Consequemente, a influência dos diâmetros limites entre celulose e coprodutos favoreceu na redução dos erros nos comprimentos das toras.

4. CONCLUSÕES

O tempo do ciclo operacional do processador florestal *harverster* diminuiu com o aumento do diâmetro limite entre celulose e coprodutos, porém com consequente redução do volume de madeira destinado para celulose e aumento de coprodutos.

A produtividade da máquina e a qualidade do processamento da madeira foram superiores no diâmetro limite de 10 cm, sendo o padrão indicado a ser adotado pela empresa em termos operacionais.

A produtividade no processamento das árvores do povoamento de *E. urophylla x E. grandis* foi afetada pela maior presença de galhos e bifurcações quando comparado ao povoamento de *E. saligna.*

A qualidade do comprimento da madeira melhorou com o aumento dos diâmetros limites entre celulose e coprodutos.

O comprimento das toras processadas ficou dentro do limite aceitável pelos parâmetros estipulados pela empresa, entretanto no processamento do povoamento de *E. saligna* os valores obtidos foram aqueles que se aproximaram do programado.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUAS PARANÁ. **Totais Mensais de Precipitação**. 2019. Disponível em: < http://www.aguasparana.pr.gov.br>. Acesso em: 14 Mai. 2019.

BIRRO, M. H. B.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; MINETTE, L. J. Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “Track-Skidder” em região montanhosa. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 525-532, 2002.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BURLA, E. R. **Mecanização de atividades silviculturais em relevo ondulado**. Belo Oriente: Cenibra, 2001. 144 p.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD.

DINIZ, C. C. C.; ROBERT, R. C. G.; VARGAS, M. B. Avaliação técnica de cabeçotes individual e múltiplo no processamento de madeira. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 1, p. 253-258, 2018.

DRINKO, C. H.; LOPES, E. S.; OLIVEIRA, F. M. Produtividade e custos do corte de pinus com *harvester* de pneus e esteiras. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, p. 3664-3677, 2015.

GINGRAS, J. F. Early Studies of Multi-Tree Handling in Eastern Canada. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, n. 2, p. 18-22, 2013.

GRAUER, A.; KAWANO, M. Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável. **Revista da Madeira**, n. 110, 2008.

HENDERSON, M. H.; EVANS, J. R. Successful implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company. **BenchmarkngAn International Journal**, v. 7, n. 4, p. 260-281, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 24 p.

LEHTIMÄKI, J.; NURMI, J. Energy wood harvesting productivity of three harvesting methods in first thinning of scots pine (Pinus sylvestris L**.). Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 8, p. 3383-3388, 2011.

LOPES, E. S.; VIEIRA, T. P.; RODRIGUES, C. K. Avaliação técnica e de custos do transporte rodoviário com diferentes espécies e sortimentos de madeira. **Floresta**, v. 46, n. 3, p. 297-305, 2016.

MAGAGNOTTI, N.; PARI, L.; SPINELLI, R. Use, Utilization, Productivity and Fuel Consumption of Purpose-Built and Excavator-Based *Harvester*s and Processors in Italy. **Forests**, v. 8, n. 485, p. 1-12, 2017.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; CASTRO, G. P. Sistemas. In: MACHADO, C.C. (Editor.). **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2014. p. 178-205.

MEDERSKI, P. S, BEMBENEK, M.; KARASZEWSKI, Z.; PILAREK, Z.; ŁACKA, A. Investigation of log length accuracy and *harvester* efficiency in processing of oak trees. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 39, n. 2, p. 173-181, 2018.

MOREIRA, J. M. M. Á. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 363-372, 2011.

MURPHY, G. Determining sample size for harvesting cost estimation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 35, n. 2/3, p. 166-169, 2005.

NADOLNY, A.; BERUDE, L. C.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C.; RODRIGUES, C. K. Qualidade na operação de corte florestal em povoamentos submetidos a dois modelos de desbaste mecanizado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, E201801689, P. 1-7, 2019.

NIEUWENHUIS, M.; DOOLEY, T. The effect of calibration on the accuracy of *harvester* measurements. **International Journal of Forest Engineering**, v. 17, n. 2, p. 25-33, 2006.

ROBERT, R. C. G. **Guia Prático de Operações Florestais na Colheita de Madeira**. 1. ed. Curitiba: Ed. Do Autor, 2012. 112 p.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PELISSALI, A. L.; SILVA, M. K. C. Modeling residual biomass from mechanized wood harvesting with data measured by forest harvester. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, n. 4, 2019.

ROSA, M. O.; OLIVEIRA, F. M. Análise da qualidade do processamento de madeira em dos sistemas mecanizados de colheita florestal. **Revista da União Latino-americana de Tecnologia**, n. 2, p. 19- 37, 2014.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T.; ESPERANCINI, M. S. T. Avaliação técnica e econômica da colheita de florestas de eucalipto com *harvester*. **Scientia Florestalis**, v. 38, n. 88, p. 611-618, 2010a.

SIMÕES, D.; FENNER, P.T. Influência do relevo na produtividade e custos do *harvester*. **Scientia Forestalis**, v. 85, n. 38, p. 107-114, 2010b.

TRAD, S.; MAXIMIANO, A. C. A. Seis sigma: fatores críticos de sucesso para sua implantação. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 13, n. 4, p. 647-662, 2009.

TRINDADE, C.; REZENDE, J. L. P.; JACOVINE, L. A. G.; SARTÓRIO, M. L. **Ferramentas da qualidade: aplicação na atividade florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2007.159 p.

CAPITULO 2

CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL ENERGÉTICO DOS COPRODUTOS DA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTOS CLONAIS DE EUCALIPTO

Resumo

A definição do manejo florestal para obtenção de multiprodutos ou para a condução de florestas energéticas pode ser realizada por meio da qualidade e potencial energético dos seus coprodutos. Neste contexto, objetivou-se caracterizar e determinar o potencial energético de coprodutos da colheita de madeira em povoamentos clonais de *E. urophylla* x *E. grandis* e de *E. saligna*, ambos com 7 anos de idade. Para isso, realizou-se a colheita das árvores e processamento em cinco cenários, sendo quatro diâmetros limites da altura comercial entre celulose e coprodutos de 8, 10, 12 e 14 cm, bem como de árvore inteira, com posterior cavaqueamento dos coprodutos. Os cavacos produzidos foram avaliados quanto à umidade, química imediata e poder calorífico. Além disso, foi determinada a biomassa seca dos diferentes compartimentos das árvores e empregado o inventário florestal para obter a quantidade de coprodutos e potencial energético por área para todos os cenários, bem como determinou-se a participação percentual de cada componente da árvore nos coprodutos produzidos. A biomassa seca foi comparada entre os estandes de eucalipto pelo teste t (α = 0,05), as características energéticas foram avaliadas entre os diâmetros limites no mesmo povoamento pelo teste de Tukey (α = 0,05) e entre povoamentos nos mesmos diâmetros limites pelo teste t (α = 0,05). Desta maneira, verificou-se que o poder calorífico superior e inferior não apresentaram diferenças significativas entre os coprodutos produzidos, porém, o *E. saligna* foi mais susceptível aos tratamentos, quanto aos parâmetros de química imediata, principalmente, em teores de cinzas, devido maior variação da participação percentual dos componentes das árvores presentes nos coprodutos. Entretanto, o *E. urophylla* x *E. grandis* apresentou parâmetros energéticos constantes nos diferentes diâmetros limites avaliados. Quanto a quantidade de biomassa seca por hectare, verificou-se que os diâmetros limites acima de 10 cm apresentaram valores acima de 32 t ha^{-1}, para ambas as espécies, com diferença significativa apenas no tratamento de árvores inteiras, sendo maior para *E. urophylla E.* x *grandis*. Tais resultados foram refletivos no potencial energético por hectare.

Palavras-chave: Biomassa; Cavacos; Poder calorífico; Química imediata.

Abstract

The definition of forest management to obtain multi-products or to conduct energetic forests can be carried out through the quality and energetic potential of its co-products. In this context, the aim was to characterize and determine the energy potential of coproducts from wood harvesting in clonal stands of *E. urophylla* x *E. grandis* and *E. saligna*, both at 7 years-old. For that, the trees were harvested and processed in five scenarios, with four diameters limiting the commercial height between pulp and coproducts of 8, 10, 12 and 14 cm, as well as the full tree, with subsequent chipping of the coproducts. The chips produced were evaluated in terms of moisture, immediate chemistry and calorific value. In addition, the dry biomass of the different tree compartments was determined and the forest inventory was used to obtain the quantity of coproducts and energy potential per area for all scenarios, as well as to determine the percentage share of each tree component in the coproducts produced. The dry biomass was compared between the eucalyptus stands by the t-test ($\alpha = 0.05$), the energy characteristics were evaluated between the limit diameters in the same stand by the Tukey test ($\alpha = 0.05$) and between stands in the same limit diameters by the t-test ($\alpha = 0.05$). Thus, it was found that the upper and lower calorific value did not present significant differences between the coproducts produced, however, the E. saligna was more susceptible to treatments, regarding the immediate chemical parameters, mainly in ash contents, due to greater variation in the percentage share of the components of trees present in the coproducts. However, *E. urophylla* x *E. grandis* presented constant energetic parameters in the different evaluated limit diameters. Regarding the amount of dry biomass per hectare, it was verified that the limit diameters above 10 cm presented values above 32 t ha^{-1}, for both species, with significant difference only in the treatment of whole trees, being greater for *E. urophylla* x *E. grandis*. Such results were reflective of the energy potential per hectare.

Keywords: Biomass; Chip; Calorific power; Immediate chemistry.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia proveniente de fontes renováveis no Brasil e no mundo vem crescendo significativamente nos últimos anos (BHATTACHARYA et al., 2016). Em especial, a biomassa tem aumentado sua proporção e vem sendo estudada para diversificar a matriz energética. A biomassa florestal pode ser proveniente de madeira sólida, pellets, serragem, coprodutos de serrarias e também da colheita de madeira (BAKER et al., 2012; BRAND, 2013; VATRAZ; BORGES, 2019), ou seja, tudo que não é aproveitado para o mercado de madeira sólida e indústria de papel e celulose.

O desenvolvimento do uso de biomassa florestal como fonte de energia renovável tem criado a necessidade de entender com detalhes as suas propriedades energéticas. Tal fato, deve-se, principalmente, ao planejamento da condução dos povoamentos florestais para obtenção de multiprodutos ou apenas para a produção de energia, como é o caso das florestas energéticas. Logo, países como os Estados Unidos tem buscado nos últimos anos empregar a árvore inteira para geração de energia, conduzida originalmente para polpação, pois as fábricas de celulose requerem cavacos de qualidade (BAKER et al., 2012). Logo, no Brasil, a situação não é diferente.

Os problemas de intertravamento no sistema de alimentação de caldeira são relatados por diversos autores, como Dai et al. (2012) e Rackl e Günthner (2016). Tais autores mencionam que os principais causadores do problema são a presença de pós finos, compressibilidade do material e umidade. Portanto, a mistura de partículas maiores, como madeira e resíduos de partículas finas, aliadas à umidade adequada, podem auxiliar na garantia do fluxo contínuo ao reator.

Sabe-se que os coprodutos, compostos pela seção final do fuste, casca, galhos e folhas são utilizados por empresas do setor de papel e celulose, onde a biomassa produzida na operação de colheita de madeira é aproveitada nas caldeiras de força para geração de energia no processo fabril (IBÁ, 2017), bem como para facilitar os processos silviculturais, devido à limpeza da área.

Geralmente, no Brasil, o processo se inicia pela colheita mecanizada da madeira no sistema *full tree* (árvores inteiras), composto pelo *feller buncher*, *skidder* e processador florestal *harvester* (MACHADO et al., 2014). Este sistema

proporciona a concentração da biomassa residual, ou seja, dos galhos, folhas e seção final do fuste próxima das estradas ao longo dos talhões (LEINONEN, 2004). Após finalizadas as operações de colheita da madeira, e posterior período de secagem do material, inicia-se a operação de processamento de coprodutos. Essa consiste no empilhamento dos coprodutos e sua transformação em cavacos com o uso de picadores florestais, e posteriormente são transportados até o consumidor final.

Devido a grande complexidade das operações florestais, tanto na colheita e transporte, como na combustão em caldeiras, as decisões pela alteração do diâmetro limite da altura comercial entre a produção de celulose e coprodutos, bem como a escolha do emprego de árvores inteiras para a geração de energia, devem ser muito bem planejadas. Para isso, torna-se necessário conhecer as características energéticas dos coprodutos gerados em diferentes cenários, a fim de auxiliar os gestores em suas tomadas de decisões.

A ausência de informações na literatura sobre a proporção ótima entre componentes arbóreos presentes nos coprodutos destinados a energia impulsionaram esta pesquisa, pois existem estudos que somente quantificaram e caracterizaram os componentes arbóreos (madeira, casca, galhos e folhas) de maneira isolada e teórica (ELOY et al., 2016; SALVADOR et al., 2016; SIMETTI et al., 2018). Portanto, o problema deste trabalho foi encontrar a composição ideal entre os componentes das árvores para garantir a qualidade energética dos cavacos.

Dentro deste contexto, este trabalho teve como hipótese o fato que o aumento do conteúdo lenhoso da árvore na composição dos coprodutos pode melhorar as suas características energéticas. Portanto, objetivou-se caracterizar e avaliar o potencial energético de cavacos de coprodutos da colheita de madeira em povoamentos clonais de eucalipto, oriundos de diferentes diâmetros da altura comercial entre celulose e energia, bem como o uso de árvores inteiras.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado em povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake x *Eucalyptus grandis* W Hill ex Maiden e *Eucalyptus saligna* Smith, com sete anos de idade, sendo localizados no Paraná, sul do Brasil. O clima foi classificado como Cfb-Köppen, com temperatura e precipitação média anual de 16 ºC e 2.004 mm, respectivamente (ALVARES et al., 2013). Esses povoamentos clonais tinham um espaçamento inicial de 3,75 m × 2,40 m e estavam estabelecidos na mesma classe de sítio (Tabela 9).

Tabela 9. Características dos povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*.

Características	*E. urophylla* × *E. grandis*	*E. saligna*
Idade (Anos)	7	7
Diâmetro à altura do peito (cm)	18,2 ± 3,0	18,7 ± 2,6
Altura total (m)	31,7 ± 3,0	31,4 ± 3,1
Altura dominante (m)	34,1 ± 0,8	34,1 ± 0,4

2.2 Inventário florestal e quantificação da biomassa

Inicialmente, foi realizado um inventário florestal para medir o diâmetro na altura do peito ena altura total das árvores. As parcelas amostrais requeridas (n) foram determinadas por meio do coeficiente de variação (cv) do diâmetro na altura do peito para população finita (equação 7), conforme Kershaw et al. (2017).

$$n=\frac{N\cdot t^2\cdot cv^2}{N\cdot LE^2+t^2\cdot cv^2} \quad (7)$$

Em que: n é parcelas amostrais necessárias, N é parcelas totais na população, cv é coeficiente de variação (%), LE é limite de erro permitido igual a 10% e t valor (α = 0,05).

As parcelas foram alocadas aleatoriamente com dimensões médias de 30,5 m × 24,9 m (759,45 m²) e 37,1 m × 23,3 m (864,43 m²), respectivamente,

nos povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e de *E. saligna*, devido às correções topográficas aplicadas. Um total de 12 e 8 parcelas foram alocadas, respectivamente, nos povoamentos, considerando 9 e 7 parcelas necessárias para um limite de erro permitido igual a 10%. Assim, foram obtidas cinco classes de diâmetros na altura do peito, o que possibilitou definir as árvores amostradas para quantificação da biomassa verde (Tabela 10).

Tabela 10. Classes de diâmetro e amostragem necessária de árvores em povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*.

Classes	Limite inferior	Média	Limite superior	*f*	Número de árvores amostradas	
	(cm)				*E. urophylla* × *E. grandis*	*E. saligna*
1	7,0	9,0	10,9	35	2	2
2	11,0	13,0	14,9	186	5	5
3	15,0	17,0	18,9	885	11	11
4	19,0	21,0	22,9	914	10	10
5	23,0	25,0	27,5	51	2	2
Total				2.071	30	30

Em que: *f* é a frequência de árvores por hectare.

A biomassa verde das árvores foi quantificada em campo pelo método destrutivo, no qual os compartimentos das árvores (madeira, cascas, galhos e folhas) foram seccionados e pesados com balança digital de precisão de 0,01 g, com capacidade de 500 kg. Além disso, foram obtidas subamostras para avaliar a umidade e a biomassa seca, nas quais foram amostrados discos de 3 cm de espessura nas alturas de 0%, 25%, 50% e 75% das árvores para amostrar os compartimentos madeira e casca, e foram coletadas subamostras para galhos e folhas.

As amostras de biomassa foram secas em estufa com circulação de ar a 105 ºC até peso constante, conforme ABNT NBR 14929: 2017 (ABNT, 2017) e equação 8 (TELMO; LOUSADA, 2011). As estimativas de biomassa seca foram realizadas multiplicando a frequência absoluta das árvores em cada classe de diâmetro por parcela.

$$w=\frac{(m_2-m_3)}{(m_2-m_1)}\times 100 \qquad (8)$$

Em que: w é a umidade (%), m1 é a massa do recipiente vazio (g), m2 é a massa do recipiente com peso vazio mais amostra antes da secagem (g) e m3 é massa do recipiente com peso vazio mais amostra após secagem (g).

2.3 Sistemas de colheita e cavaqueamento

Os povoamentos foram colhidos pelo sistema de colheita de árvores inteiras (FTH) com diâmetros limites iguais a 8, 10, 12 e 14 cm, além de árvores inteiras para energia, que corresponderam aos tratamentos deste estudo (T1 – 8 cm, T2-10 cm, T3-12 cm, T4-14 cm e T5-FT). Após 60 dias de armazenamento no campo, a picagem dos coprodutos foi realizada por meio de um picador florestal CBI modelo 6.400 (Figura 11), no qual foram coletadas cinco amostras de cavacos de 1 kg em cada tratamento.

Figura 11. Cavaqueamento dos coprodutos avaliados.

2.4 Análise dos Parâmetros Energéticos

2.4.1. Umidade

Para determinação da umidade na base úmida, as amostras de cavacos foram pesadas em balança analítica de precisão de 0,1 mg para determinação do peso úmido. Em seguida, foram secadas em estufa a 105 ºC até peso

constante e levadas ao dessecador para obtenção do peso seco, conforme a norma ABNT NBR 14929:2017, e expressão apresentada anteriormente.

2.4.2 Análises Química Imediata

A análise química imediata foi realizada de acordo com a adaptação da norma ASTM D1762-84, para determinação do teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Para isto, utilizou-se balança analítica e mufla com controle de aquecimento.

O teor de materiais voláteis foi quantificado, medindo-se a fração de massa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 900 °C num forno mufla por 10 minutos. Após a extração dos voláteis, quantificou-se o resíduo composto por cinzas e carbono fixo, sendo determinado conforme a expressão (9).

$$MV= \frac{(m1-m2)}{(m1-m3)} \times 100 \qquad (9)$$

Em que: MV é teor de materiais voláteis (%), m1 é massa da amostra seca + cadinho (g), m2 é massa da amostra após mufla a 900°C + cadinho (g), sem materiais voláteis e m3 é massa do cadinho sem material (g).

Para determinação do teor de cinzas, as amostras sem umidade e materiais voláteis foram levadas ao interior da mufla, com 700 °C, e nessa condição, permaneceu por 6 horas. Ao final, dentro do cadinho ficaram somente as cinzas, que foi determinada com auxílio da expressão (10).

$$CZ\ (\%)= \frac{(m4-m3)}{(m1-m3)} \times 100 \qquad (10)$$

Em que: CZ é teor de cinzas (%), m1 é massa da amostra seca + cadinho (g), m3 é massa do cadinho sem material (g) e m4 é massa de cinzas + cadinho após 6 horas na mufla (g).

O teor de carbono fixo foi obtido por diferença de massa após submissão da amostra a 900 °C e 700 °C em mufla, conforme a equação (11).

$$CF\ (\%)= \frac{(m2-m4)}{(m1-m3)} \times 100 \qquad (11)$$

Em que: CF é carbono fixo, m1 é massa da amostra seca + cadinho (g), m2 é massa da amostra após mufla a 900°C + cadinho (g), sem materiais voláteis, m3 é massa do cadinho sem material (g) e m4 é massa de cinzas + cadinho após 6 horas na mufla (g).

2.4.3 Poder Calorifico Superior e Inferior

A determinação do poder calorífico superior foi realizada segundo a norma ASTM D5865-13, em uma bomba calorimétrica. Em seguida, o poder calorífico inferior foi calculado conforme a equação (12), descrita por Doat (1977).

$$PCI=PCS-\left(600\times9\times\frac{H\%}{100}\right) \quad (12)$$

Em que: PCI é poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}), PCS é poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) e H é teor de hidrogênio médio de biomassa florestal, sendo 6% para *Eucalyptus* (CARNEIRO et a., 2014; SILVA et al., 2015).

2.5 Energia Potencial da biomassa seca e úmidapor Unidade de Área

Para determinar a energia potencial seca, a quantidade estimada de biomassa seca de coprodutos por hectare foi multiplicada pelo poder calorífico inferior, conforme expressão (13), adaptada de Simetti et al. (2018).

$$EPs = MS\times PCI\times10^{-6} \quad (13)$$

Em que: EPs = Energia potencial seca (Gcal ha^{-1}); MS = Biomassa seca dos por unidade de área (kg ha^{-1}); PCI = Poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}).

2.6 Análises estatísticas

O teste t de Student foi aplicado para comparar a biomassa seca por hectare entre os povoamentos (*E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*), considerando as parcelas do inventário como repetições (α = 0,05). Além disso, para comparar tratamentos (diâmetros limites) foi considerado neste estudo um delineamento inteiramente casualizado, com quatro diâmetros limites (8, 10, 12 e 14 cm) e árvores inteiras para energia para avaliação das características energéticas, assumindo as amostras de cavacos como repetições. Este experimento foi avaliado por análise de variância e teste de Tukey (α = 0,05), em

que os dados apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade pelo teste de Bartlett ($\alpha = 0,05$). Enquanto que a comparação entre povoamentos nos mesmos tratamentos (diâmetros limites), aplicou-se o teste t ($\alpha = 0,05$), visto que a avaliação da interação entre povoamentos e diâmetros limites não era necessária.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos de coprodutos com diâmetros limites (T1-8 a T4-14) e árvores inteiras para energia (T5-FT) mostraram um aumento da biomassa seca por hectare com o aumento do diâmetro limite (Tabela 11). Entretanto, esses valores não apresentaram diferenças estatísticas entre os povoamentos, exceto T5-FT com maior biomassa seca no povoamento de *E. grandis* × *E. urophylla* (α = 0,05).

Tabela 11. Biomassa seca de coprodutos de povoamentos de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*.

Tratamentos	*E. urophylla* × *E grandis*	*E. saligna*	Significância
	(t ha^{-1})		
T1-8	17,9	18,3	ns
T2-10	32,0	33,7	ns
T3-12	54,9	52,0	ns
T4-14	90,1	84,4	ns
T5-FT	249,5	210,0	*

Em que: ns não é significativo entre povoamentos e * é significativo entre povoamentos (α = 0,05), pelo teste t.

Neste estudo, os coprodutos foram caracterizados considerando diferentes diâmetros limites e o uso de árvores inteiras para energia. Assim, os coprodutos a partir de 8 cm (T1-8) apresentaram menor biomassa seca, na qual grandes picadoras florestais podem ser subutilizados, uma vez que a produção de biomassa seca está abaixo do limiar econômico de 35 t ha^{-1} estabelecido para redução do movimento do picador (ORTOLAN et al., 2006). Por outro lado, os coprodutos a partir de 10 cm se aproximam desse valor, atingindo 210,0 e 249,5 t ha^{-1} nas árvores inteiras (T5-FT) para *E. saligna* e *E. urophylla* × *E. grandis*, respectivamente.

A umidade dos cavacos mostrou diferença estatística (α = 0,05) entre os coprodutos após 60 dias armazenados em campo (Figura 12), com maiores valores em T4-14 e T5-FT. Além disso, o povoamento de *E. saligna* teve

dificuldade em perder umidade, pois apresentou valores mais elevados que *E. urophylla* × *E. grandis* (Figura 12).

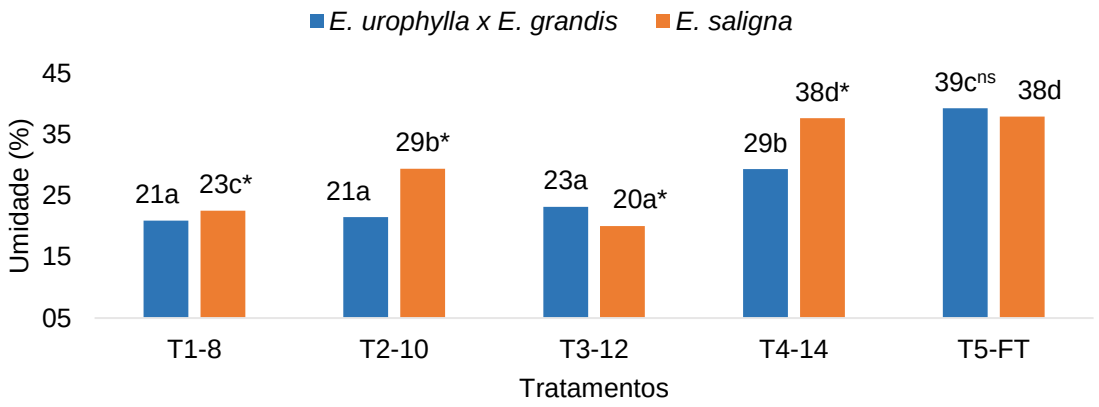


Figura 12. Umidade dos coprodutos após 60 dias no campo. Os valores médios seguidos pelas mesmas letras não diferem entre os tratamentos no mesmo povoamento pelo teste de Tukey (α = 0,05). Os valores médios seguidos por ns não se diferem entre os povoamentos em um mesmo tratamento (diâmetro limite) e * diferem entre os povoamentos em um mesmo tratamento (diâmetro limite) pelo teste t (α = 0,05).

Considerando os resultados de umidade, é importante alterar o programa de secagem de resíduos florestais recuperados com diâmetros limites maiores e árvores inteiras, uma vez que é necessário um maior tempo de armazenamento no campo (MANZONE, 2015). No entanto, o aumento do tempo de armazenamento pode levar a problemas operacionais na silvicultura devido à perda da área de plantio, o que consequentemente leva ao reajuste do agendamento das operações florestais.

O conteúdo de matéria volátil aumentou com os maiores diâmetros limites (Figura 13a), enquanto um comportamento oposto foi observado para as cinzas (Figura 13b) e o teor de carbono fixo (Figura 13c). O teor de materiais voláteis mostrou um aumento no povoamento de *E. saligna*, passando de 79,6% para 81,7% entre os tratamentos T1-8 a T5-FT, respectivamente (Figura 13a). Por outro lado, essa variável não mostrou diferença estatística entre T1-8 e T4-14 no povoamento de *E. urophylla* × *E. grandis* (Figura 13a).

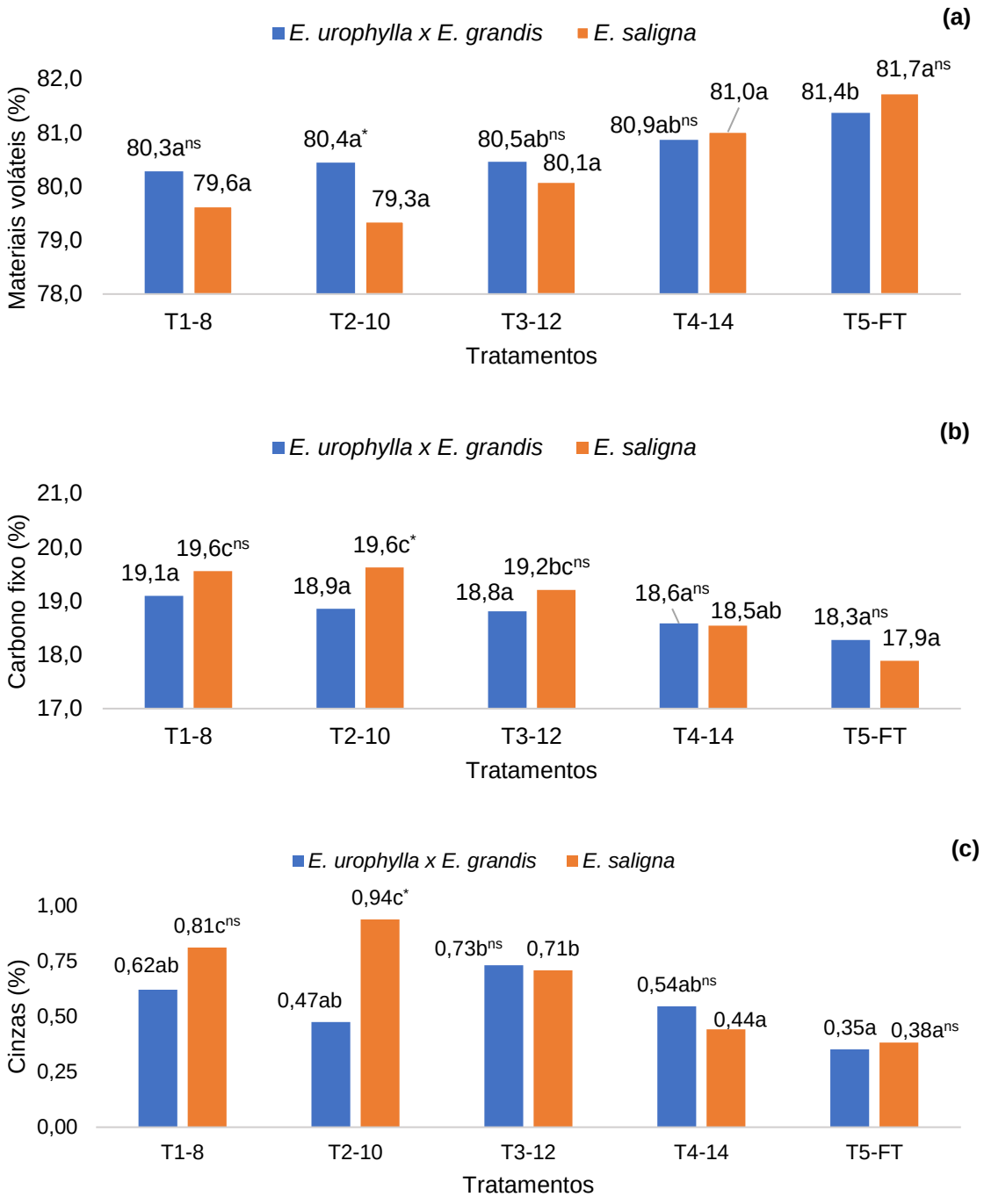


Figura 13. Teor de materiais voláteis (a), carbono fixo (b) e cinza (c) dos coprodutos. Os valores médios seguidos pelas mesmas letras não diferem entre os tratamentos no mesmo povoamento pelo teste de Tukey (α = 0,05). Os valores médios seguidos por ns não diferem entre povoamentos em um mesmo tratamento (diâmetro limite) e * diferem entre povoamentos em um mesmo tratamento (diâmetro limite) pelo teste t (α = 0,05).

As proporções de madeira nos coprodutos de *E. urophylla* × *E. grandis* (Figura 14a) foram mais constantes que *E. saligna* (Figura 14b), principalmente

em T3-12 a T5-FT. Esses resultados possivelmente afetaram as características energéticas, em que *E. saligna* foi mais suscetível aos tratamentos avaliados, uma vez que a proporção de madeira coprodutos variou de 48% a 85% e entre 66% e 87% para *E. urophylla* × *E. grandis*.

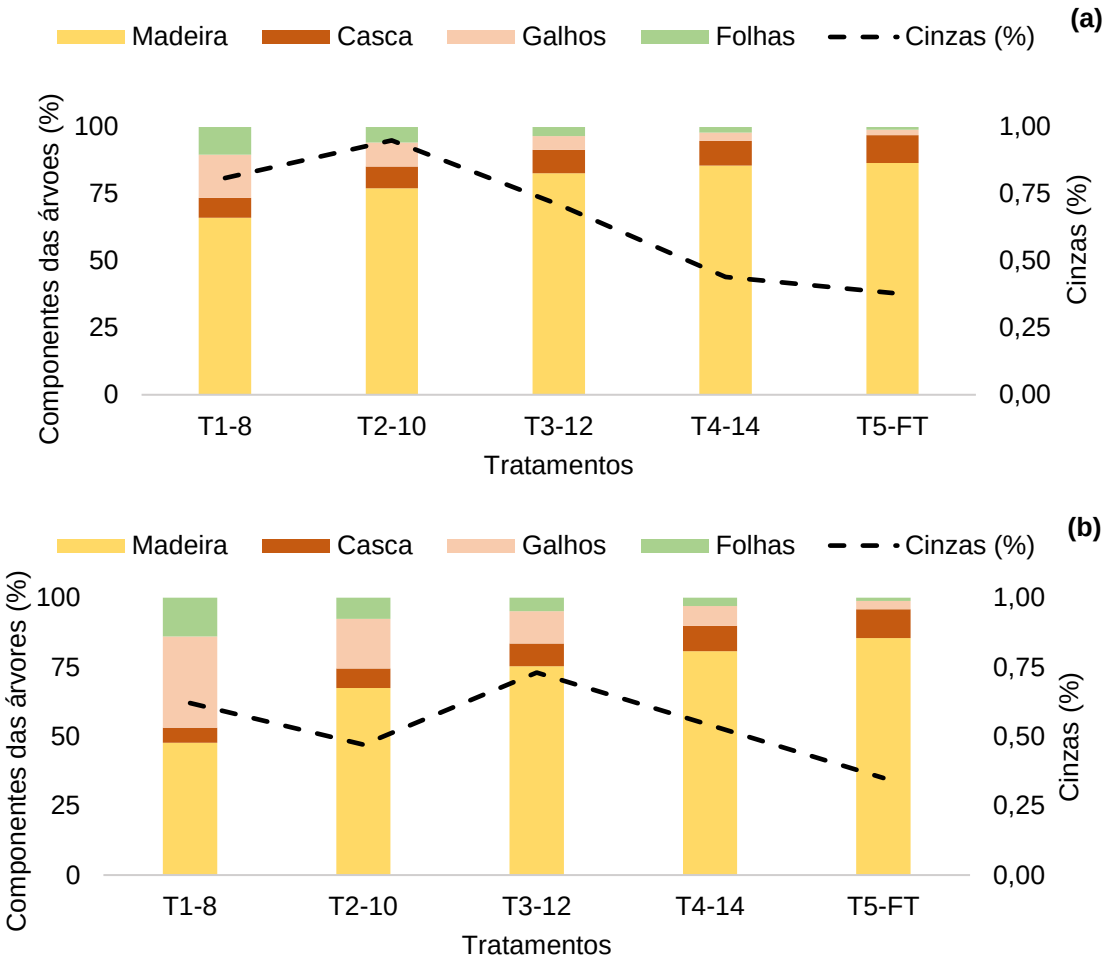


Figura 14. Compartimentos das árvores e teor de cinzas dos coprodutos de *E. urophylla* × *E. grandis* (a) e *E. saligna* (b).

O teor de cinzas de *E. saligna* foi afetado pelos diâmetros limites, com redução de 0,94% para 0,38%, e mais semelhante entre os tratamentos para *E. E. urophylla* × *E. grandis*, cujos resultados são consistentes com outros estudos (COATES et al., 2017; SIMETTI et al., 2018). Embora o teor de cinzas seja menor que os outros componentes (Figura 14a e 14b), pode ser considerado um indicador para a escolha de clones de eucalipto para fins energéticos, uma vez que *E. urophylla* × *E. grandis* não apresentou diferença estatística entre os coprodutos de 10 cm e árvores inteiras.

A proporção de casca de *E. saligna* tendeu a aumentar com o aumento do diâmetro limite e permaneceu constante para *E. urophylla* × *E. grandis*. Por outro lado, as proporções de galhos e folhas diminuíram com o aumento do diâmetro limite em ambos povoamentos, enquanto o teor de cinzas oscilou dentro de uma pequena faixa de valores inferiores a 1%.

Os valores de poder calorífico superior e inferior de *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna* não apresentaram diferenças estatísticas ($\alpha = 0,05$) entre os diâmetros limites e árvores inteiras (Figura 15a e 15b). Além disso, os valores de poder calorífico superior e inferior no tratamento (T5-FT) de árvores inteiras foram maiores para *E. urophylla* × *E. grandis* do que para *E. saligna*, em que um comportamento oposto foi observado para T4-14 e maior semelhança entre outros tratamentos.

A redução das proporções de galhos e folhas nos coprodutos por meio dos tratamentos T4-14 e T5-FT proporcionou uma diminuição do teor de cinzas. Essa relação de folhas e cinzas mostrou um padrão semelhante ao verificado por Baker et al. (2012). Além disso, esses resultados corroboram com Simetti et al. (2018), em que o teor de cinzas foi maior em cascas, seguido de galhos, folhas e madeira em povoamentos de eucalipto. Esses valores também podem estar relacionados à quantidade de nutrientes em cada compartimento arbóreo (GUIMARÃES et al., 2019; HABITZREITER et al., 2019).

Os valores de poder calorífico superior foram 4.462 a 4.651 kcal kg^{-1} para *E. saligna* e 4.430 a 4.588 kcal kg^{-1} para *E. urophylla* × *E. grandis* (Figura 15a) e podem estar relacionados à proporção de compartimentos das árvores cavacos dos coprodutos. Para Simetti et al. (2018), o PCS é mais alto na madeira e nos galhos. Portanto, o aumento da proporção de madeira nos coprodutos melhora suas características energéticas. O mesmo comportamento foi observado para o poder calorífico inferior (PCI) (Figura 15 b), que mostrou a relação entre poder calorífico e elementos químicos nos cavacos, uma vez que a maior quantidade de carbono e hidrogênio na biomassa resultou em maiores valores.

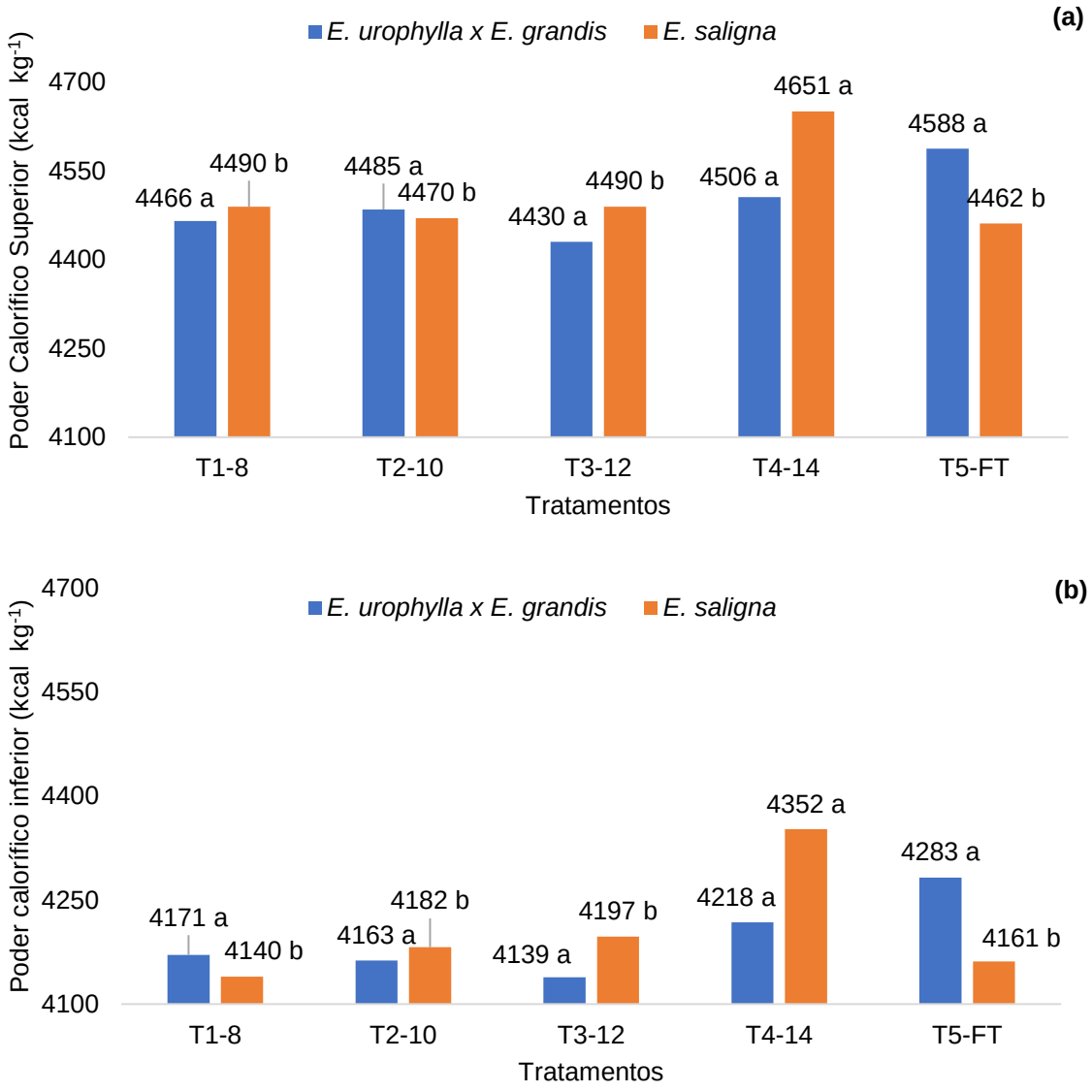


Figura 15. Valores de poder calorífico superior (a) e inferior (b) dos coprodutos. Os valores médios seguidos pelas mesmas letras não diferem entre os tratamentos no mesmo povoamento pelo teste de Tukey (α = 0,05). Os valores médios seguidos por ns não diferem entre povoamentos em um mesmo tratamento (diâmetro limite) e * diferem entre povoamentos em um mesmo tratamento (diâmetro limite) pelo teste t (α = 0,05).

O estoque de enertgia entre os tratamentos foi crescente com o aumento do diâmetro limite, sendo verificada diferença estatística significativa entre o *E. urophylla* × *E. grandis* e *E. saligna*, com 1.068,8 Gcal ha^{-1} e 873,6 Gcal ha^{-1}, respectivamente (Tabela 12). Os valores para o *E. urophylla* × *E. grandis* ficaram próximos a valores encontrados por Simetti et al (2018), que para mesma

espécie aos 6 anos de idade encontraram o valor de 1.011,7 Gcal ha^{-1}, enquanto que para o *E. saligna* os valores encontrados neste estudo foram menores.

Tabela 12. Potencial de energia de coprodutos por unidade de área (ha) em dois povoamentos clonais de *Eucalyptus*.

	Estoque de energia (Gcal ha^{-1})		
Tratamentos	*E. urophylla x E. grandis*	*E. saligna*	Significância
T1-8	74,5	74,7	ns
T2-10	133,1	140,9	ns
T3-12	227,1	218,1	ns
T4-14	380,1	367,2	ns
T5-FT	1.068,7	873,6	*

Em que: * significativo; e ns não significativo (α = 0,05) entre povoamentos pelo teste t.

4. CONCLUSÕES

O diâmetro limite da altura comercial entre celulose e coprodutos influenciou na umidade dos cavacos, apresentado aumento nos maiores diâmetros limites, que, consequentemente, deve ser uma variável a ser considerada na programação de estocagem dos coprodutos.

A análise química imediata mostrou que o *E. urophylla* × *E. grandis* foi menos susceptível a variação dos diâmetros limites, quando comparado ao *E. saligna.* Entretanto, o *E. urophylla* × *E. grandis* apresentou melhores características energéticas, podendo estar relacionado com a participação percentual dos componentes arbóreos nos coprodutos.

O poder calorífico superior e inferior não apresentaram diferença significativa com o aumento dos diâmetros limites para ambos os clones de eucalipto.

A quantidade de biomassa seca por unidade de área apresentou diferença entre os povoamentos de eucalipto apenas para coprodutos de árvores inteiras. Tais resultados refletiram no potencial energético por unidade de área, sendo maior para o *E. urophylla* × *E. grandis.*

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D5865-13: standard test methods for gross calorific value of coal and coke by the adiabatic bomb calorimeter**. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2004, p. 19.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **D1762-84: standard method for chemical analyses of wood charcoal**. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2007, p. 2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 14929-17: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa**. ABNT/CB-029 Celulose e Papel, RJ, BRA, 2017, p. 3.

BAIS, A. L. S.; LAUK, C.; KASTNER, T.; ERB, K-H. **Global patterns and trends of wood harvest and use between 1990 and 2010.** Ecological Economics, v. 119, p. 326-337, 2015.

BAKER, S. A.; GREENE, W. D.; WILSON, A. Fuels characteristics of woods-run whole tree southern pine chips. **Biomass and Bioenergy**, v. 37, p. 67-72, 2012.

BHATTACHARYA, M.; PARAMATI, S. R.; OZTURK, I.; BHATTACHARYA, S. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. **Applied Energy**, v. 62, p. 733-741, 2016.

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

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R.C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potential energy of *Eucalyptus* sp. wood according to age and different genetic materials. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

COATES, E.; CRONIN, B.; MIGUEL, A.; MCGURREN, C.; KENT, T. A characterisation of eucalyptus short rotation forestry plantations in Ireland. **Irish Forestry**, v. 74, n. 1/2, p. 61-79, 2017.

DAI, J.; CUI, H.; GRACE, J. R. Biomass feeding for thermochemical reactors. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 5, p. 716-736, 2012.

DOAT, A. Le pouvoir calorifique des bois tropical**. Bois et Forests des Tropiques**, v. 172, p. 33-48, 1977.

ELOY, E., SILVA, D. A. D., SCHMIDT, D., TREVISAN, R., CARON, B. O., ELLI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill EX Maiden. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 749- 758, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Planning forest roads and harvesting systems**. FAO, Rome, ITA, 1977, p. 148.

GUIMARÃES, C. C.; MOMOLLI, D. R.; SCHUMACHER, M. V.; LUDVICHAK, A. A.; SOUZA, H. P.; GONSALVES, J. M. W.; MALHEIROS, A. C. Silvicultural implications in hibrid of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake × *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden stand. **Agricultural Science**, v. 11, n. 14, p. 273-281, 2019.

HABITZREITER, T. L.; ADAMI, P. F.; SARTOR, L. R.; BRUN, E. J.; BATISTA, V. V.; PRESTES JUNIOR, J. V. Aboveground biomass production and nutrient accumulation in a five year old *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* plantation. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n. 2, p. 1-8, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2017**. Brasília, BR: Pöyry Ltda, 2017. 77 p.

KERSHAW, J. A.; DUCEY, M. J.; BEERS, T. W.; HUSCH, B. **Forest mensuration**. John Wiley & Sons, 2017. 663 p.

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo: VTT, 2004. 132 p.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2014.

MANZONE, M. Energy and moisture losses during poplar and black locust logwood storage. **Fuel Processing Technology**, v. 138, p. 194-201, 2015.

ORTOLAN, C.; AZEVEDO, E. W.; ANTIQUEIRA, A. C.; ORTOLAN, F. A. S.; BONISCH, H. Aproveitamento da biomassa residual de colheita florestal. In: XIV Seminário de Atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2006. 9 p.

RACKL, M.; GÜNTHNER, W. A. Experimental investigation on the influence of different grades of wood chips on screw feeding performance. Biomass and Bioenergy, v. 88, p. 106-115, 2016.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. A. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 48, p. 481-485, 2015.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A.; MAYER, S. L. S.; SOUZA, H. P.; MUNIZ, G. I. B. Production of biomass and energy stock for five *Eucalyptus* species. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 9, n. 1, p. 30-36, 2018.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bionergy**, v. 35, n. 7, p. 2634-2639, 2011.

VATRAZ, S.; BORGES, F. Q. Análise de resíduos florestais após colheita semimecanizada em um plantio de coníferas no Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 65-80, 2019.

SALVADOR, S. M.; SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; STAHL, J.; CONSENSA, C. B. Biomassa e estoque de nutrientes em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 311-321, 2016.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produtividade do processador florestal *harvester* foi superior nas atividades destinadas à produção de coprodutos com diâmetro limite entre celulose e coprodutos a partir de 10 cm. Entretanto, o aumento do diâmetro proporcionou melhorias na qualidade do processamento de madeira para celulose, expressa em comprimento de toras.

A produção de coprodutos com diâmetro limite a partir de 10 cm proporcionou quantidade satisfatória de matéria-prima para a otimização do cavaqueamento, podendo com o aumento do diâmetro limite melhorar a produção nas operações de cavaqueamento. Por outro lado, os coprodutos com diâmetros limite de dimensões maiores, e até mesmo o de árvores inteiras, apresentaram melhoria nas características energéticas de coprodutos.

Dessa maneira, conclui-se que o diâmetro limite da altura comercial entre celulose e coprodutos deve ser superior a 10 cm, pois estes apresentaram melhores indicadores de qualidade na operação de colheita de madeira, expressa em comprimento de toras, como também, melhora nas características energéticas dos cavacos produzidos dos coprodutos.

RECOMENDAÇÕES

O presente estudo mostrou a necessidade de estudos complementares, a fim de comprovar a viabilidade de uso dos diferentes coprodutos da colheita de madeira, sendo:

- Avaliar a qualidade do processamento de madeira quanto ao comprimento de toras e diâmetro limite da altura comercial entre celulose e coprodutos, por meio do processamento de multifustes;
- Avaliar o dimensionamento das máquinas de colheita da madeira e picador florestal, para otimização do desempenho operacional nos diferentes cenários de produção de coprodutos e árvores inteiras;
- Avaliar o desgaste das peças dos picadores com a variação do diâmetro limite de coprodutos, a fim de verificar se as maiores dimensões são adequadas aos maquinários existentes;
- Avaliar o comportamento do fluxo de alimentação do reator da caldeira de força com os diferentes coprodutos produzidos na colheita de madeira;
- Avaliar o período ideal de estocagem da biomassa com maiores diâmetros limites;
- Avaliar a granulometria dos cavacos produzidos nos diferentes tratamentos;
- Avaliar povoamentos clonais conduzidos em diferentes índices de sítio e idades; e
- Realizar uma análise econômica para definição dos melhores tratamentos.