

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE

**Viabilidade do aproveitamento da biomassa energética
na colheita de povoamento de Pinus em primeiro
desbaste**

TESE DE DOUTORADO

CARLA KRULIKOWSKI RODRIGUES

**IRATI, PR
2017**

CARLA KRULIKOWSKI RODRIGUES

**Viabilidade do aproveitamento da biomassa energética
na colheita de povoamento de Pinus em primeiro
desbaste**

Tese 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 Doutora.

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes - UNICENTRO
Orientador

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho - UNICENTRO
Coorientador

Prof. Dr. Dimas Agostinho Silva - UFPR
Coorientador

IRATI, PR
2017

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

RODRIGUES, Carla Krulikowski

R696v

Viabilidade do aproveitamento da biomassa energética na colheita de povoamento de Pinus em primeiro desbaste / Carla Krulikowski Rodrigues . – Irati, PR : [s.n.], 2017.

103f.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes
Coorientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho
Coorientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho Silva

Tese (doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais. Área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR.

1. Engenharia Florestal – tese. 2. Energia – carbono. 3. Madeira – colheita. 4. Sustentabilidade. 5. Produtividade. I. Lopes, Eduardo da Silva. II. Figueiredo Filho, Afonso. III. Silva, Dimas Agostinho. IV. UNICENTRO. V. Título.

CDD 585.2


TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa de Tese N° 01

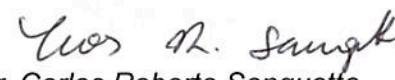
Carla Krulikowski Rodrigues

“Viabilidade do aproveitamento da biomassa energética na colheita de povoamento de Pinus em primeiro desbaste”

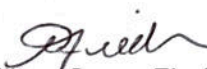
Tese aprovada em 20/02/2017, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:



Dr. Paulo Torres Fenner
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Primeiro Examinador



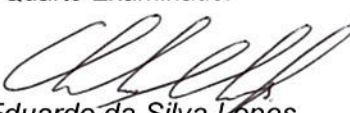
Dr. Carlos Roberto Sanquetta
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador



Dr. Nilton Cesar Fiedler
Universidade Federal do Espírito Santo
Terceiro Examinador



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



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

Irati - PR
2017

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela possibilidade de realização de muitas conquistas.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pela realização do Curso de Doutorado, em especial ao professor Eduardo da Silva Lopes, pela oportunidade, orientação e confiança, que foram muito importantes para a minha formação profissional.

Aos professores Afonso Figueiredo Filho e Dimas Agostinho Silva, pela valiosa colaboração e pelas sugestões apresentadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora Paulo Torres Fenner, Carlos Roberto Sanquetta, Nilton César Fiedler e Éverton Hillig, e as suplentes Andrea Nogueira Dias e Fabiane Aparecida de Souza Retslaff, pelos pareceres e valiosas sugestões ao trabalho.

À Araupel, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos bolsistas de Iniciação Científica, Matheus Kaminski Candido Silva e Carlos Henrique Fonseca Drinko pelo apoio na coleta e análise dos dados.

Aos funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de convivermos juntos e adquirir novos e valiosos conhecimentos.

Ao Allan L. Pelissari pela paciência, força e principalmente ao amor incondicional.

Aos meus pais, Luiz e Lúcia e minha irmã Cricilaine, pelo apoio, sempre.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho!

RESUMO

Carla Krulikowski Rodrigues. **Viabilidade do aproveitamento da biomassa energética na colheita de povoamento de *Pinus* em primeiro desbaste.**

Esta pesquisa teve por objetivo realizar uma avaliação operacional, quantificar e caracterizar a biomassa energética e determinar o estoque de energia e carbono em povoamentos de *Pinus taeda* L. de diferentes idades submetidos ao regime de desbaste. Especificamente, objetivou-se: quantificar a biomassa energética produzida nos povoamentos por meio das operações de colheita da madeira; verificar as variáveis de influência nas operações de corte e extração; e quantificar o potencial de energia da biomassa e as emissões de dióxido de carbono nas diferentes idades dos povoamentos. O estudo foi realizado na empresa Araupel, localizada no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná, sendo os dados obtidos em povoamentos com 7, 8, 9 e 10 anos de idade no modelo de desbaste misto com remoção total de 50% das árvores, realizado de forma sistemática na quinta linha do plantio e nas linhas adjacentes de forma seletiva. Inicialmente, o volume e a biomassa florestal aérea foram quantificados pelo método destrutivo, segmentando as árvores em toras grossas, toras finas, ponteiras, acículas, casca e galhos. Em seguida, foi realizada uma avaliação técnica e de custos do *harvester* e *forwarder* determinando a eficiência operacional, o rendimento energético, a produtividade e os custos operacionais e de produção. As variáveis que influenciaram na execução das operações foram analisadas por modelagem estatística. As toras finas, ponteiras, acículas, casca e galhos foram analisados para a determinação do potencial energético dos povoamentos, com a determinação da massa específica básica, poder calorífico superior e inferior, composição química e determinação do índice valor de combustível. Os resultados mostraram que as melhores idades para execução do desbaste para a geração de biomassa lenhosa foram aos 9 e 10 anos, com maior produção de toras grossas para fins industriais. Ao avaliar a colheita da madeira no desbaste nestas idades, constatou-se que a produtividade média do *harvester* foi de 26,5 e 25,1 m³ por hora efetiva (he), com custo médio de produção de R\$ 4,74 m⁻³ e R\$ 5,00 m⁻³, enquanto do *forwarder* foi de 37,0 e 37,6 m³ he⁻¹, com custo médio de produção de R\$ 4,89 m⁻³ e R\$ 4,81 m⁻³ para as idades de 9 e 10 anos, respectivamente. Na estimativa da produtividade e custos das máquinas, comprovou-se que o volume individual influenciou significativamente na produtividade e nos custos de produção do *harvester*, enquanto o volume de carga influenciou na produtividade e custos de produção do *forwarder*. Ao avaliar a produção de energia a partir da biomassa energética verificou-se que o potencial foi similar em todas as idades avaliadas. Em relação às características energéticas das toras finas e dos resíduos, as idades 9 e 10 anos se destacaram em relação ao índice valor de combustível, principalmente nos componentes toras finas, ponteiras e galhos. Desta maneira, comprovou-se que o aproveitamento da biomassa residual da colheita de madeira apresenta viabilidade na geração de energia, sendo semelhante a quantidade de energia e o potencial de emissão de CO₂ nas diferentes idades dos povoamentos.

Palavras-chave: Colheita florestal; Energia de biomassa; Produtividade; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Carla Krulikowski Rodrigues. **Viability of the use of energy biomass in the harvesting of Pine stand under first thinning.**

The aim of this study was to carry out an operational evaluation, quantify and characterize the energy biomass and determine the energy and carbon stocks in *Pinus taeda* L. stands of different ages and under thinning regime. Specifically, the objective was to quantify the energy biomass produced in the stands by means of the wood harvesting operations; to verify the influence of variables in cutting and extraction operations; and quantify the biomass energy potential and carbon dioxide emissions at the different ages of the stands. The study was carried out at the Araupel company, located in the municipality of Quedas do Iguaçu, Paraná State, in which the data were obtained in stands at 7, 8, 9, and 10 years old in the mixed thinning method with removal of 50% of all trees and carried out in a systematic mode in the fifth line of the stand and in the adjacent lines of selective mode. Initially, volume and above-ground biomass were quantified by destructive method, in which the trees were segmented in saw wood, firewood, tip, leaves, bark, and branches. Subsequently, a technical and cost evaluation of the *harvester* and *forwarder* machines was carried out for determining operational efficiency, energy efficiency, productivity, and operational and production costs. The variables that influenced in the execution of the operations were analysed by statistical modeling. The firewood, tips, leaves, barks, and branches were analysed for determining the energy potential of stands, by means of basic specific mass, higher and inferior heating value, chemical composition and determination of the fuel value index. The results showed that the best ages for applying thinnings that aim woody biomass were 9 and 10 years old, with a largest production of saw wood. When evaluating the harvesting of the wood in the thinning at these ages, it was verified that the average *harvester* productivity was 26.5 and 25.1 m³ per hour effective (he), with average production cost of R\$ 4.74 m⁻³ and R\$ 5.00 m⁻³, while the *forwarder* was 37.0 and 37.6 m³ he⁻¹, with average production costs of R\$ 4.89 m⁻³ and R\$ 4.81 m⁻³ for the ages 9 and 10 years old, respectively. For estimating productivity and costs of the machines, it was verified significant influence of the individual volume on the productivity and production costs of the *harvester*, while the load volume influenced on the productivity and production costs of the *forwarder*. When evaluating the energy production from the energy biomass it was verified that the potential was similar in all evaluated ages. In relation to the energy characteristics of thin firewoods and residues, the ages 9 and 10 years old stood out in relation to the fuel value index, mainly in the components firewood, tips, and branches. In this way, it was verified that the usage of the residual biomass of the wood harvesting presents viability in the energy generation, being similar to the amount of energy and the potential of CO₂ emission in the different ages of the stands.

Keywords: Forest harvest; Biomass energy; Productivity; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.....	6
Figura 2. Esquema da operação de desbaste. Em que: (A) modelo de desbaste aplicado; (B) abertura da trilha de operação com eliminação da 5ª linha no desbaste sistemático; e (C) área entre duas trilhas de operação onde foi feito o desbaste seletivo.....	8
Figura 3. Obtenção de biomassa verde com uso do dinamômetro digital. (a) Fuste (toras grossas, toras finas e ponteira); (b) Galhos; e (c) Acículas.....	13
Figura 4. Curvas de sítio de <i>Pinus taeda</i> e valores de altura dominante (H_{dom}) dos povoamentos nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.....	15
Figura 5. Distribuição percentual dos componentes das árvores na biomassa seca total dos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com diferentes idades. (a) Biomassa total existente; (b) Biomassa remanescente; e (c) Biomassa removida na operação de desbaste.....	21
Figura 6. <i>Harvester</i> (a) e <i>forwarder</i> (b) componentes do sistema de colheita da madeira e utilizados nos desbastes comerciais.....	31
Figura 7. Distribuição percentual dos tempos dos ciclos operacionais do <i>harvester</i> , em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.....	43
Figura 8. Distribuição percentual dos tempos dos ciclos operacionais do <i>forwarder</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.....	44
Figura 9. Produtividade efetiva do <i>harvester</i> em função do volume individual por árvore nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.....	47
Figura 10. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de produtividade do <i>harvester</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	49
Figura 11. Produtividade efetiva do <i>forwarder</i> em função da distância de extração nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	50
Figura 12. Relação do volume de carga do <i>forwarder</i> e a distância de extração nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	51
Figura 13. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de produtividade do <i>forwarder</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.....	52
Figura 14. Custos de produção do <i>harvester</i> em função do volume individual por árvore nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	55
Figura 15. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de custos de produção do <i>harvester</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	56
Figura 16. Relação dos custos de produção do <i>forwarder</i> em função do volume de carga nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	57
Figura 17. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de custos de produção do <i>forwarder</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.....	58
Figura 18. Diagrama de <i>Spiderplot</i> das sete principais variáveis dos custos operacionais do <i>harvester</i> na operação de desbaste.....	60
Figura 19. Diagrama de <i>Spiderplot</i> das sete principais variáveis dos custos operacionais do <i>forwarder</i> na operação de desbaste.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características gerais dos plantios de <i>Pinus taeda</i> L.....	7
Tabela 2. Número de árvores amostras utilizadas na cubagem e quantificação da biomassa em cada classe de diâmetro e idade.....	11
Tabela 3. Características dendrométricas médias obtidas do inventário florestal realizado nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com 7, 8, 9 e 10 anos.	16
Tabela 4. Intensidade do desbaste aplicado nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas diferentes idades avaliadas.	17
Tabela 5. Diâmetro médio à altura do peito (DAP) das árvores removidas e remanescentes e relação de desbaste (RD) nos povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas diferentes idades avaliadas.	18
Tabela 6. Biomassa energética (seca) por componente das árvores existentes antes e após a aplicação de desbaste e a biomassa removida com a operação..	19
Tabela 7. Características gerais dos plantios de <i>Pinus taeda</i> L.....	30
Tabela 8. Especificações técnicas das máquinas utilizadas no desbaste.	32
Tabela 9. Atividades parciais do ciclo operacional do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> na execução das operações de corte e extração nos povoamentos submetidos ao primeiro desbaste comercial.....	33
Tabela 10. Parâmetros estatísticos do estudo piloto utilizado no cálculo da amostragem dos ciclos operacionais das máquinas avaliadas no desbaste.....	42
Tabela 11. Tempos médios do ciclo operacional do <i>harvester</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.	43
Tabela 12. Tempos médios do ciclo operacional do <i>forwarder</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.	44
Tabela 13. Eficiência operacional, produtividade, consumo de combustível e rendimento energético do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> em povoamento de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.	45
Tabela 14. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de influência na produtividade do <i>harvester</i>	46
Tabela 15. Coeficientes e estatísticas dos modelos de produtividade do <i>harvester</i> na operação de desbaste de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.	48
Tabela 16. Análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa da produtividade do <i>harvester</i>	49
Tabela 17. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de influência na produtividade do <i>forwarder</i>	50
Tabela 18. Coeficientes e estatísticas dos modelos para estimativa da produtividade do <i>forwarder</i> nas operações de desbaste em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.	52
Tabela 19. Análise de variância do teste de identidade do modelo para estimativa da produtividade do <i>forwarder</i>	53
Tabela 20. Custos operacionais do <i>harvester</i> nas operações de desbaste.	53
Tabela 21. Custos operacionais do <i>forwarder</i> nas operações de desbaste.	54
Tabela 22. Coeficientes e estatísticas dos modelos para estimativa dos custos de produção do <i>harvester</i> nas operações de desbaste em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 9 e 10 anos.	56
Tabela 23. Análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa dos custos de produção do <i>harvester</i>	57

Tabela 24. Coeficientes e estatísticas dos modelos para estimativa dos custos de produção do <i>forwarder</i> nas operações de desbaste em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> com idades de 9 e 10 anos.	58
Tabela 25. Análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa dos custos de produção do <i>forwarder</i>	59
Tabela 26. Valores médios de massa específica básica (g cm^{-3}) e coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.	71
Tabela 27. Valores médios do poder calorífico superior e inferior (kcal kg^{-1}) e os coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.	73
Tabela 28. Valores médios do teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (%) e seus coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.	75
Tabela 29. Valores médios da análise elementar (%) e os coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.	77
Tabela 30. Índice valor de combustível na umidade verde e a 40% na base úmida e os coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de <i>Pinus taeda</i> nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.	79
Tabela 31. Características gerais dos plantios de <i>Pinus taeda</i> L.....	89
Tabela 32. Valores médios de energia da biomassa existente, remanescente e removida nos povoamentos com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial e seus coeficientes de variação (%) com os resultados do teste de Tukey.	93
Tabela 33. Valores médios de carbono na biomassa existente, remanescente e removida nos povoamentos com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial e seus coeficientes de variação (%) com os resultados do teste de Tukey.	95
Tabela 34. Valores médios do potencial de emissões de dióxido de carbono da biomassa existente, remanescente e removida nos povoamentos com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial e seus coeficientes de variação (%) com os resultados do teste de Tukey.....	97

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1 – Quantificação de biomassa energética da colheita de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. em diferentes idades submetidos ao desbaste.....	3
1 INTRODUÇÃO	4
2 MATERIAL E MÉTODOS	6
2.1 Localização e características da área de estudo	6
2.2 Povoamentos avaliados	7
2.3 Descrição dos desbastes	7
2.4 Seleção da área experimental	8
2.4.1 Seleção dos talhões.....	9
2.4.2 Classificação do sítio	9
2.5 Coleta dos Dados.....	9
2.5.1 Avaliações dendrométricas	9
2.5.2 Cubagem das árvores.....	11
2.5.3 Modelos ajustados para estimativas de altura total e volume individual	11
2.5.4 Quantificação da biomassa energética	12
2.6 Análises estatísticas.....	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
3.1 Análise das características dos povoamentos	15
3.1.1 Classificação do sítio	15
3.1.2 Inventário florestal.....	15
3.1.3 Intensidade do desbaste.....	16
3.1.4 Relação de desbaste	17
3.2 Quantificação da biomassa energética	18
4 CONCLUSÕES	23
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
CAPÍTULO 2 – Análise técnica e custo do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> em primeiro desbaste	27
1 INTRODUÇÃO	28
2 MATERIAL E MÉTODOS	30
2.1 Área de estudo.....	30
2.2 Descrição do modelo de desbaste	30
2.3 Sistema de colheita da madeira	31
2.4 Coleta de dados	32
2.4.1 Análise operacional.....	32
2.4.2 Análise de custos das máquinas.....	35
2.4.3 Análise de sensibilidade dos custos operacionais	39
2.5 Análises estatísticas.....	40
2.6 Modelagem da produtividade e dos custos de produção	40
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
3.1 Análise técnica das máquinas.....	42
3.1.1 Análise do ciclo operacional	42
3.1.2 Eficiência operacional, produtividade, consumo de combustível e rendimento energético	45
3.1.3 Modelagem da produtividade.....	46
3.2 Análise de custos.....	53
3.2.1 Modelagem dos custos de produção	55
3.2.2 Análise de sensibilidade dos custos operacionais totais.....	59

4 CONCLUSÕES	61
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
CAPÍTULO 3 - Caracterização da biomassa energética da colheita de <i>Pinus taeda</i> L. em diferentes idades submetidos ao desbaste	65
1 INTRODUÇÃO	66
2 MATERIAL E MÉTODOS	68
2.1 Origem dos materiais avaliados	68
2.2 Análise das características energéticas	68
2.3 Análises estatísticas.....	70
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
3.1 Massa específica básica	71
3.2 Poder calorífico	72
3.3 Composição química.....	74
3.4 Índice valor de combustível.....	79
4 CONCLUSÕES	81
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
CAPÍTULO 4 - Potencial de energia e de emissões de CO ₂ em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. de diferentes idades submetidos ao desbaste	86
1 INTRODUÇÃO	87
2 MATERIAL E MÉTODOS	89
2.1 Caracterização da área de estudo	89
2.2 Descrição dos desbastes	89
2.3.1 Inventário florestal e seleção das árvores amostra	89
2.3.2 Quantidade de energia por unidade de área	90
2.3.3 Estoque de carbono e potencial de emissões de CO ₂ por unidade de área	90
2.4 Análises estatísticas.....	91
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
3.1 Quantificação da quantidade de energia por unidade de área.....	92
3.2 Quantificação do estoque de carbono e potenciais emissões de CO ₂	94
4 CONCLUSÕES	99
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
RECOMENDAÇÕES.....	103

INTRODUÇÃO GERAL

O desbaste é um dos tratamentos silviculturais mais importantes para o manejo das florestas plantadas destinadas à produção de madeira, tendo por finalidade agregar maior valor na qualidade do produto, e possibilitando uma diversidade de usos e aplicações. Este tratamento não tem por objetivo apenas a seleção orientada de indivíduos qualitativamente melhores, mas também uma regulagem do espaçamento entre as árvores, de maneira a reduzir a concorrência.

A remoção de algumas árvores de um povoamento por meio dos desbastes é uma operação muito complexa e onerosa em termos econômicos quando realizada de forma mecanizada, pelo espaço restrito para o deslocamento das máquinas no interior do povoamento, acarretando em baixa produtividade e elevados custos de produção. Normalmente, no Brasil, os desbastes nos povoamentos florestais, tanto de pinus quanto de eucalipto são realizados com uso do sistema de colheita de toras curtas (*cut-to-length*), onde a remoção das árvores é realizada de maneira sistemática de uma linha de plantio e seletiva nas linhas adjacentes, sendo a distância determinada de acordo com o alcance da grua do *harvester*, e normalmente com remoção de 50% das árvores do povoamento.

O sistema mecanizado de colheita da madeira, mesmo aplicado nas operações de desbaste, é afetado por diversas variáveis que interferem na capacidade operacional das máquinas e, conseqüentemente, no custo final da madeira. Tais variáveis de influência estão relacionadas às condições físicas do terreno, às características do povoamento e ao planejamento operacional. Além disso, o desbaste influencia a produtividade e os custos das máquinas de colheita de madeira, estando relacionado com o número de árvores e linhas a serem removidas, o alcance da grua da máquina e os sortimentos de madeira a serem produzidos.

Outro aspecto relevante é a demanda por biomassa energética no Brasil, podendo os povoamentos submetidos ao desbaste comercial ser uma fonte alternativa de matéria-prima para geração de energia renovável. Esta é uma fonte tradicionalmente utilizada para fins energéticos em diversos países, sendo que no Brasil vem ganhando espaço dentro do setor florestal, pois a biomassa residual deixada no povoamento após a colheita da madeira apresenta potencial como fonte de energia renovável e não devendo ser desprezada.

Por isso, a avaliação do potencial de uso da biomassa energética originada em colheita da madeira necessita de estudos em relação a alguns fatores relevantes, como a caracterização do material em termos de massa específica, poder calorífico e composição química, a fim de verificar a sua qualidade energética, bem como estimar a quantidade de energia existente por unidade de área e seu potencial de emissões de carbono para a atmosfera.

Diante disso, o objetivo geral desta pesquisa foi avaliar as operações de colheita da madeira e quantificar o potencial energético e emissões de dióxido de carbono da biomassa de povoamentos de *Pinus taeda* L. submetidos ao regime de desbaste em diferentes idades, visando contribuir para a gestão eficiente das operações, ganhos de produtividade, redução de custos e manutenção da sustentabilidade florestal.

Para atingir o objetivo geral, o estudo encontra-se organizado em quatro capítulos, onde cada capítulo teve a finalidade de abranger um objetivo específico. Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar o efeito da idade na realização do desbaste em povoamentos de *Pinus taeda* L. para a produção de biomassa energética e na operação de colheita da madeira;
- b) Realizar uma análise técnica e de custos das máquinas de colheita da madeira na execução do desbaste em duas idades de povoamentos de *Pinus taeda* L.;
- c) Caracterizar a biomassa energética da colheita da madeira de *Pinus taeda* L. em quatro idades em povoamentos submetidos ao desbaste comercial; e
- d) Avaliar a produção de energia e o potencial de emissões de CO₂ em povoamentos de *Pinus taeda* L. de quatro idades submetidos ao desbaste comercial.

CAPÍTULO 1 – Quantificação de biomassa energética da colheita de povoamentos de *Pinus taeda* L. em diferentes idades submetidos ao desbaste

Resumo: Objetivou-se avaliar o efeito da idade na produção de biomassa energética em povoamentos de *Pinus taeda* submetidos ao primeiro desbaste, a fim de verificar a potencialidade deste produto na geração de energia. O estudo foi realizado na empresa Araupel, localizada no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná. Foram avaliados povoamentos com 7, 8, 9 e 10 anos de idade em primeiro desbaste, com condições semelhantes de solo, relevo e sítio. Inicialmente, realizou-se um inventário florestal para obtenção de dados dendrométricos dos povoamentos para auxiliar na seleção de árvores amostra. Em seguida, realizou-se a quantificação da biomassa energética pelo método destrutivo, segmentando as árvores nos seguintes compartimentos: toras grossas, toras finas, ponteira, acículas, casca e galhos, sendo os últimos quatro componentes considerados como biomassa residual da colheita de madeira. A amostragem foi composta por 47 árvores, sendo 17, 9, 10 e 11 árvores nas idades 7, 8, 9 e 10 anos, respectivamente. Considerando-se um Delineamento Inteiramente Casualizado, aplicou-se a ANOVA aos dados, e quando necessário, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os resultados obtidos mostraram que a biomassa energética da colheita de povoamentos de *Pinus taeda* submetidos ao desbaste não apresentaram diferença estatística significativa entre as quatro idades avaliadas, apresentando uma produção similar de biomassa seca dos componentes toras finas e resíduos, com médias de 14,3 e 15,8 Mg ha⁻¹, respectivamente. A biomassa residual foi composta predominantemente pelos galhos, seguida de casca, acículas e ponteiros. A utilização dos resíduos da colheita de madeira remanescentes no campo, pode duplicar o potencial energético dos povoamentos florestais.

Palavras-chave: Resíduos florestais; Energia; Manejo Florestal.

Quantification of energy biomass from *Pinus taeda* L. stands at different ages under thinning

Abstract: The aim of this study was to evaluate the effect of the age on energy biomass production in *Pinus taeda* stands under first thinning, in order to verify the potential of this product in energy generation. The study was carried out at Araupel company, located in the municipality of Quedas do Iguaçu, Paraná State. Stands at 7, 8, 9, and 10 years old were evaluated under first thinning, with similar conditions of soil, relief and site. Initially, a forest inventory was taken to obtain forest data from stands to assist in the selection of sample trees. Then, the energy biomass was quantified by destructive method, segmenting the trees in the following compartments: saw wood, firewood, tip, leaves, and branches, in which the last four components were considered residual biomass of the wood harvesting. Sampling was composed of 47 trees, being 17, 9, 10, and 11 trees in stands at 7, 8, 9, and 10 years old, respectively. Considering a completely randomized design, the ANOVA was applied to the data, and, when necessary, the means were compared by the Tukey's test at a 5% of error probability. The results obtained showed that the energy biomass of *Pinus taeda* stands under thinning did not show a statistically significant difference between the evaluated four ages, presenting a similar dry biomass production of the components of firewood and residues, with averages of 14.3 and 15.8 Mg ha⁻¹, respectively. The residual biomass was predominantly composed of branches, followed by bark, leaves, and tips. The use of residual wood harvesting residues in the field can double the energy potential of forest stands.

Keywords: Forest residues; Energy; Forest management.

1 INTRODUÇÃO

A biomassa florestal é um importante componente da matriz energética de diversos países. No Brasil, de acordo com o Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN), em 2015, a biomassa florestal representou apenas 8,2% da oferta interna de energia (BEN, 2016). Entretanto, esta fonte de energia é considerada estratégica para mitigar as emissões de carbono para a atmosfera (VAN BELLE et al., 2003; AHTIKOSKI et al., 2008; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009). A participação da biomassa na matriz energética brasileira ganhou destaque na Conferência de Paris em 2015, onde o Brasil comprometeu-se a reduzir em 37% até 2025 e 43% até 2030, as emissões de gases de efeito estufa (EMBRAPA, 2015).

Atualmente, o setor brasileiro de árvores plantadas possui uma área de aproximadamente 7,8 milhões de hectares, predominantemente composta por espécies dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., conduzidos para produção de diversos fins madeireiros (IBÁ, 2016). Dentro do processo produtivo florestal, os resíduos gerados na colheita de madeira podem ser utilizados como matéria-prima para a geração de energia. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB), o Brasil gerou aproximadamente 2,9 milhões de metros cúbicos de resíduos dentro da cadeia florestal entre os anos de 2013 e 2014 (ABIB, 2015).

Os resíduos florestais gerados nas operações de colheita da madeira são constituídos pela parte superior das árvores (galhos, folhas, cascas, ponteiros e miscelâneas), toras que não atingem as dimensões mínimas necessárias para o uso ou que não possuem valor comercial, árvores com patologias ou mortas, tocos e raízes (FOELKEL, 2007; WHITTAKER et al., 2011; ABIB, 2015). Apesar do potencial de ciclagem de nutrientes e conservação dos solos, a permanência destes resíduos no campo dificulta as operações de implantação do novo povoamento florestal. Por essa razão, muitas empresas têm como prática o aproveitamento da biomassa residual da colheita de madeira como combustível, (CASTRO, 2014; SOLER, 2016), entretanto, somente no regime de corte raso e com uso do sistema de colheita de madeira de árvores inteiras (*full-tree*).

Apesar do grande potencial dos resíduos florestais para a geração de energia, uma parte importante é deixada no campo, principalmente em

povoamentos submetidos ao regime de desbaste, devido às dificuldades e os elevados custos para o seu aproveitamento (WHITTAKER et al., 2011).

A quantidade de biomassa energética produzida na operação de colheita da madeira é desconhecida, principalmente em povoamentos de pinus submetidos ao regime de desbaste. Além disso, existem poucos estudos com a finalidade de quantificar os resíduos florestais, visto que, em termos econômicos, o produto mais valioso da floresta plantada é o fuste, restringindo-se apenas ao volume comercial.

A capacidade de produção de resíduos na operação de colheita da madeira depende de diversas variáveis que estão associadas à qualidade da floresta, homogeneidade das árvores, sortimentos, máquinas de colheita e a gestão que se pretende aplicar aos resíduos florestais (FOELKEL, 2007; WHITTAKER et al., 2011; ABIB, 2015). Portanto, o conhecimento da quantidade dos resíduos produzidos auxiliará em diversas questões no planejamento do fluxo de energia na indústria, com a geração de um abastecimento confiável de biomassa, seleção de máquinas e equipamentos adequados para o seu processamento e a garantia de baixos custos de produção (CANTO, 2009; JONG et al., 2014).

Objetivou-se quantificar a biomassa aérea nos povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades submetidos ao desbaste, verificando a viabilidade do uso dos resíduos da colheita da madeira para fins energéticos, bem como auxiliar nas decisões para otimização dos recursos disponíveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e características da área de estudo

O estudo foi realizado na empresa Araupel, localizada no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná, Brasil, entre as coordenadas geográficas 25°26'27" S e 52°55'17" W (Figura 1).

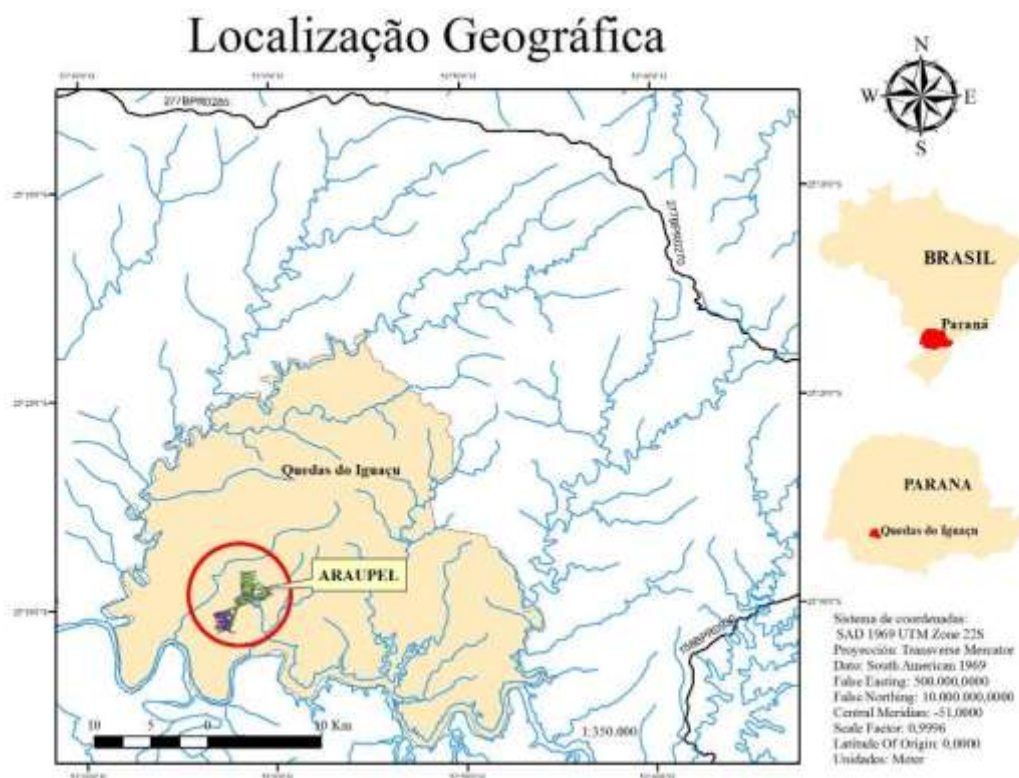


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo. Fonte: Cabral (2014).

De acordo com o sistema de classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como subtropical (Cfa), com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes, tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida e com 1.779 mm de precipitação média anual (CAVIGLIONE et al., 2000).

Na região de estudo, predominam-se os solos do tipo Neossolo litólico, com relevo suavemente ondulado, apresentando uma declividade média de 8% e altitude média de 566 m.

2.2 Povoamentos avaliados

Os povoamentos estudados foram de *Pinus taeda* L. implantados nos anos de 2008, 2007, 2006 e 2005, estando com idades de 7, 8, 9 e 10 anos no momento das avaliações. A densidade inicial era de 1.667 árvores por hectare (espaçamento de 3,0 m x 2,0 m). As idades citadas referem-se as idades que foram aplicados o primeiro desbaste comercial (Tabela 1).

Tabela 1. Características gerais dos plantios de *Pinus taeda* L.

Informações	Idade dos povoamentos (anos)			
	7	8	9	10
Ano de plantio	2008	2007	2006	2005
Área de plantio (ha)	439,1	263,9	141,3	162,5
Poda baixa (Ano de execução)	2012	2011	2010	2009
Árvores plantadas (ha)	1.667	1.667	1.667	1.667
Árvores existentes em 2015 (ha)	1.470	1.487	1.437	1.417
Taxa de mortalidade (%)	12,0	11,0	14,0	15,0
DAP médio (cm)	18,1	18,3	19,6	19,1
h média (m)	12,8	13,6	15,2	15,6
VMI (m ³)	0,160	0,173	0,225	0,215

Em que: DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo; h = Altura total; e VMI = Volume médio individual das árvores.

2.3 Descrição dos desbastes

Os desbastes avaliados foram classificados como mistos, com o corte sistemático da quinta linha de árvores e remoção de aproximadamente 20% dos indivíduos para a abertura dos ramais de extração, somada às falhas. Considerando o alcance máximo do cabeçote do *harvester*, foram removidas 30% das árvores dispostas em ambos os lados da trilha por meio do desbaste seletivo (Figura 2).

Na realização do desbaste pelos critérios definidos pela empresa, foram produzidos dois sortimentos de toras com casca. As toras grossas com comprimentos de 3,60 m e diâmetro entre 15,0 e 35,5 cm destinadas ao uso industrial (serraria e laminação), e toras finas, com comprimento de 3,05 m e diâmetro entre 3,5 e 15,0 cm, destinadas à produção de energia. Além disso, foram gerados os resíduos da colheita da madeira, que eram compostos pelos galhos, acículas e ponteiras (porção final do fuste com diâmetro abaixo de 3,5 cm). Desta maneira, foi considerada biomassa energética o somatório do peso da biomassa seca das toras finas, acículas, ponteiras, casca e galhos.

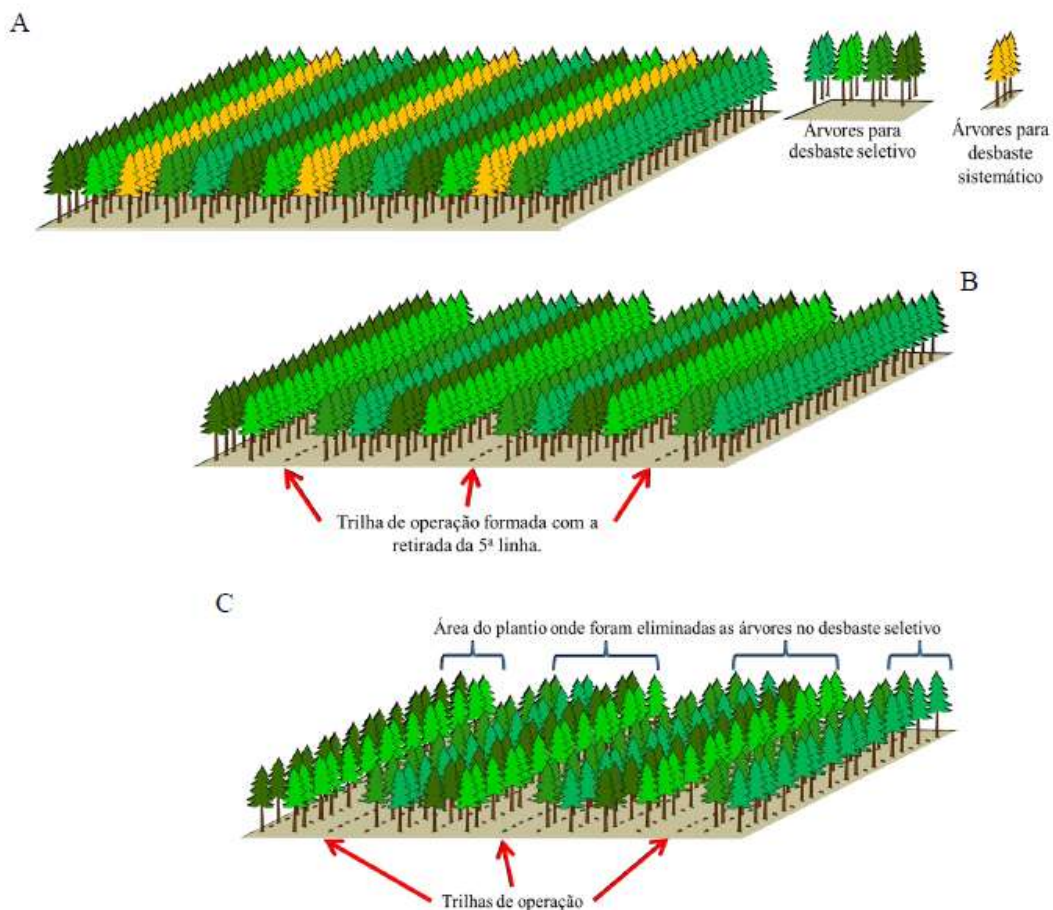


Figura 2. Esquema da operação de desbaste. Em que: (A) modelo de desbaste aplicado; (B) abertura da trilha de operação com eliminação da 5ª linha no desbaste sistemático; e (C) área entre duas trilhas de operação onde foi feito o desbaste seletivo. Fonte: Cabral (2014).

2.4 Seleção da área experimental

A área de estudo foi selecionada de acordo com o planejamento da empresa para a realização do primeiro desbaste a ser aplicado durante o ano de 2015, onde foram selecionadas áreas após uma análise da homogeneidade da floresta e dos padrões para a aplicação dos desbastes.

Inicialmente foram selecionados os talhões segundo a homogeneidade de solo e relevo em que foram avaliadas as características dos povoamentos por meio de um inventário florestal, de modo a atingir as seguintes finalidades: verificar se todas as idades avaliadas se encontravam no mesmo sítio; obter as estimativas dos parâmetros dendrométricos da floresta; identificar as árvores para a realização do desbaste; e definir a mesma intensidade de desbaste em todas as idades dos povoamentos.

2.4.1 Seleção dos talhões

As áreas do estudo foram previamente selecionadas pela empresa, atendendo as características desejadas e estando próximas umas das outras, visando facilitar a execução do desbaste mecanizado.

Com os mapas das áreas e visita *in loco*, foram selecionados os talhões com uma área mínima de 10 hectares em cada idade e comprimento mínimo do talhão de 200 m, a fim de atender o posterior estudo operacional da colheita da madeira.

2.4.2 Classificação do sítio

Para a realização da classificação do sítio foi utilizado o modelo de Chapman-Richards ajustado por Retslaff (2014) para *Pinus taeda* L. na região Centro-Sul do estado do Paraná. A equação ajustada proposta permitiu gerar as curvas de Índice de Sítio por meio da seguinte expressão (1):

$$H_{dom} = 33,8439000 \cdot \left[(1 - e^{(-0,0925913 \cdot I_i)}) \right]^{1,4198700} \quad (1)$$

Em que: H_{dom} = Altura dominante (m); I_i = Idade (ano), sendo a idade-índice igual a 18 anos e o intervalo entre as classes de sítio de 3,0 m, com índices de sítio de 18, 21, 24, 27 e 30 m.

2.5 Coleta dos Dados

2.5.1 Avaliações dendrométricas

Para auxiliar na determinação do estoque de biomassa foi realizado um inventário florestal antes da execução dos desbastes nos povoamentos das diferentes idades, com o objetivo de mensurar o diâmetro a 1,3 m do solo (DAP), a altura total (h) e as alturas dominante (H_{dom}) nas parcelas. O inventário foi realizado com auxílio de fita métrica para medir a circunferência a 1,3 m do solo (CAP) de todas as árvores das parcelas e o Vertex para medição da altura total de 20% das árvores das parcelas, alocadas nas primeiras fileiras e não inclusas as árvores dominantes.

O inventário florestal se iniciou com a identificação e marcação das árvores a serem retiradas no desbaste misto. Em seguida, foram utilizadas 10 parcelas alocadas sistematicamente em cada idade, com o dimensionamento proposto por

Cabral (2014), com uma área de 630 m², possuindo 15 m de largura e 42 m de comprimento.

A intensidade amostral foi determinada após a realização de um inventário piloto e calculada em função do coeficiente de variação (CV) para populações finitas, devido ao tamanho da área ser conhecido (10 ha para cada idade), conforme a expressão (2) descrita por Sanquetta et al. (2009):

$$n = \frac{Nt^2 (CV\%)^2}{N(LE\%)^2 + t^2 (CV\%)^2} \quad (2)$$

Em que: LE = Limite de erro admitido no inventário de 10%; e t = Valor de t para $\alpha = 0,05$.

As informações obtidas serviram de base para gerar a distribuição diamétrica, sendo o número de classes obtido pela fórmula de Sturges, descrito por Machado e Figueiredo Filho (2006). Estas classes foram utilizadas para auxiliar na seleção das árvores amostras, visando a cubagem e quantificação da biomassa energética.

Portanto, considerando-se 12 classes de diâmetro, que variaram de 3,5 cm a 33,5 cm, foram selecionadas 17, 9, 10 e 11 árvores, respectivamente nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos (Tabela 2).

A variação do número de árvores amostras entre as diferentes idades se deveu ao uso de apenas uma fórmula para determinar a distribuição diamétrica e quando a idade não possuía indivíduos em uma classe diamétrica, eram amostrados mais indivíduos na idade onde a classe era existente, de modo a atender a necessidade de amostrar no mínimo três árvores por classe nas quatro idades dos povoamentos.

Tabela 2. Número de árvores amostras utilizadas na cubagem e quantificação da biomassa em cada classe de diâmetro e idade.

Classes de DAP	Limites (cm)	Idade dos povoamentos (anos)				Total
		7	8	9	10	
1	3,5 a 6,0	4	-	-	-	4
2	6,1 a 8,5	3	-	-	1	4
3	8,6 a 11,0	1	1	1	1	4
4	11,1 a 13,5	1	1	1	1	4
5	13,6 a 16,0	1	1	1	1	4
6	16,1 a 18,5	1	1	1	1	4
7	18,6 a 21,0	1	1	1	1	4
8	21,1 a 23,5	1	1	1	1	4
9	23,6 a 26,0	1	1	1	1	4
10	26,1 a 28,5	1	1	1	1	4
11	28,6 a 31,0	1	1	1	1	4
12	31,1 a 33,5	1	-	1	1	3
Total de árvores amostra		17	9	10	11	47

Em que: DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo.

2.5.2 Cubagem das árvores

A cubagem das árvores teve por finalidade verificar a semelhança dos povoamentos quanto ao volume médio individual e ao volume por hectare. Nesta etapa, as árvores selecionadas foram derrubadas e os galhos retirados para facilitar as medições. Em seguida, com uma trena foi mensurada a altura total de cada árvore para o cálculo das alturas relativas e posterior medição dos diâmetros. As medidas para a cubagem foram tomadas nas alturas 0,10 e 1,30 m, e a 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95% da altura total de cada árvore, sendo devidamente anotadas em fichas de campo. Para o cálculo do volume de cada seção do fuste foi utilizado o método de Smalian descrito por Machado e Figueiredo Filho (2006).

2.5.3 Modelos ajustados para estimativas de altura total e volume individual

No inventário florestal foram mensuradas a altura total de 20% das árvores das parcelas, alocadas nas primeiras fileiras, a altura das demais árvores foi estimada com o modelo de Stoffels (3), que dentre os diversos modelos testados foi que apresentou o maior coeficiente de determinação ajustado, o menor erro padrão da estimativa em porcentagem e ausência de tendências aparentes na distribuição dos resíduos.

$$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Em que: \ln = Logaritmo neperiano; h = Altura total (m); DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo (cm); e ε_i = Erro aleatório.

Para a estimativa dos volumes individuais, as árvores cubadas foram empregadas como base de dados para o ajuste do modelo de Schumacher-Hall (4).

$$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \ln(h) + \varepsilon_i \quad (4)$$

Em que: \ln = Logaritmo neperiano; v = Volume individual das árvores (m^3); DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo (cm); h = Altura total (m); e ε_i = Erro aleatório.

As árvores das parcelas identificadas nas planilhas de inventário florestal permitiram o cálculo da área basal ($m^2 \text{ ha}^{-1}$) das árvores remanescentes e das removidas com o desbaste e, conseqüentemente, a determinação da intensidade do desbaste (%). Para classificar o tipo de desbaste, foi determinada a relação de desbaste (RD) sugerida por Mederski (2006), por meio das médias de diâmetro (DAP) das árvores retiradas e das árvores remanescentes, a fim de verificar a similaridade dos povoamentos (5).

$$RD = \frac{\overline{DAP} \text{ árvores retiradas}}{\overline{DAP} \text{ árvores remanescentes}} \quad (5)$$

Em que: RD = Relação de desbaste; e \overline{DAP} = Diâmetro médio à 1,3 m do solo (cm).

2.5.4 Quantificação da biomassa energética

Simultaneamente ao processo de cubagem (Item 2.5.2), foi realizada a quantificação da biomassa utilizando-se o método destrutivo, pelo qual os componentes das árvores foram separados, pesados e amostrados. Cada indivíduo foi segmentado em toras grossas e toras finas com casca, ponteira, galhos e acículas.

As amostras para a obtenção da biomassa verde foram pesadas separadamente no campo, com o uso de um dinamômetro digital de guincho com precisão de 0,01 g e com capacidade de 500 kg (Figura 3). Além disso, foram retirados discos com casca com cinco centímetros de espessura, para a determinação da massa seca do fuste e casca, sendo a 0%, 25%, 50% e 75% da altura total da árvore. A amostragem de acículas foi feita por meio de subamostras

na ponta, no meio e na base dos galhos localizados no terço médio da copa, com o mesmo procedimento adotado para os galhos.

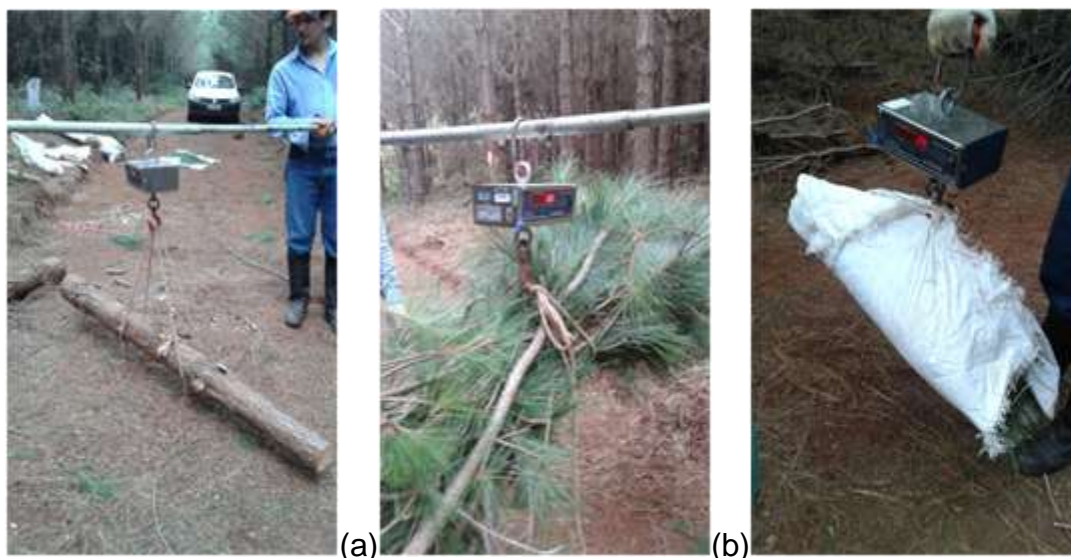


Figura 3. Obtenção de biomassa verde com uso do dinamômetro digital. (a) Fuste (toras grossas, toras finas e ponteira); (b) Galhos; e (c) Acículas.

Em seguida, no laboratório, as amostras de biomassa foram submetidas à secagem em estufa com renovação e circulação de ar em temperatura de 105°C até obter peso constante, visando obtenção da massa seca. A pesagem foi realizada com uma balança de precisão de 0,01 g. Com os dados provenientes da biomassa verde e umidade na base úmida em cada componente das árvores, foram realizados os cálculos da biomassa seca, utilizando-se a expressão (6):

$$B_s = B_v - U \quad (6)$$

Em que: B_s = Biomassa seca (kg); B_v = Biomassa verde (kg); U = Umidade na base úmida (kg kg^{-1}).

A biomassa total por hectare em cada componente foi obtida pela multiplicação dos valores médios da biomassa das árvores em cada classe de diâmetro pelo número de árvores existentes dentro da classe, por hectare, nas diferentes idades dos povoamentos.

2.6 Análises estatísticas

Foi utilizado um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), onde os tratamentos foram representados pelas idades dos povoamentos avaliados e as repetições como os valores de DAP, altura total, volume individual, volume por hectare, área basal, relação de desbaste e biomassa energéticas obtidos das parcelas do inventário florestal. Tais valores foram analisados quanto à normalidade pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* e quanto à homogeneidade de variâncias pelo teste de *Bartlett* a 5% de probabilidade de erro. Em seguida, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e, quando necessário, as médias comparadas pelo teste de Tukey ao mesmo nível de probabilidade de erro. As análises foram realizadas no *software* Assistat 7.7 beta.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das características dos povoamentos

3.1.1 Classificação do sítio

Os quatro povoamentos avaliados foram considerados de alta capacidade produtiva, com índice de sítio de 30 m na idade índice de 18 anos, conforme a equação de Chapman-Richards ajustado por Retslaff (2014) para classificação de sítio de *Pinus taeda*, na região Centro-Sul do estado do Paraná (Figura 4).

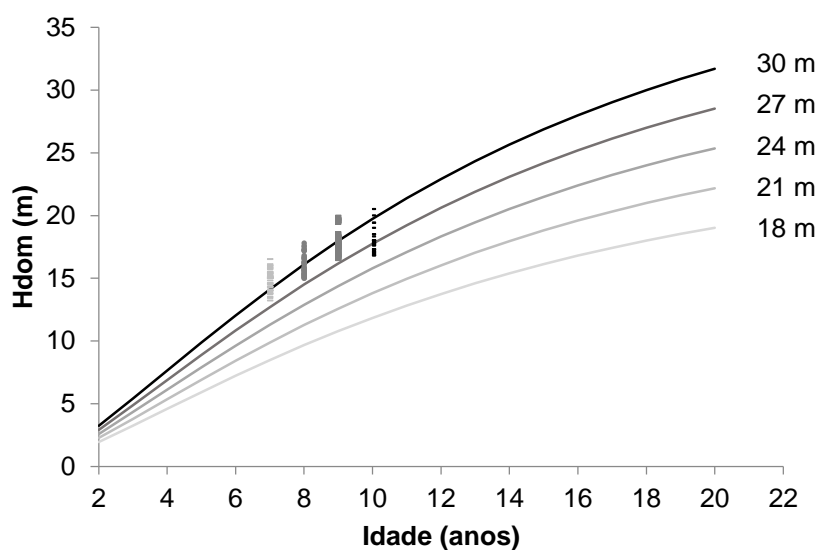


Figura 4. Curvas de sítio de *Pinus taeda* e valores de altura dominante (H_{dom}) dos povoamentos nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.

3.1.2 Inventário florestal

Os dados obtidos do inventário florestal tiveram a sua normalidade e homogeneidade das variâncias comprovadas. Desta maneira, seguiu-se com a ANOVA. O teste F foi significativo a 5% de probabilidade de erro, necessitando da aplicação do teste de média Tukey ao mesmo nível de probabilidade de erro. Assim, os povoamentos avaliados apresentaram DAP médio que variou de 18,2 a 19,2 cm, diferindo as idades 7 e 8 anos em relação às idades 9 e 10 anos. A altura total variou de 12,8 a 15,6 m, com diferença estatística significativa em todas as idades avaliadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. O volume médio individual das árvores variou de 0,160 a 0,225 m³, com diferença significativa entre os povoamentos nas idades 7 e 8 anos em relação às idades 9 e 10 anos. Este

mesmo comportamento, como esperado, foi verificado no volume médio por hectare, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Características dendrométricas médias obtidas do inventário florestal realizado nos povoamentos de *Pinus taeda* com 7, 8, 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	Média por hectare					
	N	DAP (cm)	h (m)	Hdom (m)	VMI (m ³)	V (m ³ cc ha ⁻¹)
7	1.470	18,2 b	12,8 d	14,85 c	0,160 b	235,2 b
8	1.487	18,3 b	13,6 c	16,11 b	0,173 b	257,3 b
9	1.437	19,9 a	15,3 b	17,86 a	0,225 a	323,3 a
10	1.417	19,2 a	15,6 a	17,88 a	0,215 a	304,7 a

Em que: N = Número de árvores existente por hectare; DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo; h = Altura total; Hdom = Altura dominante; VMI = Volume médio individual; e V = Volume médio por hectare com casca. As médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Nota-se que o volume médio individual das árvores foi crescente nas idades 7, 8 e 9 anos. Porém, a idade de 10 anos apresentou um volume médio individual das árvores inferior em relação à idade de 9 anos, refletindo também no volume por hectare. Tal fato pode ser explicado devido ao sítio na idade de 10 anos, apesar de ser considerado de alta produtividade, ficou com um valor médio de altura dominante semelhante à idade de 9 anos, mostrando, portanto, que os sítios podem ser distintos.

3.1.3 Intensidade do desbaste

Os valores de área basal inicial e removida e a porcentagem da área basal removida apresentaram distribuição normal e homogeneidade nas variâncias. Em seguida, com a ANOVA, foi possível verificar que não houve diferença estatística entre as idades avaliadas. Antes da operação de desbaste, a área basal média foi de 42,5 m² ha⁻¹. A área basal removida com a aplicação de desbaste foi de 15 m² ha⁻¹, proporcionando uma intensidade de desbaste de 34,6%, considerada semelhante em todas as idades avaliadas (Tabela 4).

A área basal removida na operação de desbaste foi em torno de 35% da área basal total. Este valor está dentro do que é considerado limitante para que não haja redução da produção total dos povoamentos (SCHNEIDER; FINGER, 1994). Entretanto, Flotz et al. (1967) relataram que remoções de 35% a 40% do nível máximo de área basal não influenciam na taxa de crescimento em área transversal das árvores remanescentes de *Pinus* spp. Porém, os autores consideram que

remoções superiores a 40% da área basal acarretam redução da produção total dos povoamentos.

Tabela 4. Intensidade do desbaste aplicado nos povoamentos de *Pinus taeda* nas diferentes idades avaliadas.

Idade dos povoamentos (anos)	G _{inicial} (m ² ha ⁻¹)	G _{removida} (m ² ha ⁻¹)	% de G removida
7	40,6	14,2	34,8
8	40,2	14,1	35,1
9	45,3	15,5	32,7
10	44,1	16,2	35,7
Média	42,6	15,0	34,6

Em que: G_{inicial} = Área basal do povoamento antes da aplicação de desbaste; G_{retirada} = Área basal removida na aplicação de desbaste; e % de G removida = Percentagem de área basal removida na operação de desbaste.

3.1.4 Relação de desbaste

Os dados de DAP das árvores removidas e remanescentes, assim como a relação de desbaste apresentaram comportamento normal e homogeneidade das variâncias. Com a ANOVA foi possível verificar que o DAP das árvores retiradas e a relação de desbaste não apresentaram diferença significativa, exceto no DAP das árvores remanescentes, que ao seguir com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, foi possível verificar que as idades 7 e 8 anos não diferiram estatisticamente entre si, seguida da idade 10 e 9 anos, sendo o maior valor obtido na idade de 9 anos, devido aos motivos citados anteriormente como relação à capacidade de sítio.

A relação de desbaste foi aplicada para verificar a homogeneidade do povoamento, dentro do aspecto operacional do desbaste, sendo possível observar que a relação entre o DAP das árvores removidas no desbaste e o DAP das árvores remanescentes ficou em torno de 0,6, caracterizando como desbaste por baixo (Tabela 5).

Os valores médios de DAP das árvores removidas não apresentaram diferença estatística significativa entre as idades dos povoamentos, bem como a relação de desbaste. Esta semelhança proporcionou homogeneidade dos tratamentos quanto às características dendrométricas para que não houvesse influência nas atividades operacionais de colheita de madeira (MEDERSKI, 2006).

Tabela 5. Diâmetro médio à altura do peito (DAP) das árvores removidas e remanescentes e relação de desbaste (RD) nos povoamentos de *Pinus taeda* nas diferentes idades avaliadas.

Idade dos povoamentos (anos)	DAP removidas (cm)	DAP remanescentes (cm)	RD
7	12,3	19,8 c	0,62
8	12,3	19,7 c	0,62
9	12,4	21,7 a	0,57
10	13,0	20,6 b	0,63

Em que: DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo; RD = Relação de desbaste; RD < 1: Desbaste por baixo; RD = 1: Desbaste médio; e RD > 1: Desbaste por alto. As médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3.2 Quantificação da biomassa energética

Na Tabela 6 são apresentados os valores da biomassa energética dos componentes das árvores de *Pinus taeda*, nas diferentes idades avaliadas, antes e após a operação de desbaste e a quantidade de biomassa removida por unidade de área.

A biomassa total foi semelhante nas idades 7 e 8 anos, com aproximadamente 140 Mg ha⁻¹, enquanto nas idades 9 e 10 anos foi aproximadamente 160 Mg ha⁻¹. Este aumento da biomassa florestal nos povoamentos de maior idade é representado pelo acréscimo da quantidade de toras grossas e finas, galhos e acículas. Tais resultados estão de acordo com o esperado, pois segundo Brand et al. (2014), que ao avaliarem a biomassa gerada em povoamentos de *Pinus taeda* com diferentes idades, verificaram que a quantidade de biomassa é crescente com o aumento da idade dos povoamentos, principalmente no componente galhos.

Ao avaliar a biomassa energética gerada na operação de desbaste, verificou-se que os povoamentos não apresentaram diferença estatística significativa entre as idades avaliadas, bem como em relação à biomassa total. Porém, é possível afirmar que, os povoamentos com idade de 9 e 10 anos apresentaram maior quantidade de biomassa no componente toras grossas, tornando o desbaste mais vantajoso nestas idades dentro do aspecto operacional da colheita da madeira.

Tabela 6. Biomassa energética (seca) por componente das árvores existentes antes e após a aplicação de desbaste e a biomassa removida com a operação.

Biomassa seca existente antes da aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteira	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	67,9 b (±3,6)	31,2 a (±2,7)	0,8 bc (±0,1)	7,8 b (±0,5)	9,9 b (±0,5)	23,3 b (±1,5)	41,8 b (±2,3)	73,0 bc (±4,7)	140,9 b (±7,9)
8	67,6 b (±7,9)	30,8 a (±2,1)	0,8 c (±0,1)	7,8 b (±0,5)	9,8 b (±0,7)	23,2 b (±2,8)	41,6 b (±3,9)	72,4 c (±3,7)	140,0 b (±11,0)
9	83,9 a (±6,2)	28,7 a (±2,3)	0,9 a (±0,1)	8,9 a (±0,5)	11,3 a (±0,6)	28,4 a (±2,4)	49,5 a (±3,3)	78,2 a (±3,8)	162,1 a (±9,2)
10	78,5 a (±3,9)	31,4 a (±2,7)	0,9 b (±0,1)	8,7 a (±0,6)	10,9 a (±0,5)	26,2 a (±1,0)	46,7 a (±1,8)	78,1 ab (±3,8)	156,6 a (±7,1)
Média	74,5 (±8,9)	30,5 (±2,6)	0,8 (±0,1)	8,3 (±0,7)	10,5 (±0,8)	25,3 (±2,9)	44,9 (±4,4)	75,4 (±4,7)	149,9 (±13,0)
Biomassa seca remanescente com a aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteira	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	47,1 c (±2,4)	16,8 a (±0,8)	0,4 bc (±0,0)	5,1 b (±0,2)	6,1 c (±0,3)	15,3 b (±1,0)	26,9 b (±1,4)	43,7 b (±1,8)	90,8 c (±4,0)
8	46,7 c (±4,5)	16,7a (±1,0)	0,4 c (±0,0)	5,0 b (±0,2)	6,1 c (±0,4)	15,4 b (±1,6)	26,9 b (±2,2)	43,6 b (±1,4)	90,3 c (±5,8)
9	59,6 a (±4,1)	15,1 b (±0,7)	0,5 a (±0,0)	5,9 a (±0,6)	7,2 a (±0,3)	19,3 a (±2,1)	32,9 a (±2,9)	48,0 a (±2,7)	107,6 a (±6,6)
10	53,2 b (±3,4)	16,4 a (±0,9)	0,4 b (±0,0)	5,4 ab (±0,4)	6,7 b (±0,4)	17,0 b (±1,3)	29,5 b (±2,0)	45,9 ab (±2,4)	99,1 b (±5,5)
Média	51,7 (±6,4)	16,3 (±1,1)	0,4 (±0,1)	5,4 (±0,5)	6,5 (±0,6)	16,8 (±2,2)	29,0 (±3,3)	45,3 (±2,8)	97,0 (±8,9)
Biomassa seca removida com a aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteira	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	20,8 b (±2,5)	14,4 a (±2,3)	0,4 a (±0,0)	2,8 a (±0,4)	3,8 a (±0,4)	8,1 a (±1,0)	15,1 a (±1,7)	29,5 a (±3,8)	50,3 a (±6,1)
8	20,9 b (±3,8)	14,2 a (±1,5)	0,4 a (±0,0)	2,8 a (±0,3)	3,7 a (±0,4)	7,8 a (±1,3)	14,7 a (±1,9)	28,9 a (±2,8)	49,8 a (±6,1)
9	24,3 ab (±4,5)	13,6 a (±2,0)	0,4 a (±0,0)	3,0 a (±0,4)	4,0 a (±0,5)	9,1 a (±1,5)	16,5 a (±2,4)	30,1 a (±4,0)	54,4 a (±8,0)
10	25,4 a (±3,3)	14,9 a (±2,6)	0,4 a (±0,0)	3,2 a (±0,5)	4,2 a (±0,5)	9,2 a (±1,1)	17,0 a (±2,0)	31,9 a (±4,5)	57,3 a (±7,5)
Média	22,9 (±4,0)	14,3 (±2,1)	0,4 (±0,0)	3,0 (±0,4)	3,9 (±0,5)	8,6 (±1,3)	15,8 (±2,2)	30,1 (±3,8)	53,1 (±7,4)

Em que: O valor entre parênteses é o desvio padrão da média; Mg ha⁻¹ = Megagrama por hectare; Toras grossas = Sortimento destinado à serraria, composto por toras de 3,60 m de comprimento e diâmetro mínimo de 15,0 cm; Toras finas = Sortimento destinado à energia, composto por toras de 3,05 m e diâmetro de 15,0 cm a 3,5 cm; Resíduos = Soma da biomassa seca dos componentes ponteiras, acículas, casca e galhos; Biomassa energética = Soma da biomassa seca das toras finas e dos componentes dos resíduos; e Total = Soma da biomassa seca de todos os componentes das árvore. As médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A aplicação de primeiro desbaste precoce impacta nos custos operacionais, ocasionado pelo menor número de árvores a ser colhido quando comparado com a operação de corte raso, bem como pelo menor volume individual das árvores removidas, situação que afeta negativamente a produção de sortimentos de madeira destinada à serraria, podendo ainda comprometer a rentabilidade das primeiras intervenções (KÄRHÄ et al., 2005; KÄRHÄ et al., 2006; NURMINEN et al., 2006; NUUTINEN et al., 2010; OIKARI et al., 2010).

Além disso, o somatório dos componentes dos resíduos da colheita de madeira, compostos por ponteiros, acículas, casca e galhos, ultrapassaram a quantidade de biomassa de toras finas removidas do talhão para fins energéticos. Isto indicou que entre 14,7 a 17,0 Mg ha⁻¹ de biomassa energética permaneceram no campo, sendo 19% deste valor composto por biomassa seca de acículas, enquanto os galhos foram mais representativos, chegando a mais de 54% da composição dos resíduos gerados (Figura 5).

Considerando o somatório de biomassa destinada para fins energéticos, ou seja, as toras finas e os componentes residuais da colheita da madeira, obteve-se um total de aproximadamente 30 Mg ha⁻¹ em todas as idades avaliadas. Para Ortolan et al. (2006), a quantidade de biomassa necessária para otimizar o aproveitamento do material em termos econômicos é acima de 35 Mg ha⁻¹ e em curtas distâncias até a planta da indústria. Logo, nota-se que para elevar o aproveitamento da biomassa energética na operação de desbaste é necessário que haja um aumento da intensidade de desbaste em 40% da área basal, de modo que se tenha um acréscimo em torno de 5 Mg ha⁻¹ na geração destes produtos.

De acordo com diversos autores, para tornar a operação de primeiro desbaste rentável sob o aspecto operacional, é necessário aumentar a intensidade do desbaste aplicado nos povoamentos florestais (WADSWORTH, 2000; MEDERSKI, 2006). Quanto maior a intensidade do desbaste, maior é a produtividade das máquinas, e conseqüentemente, menores são os custos de produção.

Desta maneira, nota-se que as principais barreiras existentes para o uso da biomassa florestal como fonte de energia renovável estão dentro do aspecto econômico, pois, os principais fatores que influenciam na utilização deste produto são os custos de colheita e transporte (GOLDEMBERG, 1998; MACEDO, 2001; MARTÍ, 2006).

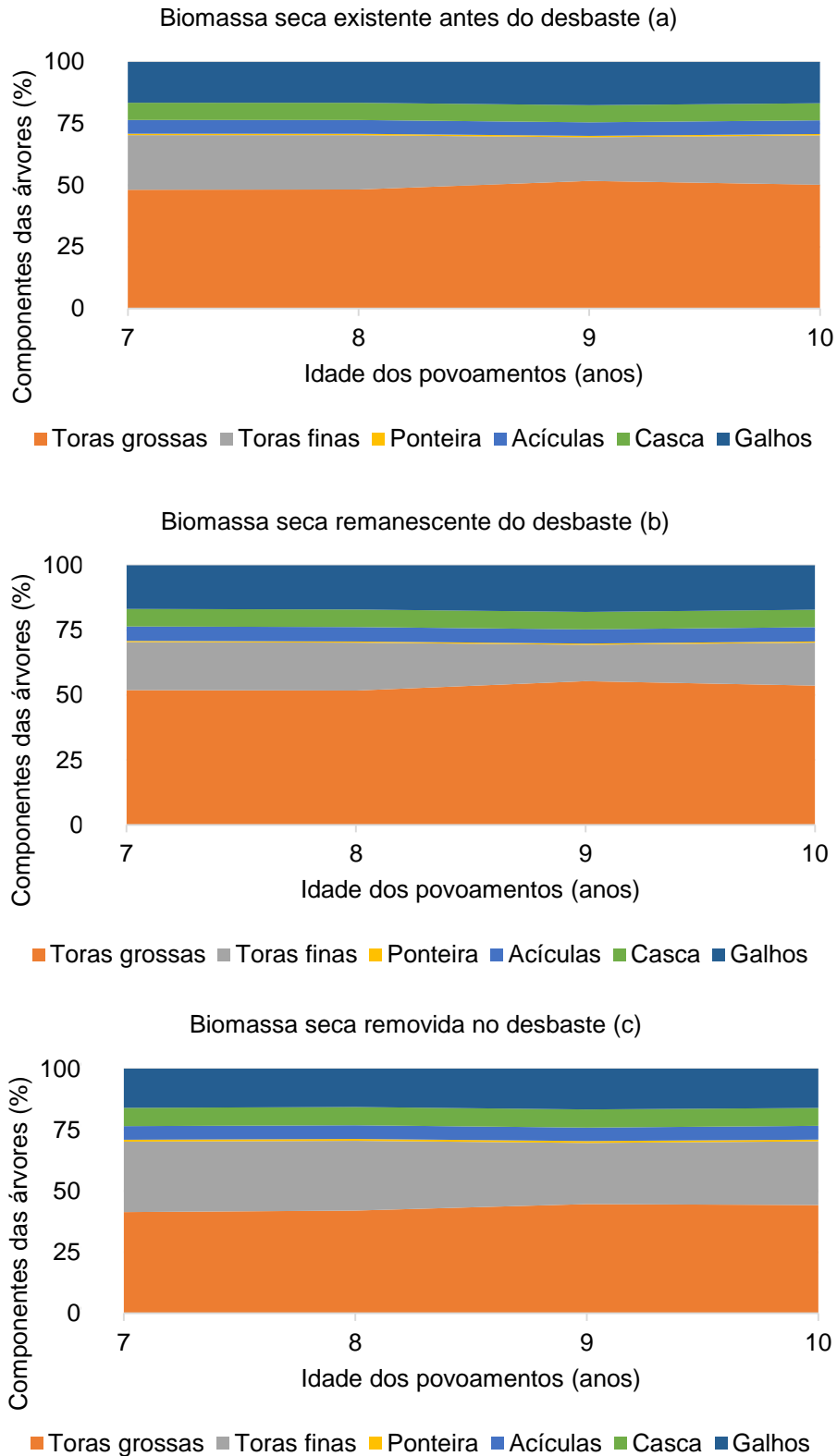


Figura 5. Distribuição percentual dos componentes das árvores na biomassa seca total dos povoamentos de *Pinus taeda* com diferentes idades. (a) Biomassa total existente; (b) Biomassa remanescente; e (c) Biomassa removida na operação de desbaste.

Destaca-se que outra forma de mitigar tais barreiras econômicas na aplicação da biomassa energética gerada na operação de desbaste é o uso de tecnologias alternativas, como o uso de máquinas de pequeno porte para o cavaqueamento no campo. Em alguns países como a Finlândia e Nova Zelândia é possível aproveitar os resíduos da colheita quando estes totalizam em torno de 6 a 9 Mg ha⁻¹ na operação de primeiro desbaste comercial. Entretanto, salienta-se que em tais países o valor de venda desta biomassa é mais elevado (LEINONEN, 2004; KALLIO e LEINONEN, 2005; HALL, 2007).

4 CONCLUSÕES

- A idade de execução do desbaste não influenciou na quantidade de biomassa energética produzida no primeiro desbaste comercial;
- A biomassa residual é predominantemente composta por galhos, seguida de casca, acículas e ponteiras, que permanecem no campo e que não estão sendo aproveitados como fonte energética;
- A quantidade de biomassa energética, composta por toras finas, ponteiras, acículas, casca e galhos, não atingiu a quantidade necessária para a viabilizar economicamente o seu uso, devendo, portanto, haver modificações na intensidade do desbaste, com a retirada de 40% da área basal do povoamento, ou a busca para o uso de máquinas de pequeno porte para o seu processamento; e
- A quantidade de biomassa residual da colheita de madeira foi semelhante às toras finas, portanto, o seu aproveitamento proporcionará o acréscimo de biomassa disponível para fins energéticos, podendo duplicar a atual quantidade utilizada pela empresa, visto que esta aproveita apenas toras finas para produção de energia.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIB - Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. **Atlas brasileiro biomassa florestal e industrial e agroindustrial**. Curitiba, PR, 2015. 154 p.

AHTIKOSKI, A.; HEIKKILA, J.; ALENIUSA, V.; SIRENC, M. Economic viability of utilizing biomass energy from young stands: The case of Finland. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 11, p. 988-996, 2008.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN. **Relatório síntese, ano base 2015**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Disponível em: <www.ben.epe.gov.br>. Acesso em: 23 Fev. 2017.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Árvore**, v. 38, n. 2, p. 353-360, 2014.

CABRAL, O. M. J. V. **Avaliação operacional da colheita de madeira em desbastes de *Pinus taeda* L.** 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro Oeste Irati, Irati, 2014.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 127 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CASTRO, A. F. N. M. **Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Colombo: EMBRAPA FLORESTAS, 2015. 87 p.

FLOTZ, B. W.; JOHNSTON, W. F. **Cross basal area growth of Northern WhiteCeder is independent of stand density over a wide range**. Local: U.S. Forest Service Research, 1967. (Note NC 61).

FOELKEL, C. **Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais Lenhosos da eucaliptocultura**. 2007. Disponível em: <www.eucalyptus.com.br>. Acesso em: 23 Set. 2016.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: Ed. USP, 1998. 125 p.

HALL, P. Forest residues for bioenergy. **New Zealand Tree Grower**, 2007. PÁGINAS Disponível em: <<http://www.nzffa.org.nz/farm-forestry-model/resource->

centre/tree-grower-articles/tree-grower-november-2007/forest-residues-for-bioenergy/>. Acesso em: 06 Dez. 2016.

IBÁ - INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual da IBÁ 2016, ano base 2015**. 96 p. Disponível em: <<http://www.iba.org>>. Acesso em: 30 Ago. 2016.

JONG, J.; AKSELSSON, C.; BERGLUND, H.; EGNELL, G.; GERHARDT, K.; LÖNNBERG, L.; OLSSON, B.; VON STEDINGK, H. **Consequences of an increased extraction of forest biofuel in Sweden** – a synthesis from the biofuel research programme 2007-2011, supported by Swedish Energy Agency. Summary of the synthesis report. ER 2014:09. Swedish Energy Agency, Eskilstuna.

KALLIO, M.; LEINONEN, A. **Production technology of forest chips in Finland**. Jyväskylä: VTT, 2005. 103 p. (Project Report PRO2/p2032/05).

KÄRHÄ, K.; JOUHIAHO, A.; MUTIKAINEN, A.; MATTILA, S. Mechanized energy wood harvesting from early thinnings. **International Journal Forest Engineering**, v. 16, n. 1, p. 15-26, 2005.

KÄRHÄ, K.; KESKINEN, S.; LIIKKANEN, R.; LINDROOS, J. Kokopuun korjuu nuorista metsistä [Whole-tree harvesting in early thinnings]. **Metsäteho Report 193**, 2006. 79 p. Disponível em: <http://www.metsateho.fi/kategoria/raportti/page/9/>. Acesso em: 16 Jul. 2016.

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo, Finland: VTT, 2004. 132 p. (Research Note 2229).

MACEDO, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: Situação atual, oportunidades de desenvolvimento**. Brasília: CGEE, 2001. 10 p.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2 ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006. 316 p.

MARTÍ, B. V. Situacion de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. **Ecosistemas**, v. 15, n. 1, p. 77-86, 2006.

MEDERSKI, P. A. Comparison of harvesting productivity and costs in thinning operations with and without Midfield. **Forest Ecology and Management**, v. 224, n. 3, p. 286-296, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento e resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e proposta de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Projeto PNUD BRA 00/20 – Apoio às políticas públicas na área de gestão e controle ambiental, 2009. 40 p.

NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. **Silva Fennica**, v. 40, n. 2, p. 335-363, 2006.

NUUTINEN, Y.; VÄÄTÄINEN, K.; ASIKAINEN, A.; PRINZ, R.; HEINONEN, J. Operational efficiency and damage to sawlogs by feed rollers of the *harvester* head. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 121-139, 2010.

OIKARI, M.; KÄRHÄ, K.; PALANDER, T.; PAJUOJA, H.; OVASKAINEN, H. Analyzing the views of wood harvesting professionals related to the approaches for increasing the cost-efficiency of wood harvesting from young stands. **Silva Fennica**, v. 44, n. 3, p. 481-495, 2010.

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.

RETSLAFF, F. A. S. **Simulador para prognose da produção de *Pinus taeda* com diagrama de manejo da densidade associado à modelagem em classes de diâmetro**. 2014. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; CÔRTE, A. P. D.; FERNANDES, L. A. V. **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: Multi-Graphic Gráfica e Editora, 2009. 319 p.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Determinação de regimes de desbaste para povoamentos de *Pinus elliottii* E. do planalto ocidental no Estado de Santa Catarina. **Ciência Florestal**, v. 4, n. 1, p. 43-59, 1994.

SOLER, R. R. **Influência do relevo e da presença de resíduos da colheita florestal no rendimento e na qualidade silvicultural de um sistema de plantio mecanizado**. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2016.

VAN BELLE J. F.; TEMMERMAN, M.; SCHENKEL, Y. Three level procurement of forest residues for power plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 4-5, p. 401-409, 2003.

WADSWORTH, F. **Producción forestal para América Tropical: Manual de Agricultura 710-S**. San Jose: US FOREST SERVICE, 2000. 461 p.

WHITTAKER, C.; MORTIMER, N.; MURPHY, R.; MATTHEWS, R. Energy and greenhouse gas balance of the use of forest residues for bioenergy production in the UK. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 11, p. 4581-4594, 2011.

CAPÍTULO 2 – Análise técnica e custo do *harvester* e *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* em primeiro desbaste

Resumo: Objetivou-se realizar uma análise técnica e de custos do *harvester* e *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* L. em duas idades no primeiro desbaste. O estudo foi realizado na empresa Araupel, no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná. Foram avaliados os tratores florestais *harvester* e *forwarder* na execução do corte e extração da madeira em povoamentos submetidos ao primeiro desbaste nas idades de 9 e 10 anos. Foi realizado um estudo de tempos e movimentos das máquinas, determinando os tempos dos ciclos operacionais, a eficiência operacional, o rendimento energético, a produtividade efetiva e os custos operacionais e de produção. Foram verificadas as variáveis de maior influência na produtividade das máquinas por meio do ajuste de modelos estatísticos e teste de identidade dos modelos com os dados agrupados pela variável idade do povoamento. Os resultados mostraram que o maior tempo consumido no ciclo operacional do *harvester* foi na etapa de processamento, enquanto para o *forwarder*, foram as etapas de carregamento e descarregamento da madeira. A produtividade média do *harvester* foi de 26,5 e 25,1 m³ por hora efetiva (he) e custo médio de produção de R\$ 4,74 m⁻³ e R\$ 5,00 m⁻³ nas idades de 9 e 10 anos, enquanto para o *forwarder*, a produtividade média foi de 37,0 e 37,6 m³ he⁻¹, com custo médio de produção de R\$ 4,89 m⁻³ e R\$ 4,81 m⁻³, respectivamente. Os modelos ajustados para a estimativa da produtividade e custos das máquinas mostraram que a variável volume das árvores influenciou significativamente a produtividade e o custo de produção do *harvester*, enquanto a variável volume da carga influenciou significativamente a produtividade e o custo de produção do *forwarder*.

Palavras-chave: Colheita de madeira; Desbaste; Variáveis operacionais; Produtividade.

Technical and cost analyses of *harvester* and *forwarder* in *Pinus taeda* stands under first thinning

Abstract: The aim of this study was to perform a technical and cost analyses of the *harvester* and *forwarder* in *Pinus taeda* L. stands at two ages under first thinning. The study was carried out at Araupel company, in the municipality of Quedas do Iguaçu, Paraná State. *Harvester* and *forwarder* forestry tractors were evaluated in the execution of the cutting and extraction of the wood in stands under first thinning at 9 and 10 years old. A time and motion study of machines was carried out, determining the times of operational cycles, operational efficiency, energy efficiency, effective productivity, and operational and production costs. The variables of greatest influence in the productivity of the machines were verified by means of fitted statistical models and identity test of the models with the data grouped by the variable stand age. The results showed that the most time consumed in the *harvester* operating cycle was in the processing stage, while loading and unloading stages for the *forwarder*. Average *harvester* productivities were 26.5 and 25.1 m³ per effective hour (he), and average production costs were R\$ 4.74 m⁻³ and R\$ 5.00 m⁻³ for the stands at 9 and 10 year old, while the average productivities were 37.0 and 37.6 m³ he⁻¹ for the *forwarder*, with average production costs of R\$ 4.89 m⁻³ and R\$ 4.81 m⁻³, respectively for 9 and 10 year old. The fitted models for estimating productivity and costs of the machines showed that the variable tree volume had significant influence on the productivity and production cost of the *harvester*, as well as the variable load volume for the productivity and production cost of the *forwarder*.

Keywords: Wood harvesting; Thinning; Operational variables; Productivity.

1 INTRODUÇÃO

O desbaste é uma importante atividade silvicultural que visa a remoção parcial das árvores de um povoamento, sendo essencial para o manejo das florestas destinadas à produção de madeira. Quando realizado por métodos mecanizados, os primeiros desbastes acarretam em problemas operacionais e de produtividade para as máquinas, em função do espaço restrito que dificulta a mobilidade das máquinas no interior do povoamento, acarretando em baixa produtividade e elevados custos, além do baixo volume das árvores a serem removidas (MALINOVSKI et al., 2006; OIKARI et al., 2010).

A colheita da madeira e o transporte constituem as primeiras etapas da produção florestal, apresentando grande importância em termos econômicos, pois representa mais de 50% dos custos da madeira posto fábrica (MACHADO, 2014). E os custos tornam-se ainda maiores quando a colheita da madeira é realizada em povoamentos submetidos ao desbaste (MEDERSKI, 2006).

Os primeiros desbastes nos povoamentos florestais, quando mecanizados, são normalmente realizados utilizando-se o sistema de colheita de toras curtas (*cut-to-length*), devido à maior facilidade de deslocamento da máquina no interior do talhão (MEDERSKI, 2006), onde a remoção das árvores é realizada de maneira sistemática de uma linha de plantio e com eliminação seletiva nas linhas adjacentes, sendo a distância de cada lado da trilha de operação definida pelo alcance da grua do *harvester*, e com remoção de 50% das árvores do povoamento.

De acordo com Syunev et al. (2009), ao compararem os sistemas de toras curtas, fustes e árvores inteiras em operações de desbaste, esses autores concluíram que os sistemas de toras longas e árvores inteiras causam maior quantidade de injúrias às árvores remanescentes. Assim, o sistema de toras curtas é mais indicado para a operação de desbaste, pois proporciona maior qualidade final do produto e melhores condições ergonômicas de trabalho, enquanto o sistema de toras longas e árvores inteiras apresentaram muitas limitações na execução das operações.

Nos primeiros desbastes, devido à baixa mobilidade das máquinas no interior do povoamento, o baixo volume individual das árvores a ser removido, a necessidade de produção de madeira com diversos sortimentos acarreta em baixa produtividade das máquinas e elevados custos de produção (HAKKILA, 2004;

KÄRHA et al., 2005; MALINOVSKI et al., 2006; NURMINEN et al., 2006; NUUTINEN et al., 2010).

Martins et al. (2009) ao analisarem o desempenho do *harvester*, verificaram uma tendência de aumento da produtividade com o aumento do volume médio por árvore. Burla (2008) mencionou que o diâmetro médio das árvores é um fator significativo para a estimativa da produtividade dos equipamentos de colheita de madeira.

Silva e Fenner (2009) avaliaram a operação de extração de madeira com o *forwarder* e encontraram diversas variáveis que influenciam na produtividade, podendo citar os tempos de carregamento e descarregamento, o número de toras transportadas, a carga parcial de carregamento e descarregamento e a distância de extração no ramal. Já Malinovski et al. (2006) afirmaram que as variáveis de influência na produtividade do *forwarder* são a distância de extração, a experiência do operador, a capacidade da grua, o volume das toras e o tamanho das pilhas.

No Brasil existem poucos dados sobre a influência dessas variáveis e a capacidade produtiva esperada das máquinas em determinadas condições de trabalho, principalmente em operações de desbaste (DIAS, 2000; SCHNEIDER e SCHNEIDER, 2008; CABRAL, 2014). Esta falta de estudos específicos nesta operação acarreta em distorções para o planejamento, pois os dados são obtidos em uma realidade diferente quando comparado ao corte raso, destacando a necessidade de realização de estudos em condições específicas.

Objetivou-se realizar uma análise técnica e de custos do *harvester* e *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* submetidos ao primeiro desbaste com duas idades, visando auxiliar no planejamento e melhor gestão das operações florestais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na empresa Araupel, localizada no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná, Brasil, entre as coordenadas geográficas 25°26'27" S e 52°55'17" W. O clima da região é classificado como Cfa (Köppen) (CAVIGLIONE et al., 2000). Na região de estudo, predominam-se os solos do tipo Neossolo litólico, com relevo suavemente ondulado, apresentando uma declividade média de 8%, e altitude média de 566 m acima do nível do mar.

Os povoamentos estudados foram de *Pinus taeda* plantados nos anos de 2006 e 2005, com uma densidade inicial de 1.667 árvores por hectare (espaçamento de 3,0 m x 2,0 m). Foram aplicados desbastes com idade de 9 e 10 anos (Tabela 7).

Tabela 7. Características gerais dos plantios de *Pinus taeda* L.

Informações	Idade dos povoamentos (anos)	
	9	10
Ano de plantio	2006	2005
Área de plantio (ha)	141,3	162,5
Poda baixa (Ano de execução)	2010	2009
Árvores plantadas (ha)	1.667	1.667
Árvores existentes em 2015 (ha)	1.437	1.417
Taxa de mortalidade (%)	14,0	15,0
DAP médio (cm)	19,6	19,1
h média (m)	15,2	15,6
VMI (m ³)	0,225	0,215

Em que: DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo; h = Altura total; e VMI = Volume médio individual das árvores.

2.2 Descrição do modelo de desbaste

Os desbastes foram classificados como mistos, com o corte sistemático da quinta linha de árvores do plantio para abertura das trilhas de operação e o corte seletivo de árvores nas duas linhas adjacentes às trilhas de operação, que normalmente são definidas pelo alcance do braço e grua do *harvester*. Foram removidas 20% das árvores pelo desbaste sistemático e 30% das árvores pelo desbaste seletivo, totalizando 50% de árvores removidas pelo desbaste, contabilizados, juntamente, com as falhas das árvores mortas.

Na realização do desbaste, com critérios definidos pela empresa, foram produzidos dois sortimentos de toras com casca, sendo toras grossas no

comprimento de 3,60 m e diâmetros entre 15,0 e 35,5 cm destinadas para uso industrial (serraria e laminação), e toras finas produzidas nos sortimentos no comprimento de 3,05 m e diâmetro entre 3,5 e 15,0 cm que são destinadas para produção de energia. Assim como, os resíduos de colheita da madeira que eram compostos pelos galhos, acículas e ponteiras (porção final do fuste, menor que 3,5 cm de diâmetro).

2.3 Sistema de colheita da madeira

O sistema de colheita da madeira estudado foi de toras curtas (*cut-to-length*), com o uso dos tratores florestais *harvester* e *forwarder*, na realização da operação de corte e extração, respectivamente (Figura 6).



Figura 6. *Harvester* (a) e *forwarder* (b) componentes do sistema de colheita da madeira e utilizados nos desbastes comerciais.

Na operação de corte, o *harvester* (Tabela 8) realizava a eliminação total da quinta linha de árvores do povoamento (desbaste sistemático), criando então uma trilha de operação para a entrada das máquinas, com remoção de 20% das árvores dos povoamentos. Simultaneamente era realizado a remoção de 30% das árvores marcadas para o desbaste, dispostas em ambos os lados da trilha de operação. O *harvester* realizava a derrubada, processamento e empilhamento da madeira em ambos os lados da trilha de operação da máquina, separando os sortimentos de toras grossas, destinadas à serraria, e toras finas destinadas à energia.

Em seguida, o *forwarder* (Tabela 8) realizava a extração da madeira na forma de toras nos diferentes sortimentos do interior do povoamento até a margem do talhão. As viagens do *forwarder* carregado eram intercaladas em sortimento de energia (toras finas) e sortimento de energia (toras finas) e serraria (toras grossas).

Tabela 8. Especificações técnicas das máquinas utilizadas no desbaste.

Máquina	Marca	Modelo	Especificações técnicas
<i>Harvester</i>	Caterpillar	318D2 L	Motor: modelo C4.4ACERT, Potência: 84 kW. Peso operacional: 17,9 t sem o cabeçote. Horímetro médio: 2.370 horas; Grua de alcance com carga: 7,2 m. Rodados de esteiras. Cabeçote: LogMax 5000D. Com altura de 1,483 m; Peso: 891 kg; dois rolos de alimentação, com uma velocidade de 3,8 m s ⁻¹ ; abertura máxima dos rolos 51,5 cm; Capacidade máxima do corte do sabre: 63 cm; Diâmetro máximo de desgalhamento: 41,5 cm.
<i>Forwarder</i>	Komatsu	865	Motor: 74 AWI. Potência: 158 kW. Peso operacional: 18,9 t. Área de carga: 4,8 m ² . Capacidade de carga: 16,5 Mg; Área de carga: 4,5 m ² ; Horímetro médio: 5.540 horas; Rodados de pneus; Tração 8x8. Grua com alcance máximo 7,8 m. Garra Komatsu G28.

2.4 Coleta de dados

2.4.1 Análise operacional

A análise operacional das máquinas de colheita da madeira foi realizada com base em um estudo de tempos e movimentos pelo método de cronometragem de tempos contínuos, que é caracterizado pela obtenção dos tempos de etapa do ciclo operacional sem a detenção do cronômetro, ou seja, de forma contínua.

Inicialmente foi determinado o número mínimo de ciclos operacionais necessários para ambas as máquinas (n), por meio de um estudo piloto, conforme metodologia proposta por Barnes (1977), por meio da equação (7).

$$n \geq \frac{t^2 \cdot CV^2}{LE^2} \quad (7)$$

Em que: n = Número mínimo de ciclos necessários; t = Valor de t , para o nível de significância de 5% em $(n-1)$ graus de liberdade; CV = Coeficiente de variação, em porcentagem; e LE = Limite de erro admitido de 5% para o *harvester* e de 12% para o *forwarder*.

Com o auxílio de cronômetros centesimais, pranchetas e formulários de campo específicos, foram mensurados os ciclos operacionais das máquinas estudadas, que foram subdivididos em elementos parciais, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Atividades parciais do ciclo operacional do *harvester* e *forwarder* na execução das operações de corte e extração nos povoamentos submetidos ao primeiro desbaste comercial.

Máquina	Atividades parciais	Descrição
<i>Harvester</i>	Busca e Corte (BC)	Movimentação do braço e do cabeçote da máquina na busca da árvore, iniciando no momento da abertura das garras e finalizando com a separação da árvore do toco pela ativação do sabre.
	Processamento (PR)	Separação da árvore do toco pelo acionamento do sabre, sendo finalizado com o desgalhamento, traçamento, destopamento e empilhamento da madeira.
	Deslocamento da Máquina (DM)	Movimento da máquina, entre árvores, caracterizado pelo acionamento da esteira, e finalizado com o interrompimento do movimento da máquina.
	Interrupções (IT)	Tempo em que a máquina não realizou as atividades anteriores.
<i>Forwarder</i>	Viagem Vazio (VV)	Deslocamento da máquina da margem do talhão até a primeira pilha de toras a ser carregada no interior do povoamento.
	Carregamento e deslocamento (CR)	Movimentação da grua para realizar o carregamento das toras, com o deslocamento entre pilhas, sendo finalizado com o posicionamento da grua sobre a caixa de carga da máquina carregada.
	Viagem Carregado (VC)	Posicionamento da grua sobre a caixa de carga e finalizado com o posicionamento da máquina próximo à pilha de toras na margem do talhão.
	Descarregamento (DC)	Movimentação da grua, para realização do descarregamento das toras, e finalizado com o posicionamento da grua sobre a caixa de carga da máquina vazia, incluindo as manobras necessárias para o início do próximo ciclo.
	Interrupções (IT)	Tempo compreendido em que a máquina não realizou as atividades anteriores.

2.4.1.1 Eficiência operacional e produtividade

A eficiência operacional (E_o), definida pela porcentagem do tempo efetivamente trabalhado em relação ao tempo programado, foi obtida pela expressão (8):

$$E_o = \frac{T_e}{T_p} \cdot 100 \quad (8)$$

Em que: E_o = Eficiência operacional (%); T_e = Tempo de trabalho efetivo (horas); e T_p = Tempo programado de trabalho das máquinas (horas).

Os valores de produtividade do *harvester* foram determinados por meio do volume individual, obtidos a partir do computador de bordo da máquina, mensurados pelo cabeçote processador, bem como pelo volume médio individual

obtido no inventário florestal, cujos valores foram divididos pelas horas efetivamente trabalhadas (he).

A produtividade do *forwarder* foi obtida pela contagem das toras apanhadas pela garra em cada ciclo operacional na etapa de descarregamento (Na), cujo valor foi multiplicado pelo volume de toras cubadas (Va), nos sortimentos de energia e serraria, sendo então dividido pelo tempo do ciclo em horas, conforme a expressão (9):

$$Pr = \frac{Va \times Na}{he} \quad (9)$$

Em que: Pr = Produtividade da máquina ($m^3 \text{ he}^{-1}$); Va = Volume individual das árvores ou toras (m^3); Na = Número de árvores cortadas ou toras extraídas em cada ciclo operacional; e he = Horas efetivas de trabalho (horas).

2.4.1.2 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível (CE) foi expresso por unidade de potência nominal do trator (Pt) e calculado para cada máquina do sistema de colheita da madeira avaliado, conforme expressão (10):

$$CE = \frac{D.C}{Pt} \quad (10)$$

Em que: CE = Consumo específico de combustível ($g \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$); D = Densidade do combustível ($g \text{ L}^{-1}$), sendo considerado 853 g L^{-1} para diesel; C = Consumo de combustível por hora ($L \text{ h}^{-1}$); e Pt = Potência nominal do trator (kW).

2.4.1.3 Rendimento energético

O rendimento energético (RE) foi obtido pela razão entre consumo específico de combustível (CE) e a produtividade (Pr) das máquinas, conforme expressão (11):

$$RE = \frac{CE}{Pr} \quad (11)$$

Em que: RE = Rendimento energético ($g \text{ kW}^{-1} \text{ m}^3 \text{ cc}$); CE = Consumo específico de combustível ($g \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$); e Pr = Produtividade da máquina ($m^3 \text{ h}^{-1}$).

2.4.2 Análise de custos das máquinas

A análise dos custos das máquinas foi baseada na determinação dos custos operacionais e de produção. No cálculo dos custos operacionais, foram obtidos os custos fixos (depreciação, juros e seguros), estimados pela metodologia proposta por Miyata (1980); os custos variáveis (combustíveis, óleo hidráulico, lubrificantes e graxas, pneus e esteiras, manutenção e reparos); pessoal operacional (salário e encargos sociais), fornecidos pela empresa, além de alguns dados obtidos em campo; enquanto os custos de administração foram obtidos a partir dos custos diretos do maquinário.

2.4.2.1 Custo operacional

a) Custos fixos (CF)

Foram considerados custos fixos aqueles que não variam com as horas de operação, isto é, não sofrem alterações devido ao uso da máquina. No cálculo dos custos fixos foi considerado o valor de revenda de 20% do valor de aquisição e uma vida útil de 5 anos das máquinas, sendo os valores de aquisição das máquinas e custos de mão de obra fornecidos pela empresa.

Depreciação (DP)

A depreciação é considerada como o meio de recuperar o investimento original da máquina, na medida em que ocorre o seu envelhecimento ou obsolescimento. A inclusão deste valor no custo operacional representa um capital de reserva para a aquisição de uma nova máquina. Para isso, foi utilizado o método de cálculo da depreciação linear, em que, o valor depreciável (DP) foi obtido ao subtrair o valor de aquisição da máquina e implemento (V_a) do valor residual (V_r). Posteriormente, dividiu-se o valor depreciável pela vida útil estimada (N) e pelas horas efetivas de uso anual (H_e), conforme as expressões (12):

$$DP = \frac{V_a - V_r}{N \cdot H_e} \quad (12)$$

Em que: DP = Depreciação linear da máquina (R\$ he^{-1}); V_a = Valor de aquisição da máquina + implemento (R\$); V_r = Valor residual ou de revenda da máquina + implemento (R\$); N = Vida útil estimada (anos); e H_e = Horas efetivas de uso anual (horas).

Juros e seguros (JS)

Os juros e seguros (JS) foram calculados pela expressão (13), considerando a aplicação de uma taxa de juros (i) ao investimento médio anual (IMA) (14), que correspondeu ao custo de oportunidade aplicado ao capital. Neste estudo, considerou-se a taxa total com a soma de juros e seguros de 12% a.a.

$$JS = \frac{IMA \cdot i}{He} \quad (13)$$

Em que: JS = Custos de juros e seguros (R\$ he^{-1}); IMA = Investimento médio anual (R\$); i = Taxa de juros e seguros (%); e He = Horas efetivas de trabalho anual (horas).

$$IMA = \frac{(Va - Vr) \cdot (N + 1)}{2 \cdot N} + Vr \quad (14)$$

Em que: IMA = Investimento médio anual (R\$); Va = Valor de aquisição da máquina + implemento (R\$); Vr = Valor residual ou de revenda da máquina + implemento (R\$) e; N = Vida útil estimada (anos).

b) Custos variáveis (CV)

Foram considerados como custos variáveis (CV) aqueles que estão diretamente relacionados com a frequência de uso da máquina e que incidem de acordo com a quantidade produzida. Compõem os custos variáveis, os custos com combustível, óleo hidráulico, lubrificantes e graxas, pneus ou esteiras e manutenção e reparos.

Custos com combustível (CC)

Os custos com combustível (CC) são referentes ao consumo de óleo diesel por hora, sendo considerado o valor de mercado. Neste estudo, o consumo de combustível foi obtido pela média histórica de abastecimento das máquinas, sendo calculado de acordo com a equação (15):

$$CC = Pu \cdot C \quad (15)$$

Em que: CC = Custo com combustível (R\$ h^{-1}); Pu = Preço atual de um litro de óleo diesel (R\$ L^{-1}); e C = Consumo de óleo diesel por hora ($L h^{-1}$).

Óleo hidráulico, lubrificantes e graxas (COHLG)

O custo com óleo hidráulico, lubrificantes e graxas (COHLG) varia de acordo com a potência do motor e com a complexidade hidráulica da máquina, podendo ser calculado em função do consumo de combustível. Para a obtenção do custo com óleo hidráulico, lubrificantes e graxas, foi utilizada a série de dados históricos obtidos dentro da realidade da empresa e calculados os índices de custos para serem utilizados na expressão (16):

$$\text{COHLG} = \text{ILG} \cdot \text{CC} \quad (16)$$

Em que: COHLG = Custo com óleo hidráulico, lubrificantes e graxas (R\$ h⁻¹); ILG = Índice de custos com óleo hidráulico, lubrificantes e graxas (6,1% do custo com combustível para o *harvester* e 3,9% do custo com combustível para o *forwarder*); e CC = Custo com combustível (R\$ h⁻¹).

Custo de pneus ou esteiras (CPE)

Os custos com material rodante (pneus ou esteiras) das máquinas foi calculado de acordo com a expressão (17):

$$\text{CPE} = \frac{\text{Nr} \cdot \text{Vr}}{\text{Hr}} \quad (17)$$

Em que: CPE = Custo de pneus ou esteiras (R\$ he⁻¹); Nr = Número de rodados (pneus ou esteiras) da máquina; Vr = Valor de um pneu ou esteira da máquina (R\$); e Hr = Vida útil de um pneu ou esteira, em horas efetivas (he).

Custo de manutenção e reparos (CMR)

O custo com manutenção e reparos (CMR) está relacionado com a vida útil e o valor de aquisição da máquina. Este custo se refere à manutenção e reparos que incide devido à utilização em condições normais ou ao desgaste dos componentes, acidentes ou a própria deterioração natural da máquina. Este custo abrange os custos com assistência técnica; reposição de materiais e serviços de terceiros. O custo de manutenção e reparos foi estimado utilizando-se de fatores de manutenção e reparos da máquina e implemento, que foram calculados utilizando a série de dados históricos obtidos dentro da realidade da empresa, conforme a expressão (18):

$$CMR = \left(\frac{Vm}{N.he} \right) . F1 + \left(\frac{Vi}{N.he} \right) . F2 \quad (18)$$

Em que: CMR = Custo de manutenção e reparo (R\$ h⁻¹); Vm = Valor de aquisição da máquina base (R\$); Vi = Valor de aquisição do implemento (R\$); F1 = Fator de manutenção e reparos da máquina base (0,78 para o *harvester* e 0,39 para o *forwarder*); N = Vida útil econômica da máquina (anos); He = Horas efetivas de uso anual (horas); F2 = Fator de manutenção e reparos do implemento (0,25 para o *harvester*).

c) Custos de mão de obra (CMO)

São custos de mão de obra (CMO) aqueles formados pelos custos diretos e indiretos com o operador da máquina, obtidos pela expressão (19):

$$CMO = \frac{12.Sm.(1 + S)}{He} \quad (19)$$

Em que: CMO = Custo de mão de obra (R\$ he⁻¹); Sm = Salário mensal (R\$); S = Fator de encargos sociais (1,10); e He = Horas efetivas de uso anual (horas).

Para efeito de cálculo, utilizou-se o fator de encargos sociais (S) igual a 1,10, conforme sugerido na literatura, devido à elevada taxa de encargos sociais praticados no Brasil.

d) Custos administrativos (CAD)

Foram considerados os custos de administração (CAD) como aqueles relacionados com os trabalhos de escritório e a supervisão de campo, sendo obtidos por meio da multiplicação dos custos diretos do maquinário e mão de obra (CD) pelo coeficiente de administração (K). Neste estudo foi aplicado um valor de 0,10, que representa 10% dos custos diretos, conforme expressão (20).

$$CAD = CD.K \quad (20)$$

Em que: CAD = Custos administrativos (R\$ h⁻¹); CD = Custos diretos do maquinário e mão de obra (R\$ h⁻¹); e K = Coeficiente de administração (K = 0,10).

e) Custo operacional total (CT)

O custo operacional total (CT) foi calculado considerando o somatório de custos fixos (CF), variáveis (CV), mão de obra (CMO) e administrativos (CAD), obtidos pela expressão (21):

$$CT = CF + CV + CMO + CAD \quad (21)$$

Em que: CT = Custos totais; CF = Custos fixos; CV = Custos variáveis; CMO = Custos de mão de obra; e CAD = Custos administrativos.

2.4.2.2 Custo de produção (CPr)

O custo de produção das máquinas (CPr) foi obtido pela divisão dos custos operacionais (CT) pela produtividade (Pr), conforme a expressão (22):

$$CPr = \frac{CT}{Pr} \quad (22)$$

Em que: CPr = Custo de produção de máquina (R\$ m⁻³); COT = Custo operacional total da máquina (R\$ he⁻¹); e Pr = Produtividade da máquina de corte e extração (m³ he⁻¹).

2.4.3 Análise de sensibilidade dos custos operacionais

A análise de sensibilidade dos custos operacionais foi aplicada para determinar os valores mínimos, médios e máximos das variáveis mais relevantes constituintes do custo operacional do *harvester* e do *forwarder* nas condições de colheita da madeira em regime de desbaste. Esta análise foi realizada com base na variação de ±20% das variáveis: eficiência operacional, depreciação, combustível, manutenção e reparos, taxa de juros, salário dos operadores e valor de aquisição das máquinas e implementos.

Na análise de sensibilidade foram adotados os valores de custos operacionais para a condição de operação avaliada no presente estudo, considerando uma eficiência operacional de 86,9% para o *harvester* e de 84,0% para o *forwarder* durante dois turnos de trabalho no período diário de 16 horas. A partir destes dados, foram plotados os valores graficamente em diagramas

Spiderplot com os valores obtidos de custo operacional para cada máquina avaliada (OLIVEIRA, 2009; PAULA, 2011; COSTA, 2012; ROBERT, 2013).

2.5 Análises estatísticas

Inicialmente, obtiveram-se as estatísticas descritivas dos tempos totais dos ciclos operacionais das máquinas com a apresentação do número mínimo de unidades amostrais requeridas. Em seguida, para os dados de duração dos elementos dos ciclos operacionais das máquinas avaliadas nos diferentes tratamentos (idades do primeiro desbaste), foi aplicado o teste de normalidade de *Kolmogorov-Smirnov* a 5% de probabilidade de erro e transformações de dados, onde se constatou que os mesmos não se enquadravam na distribuição normal.

Foram então comparados os tempos dos elementos do ciclo operacional das máquinas em ambas as idades por meio do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, considerado um método não paramétrico análogo ao teste t-Student para comparar as duas amostras independentes (9 e 10 anos).

2.6 Modelagem da produtividade e dos custos de produção

Foi efetuada uma análise de regressão linear múltipla para verificação da relação entre a variável dependente “produtividade efetiva” e “custos de produção” com as variáveis independentes que influenciaram na capacidade operacional das máquinas, sendo considerado volume individual e os tempos do ciclo operacional para o *harvester*, e o volume da carga, tempo do ciclo operacional e a distância de extração para o *forwarder*.

Inicialmente foi verificada a homogeneidade das variâncias dos dados de produtividade das máquinas por meio do teste de *Bartlett* ao nível de 5% de probabilidade de erro, seguida da elaboração de uma Matriz de Correlação Linear Simples (Pearson) das variáveis de potencial interesse da modelagem (Idade do povoamento, volume individual, tempo do ciclo, volume de carga e distância de extração). Para a obtenção de melhores ajustes, as variáveis sofreram transformações, dependendo de suas características e comportamentos no momento das análises, sendo que na seleção das variáveis utilizou-se o método *stepwise*, com auxílio do suplemento *Action Stat* no *Microsoft Excel*.

Os modelos ajustados foram selecionados com as seguintes estatísticas: coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro-padrão da estimativa em porcentagem ($Syx\%$), valor de F e significância dos coeficientes de regressão (β_i). A análise gráfica de resíduos foi aplicada para verificar a presença ou ausência de tendências nas estimativas da variável dependente.

Verificada a baixa correlação da variável idade dos povoamentos, optou-se por aplicar o teste de identidade de Graybill (1976) para conferir a possibilidade de agrupamento de idades e o emprego de um modelo reduzido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise técnica das máquinas

O número mínimo de ciclos operacionais necessários para avaliação das máquinas de colheita da madeira em ambas as idades de desbaste em função da duração total de cada ciclo operacional é apresentado na Tabela 10. No estudo de tempos e movimentos foram mensurados 2.497 e 3.485 ciclos para o *harvester* e 30 e 53 ciclos para o *forwarder*, nas idades de 9 e 10 anos, respectivamente, sendo necessários apenas 180 e 167 para o *harvester* e 30 e 53 ciclos para o *forwarder*, para atender o limite de erro admitido.

Tabela 10. Parâmetros estatísticos do estudo piloto utilizado no cálculo da amostragem dos ciclos operacionais das máquinas avaliadas no desbaste.

Parâmetros estatísticos	<i>Harvester</i>		<i>Forwarder</i>	
	Idade dos povoamentos (anos)			
	9	10	9	10
Duração média do ciclo operacional (s)	23	24	989	896
Mediana (s)	23	23	1.118	918
Valores mínimos das unidades de amostras (s)	4	4	409	206
Valores máximos das unidades de amostras (s)	79	69	1.500	1.587
Número total de ciclos cronometrados	2.497	3.485	30	53
Desvio padrão das amostras (S)	8	8	331	384
Coeficiente de variação (CV%)	34	33	33	43
Erro admissível (%)	5	5	12	12
Número mínimo de observações (n)	180	167	30	53

Em que: s = Segundos.

3.1.1 Análise do ciclo operacional

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios dos tempos dos ciclos operacionais do *harvester*, onde se verifica que houve diferença estatística significativa nos elementos busca e corte e processamento, que acarretou diferença no tempo total do ciclo operacional nas idades 9 e 10 anos.

Tabela 11. Tempos médios do ciclo operacional do *harvester* em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Elementos do ciclo	Idade dos povoamentos (anos)		p-valor
	9	10	
	Tempos	Tempos	
Busca e corte (s)	5**	6**	<0,001
Processamento (s)	16**	15**	<0,001
Deslocamento (s)	2 ^{ns}	3 ^{ns}	0,9898
Tempo total do ciclo (s)	23**	24**	<0,001

Em que: s = Segundos; ** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro ($p < 0,01$); e ^{ns} = Não significativo ($p \geq 0,05$).

O processamento da madeira consumiu o maior tempo do ciclo operacional nas idades de 9 e 10 anos, com aproximadamente 68% e 63%, respectivamente (Figura 7). De acordo com Silva (2008), isto se deve ao envolvimento de diversas atividades na etapa de processamento, como desgalhamento, destopamento, traçamento e empilhamento, além da necessidade da separação das pilhas de toras por classe de sortimento.

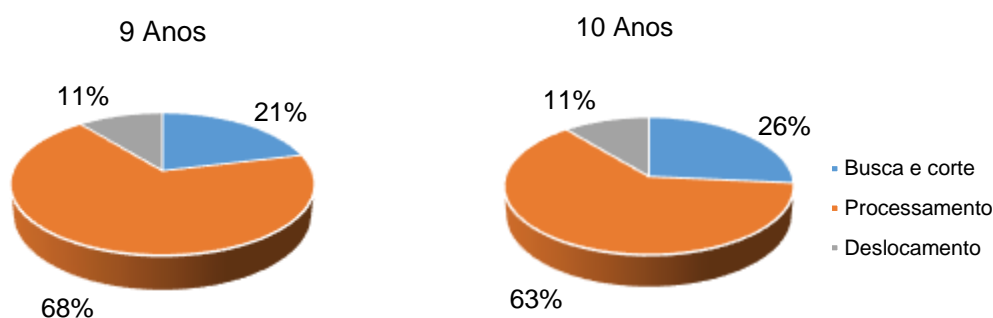


Figura 7. Distribuição percentual dos tempos dos ciclos operacionais do *harvester*, em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Observou-se que o tempo percentual do processamento foi maior na idade de 9 anos, podendo ser explicado pela maior quantidade de árvores bifurcadas existentes em aproximadamente 31% dos ciclos operacionais (árvores), que acarretou na necessidade de reorganização das toras nas pilhas. Tal situação deve-se ao fato que cada seção da árvore bifurcada é processada individualmente. Portanto, o planejamento da colheita da madeira, deve considerar a presença de árvores bifurcadas na área, visto que, acarreta em maior tempo consumido na atividade de processamento das árvores.

Os tempos médios do ciclo operacional do *forwarder* na execução do desbaste nos povoamentos de *Pinus taeda* são ilustrados na Tabela 12. Nota-se que não houve diferença estatística significativa entre as idades dos povoamentos em relação aos tempos totais do ciclo operacional.

Tabela 12. Tempos médios do ciclo operacional do *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Elementos do ciclo	Idade dos povoamentos (anos)		p-valor
	9 Tempos	10 Tempos	
Viagem vazio (s)	138**	81**	0,0001
Carregamento (s)	526 ^{ns}	544 ^{ns}	0,7633
Viagem carregado (s)	77 ^{ns}	47 ^{ns}	0,1125
Descarregamento de toras finas (s)	156 ^{ns}	156 ^{ns}	0,9883
Descarregamento de toras grossas (s)	92 ^{ns}	74 ^{ns}	0,3867
Tempo total do ciclo (s)	989^{ns}	902^{ns}	0,3089

Em que: s = Segundos; ** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro ($p < 0,01$); e ^{ns} = Não significativo ($p \geq 0,05$).

O carregamento consumiu a maior parte do tempo do ciclo operacional, com 53% e 60%, seguido pelo descarregamento com 25%, perfazendo, portanto, um tempo total de 78% e 85% do ciclo operacional nas idades de 9 e 10 anos, respectivamente (Figura 8). Estes resultados mostram que a maior parte do tempo do ciclo operacional foi consumido na forma passiva, ou seja, com a máquina realizando o carregamento e descarregamento da madeira, mostrando a necessidade de adoção de medidas nesta etapa visando à otimização da operação. Lopes et al. (2016) recomendam que a extração de madeira seja feita com a separação dos sortimentos das toras, pois em seu estudo foi detectado um aumento de produtividade e redução de custos da ordem de 15%.

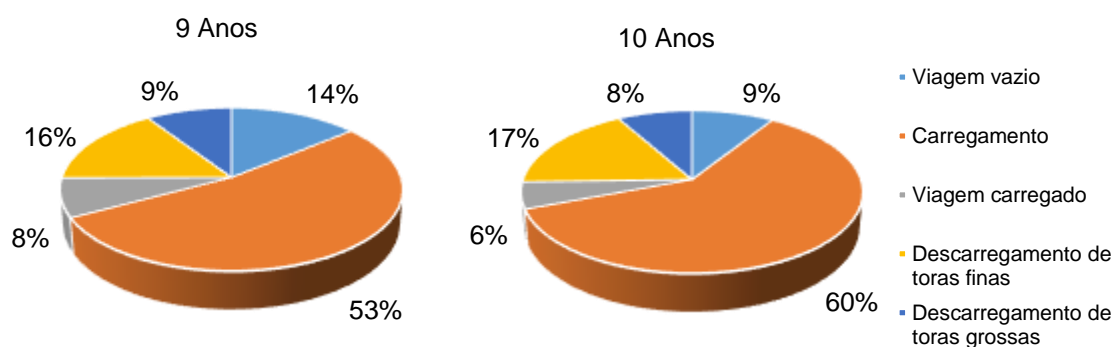


Figura 8. Distribuição percentual dos tempos dos ciclos operacionais do *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

A etapa de descarregamento de toras finas consumiu 16% e 17% do tempo total do ciclo, nas idades de 9 e 10 anos, respectivamente, sendo superior ao tempo de descarregamento de toras grossas, que consumiu 9% e 8% do tempo total do ciclo. Isto se deve a maior quantidade de movimentação da grua no descarregamento de toras finas, proporcionando o aumento do tempo do ciclo, se comparado ao descarregamento de toras grossas, que quando estas estavam presente no compartimento de carga, proporcionavam uma maior produtividade da máquina.

3.1.2 Eficiência operacional, produtividade, consumo de combustível e rendimento energético

A eficiência operacional do *harvester* foi de 86,9% e a produtividade determinada pelos dados do inventário florestal de 27,6 e 27,1 m³ he⁻¹ nos povoamentos de 9 e 10 anos, enquanto a partir do computador de bordo da máquina, a produtividade média foi de 26,5 e 25,1 m³ he⁻¹ nas idades de 9 e 10 anos, respectivamente (Tabela 13).

Tabela 13. Eficiência operacional, produtividade, consumo de combustível e rendimento energético do *harvester* e *forwarder* em povoamento de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	EO (%)	Pr (m ³ he ⁻¹)	CE (g kW ⁻¹ h ⁻¹)	RE (g kW ⁻¹ m ³)
Harvester				
9	86,9	26,5	160,6	6,1
10		25,1		6,4
Média	86,9	25,8	160,6	6,2
Forwarder				
9		37,0	59,9	1,6
10	84,0	37,6		1,6
Média	84,0	37,3	59,9	1,6

Em que: EO = Eficiência Operacional; Pr = Produtividade; CE = Consumo Específico de Combustível; RE = Rendimento Energético.

A diferença da produtividade observada pode estar relacionada com as características dos dados do inventário florestal, no qual foram considerados os volumes totais (comercial+ponteira), ao passo que no computador de bordo da máquina registrou apenas os volumes comerciais (toras grossas+toras finas), sendo este método o mais adequado. Entretanto, vale salientar que existem variáveis que podem influenciar na confiabilidade dos dados obtidos pelo cabeçote

do *harvester*, tais como perda de contato do rolo com tronco, devido à rugosidade da casca, tortuosidade do tronco e resistência dos galhos ao corte da faca de desgalhamento (KWF, 2013).

O conhecimento do consumo de combustível é essencial para a determinação da quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência na unidade de tempo, representando o investimento para a geração de cada metro cúbico (m³) de madeira na operação de desbaste. O consumo específico de combustível do *harvester* foi de 160,6 g kW⁻¹ h⁻¹, resultando em um rendimento energético médio de 6,2 g kW⁻¹ m³, considerando este valor médio para os povoamentos em ambas as idades.

O *forwarder* apresentou eficiência operacional de 84,0% e uma produtividade média de 37,0 e 37,6 m³ he⁻¹ nos povoamentos de 9 e 10 anos, respectivamente. Com um consumo específico de combustível médio de 59,9 g kW⁻¹ h⁻¹, resultando em um rendimento energético médio de 1,6 g kW⁻¹ m³ (Tabela 13). Observou-se que os resultados do *forwarder* seguiram a tendência do *harvester*, apresentando produtividades similares entre os povoamentos, sendo ocasionado pela proximidade das idades 9 e 10 anos, que se assemelham no volume médio por hectare.

3.1.3 Modelagem da produtividade

Para a análise da influência das variáveis na produtividade do *harvester* realizou-se a correlação linear simples de Pearson e verificou-se que entre as variáveis idade do povoamento (I), volume individual (vi) e tempo do ciclo operacional (TC), a variável que apresentou maior correlação com a produtividade da máquina foi o volume individual das árvores (Tabela 14).

Tabela 14. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de influência na produtividade do *harvester*.

Variáveis	Pr	I	vi	TC
Pr	1,00			
I	-0,05 ^{ns}	1,00		
vi	0,88**	-0,06**	1,00	
TC	0,11**	0,02**	0,51**	1,00

Em que: Pr = Produtividade do *Harvester*; I = Idade do povoamento; vi = Volume individual; TC = Tempo do ciclo; ** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro ($p < 0,01$); e ^{ns} = Não significativo ($p \geq 0,05$).

Na Figura 9 é apresentado o comportamento da produtividade do *harvester* nas idades de 9 e 10 anos, em função do volume individual de cada árvore processada durante a execução da operação. Como pode ser notado, a produtividade foi diretamente influenciada por esta variável, onde o aumento do volume individual da árvore proporcionou aumento da produtividade.

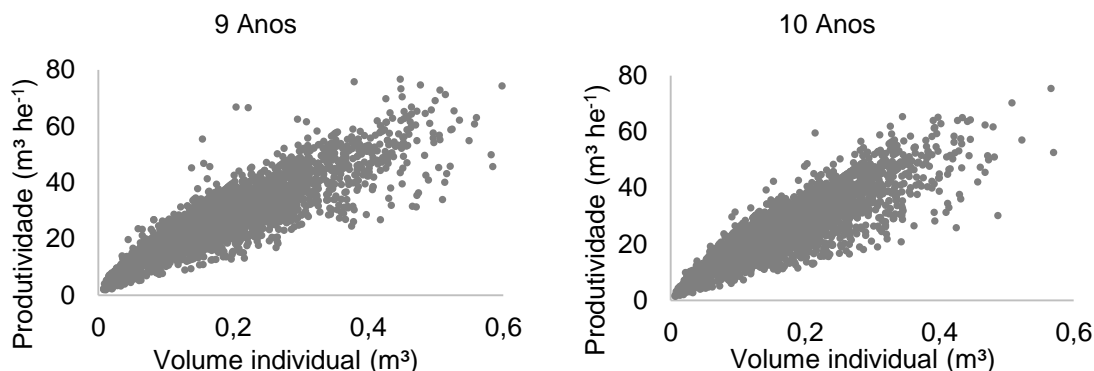


Figura 9. Produtividade efetiva do *harvester* em função do volume individual por árvore nos povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Diversos autores comprovaram que a capacidade produtiva do *harvester* aumenta proporcionalmente com o incremento do volume individual da árvore e, conseqüentemente, o custo de produção apresenta uma tendência inversa (HUYLER; LEDOUX, 1999; BRAMUCCI, 2001; LEITE et al., 2013). Entretanto, alguns pesquisadores comprovaram que a produtividade eleva-se com o aumento do volume individual até um ponto máximo, decrescendo após este valor em um comportamento parabólico (SANTOS; MACHADO, 1995; BURLA, 2008). Tal variação deve-se ao fato de que as árvores atingiram um volume que dificulta o trabalho da máquina, demonstrando o seu limite operacional, que está ligado ao diâmetro da árvore e densidade da madeira (BRAMUCCI, 2001; BURLA, 2008).

Para a estimativa da produtividade do *harvester* o modelo ajustado segue abaixo (23):

$$Pr = \beta_0 + \beta_1 Vi + \beta_2 vi^2 + \beta_3 vi.TC + \beta_4 vi^2.TC + \beta_5.TC + \varepsilon_i \quad (23)$$

Em que: Pr = Produtividade do *harvester* ($m^3 \text{ he}^{-1}$); vi = Volume individual (m^3); TC = Tempo do ciclo operacional (segundos); β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5 = Coeficientes do modelo; e ε_i = Erro aleatório.

Na Tabela 15 são apresentados os coeficientes e as estatísticas dos modelos ajustados usados nas estimativas da produtividade do *harvester* nos povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos, sendo denominados de completos, enquanto o terceiro modelo com os dados agrupados pela variável idade foi denominado reduzido.

Tabela 15. Coeficientes e estatísticas dos modelos de produtividade do *harvester* na operação de desbaste de povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Idade (Anos)	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R ² aj	Syx%	F
9	4,984*	282,547*	-183,317*	-4,634*	4,848*	-0,229*	0,980	7,07	27526,2*
10	4,700*	270,527*	-167,870*	-4,283*	4,379*	-0,195*	0,975	7,52	22079,2*
Agrupados	4,854*	274,191*	-169,121*	-4,378*	4,366*	-0,210*	0,977	7,36	48790,7*

Em que: R²aj = Coeficiente de determinação ajustado; Syx% = Erro padrão de estimativa em porcentagem; F = Valor do teste F; β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5 = Coeficientes de regressão; e * = Coeficientes de regressão significativos a 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Observou-se que todos os coeficientes do modelo foram significativos, mostrando alta correlação das variáveis volume individual e o tempo do ciclo operacional com a produtividade do *harvester*. Os coeficientes de determinação ajustados foram considerados altos, com valores próximos a 0,98, e os erros padrão da estimativa foram baixos, em torno de 7,1 a 7,5%, demonstrando, portanto, a existência de alta correlação da produtividade da máquina com estas variáveis.

Na Figura 10 são apresentados os gráficos de resíduos dos modelos ajustados, podendo ser notada a tendência em superestimar a produtividade do *harvester* para árvores com menores volumes individuais. Estes valores elevados foram obtidos quando o volume da árvore era inferior a 0,015 m³. Para Hakkila (2004) árvores inferiores a este volume tornam o corte mecanizado inviável, devido à baixa produtividade da máquina.

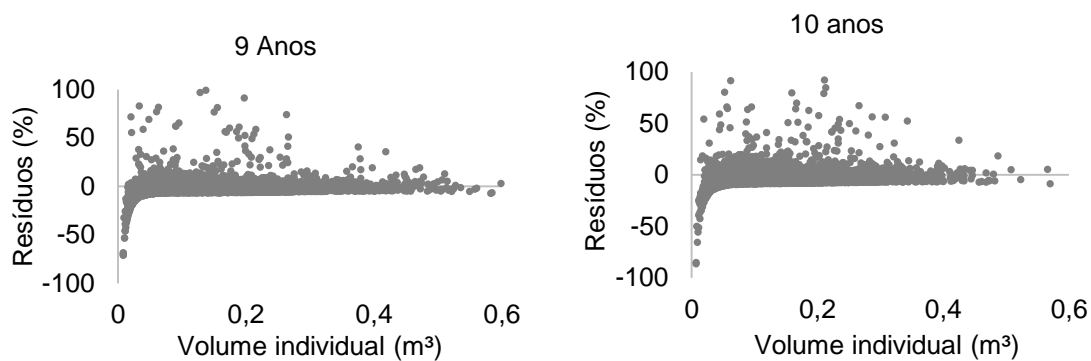


Figura 10. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de produtividade do *harvester* em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

Na Tabela 16 é apresentada a análise de variância para o teste de identidade do modelo de estimativa da produtividade do *harvester* na operação de desbaste em povoamentos de *Pinus taeda*, com 9 e 10 anos de idade. Esse procedimento visou verificar a possibilidade de se utilizar um modelo reduzido, onde os dados foram agrupados pela variável idade. Assim, foi verificado que houve diferença estatística significativa na estimativa da produtividade do *harvester*.

Tabela 16. Análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa da produtividade do *harvester*.

FV	GL	SQ	QM	F	F _α
Modelo Completo	12	4.639.842,926			
Modelo Reduzido	6	4.639.454,823			
Diferença	3	388,103	64,684	18,293*	0,273
Resíduo	5.651	19.982,253	3,536		
Total	5.663	4.659.825,179			

Em que: GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrado médio; F = Estatística F; F_α = Valor de F crítico; e * = Diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Por meio desta análise de variância, pode-se visualizar que o valor da estatística F foi superior ao valor crítico (F_α), o que possibilitou concluir que os modelos completo e reduzido possuem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade de erro. Com isso, os modelos completos devem ser utilizados para estimativa da produtividade do *harvester* na operação de desbaste nas duas idades avaliadas.

Ao analisar as variáveis de influencia na produtividade do *forwarder*, verificou-se que houve baixa correlação da produtividade com a distância de extração (Tabela 17 e Figura 11), sendo a maior correlação existente com o volume de carga, seguida do tempo do ciclo (Tabela 17 e Figura 12).

Tabela 17. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de influência na produtividade do *forwarder*.

Variáveis	Pr	I	VC	TC	DE
Pr	1,00				
I	0,02 ^{ns}	1,00			
VC	0,74 ^{**}	0,02 ^{ns}	1,00		
TC	0,29 [*]	0,05 ^{ns}	0,84 ^{**}	1,00	
DE	0,18 [*]	0,09 ^{ns}	0,58 ^{**}	0,72 ^{**}	1,00

Em que: Pr = Produtividade do *forwarder*; I = Idade do povoamento; VC = Volume de Carga; TC = Tempo do ciclo; DE = Distância de extração; ** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro ($p < 0,01$); * Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$); e ^{ns} = Não significativo ($p \geq 0,05$).

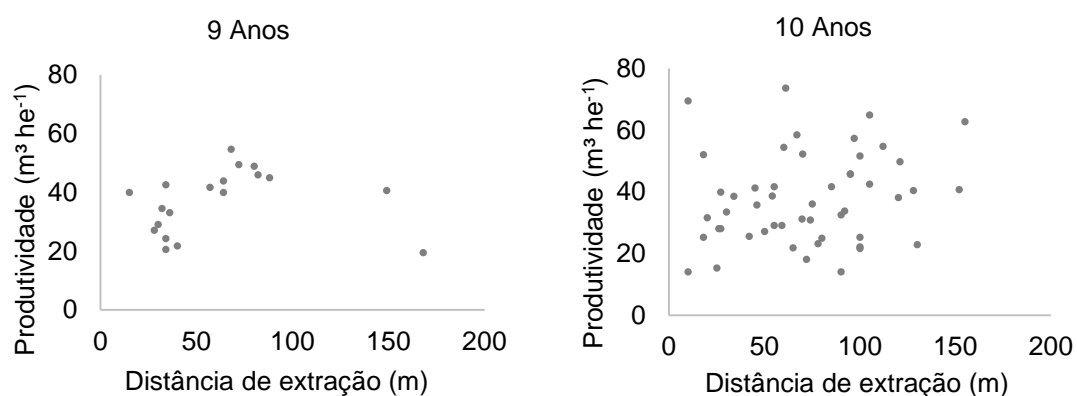


Figura 11. Produtividade efetiva do *forwarder* em função da distância de extração nos povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

Nas menores distâncias de extração o *forwarder* realizou apenas a extração do sortimento de energia (toras finas), pois era possível completar a sua capacidade de carga sem a necessidade de deslocamentos maiores. Entretanto, quando era realizada a extração da madeira de dois sortimentos (toras grossas+toras finas) em um único ciclo operacional, houve a necessidade da máquina se deslocar em maiores distâncias de extração para completar a carga do sortimento para serraria (toras grossas). Isto proporcionou maior volume de carga no ciclo operacional. Conseqüentemente, esta diferença de volume de carga compensou o tempo consumido com o deslocamento de viagem vazio e carregado devido às maiores distâncias percorridas.

Na Figura 12 é visualizado o aumento do volume de carga em função da distância de extração, causado pela presença de compartimento da carga com sortimento de serraria (toras grossas). A tendência de aumento da produtividade nas maiores distâncias de extração, devido a presença do sortimento de serraria consorciado com o de energia, também foi verificada por Lopes et al. (2016), que, ao compararem dois métodos de extração, com sortimentos de energia e serraria

separados e consorciados, obtiveram-se aumento da produtividade na classe de distância acima de 150 m na extração dos sortimentos consorciados.

A principal variável de influência na produtividade do *forwarder* foi o volume de carga. Sendo assim, uma forma de elevar a produtividade da máquina é aumentar o seu volume de carga. De acordo com Carmo et al. (2015), é possível maximizar a produtividade do *forwarder* por meio do aumento da altura dos fueiros para obtenção do aumento da caixa de carga, desde que a densidade da madeira e o volume transportado não comprometam a estabilidade da máquina, e, por consequência, permita um volume maior de madeira a ser transportado por ciclo operacional.

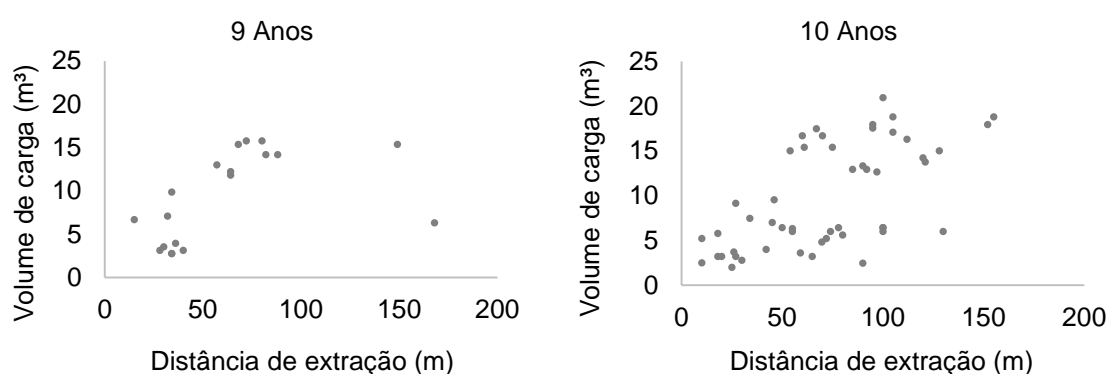


Figura 12. Relação do volume de carga do *forwarder* e a distância de extração nos povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

No ajuste de modelos para estimativa da produtividade do *forwarder*, foram selecionadas as variáveis tempo do ciclo operacional, volume de carga e distância de extração. Portanto, o modelo ajustado para a estimativa da produtividade do *forwarder* segue abaixo (24):

$$Pr = \beta_0 + \beta_1.TC + \beta_2.VC + \beta_3.DE + \varepsilon_i \quad (24)$$

Em que: Pr = Produtividade do *forwarder* (m³ he⁻¹); TC = Tempo do ciclo (horas); VC = Volume de carga do ciclo (m³); DE = Distância de extração do ciclo (m); β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = Coeficientes do modelo; e ε_i = Erro aleatório.

Na Tabela 18 estão apresentados os coeficientes e as estatísticas dos modelos ajustados para a estimativa da produtividade do *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos, sendo denominados de

completos, ao passo que o terceiro modelo, com os dados agrupados pela variável idade, foi denominado de reduzido.

Observou-se que os coeficientes de regressão correspondentes às variáveis Tempo do ciclo, Volume da carga e Distância de extração foram significativos a 5% de probabilidade de erro. Os coeficientes de determinação ajustados variaram de 0,88 a 0,94, com um erro padrão de estimativa que variou de 6,9 a 13,5% para a idade de 9 e 10 anos, respectivamente.

Tabela 18. Coeficientes e estatísticas dos modelos para estimativa da produtividade do *forwarder* nas operações de desbaste em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Idade (anos)	β_0	β_1	β_2	β_3	R ² aj	Syx%	F
9	27,875*	-79,992*	3,242*	-0,035*	0,943	6,87	100,3*
10	37,625*	-152,088*	4,021*	-0,015*	0,879	13,51	120,7*
Agrupados	35,544*	-147,370*	3,956*	0,002*	0,883	12,46	170,8*

Em que: R²aj = Coeficiente de determinação ajustado; Syx% = Erro padrão de estimativa em porcentagem; F = valor do teste F; β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = Coeficientes de regressão; e * = Coeficientes de regressão significativos a 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Na Figura 13 são apresentados os gráficos de resíduos dos modelos ajustados. Observa-se que o modelo na idade de 10 anos, apresentou maior dispersão dos resíduos nas distâncias até 50 m e, conseqüentemente, isto explicou o maior erro de estimativa obtido nesta idade.

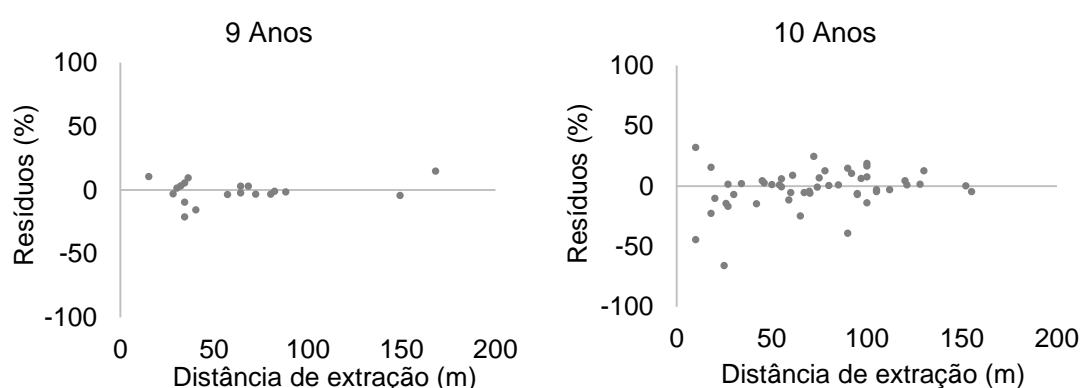


Figura 13. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de produtividade do *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Na Tabela 19 é apresentada a análise de variância do teste de identidade do modelo para a estimativa da produtividade do *forwarder* na operação de desbaste nos povoamentos de *Pinus taeda*, com 9 e 10 anos de idade. Observa-se que,

assim como no *harvester*, não foi possível agrupar os dados do *forwarder* em função da variável idade, devendo-se utilizar um modelo para cada idade avaliada.

Tabela 19. Análise de variância do teste de identidade do modelo para estimativa da produtividade do *forwarder*.

FV	GL	SQ	QM	F	F _α
Modelo Completo	8	11.239,760			
Modelo Reduzido	4	11.130,834			
Diferença	4	108,926	27,231	1,275*	0,176
Resíduo	60	1.281,589	21,360		
Total	68	12.521,349			

Em que: GL= Graus de liberdade; SQ= Soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = Estatística F; F_α = Valor F crítico; e * = Diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade de erro.

3.2 Análise de custos

O custo operacional de uma máquina corresponde ao somatório de todos os custos resultantes de sua aquisição e operação. Silva et al. (2004) ressaltaram que a essencialidade das análises de custos, aliadas aos estudos de produtividade como forma de planejar a produção, visam à minimização dos custos e a maximização do rendimento das atividades, tornando, assim, o projeto técnica e economicamente viável.

Portanto, considerando-se a taxa de juros e seguros de 12% a.a. e uma eficiência operacional média de 86,9%, calculou-se o custo por hora efetivamente trabalhada de R\$ 125,40. Os custos fixos corresponderam a aproximadamente 39,0%, os custos variáveis foram de 40,5%, mão de obra de 12,6% e de administração de 7,9% dos custos totais (Tabela 20).

Tabela 20. Custos operacionais do *harvester* nas operações de desbaste.

	Itens de custos	Valor (R\$ he ⁻¹)	Valor parcial (%)	Valor total (%)
Fixo	Depreciação	32,38	25,8	39,0
	Juros, seguros e impostos	16,52	13,2	
Variável	Combustível	19,41	15,5	40,5
	Lubrificantes e graxas	1,19	0,9	
	Material rodante	5,50	4,4	
	Reparos e manutenção	24,69	19,7	
Mão de Obra		15,74	12,6	12,6
Administração		9,97	7,9	7,9
	Total	125,40	100,0	100,0

Entre os custos fixos, a variável depreciação foi a mais representativa dos custos operacionais (25,8%), sendo justificada pelo alto valor de aquisição da

máquina. Contudo, o custo de depreciação pode ser maior, dependendo da quantidade de horas trabalhadas no mês.

Entre os custos variáveis, o combustível representou 15,5% dos custos operacionais calculados para o *harvester*, sendo este considerado um dos principais componentes dos custos totais, corroborando com diversos autores (PAULA, 2011; COSTA, 2012). Segundo Fernandes e Leite (2001), o combustível é um dos principais itens que compõem o custo operacional de uma máquina. Além disso, trata-se de um indicativo da eficiência do processo de conversão de energia do sistema mecanizado na operação de colheita de madeira.

Os custos de manutenção (assistência técnica; material de reposição e serviços de terceiros) foram considerados baixos, ao comparar com os resultados apresentados na literatura (CANTO, 2009). No entanto, pode-se associar ao baixo valor médio de uso de 2.370 horas no momento do estudo, que proporcionou menor necessidade de manutenção e reparos.

Com relação aos custos do *forwarder*, considerando uma eficiência operacional média de 84,0% e taxa de juros e seguros de 12% a.a., obteve-se um custo por hora efetivamente trabalhada de R\$ 180,93. Os custos fixos corresponderam a 35,4% do custo operacional total, constituído principalmente, pela depreciação, que correspondeu a R\$ 42,48 por hora efetiva de trabalho (Tabela 21).

Tabela 21. Custos operacionais do *forwarder* nas operações de desbaste.

	Itens de custos	Valor (R\$ he ⁻¹)	Valor parcial (%)	Valor total (%)
Fixo	Depreciação	42,48	23,5	35,4
	Juros e seguros	21,66	12,0	
Variável	Combustível	22,86	12,6	47,3
	Lubrificantes e graxas	0,88	0,5	
	Material rodante	41,10	22,7	
	Reparos e manutenção	20,71	11,4	
Mão de Obra		16,28	9,0	9,0
Administração		14,97	8,3	8,3
	Total	180,94	100,0	100,0

Os custos variáveis foram os principais que oneraram os custos operacionais da máquina, representando 47,3% do total. O material rodante foi a variável que mais afetou os custos variáveis, representando 22,7% do custo operacional total. Em seguida, a vida útil do *forwarder* influenciou diretamente nos custos de reparos

e manutenção da máquina (assistência técnica + material de reposição + serviços de terceiros). No momento inicial do estudo, a máquina apresentou uma média de 5.540 horas de uso, o que influenciou em 11,4% nos custos operacionais totais.

O custo de mão de obra correspondeu a 9,0% do custo operacional total, representando R\$ 16,28 por hora efetiva de trabalho. Porém, vale salientar que este custo é variável entre empresas, pois muitas realizam estudos para redução de turnos de trabalho, dias totais de trabalho e aumento de horas extras pontuais, buscando a redução de custos e a manutenção dos índices de produção.

3.2.1 Modelagem dos custos de produção

O custo médio de produção do *harvester* nos povoamentos de *Pinus taeda*, com idade de 9 e 10 anos foi de R\$ 4,74 e R\$ 5,00 por metro cúbico, respectivamente. Entretanto, na Figura 14, é possível observar a variabilidade dos custos de produção em função do volume individual das árvores.

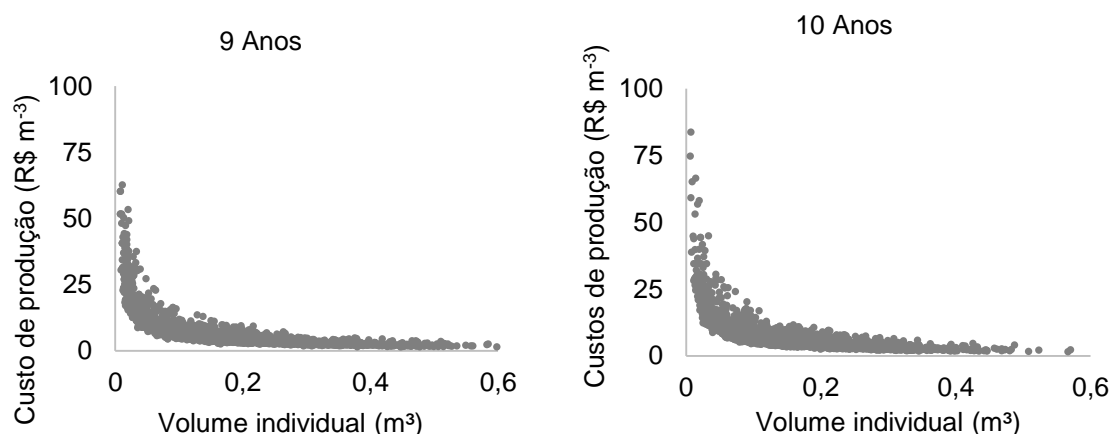


Figura 14. Custos de produção do *harvester* em função do volume individual por árvore nos povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

Observou-se que os custos de produção apresentaram comportamento análogo à produtividade em função do volume individual das árvores. Além disso, os resultados corroboraram com Hakkila (2004), que afirmou que o corte mecanizado é economicamente viável apenas quando o volume individual das árvores for superior a 0,015 m³, uma vez que valores inferiores resultam em custos excessivamente elevados devido à baixa produtividade obtida pela máquina.

Para estimar o custo de produção do *harvester*, optou-se por ajustar um modelo exponencial linearizado, considerando a variável independente o volume individual das árvores, conforme descrito a seguir (25):

$$\ln \text{CPr} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln v_i + \varepsilon_i \quad (25)$$

Em que: CPr = Custos de produção (R\$ m⁻³); v_i = Volume individual (m³); β₀ e β₁ = Coeficientes do modelo; e ε_i = Erro aleatório.

Na Tabela 22 são apresentados os coeficientes e as estatísticas de ajuste e precisão dos modelos ajustados para cada idade do povoamento e com os dados agrupados por idade.

Tabela 22. Coeficientes e estatísticas dos modelos para estimativa dos custos de produção do *harvester* nas operações de desbaste em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 10 anos.

Idade (anos)	β ₀	β ₁	R ² aj	Syx%	F	IM
9	0,276*	-0,745*	0,930	36,69	18.485,9*	1,03
10	0,265*	-0,758*	0,915	38,22	12.523,8*	1,03
Agrupados	0,263*	-0,751*	0,831	37,82	30.474,9*	1,03

Em que: R²aj = Coeficiente de determinação ajustado; Syx% = Erro padrão de estimativa em porcentagem; F = valor do teste F; β₀ e β₁ = Coeficientes da regressão; e * = Coeficientes de regressão significativos a 5% de probabilidade de erro (p < 0,05).

Os coeficientes de determinação ajustados variaram de 0,92 a 0,93 para as idades de 9 e 10 anos, respectivamente, dessa maneira, os modelos ajustados conseguem explicar mais de 90% da variabilidade do custo de produção. Entretanto, o erro padrão de estimativa apresentou-se alto, podendo ser visualizado na Figura 15 a maior dispersão dos resíduos em função do volume individual.

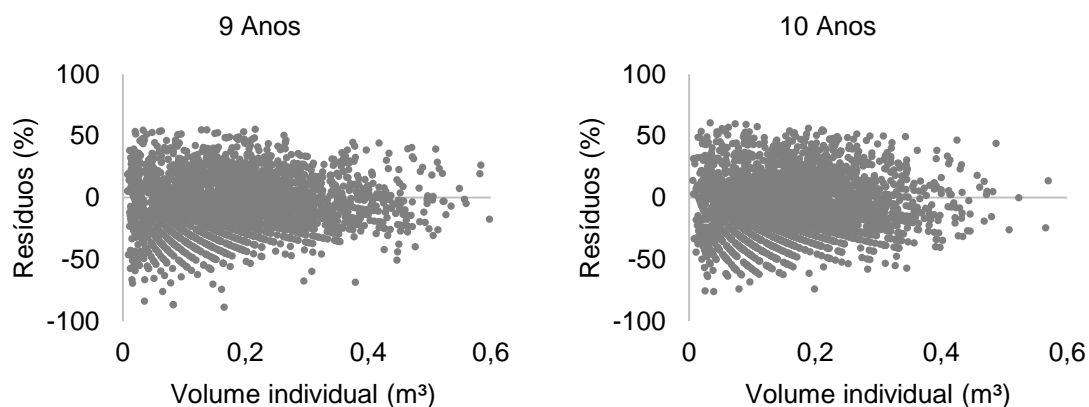


Figura 15. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de custos de produção do *harvester* em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

Verificou-se que, assim como na produtividade efetiva do *harvester*, não houve semelhança dos custos de produção nas duas idades do povoamento (Tabela 23). Em razão desta distinção entre os custos de produção e entre as idades dos povoamentos avaliados, tornou-se necessário ajustar um modelo para cada idade. Isto se deve ao custo de produção ser diretamente determinado pela produtividade da máquina.

Tabela 23. Análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa dos custos de produção do *harvester*.

FV	GL	SQ	QM	F	F _α
Modelo Completo	4	18625,218			
Modelo Reduzido	2	18449,857			
Diferença	2	175,361	87,681	3.554,093*	0,051
Resíduo	5642	139,190	0,025		
Total	5646	18764,408			

Em que: GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrado médio; F = Estatística F; F_α = Valor F crítico; e * = Diferença estatística significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro.

O custo médio de produção do *forwarder* nos povoamentos de *Pinus taeda*, com 9 e 10 anos foi de R\$ 4,89 e R\$ 4,81 por metro cúbico, respectivamente. Na Figura 16 é possível verificar a variabilidade dos custos de produção em função do volume de carga do *forwarder*, onde os custos de produção diminuem com o aumento do volume de carga na operação de extração de madeira.

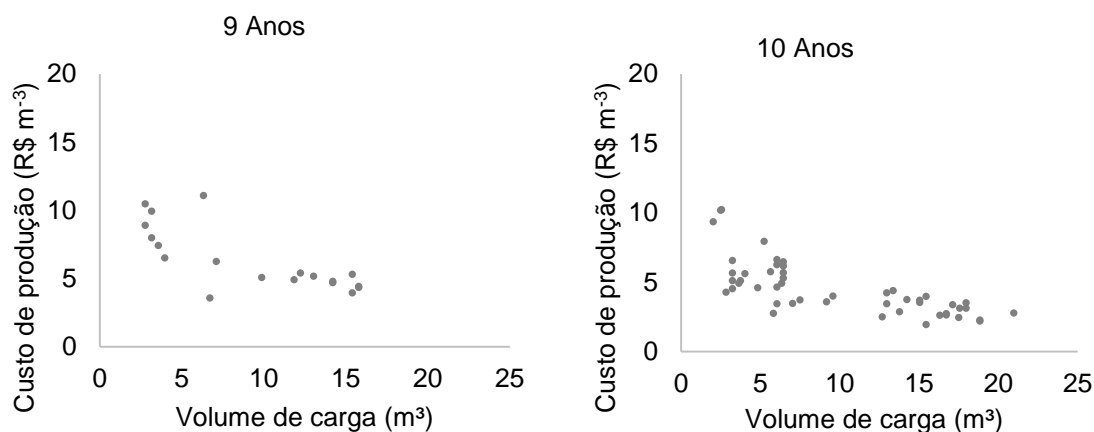


Figura 16. Relação dos custos de produção do *forwarder* em função do volume de carga nos povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

O melhor modelo ajustado para a estimativa do custo de produção do *forwarder* foi o seguinte (26):

$$\ln CPr = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln VC + \varepsilon_i \quad (26)$$

Em que: CPr = Custos de produção (R\$ m⁻³); VC = Volume de carga (m³); β_0 e β_1 = Coeficientes do modelo; ε_i = Erro aleatório.

Na Tabela 24 são apresentados os coeficientes e as estatísticas dos modelos ajustados para as estimativas dos custos de produção do *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos, bem como o modelo com os dados agrupados pela variável idade.

Tabela 24. Coeficientes e estatísticas dos modelos para estimativa dos custos de produção do *forwarder* nas operações de desbaste em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

Idade (Anos)	β_0	β_1	R ² aj	Syx%	F	IM
9	2,463*	-0,407*	0,692	20,33	50,9*	1,01
10	2,631*	-0,465*	0,865	51,98	81,7*	1,03
Agrupados	2,583*	-0,448*	0,956	25,69	123,5*	1,03

Em que: R²aj = Coeficiente de determinação ajustado; Syx% = Erro padrão de estimativa em %; F = valor do teste F; IM = Índice de Meyer; β_0 e β_1 = Coeficientes de regressão; e * = Coeficientes de regressão significativos a 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Os coeficientes de regressão obtidos foram significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro, em que o valor de F mostrou significância e a possibilidade em estimar os custos de produção do *forwarder* em função do volume de carga por ciclo. Entretanto, o erro padrão de estimativa em porcentagem mostrou-se alto, ocasionado pela dispersão dos resíduos obtidos em ambas as idades (Figura 17).

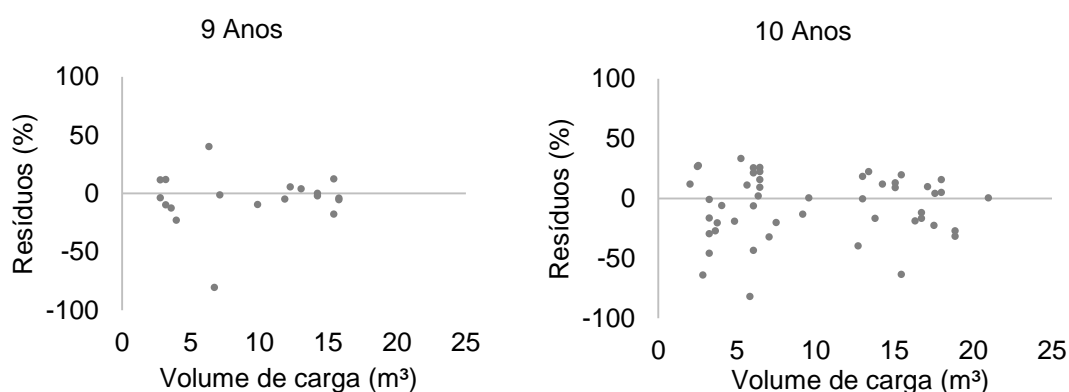


Figura 17. Resíduos dos modelos ajustados para a estimativa de custos de produção do *forwarder* em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 9 e 10 anos.

Na Tabela 25 está apresentada a análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa dos custos de produção do *forwarder*. Assim como no *harvester*, a estimativa dos custos de produção do *forwarder* deve ser realizada por meio de ajuste de modelo para cada idade avaliada, não podendo os dados serem agrupados pela variável idade do povoamento.

Tabela 25. Análise de variância para o teste de identidade do modelo para estimativa dos custos de produção do *forwarder*.

FV	GL	SQ	QM	F	F _α
Modelo Completo	4	192,260			
Modelo Reduzido	2	192,206			
Diferença	2	0,054	0,027	0,531*	0,051
Resíduo	64	3,233	0,051		
Total	68	195,493			

Em que: GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = Estatística F; F_α = Valor de F crítico; e * = Diferença estatística significativa ao nível de 5% de significância.

3.2.2 Análise de sensibilidade dos custos operacionais totais

Na análise de sensibilidade do *harvester* verificou-se que a taxa de juros, o valor de aquisição da máquina e a eficiência operacional apresentaram maiores inclinações dentro dos cenários simulados, com variação de $\pm 20\%$ das variáveis: eficiência operacional, depreciação, combustível, manutenção e reparos, taxa de juros, salário dos operadores e valor de aquisição da máquina e implementos (Figura 18).

As variáveis depreciação, reparos e manutenção, salário dos operadores e o custo de manutenção e reparos foram as variáveis que proporcionaram menor variação de redução e acréscimo de custo. O menor custo de manutenção foi devido à baixa quantidade de horas trabalhadas da máquina no momento do estudo (2.370 horas).

A eficiência operacional, segundo Costa (2012), comporta-se de maneira análoga as outras variáveis, cujo acréscimo da eficiência operacional reduz os custos operacionais. Além disso, observou-se que ao reduzir a eficiência operacional em 20%, os custos operacionais aumentaram em 10%. Entretanto, ao aumentar a eficiência operacional em 10%, obteve-se uma redução de 6,4%, o que representa uma economia de R\$ 11,66 por hora efetiva de trabalho.

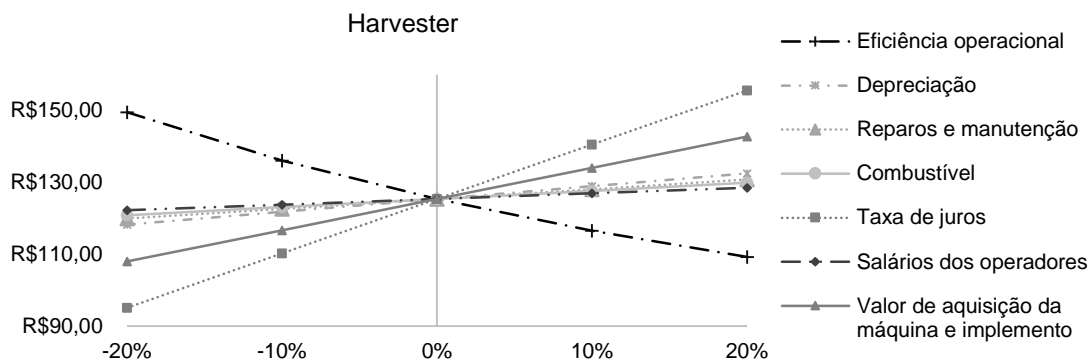


Figura 18. Diagrama de *Spiderplot* das sete principais variáveis dos custos operacionais do *harvester* na operação de desbaste.

Na análise de sensibilidade dos custos operacionais do *forwarder* verificou-se que os cenários influenciaram nas variáveis taxa de juros, valor de aquisição da máquina e eficiência operacional. As demais variáveis apresentaram pouca alteração com as simulações realizadas (Figura 19).

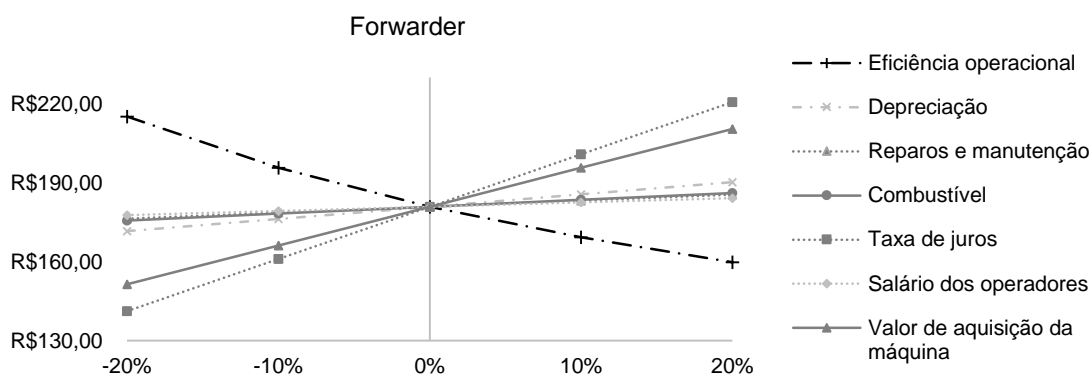


Figura 19. Diagrama de *Spiderplot* das sete principais variáveis dos custos operacionais do *forwarder* na operação de desbaste.

Portanto, em ambas as máquinas avaliadas, observou-se a importância de se manter uma alta eficiência operacional, pois esta variável afeta diretamente os custos operacionais. Segundo Canto (2009), para garantir sempre uma eficiência operacional e controlar os custos operacionais é importante prever a vida útil das peças e realizar a sua substituição antes que elas falhem, reduzindo o tempo de permanência em manutenção.

4 CONCLUSÕES

- O processamento consumiu o maior tempo do ciclo operacional da operação de corte com o *harvester*;
- O carregamento e descarregamento da madeira consumiram o maior tempo do ciclo operacional do *forwarder*, sendo que tais atividades parciais não foram afetadas pelas idades dos povoamentos;
- A produtividade efetiva do *harvester* foi diretamente afetada pelo volume individual das árvores e pelo tempo do ciclo operacional;
- A produtividade do *forwarder* foi afetada pelo volume da carga transportada, tempo do ciclo operacional e distância de extração;
- A variável idade dos povoamentos no desbaste não apresentou correlação estatística com a produtividade das máquinas, não sendo possível ser incluída nos modelos ajustados;
- Os dados nas estimativas de produtividade efetiva e os custos de produção das máquinas não possibilitaram o agrupamento em função da idade;
- Os custos operacionais do *harvester* foram afetados pelas variáveis combustível, depreciação e manutenção, enquanto do *forwarder* pela manutenção, depreciação e material rodante;
- Na análise de sensibilidade dos custos de ambas as máquinas, a taxa de juros, o valor de aquisição e a eficiência operacional foram as variáveis que apresentam maior mudança nos cenários de simulação.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: Projeto e medida do trabalho.** Americana: Edgard Blucher, 1977. 635 p.

BRAMUCCI, M. **Determinação de fatores de influência sobre a produtividade de “Harvesters” na colheita de madeira.** 2001. 50 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2001.

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

CABRAL, O. M. J. V. **Avaliação operacional da colheita de madeira em desbastes de *Pinus taeda* L.** 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2014.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia.** 2009. 127 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CARMO, F. C. A.; FIEDLER, N. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Otimização do uso do trator florestal *forwarder* em função da produtividade, custos e capacidade de carga. **Árvore**, v. 39, n. 3, p. 561-566, 2015.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná.** Londrina: IAPAR, 2000. Disponível em :<<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

COSTA, E. M. da. **Avaliação do desempenho e de custos de um harvester em floresta de eucalipto de baixa produtividade.** 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

DIAS, A. N. **Modelagem e avaliação econômica de plantações de eucalipto submetida a desbastes.** Viçosa, MG: 2000. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

FERNANDES, H. C.; LEITE, A. M. P. Proposta de uma metodologia para ensaio de máquinas colhedoras de madeira. In: Simpósio brasileiro sobre colheita e transporte florestal, 5, 2001, Porto Seguro. **Anais...** Viçosa: SIF/UFV, 2001. p. 227-239.

GRAYBILL, F. A. **theory and application of the linear model.** Belmont: Duxbury Press, 1976. 704 p.

HAKKILA, P. **Developing technology for large-scale production of forest chips.** 2003. 54 p. (Final Report 6/2004).

HUYLER, N. K.; LEDOUX, C. B. **Performance of a cut-to-length harvester in a single-tree and group-selection cut.** Washington: USDA, 1999. 6 p. (Research Paper, 711).

KÄRHÄ, K.; JOUHIAHO, A.; MUTIKAINEN, A.; MATTILA, S. Mechanized energy wood harvesting from early thinnings. **International Journal of Forest Engineering**, v. 16, n. 1, p. 15-26, 2005.

KWF. **Lastenheft *Harvester*vermessung**. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., Groß-Umstadt, 2013. 30 p.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem técnica e de custos do *Harvester* no corte de madeira de eucalipto no sistema de toras curtas. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 205-215, 2013.

LOPES, E. S.; DINIZ, C. C. C.; SERPE, E. L.; CABRAL, O. M. J. V. Efeito do sortimento da madeira na produtividade e custo do *forwarder* no desbaste comercial de *Pinus taeda*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 57-66, 2016.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2014. 543 p.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. YAMAJI, F. M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 169-182, 2006.

MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um *harvester* trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.

MEDERSKI, P. A. Comparison of harvesting productivity and costs in thinning operations with and without Midfield. **Forest Ecology and Management**, v. 224, n. 3, p. 286-296, 2006.

MIYATA, E. S. **Determining fixed and operating costs of logging equipment**. Washington: USDA Forest Service, 1980. 16 p. (NC General Technical Report, 55).

NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. **Silva Fennica**, v. 40, n. 2, p. 335-363, 2006.

NUUTINEN, Y.; VÄÄTÄINEN, K.; ASIKAINEN, A.; PRINZ, R.; HEINONEN, J. Operational efficiency and damage to sawlogs by feed rollers of the *harvester* head. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 121-139, 2010.

OIKARI, M.; KÄRHÄ, K.; PALANDER, T.; PAJUOJA, H.; OVASKAINEN, H. Analyzing the views of wood harvesting professionals related to the approaches for increasing the cost-efficiency of wood harvesting from young stands. **Silva Fennica**, v. 44, n. 3, p. 481-495, 2010.

OLIVEIRA, R. J. **Avaliação econômica da utilização de cabos aéreos na colheita florestal em regiões montanhosas**. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PAULA, E. N. S. O. **Avaliação técnica, de custos e ambiental de dois modelos de harvester na colheita florestal**. 2011. 68 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

ROBERT, R. C. G. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita mecanizada em plantios de *Eucalyptus* spp. em duas condições de relevo acidentado**. 2013. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTOS, S. L. M.; MACHADO, C. C. Análise técnico-econômica do processamento de madeira de eucalipto em áreas planas, utilizando o processador. **Árvore**, v. 19, n. 3, p. 346-357, 1995.

SCHNEIDER, R.; SCHNEIDER, P. **Introdução ao manejo florestal**, 2 ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SILVA, E. N. **Avaliação técnica e econômica do corte de pinus com harvester**. 2008. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SILVA, J. R.; FENNER, P. T. Desempenho de Tractor Florestal Transportador Autocarregável ("*Forwarder*"). **Silva Lusitana**, v. 17, n. 1, p. 97-108, 2009.

SILVA, K. R.; MINETTI, L. J.; FIEDLER, N. C.; VENTUROLI, F.; MACHADO, E. G. B.; SOUZA, A. P. Custos e rendimentos operacionais de um plantio de eucalipto em região de cerrado. **Árvore**, v. 28, n. 3, p. 361-366, 2004.

SYUNEV, V.; SOKOLOV, A.; KONOVALOV, A. **Comparison of wood harvesting methods in the Republic of Karelia, Metlan työraportteja**. Working Papers 120. Helsinki: Finnish Forest Research Institute, 2009. 117 p.

CAPÍTULO 3 - Caracterização da biomassa energética da colheita de *Pinus taeda* L. em diferentes idades submetidos ao desbaste

Resumo: Objetivou-se avaliar qualitativamente as características da biomassa energética da colheita de madeira em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial, visando subsidiar o melhor aproveitamento dos materiais para fins energéticos. O estudo foi realizado em povoamentos com 7, 8, 9 e 10 anos de idade submetidos ao primeiro desbaste comercial. Foram amostradas 17, 9, 10 e 11 árvores nas respectivas idades, segmentadas nos compartimentos: toras finas, ponteira, acículas, cascas e galhos. Nesses compartimentos foram obtidas amostras para determinação da massa específica básica, poder calorífico superior e inferior, composição química e índice valor de combustível (IVC). As determinações energéticas foram submetidas ao Delineamento Inteiramente Casualizado e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os resultados mostraram a existência de diferença nas características energéticas entre os componentes das árvores, sendo as toras finas e ponteiros considerados os melhores produtos para fins energéticos, seguido pelos galhos em relação aos parâmetros massa específica básica, poder calorífico superior, teor de cinzas e IVC. A casca e as acículas apresentaram elevados valores de poder calorífico, porém com qualidade inferior nos parâmetros massa específica básica, teor de cinzas e IVC. Em relação a variável idade do povoamento, por meio do parâmetro IVC, foi possível ranqueá-las, juntamente com os componentes avaliados, podendo-se afirmar que os povoamentos nas idades de 9 e 10 anos apresentaram elevada capacidade de geração de produtos com as melhores qualidades energéticas, principalmente, nos componentes toras finas, ponteiros e galhos.

Palavras-chave: Desbaste mecanizado; Poder calorífico; Biomassa; Energia.

Characterization of the energy biomass of *Pinus taeda* L. harvesting at different ages under thinning

Abstract: The aim of this study was to quantify and evaluate the energy biomass characteristics of wood harvesting in *Pinus taeda* L. stands at different ages under commercial thinning, aiming at subsidizing the best usage of materials for energy purposes. The study was carried out in stands at 7, 8, 9, and 10 years old under first commercial thinning, in which 17, 9, 10, and 11 trees were sampled in the respective ages, and segmented in the compartments: firewood, tip, leaves, bark, and branches. In these compartments, samples were obtained to determine the basic specific mass, higher and inferior heating value, chemical composition and fuel value index (IVC). The energy determinations were submitted to a completely randomized design and the averages were compared by the Tukey's test at a 5% level of error probability. The results showed the existence of a difference in the energy characteristics between the tree components, being the firewood and tip were considered the best products for energy purposes, followed by the branches in relationship for basic specific mass, higher heating value, ash content, and IVC parameters. The bark and leaves presented highest heating value, but with lowest quality in basic specific mass, ash content, and IVC parameters. In relation to the variable stand age through the IVC parameter, it was possible ranking together with the evaluated components, being able to affirm that the stands at 9 and 10 years old presented highest capacity for generation products with best energy quality, mainly in the firewood, tips, and branches components.

Keywords: Mechanized thinning; Heating values; Biomass; Energy.

1 INTRODUÇÃO

O uso da biomassa residual da colheita de madeira vem se tornando muito atrativo nos últimos anos por ser uma alternativa viável economicamente para as empresas, visto que auxilia na diversificação da matriz energética, bem como, nas mitigações das emissões de gases de efeito estufa (SOUZA, 2010). Porém, o uso da biomassa florestal para fins energéticos requer algumas características desejáveis em relação aos parâmetros umidade, massa específica básica, poder calorífico e teor de cinzas (BARCELLOS et al., 2005), que são definidores da qualidade de energia liberada na combustão.

Quando a biomassa florestal é oriunda da biomassa residual da colheita de madeira, ou seja, composta por galhos, ponteiros, cascas e folhas, deve-se considerar a umidade do material no planejamento das operações, sendo uma das principais variáveis de influência do rendimento energético da biomassa florestal (HEDING, 1984; THÖRNQVIST, 1986; NURMI, 1995; GARSTANG et al., 2002; ORO, 2015). Quando a biomassa residual da colheita de madeira é processada, geralmente apresenta uma umidade inicial em torno de 50 a 60% na base úmida. Estes valores implicam na necessidade de realizar um armazenamento correto, para que haja uma redução de 15 a 20% da umidade, aumentando assim o rendimento energético destes combustíveis (COSTA et al., 2014; ORO, 2014).

A massa específica é outra variável que determina a qualidade da biomassa, sendo expressa pela quantidade de massa presente em um determinado volume (BRAND, 2010). Esta variável influencia a velocidade da queima, pois quando o material apresenta baixo valor de massa específica, a queima ocorre rapidamente, apresentando menor poder calorífico (VALE et al., 2002; SOUZA, 2010). Contudo, quando é avaliada a biomassa residual da colheita de madeira, a massa específica é altamente variável, devido à diversidade de componentes existentes no material, como casca, galhos e folhas (SOUZA et al., 2012).

O poder calorífico superior também é importante na avaliação da qualidade energética da madeira, pois refere-se à quantidade de energia térmica total liberada na combustão de uma determinada quantidade de combustível. Esta variável é influenciada por diversas outras, como o tipo de biomassa, sua composição química e a umidade presente no material (BRAND, 2007; BRAND, 2010).

A composição química elementar é representada pelos seguintes elementos: carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. O carbono é importante no processo de combustão, pois pode estar presente na reação completa, liberando dióxido de carbono (CO₂), com maior liberação de energia, e incompleta, liberando monóxido de carbono (CO), com menor quantidade de energia. O hidrogênio libera elevada carga de calor quando reage com o oxigênio, resultando em vapor de água (NOGUEIRA; LORA, 2003; CASTRO, 2005).

A combinação dessas variáveis mencionadas resulta no índice valor de combustível (IVC), que é sugerido como um método para a verificação da qualidade da biomassa florestal (MAYER, 2016). Diversos autores utilizaram o IVC para realizar o ranqueamento de espécies e auxiliar na seleção daquelas mais apropriadas para uso como energia (RAI et al., 2002; DEKA et al., 2007; SAHOO et al., 2014; MAYER, 2016). O IVC depende do valor calorífico, massa específica, umidade e teor de cinzas da biomassa (BHATT; TODARIA, 1990; GOEL; BEHL, 1996; ABBOT et al., 1997; DEKA et al., 2007).

Objetivou-se neste estudo caracterizar os parâmetros de qualidade da biomassa energética produzidas na colheita de madeira em povoamentos de *Pinus taeda* com diferentes idades submetidos ao primeiro desbaste comercial, gerando informações que possam contribuir para o potencial uso como fonte de energia renovável, bem como o planejamento das operações florestais, armazenamento e processamento da matéria prima.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Origem dos materiais avaliados

O estudo foi conduzido na empresa Araupel, no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná. Foram obtidos dados de povoamentos de *Pinus taeda* L. submetidos ao primeiro desbaste comercial com amostragem de 17, 9, 10 e 11 árvores nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos, respectivamente.

As árvores amostradas foram segmentadas nos sortimentos de energia (toras finas sem casca), ponteiras (sem casca), acículas, casca do fuste e galhos com casca, enquanto o sortimento de serraria (toras grossas sem casca) foi excluído, visto não possuir a finalidade de geração de energia. Já as toras finas e ponteiras foram agrupadas, devido à pequena quantidade de amostra de ponteiras e suas características energéticas, sendo mais semelhantes com as toras finas quando comparado aos galhos, por não apresentarem casca na sua composição.

2.2 Análise das características energéticas

As análises das características energéticas foram realizadas com base nas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), pois as normas brasileiras (NBR) encontravam-se suspensas para revisão durante a execução das análises.

a) Massa específica básica

A massa específica básica dos materiais (toras finas, ponteiras, acículas, casca e galhos) foi obtida por meio da adaptação da norma ASTM D2395-14.

Para a determinação da massa específica básica das toras finas foram obtidas cunhas dos discos retirados ao longo do fuste das árvores, enquanto a casca contida nestes discos foi retirada e parte utilizada como amostra para determinação da massa específica básica. Para os galhos foi considerado como amostra um disco retirado da sua seção com casca, enquanto para as acículas obteve-se uma pequena quantidade (15 g à 0% de umidade) que foi inserida em um saco de tecido, onde a massa seca do saco e a massa do mesmo saturado foram descontadas dos valores obtidos.

As amostras foram saturadas a partir da imersão em água destilada para saturação das fibras, com o auxílio de uma bomba a vácuo. Com uma balança

analítica, um backer de 1 litro e uma agulha fina de peso irrelevante para auxiliar a imersão das amostras foram determinadas as massas específicas básicas. Os demais passos foram semelhantes ao descrito na norma utilizada.

b) Poder calorífico

A determinação do poder calorífico superior foi realizada de acordo com a norma ASTM D5865-13. Para isso, foi utilizada uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA-WERNE C5000. As amostras foram secas e trituradas, sendo em seguida obtidas subamostras que foram inseridas na bomba calorimétrica para obtenção do poder calorífico superior. Em seguida, determinou-se o poder calorífico inferior, que correspondeu a energia gerada, sendo descontada a quantidade de água formada durante a combustão do hidrogênio de constituição do material.

c) Composição química

A análise química imediata foi realizada de acordo com a adaptação da norma ASTM D1762-84, quanto à temperatura para ser similar às normas brasileiras para determinação do teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Para isto, foi utilizada balança analítica e mufla com controle de aquecimento.

d) Composição química elementar

Para a realização da análise da composição química elementar (C, H e N), foram efetuadas amostras compostas, separadas por componentes das árvores e por idade, sendo agrupadas em três classes diamétricas: baixa (3,5 a 13,5 cm), média (13,6 a 21,0 cm) e alta (21,1 a 33,5 cm). Em seguida, as amostras foram encaminhadas à Central Analítica da Universidade de São Paulo - USP, cuja análise elementar foi realizada com auxílio do equipamento Perkin Elmer – CHN 2400.

A análise elementar determinou a porcentagem de carbono, hidrogênio e nitrogênio das amostras, baseado no método de Pregl-Dumas, onde as amostras foram sujeitas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases resultantes da combustão foram quantificados em um detector de condutividade térmica.

e) Índice Valor de Combustível (IVC)

O IVC foi calculado para todos os componentes das árvores destinados à energia (toras finas+ponteiras, acículas, casca e galhos), e em todas as idades avaliadas (7, 8, 9 e 10 anos), por meio da seguinte fórmula (27) (BHATT e TODARIA, 1990):

$$\text{IVC} = \frac{\text{Valor energético } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{g}}\right) \cdot \text{Massa específica básica } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}{\text{Teor de cinzas } \left(\frac{\text{g}}{\text{g}}\right) \cdot \text{Umidade na base úmida } \left(\frac{\text{g}}{\text{g}}\right)} \quad (27)$$

A umidade utilizada para o cálculo do IVC foi a umidade verde na base úmida, ou seja, a umidade obtida no momento da colheita da madeira, e também, realizou-se o cálculo de IVC para a umidade na base úmida a 40%, simulando o valor médio utilizado para a queima da biomassa florestal, que é obtido após um período médio de armazenamento de dois meses para a secagem da biomassa.

2.3 Análises estatísticas

Foi utilizado um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com diferentes repetições, e tendo como tratamentos as idades e os componentes das árvores. Inicialmente verificou-se a normalidade dos dados pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* e a homogeneidade das variâncias pelo teste de *Bartlett* ao nível de 5% de probabilidade de erro. Em seguida, as médias dos parâmetros energéticos das amostras foram submetidas à análise de variância (ANOVA), e quando necessário, as médias comparadas pelo teste de Tukey ao mesmo nível de probabilidade de erro. As análises foram realizadas com o suplemento *Action 3.1* no *software* Excel 2016.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Massa específica básica

Os valores médios de massa específica básica dos componentes das árvores dos povoamentos submetidos ao desbaste nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 26. Observa-se que a idade do povoamento pouco afetou a massa específica da biomassa, sendo mais visível dentro da variável componente da árvore, onde verificou-se que a massa específica decresceu no sentido: galhos, toras finas+ponteiras, casca e acículas, chegando a uma redução de 35% da maior para a menor massa específica. Isto mostra a heterogeneidade da massa específica entre os componentes que compõem a biomassa energética (SOUZA et al., 2012).

Tabela 26. Valores médios de massa específica básica (g cm^{-3}) e coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	Massa específica básica dos componentes das árvores (g cm^{-3})			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	0,355 aB (9,9)	0,149 aD (5,3)	0,251 dC (1,0)	0,389 bA (9,3)
8	0,386 aA (15,4)	0,154 aC (9,3)	0,334 aB (1,2)	0,413 abA (6,7)
9	0,386 aA (16,3)	0,138 bC (5,4)	0,310 bB (0,9)	0,380 bA (10,2)
10	0,384 aB (10,8)	0,126 cD (6,9)	0,285 cC (0,6)	0,433 aA (10,5)
Média	0,377 (13,1)	0,142 (10,6)	0,295 (1,0)	0,404 (10,5)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação (%); as médias seguidas de mesmas letras não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; letras minúsculas para comparação na coluna (idades); e letras maiúsculas para comparação na linha (componentes).

Os maiores valores de massa específica básica foram encontrados no componente galhos, variando de $0,389 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,433 \text{ g cm}^{-3}$, seguido dos componentes toras finas+ponteiras, que apresentou valor médio de $0,377 \text{ g cm}^{-3}$, sem diferença estatística entre as idades, e estando próximo aos valores de densidade básica de *Pinus taeda* encontrados por Higa et al. (1973) e por Xavier (2009).

Os componentes que apresentaram baixos valores de massa específica básica foram as acículas, com $0,142 \text{ g cm}^{-3}$, seguida do componente casca com

0,295 g cm⁻³. Tal resultado mostra que a presença de acículas na biomassa residual da colheita de madeira em povoamentos submetidos ao desbaste reduz a qualidade do material com a finalidade energética. Em função da baixa massa específica há maior facilidade na queima rápida do material, assim como, proporcionou maior volume para manuseio, estoque e transporte, quando comparado com os sortimentos galhos e toras finas+ponteiras (VALE et al., 2002).

Desta maneira, foi possível verificar que a presença de acículas nos resíduos faz com que a sua qualidade energética seja reduzida, quanto a sua baixa massa específica básica, apesar de apresentar elevados valores de poder calorífico superior. O ideal é que os resíduos apresentem elevados valores de massa específica, implicando em melhores características dentro do aspecto operacional, como no manuseio, no estoque e no transporte, pois quando a biomassa florestal apresenta baixa massa específica, esta, onera os custos operacionais, podendo inviabilizar economicamente o seu aproveitamento (MARTÍ, 2006; CANTO, 2009).

3.2 Poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) que se refere à energia liberada dentro do processo de combustão para obtenção de calor é um parâmetro de eficiência deste processo, pois define que, quanto maior o PCS, maior é a eficiência do processo de combustão. Desta maneira, observa-se na Tabela 27 os valores médios de PCS dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas diferentes idades, que decresceram no sentido: acículas, casca, galhos e toras finas+ponteiras.

O valor médio do poder calorífico superior das toras finas+ponteiras de *Pinus taeda* foi de 4.803,9 kcal kg⁻¹, sendo tal resultado próximo ao valor de 4.979 kcal kg⁻¹ encontrado por Furtado et al. (2012a) para a mesma espécie e na idade de 10 anos, bem como Brand e Muñiz (2012), que encontraram PCS de 4.722 a 4.867 kcal kg⁻¹ para o fuste com casca de *Pinus taeda*.

O PCS dos galhos ficou próximo aos valores obtidos nos componentes toras finas+ponteiras, porém os valores aumentaram diretamente com o avanço da idade, com destaque na idade de 10 anos, com média de 4.877,5 kcal kg⁻¹. Tais resultados demonstram que o componente galhos apresentou características similares no sortimento toras finas+ponteiras, podendo tal material ser utilizado como fonte de matéria prima para geração de energia renovável.

Tabela 27. Valores médios do poder calorífico superior e inferior (kcal kg^{-1}) e os coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	Poder calorífico superior dos componentes das árvores (kcal kg^{-1})			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	4.819,1 aC (1,7)	5.058,8 aA (1,7)	4.988,7 aB (1,4)	4.825,9 bC (1,0)
8	4.804,6 aC (1,3)	5.127,4 aA (2,0)	4.974,1 aB (0,5)	4.863,8 abC (0,8)
9	4.802,5 aC (0,8)	5.122,8 aA (1,4)	4.989,0 aB (1,4)	4.830,3 abC (1,0)
10	4.787,5 aC (1,7)	5.067,4 aA (1,8)	5.031,1 aA (1,3)	4.877,5 aB (1,1)
Média	4.803,9 (1,5)	5.094,1 (1,8)	4.995,7 (1,3)	4.849,4 (1,1)
Idade dos povoamentos (anos)	Poder calorífico inferior dos componentes das árvores (kcal kg^{-1})			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	4.470,6 aB (1,9)	4.707,5 aA (1,8)	4.678,2 aA (1,5)	4.488,4 aB (1,1)
8	4.457,7 aC (1,4)	4.774,5 aA (2,2)	4.657,6 aB (0,6)	4.524,7 aC (0,9)
9	4.453,2 aC (0,9)	4.758,8 aA (2,2)	4.681,7 aB (1,5)	4.480,6 aC (1,2)
10	4.434,9 aC (1,8)	4.717,7 aA (1,9)	4.733,7 aA (1,4)	4.541,3 aB (1,1)
Média	4.454,1 (1,6)	4.739,6 (1,9)	4.687,8 (1,4)	4.508,8 (1,2)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação (%); as médias seguidas de mesmas letras não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; letras minúsculas para comparação na coluna (idades); e letras maiúsculas para comparação na linha (componentes).

Para as acículas, o PCS médio foi de $5.094,1 \text{ kcal kg}^{-1}$, sendo superior aos demais componentes das árvores, devido a maior quantidade de extrativos que aumentam o poder calorífico da biomassa (BRAND et al., 2014). Em seguida, a casca apresentou o segundo maior PCS, com média de $4.995,7 \text{ kcal kg}^{-1}$, não havendo diferença estatística significativa entre as idades dos povoamentos, que em termos práticos, mostra que esta variável energética isoladamente não auxilia na definição da melhor idade para execução do desbaste, a fim de proporcionar uma otimização dos recursos disponíveis.

Os valores de poder calorífico inferior (PCI) nos componentes das árvores não foram influenciados pela idade dos povoamentos, mas pelos componentes das árvores, sendo os valores de poder calorífico inferior diretamente proporcionais ao poder calorífico superior. O poder calorífico inferior dos componentes acículas,

toras finas+ponteiras e galhos, apresentaram redução de aproximadamente 7% do poder calorífico superior ao descontar a energia liberada na formação de água, devido ao maior teor de hidrogênio. Já a casca apresentou redução de 6% em função do menor teor de hidrogênio neste componente. Tais valores demonstraram a dependência do poder calorífico com a composição química elementar do material, pois quanto maior a quantidade de carbono e hidrogênio na biomassa, maior é o poder calorífico obtido (PEREIRA JÚNIOR, 2001).

3.3 Composição química

Na Tabela 28 são apresentados os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas diferentes idades. Como pode ser observado, a maior quantidade de materiais voláteis está presente nos componentes toras finas+ponteiras, seguida de galhos, acículas e casca, com 81,9%; 76,5%; 72,8% e 67,5%, respectivamente. Além disso, não houve diferença significativa nas diferentes idades avaliadas entre os componentes toras finas+ponteiras e galhos, mostrando que tais componentes apresentaram a mesma tendência nas diferentes idades.

O conhecimento dos teores de materiais voláteis pode auxiliar na estimativa do grau de combustão de um material (NOGUEIRA; LORA, 2003; BRAND, 2010; WIONZEK, 2014; MAYER, 2016). Isto indica que quanto menor o teor de materiais voláteis juntamente com maior teor de carbono fixo, a queima será mais lenta e maior será o tempo necessário para a queima completa do material.

Este conhecimento também pode auxiliar no dimensionamento do volume de uma fornalha e na estimativa da formação de chama durante a oxidação ou redução da biomassa (BRAND, 2010; SPANHOL, 2015). Tal fato pode ser explicado, principalmente pelo processo de combustão da biomassa florestal ser executado em seis etapas sucessivas: 1) secagem, 2) emissão de voláteis, 3) ignição dos voláteis, 4) queima dos voláteis em chama, 5) extinção da chama dos voláteis e 6) combustão do resíduo de carbono (GALLO; AGNELLI, 1998; NOGUEIRA; LORA, 2003; CASTRO, 2005).

Além disso, o conhecimento do teor de cinzas existente é importante para verificar a qualidade energética do material, pois representa o teor de minerais

existente nos materiais combustíveis, sendo considerado melhor quando a biomassa apresenta menor teor de cinzas.

Tabela 28. Valores médios do teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (%) e seus coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	Teor de materiais voláteis dos componentes das árvores (%)			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	81,5 aA (1,1)	73,3 aC (1,0)	66,9 bD (1,5)	76,3 aB (1,6)
8	82,1 aA (0,9)	72,6 abC (0,6)	68,6 aD (1,8)	76,6 aB (1,2)
9	81,7 aA (0,7)	72,7 abC (0,8)	67,3 bD (0,5)	76,7 aB (1,7)
10	82,1 aA (0,8)	72,4 bC (0,9)	67,3 bD (1,1)	76,3 aB (0,9)
Média	81,9 (0,9)	72,8 (1,0)	67,5 (1,7)	76,5 (1,4)
Idade dos povoamentos (Anos)	Teor de carbono fixo dos componentes das árvores (%)			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	18,2 aD (4,8)	23,8 aB (3,3)	31,7 aA (4,0)	22,7 aB (5,4)
8	17,6 aD (4,3)	24,2 aB (2,2)	30,4 bA (12,2)	22,3 aC (3,9)
9	18,0 aD (3,3)	24,1 aB (2,6)	31,5 aA (1,3)	22,3 aC (5,2)
10	17,7 aD (4,0)	23,8 aB (2,6)	31,5 aA (3,8)	22,6 aC (2,8)
Média	17,9 (4,4)	24,0 (2,8)	31,3 (6,1)	22,5 (4,6)
	(%)			
Idade dos povoamentos (anos)	Teor de cinzas dos componentes das árvores (%)			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	0,277 aD (14,3)	2,947 bA (16,6)	1,369 aB (30,9)	1,032 aC (24,1)
8	0,274 aC (20,8)	3,174 bA (8,9)	1,152 aB (18,2)	1,162 aB (13,5)
9	0,261 aD (30,1)	3,237 abA (12,5)	1,231 aB (17,3)	0,790 bC (33,4)
10	0,236 aC (21,5)	3,746 aA (14,2)	1,224 aB (17,0)	1,045 aB (11,9)
Média	0,262 (22,0)	3,276 (16,5)	1,244 (24,7)	1,007 (23,1)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação (%); as médias seguidas de mesmas letras não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; letras minúsculas para comparação na coluna (idades); e letras maiúsculas para comparação na linha (componentes).

O teor de cinzas é influenciado por fatores como condições ambientais, espécie, componente da árvore e idade (SJÖSTRÖM, 1993; BRAND, 2010; ELOY et al., 2015; PELANDA et al., 2015). Portanto, o sortimento toras finas+ponteiras foi

o componente que apresentou o menor teor de cinzas, seguido dos galhos, casca e acículas, com 0,3%, 1,0%, 1,2% e 3,3%. Este aumento do teor de cinzas nos diferentes componentes das árvores ocorreu pela tendência de que a maioria dos minerais se concentra nas estruturas mais jovens das árvores (SCHUMACHER; BONACIAN, 2006).

Desta maneira, foi observado que a maior quantidade de cinzas foi encontrada no componente acículas, com teor médio de 3,2%, variando de 2,9% nos povoamentos com idade de 7 anos e 3,7% na idade de 10 anos. Tais resultados corroboraram com outros autores que afirmaram que o teor de cinzas de acículas deve variar entre 2% e 4% (BRAND; MUÑIZ, 2012; FURTADO et al., 2012b).

Lúcio et al. (2010) explicaram que tal característica está relacionada com o teor de nutrientes presente nas acículas, tais como cálcio, potássio, fósforo, nitrogênio, magnésio e enxofre, em que a maior concentração de nutrientes se encontra nas estruturas mais jovens da planta, em razão da maior atividade metabólica (SCHUMACHER; BONACIAN, 2006). Entretanto, vale salientar que não existe somente nutrientes, mas também minerais como silício e alumínio.

O coeficiente de variação obtido no teor de cinzas foi maior em relação aos teores de voláteis e carbono fixo, que pode ser justificado pelo fato do valor numérico referente ao teor de cinzas ser pequeno (SOUZA, 2010). Isto se deve a quantidade de dígitos existentes na balança analítica utilizada, que foi de quatro dígitos, podendo a norma recomendar o uso de uma balança de seis dígitos para poder diminuir o problema de arredondamento dos valores, visto que os valores obtidos na análise de teor de cinzas são muito baixos.

Na Tabela 29 são apresentados os teores dos elementos carbono, hidrogênio e nitrogênio presentes nos diferentes componentes das árvores de *Pinus taeda* e nas diferentes idades avaliadas. Notou-se que o carbono constituiu de 45 a 50% da biomassa florestal, não apresentando diferença significativa entre as idades dos povoamentos pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Logo, estes resultados mostraram que a composição química elementar não alterou com a idade, e conseqüentemente, a energia liberada pela combustão também não alterou, conforme apresentado anteriormente.

Tabela 29. Valores médios da análise elementar (%) e os coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	Teor de carbono dos componentes das árvores (%)			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	46,1 aC (3,2)	48,7 aAB (0,6)	50,7 aA (1,6)	48,0 aBC (1,2)
8	47,4 aB (0,5)	49,1 aA (0,6)	49,8 aA (1,0)	47,9 aB (1,1)
9	46,7 aB (3,3)	49,0 aAB (1,1)	49,9 aA (1,1)	47,9 aAB (1,2)
10	47,2 aB (1,0)	48,0 aB (1,5)	50,2 aA (0,3)	47,9 aB (1,0)
Média	46,8 (1,1)	48,7 (1,3)	50,1 (1,2)	47,9 (1,0)
Idade dos povoamentos (anos)	Teor de nitrogênio dos componentes das árvores (%)			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	0,13 bD (17,3)	1,86 bA (2,4)	0,46 aB (6,0)	0,32 bcC (2,4)
8	0,19 aD (4,6)	2,11 aA (2,3)	0,47 aB (5,0)	0,29 cC (2,0)
9	0,09 cD (6,2)	1,96 bA (1,8)	0,54 aB (5,1)	0,35 abC (7,1)
10	0,14 bC (2,1)	1,97 bA (3,0)	0,47aB (9,6)	0,38 aB (6,1)
Média	0,14 (27,0)	1,98 (5,1)	0,48 (8,9)	0,33 (11,5)
Idade dos povoamentos (anos)	Teor de hidrogênio dos componentes das árvores (%)			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	6,45 aAB (1,8)	6,51 bA (0,6)	5,75 abC (0,5)	6,25 bB (2,0)
8	6,42 aAB (0,4)	6,54 bA (1,1)	5,86 aC (1,0)	6,28 bB (1,3)
9	6,47 aA (3,2)	6,74 aA (1,4)	5,69 bB (0,6)	6,49 aA (1,1)
10	6,53 aA (2,9)	6,48 bAB (1,0)	5,51 cC (0,8)	6,23 bB (1,1)
Média	6,47 (2,1)	6,56 (1,9)	5,66 (2,4)	6,31 (1,8)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação (%); as médias seguidas de mesmas letras não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras minúsculas para comparação na coluna (idades); e letras maiúsculas para comparação na linha (componentes).

Os maiores teores de carbono foram encontrados no compartimento casca, com média de 50,1%, seguida das acículas, galhos e toras finas+ponteiras com média de 48,7%, 47,9% e 46,8%, respectivamente. Esta mesma tendência foi obtida por Dallagnol et al. (2011), com maior teor de carbono no compartimento casca (49,6%), enquanto Balbinot et al. (2003) também encontraram teores

elevados no componente acículas e casca, ao passo que os altos teores de carbono nas acículas se devem ao processo fotossintético (TAIZ; ZEIGER, 2009).

O teor de hidrogênio variou de 5,5 a 6,7% nos diversos componentes avaliados, sendo maiores nas toras finas+ponteiras, seguido de acículas e galhos, enquanto a casca apresentou o menor teor de hidrogênio (5,7%). O teor de hidrogênio nos componentes toras finas+ponteiras não apresentou diferença estatística significativa entre as idades dos povoamentos, enquanto a casca foi mais sensível ao aumento da idade dos povoamentos, sendo os menores teores de hidrogênio encontrados nas maiores idades. Conseqüentemente, isto proporcionou menor formação de vapor e energia na reação de combustão deste material.

Dentro do aspecto energético, os melhores produtos são aqueles que apresentam maiores teores de carbono e hidrogênio, pois garantem maior liberação de energia no processo de combustão (NOGUEIRA; LORA, 2003; CASTRO, 2005). Entretanto, quando o nitrogênio apresenta elevados teores nos compartimentos a serem aproveitados para energia pode ocorrer maior extração deste nutriente do sítio, comprometendo a capacidade produtiva da área (JONG et al., 2014).

Dentro deste contexto, notou-se que os maiores teores de nitrogênio estiveram presentes nos componentes acículas, com 1,9% a 2,1%, seguida de casca, galhos e toras finas+ponteiras com 0,48%, 0,33% e 0,14%, respectivamente. Isso se deve ao crescimento das árvores, que inicialmente é concentrado nas folhas e raízes, apresentando alta quantidade de nutrientes nestes componentes (MILLER, 1995).

Portanto, um modo de mitigar a exportação de nutrientes com o uso da biomassa energética é a manutenção parcial dos resíduos da colheita de madeira no campo, como por exemplo, a permanência das acículas (KALLIO; LEINONEN, 2005; BELLOTE et al., 2008), pois, uma vez que a limitação na disponibilidade de nitrogênio pode acarretar na redução do crescimento das árvores (TAMM, 1991; JONG et al., 2014). Nurmi e Hillegrand (2002) recomendaram manter um tempo de armazenamento suficiente para que as folhas se desprendam dos galhos e permaneçam no campo, visto que este componente apresenta elevados teores de nutrientes.

3.4 Índice valor de combustível

O índice valor de combustível (IVC) dos componentes da árvore nas diferentes idades avaliadas é apresentado na Tabela 30. Na umidade verde, notou-se que os componentes toras finas+ponteiras apresentou os maiores IVC, com destaque nas idades de 8, 9 e 10 anos, com 4.777, 5.308 e 6.072, considerado como o melhor produto para fins energéticos. Em seguida, os maiores índices encontrados foram nos galhos nas idades 9 e 10 anos, seguidos de casca nas idades 8, 9 e 10 anos e pelas acículas nas idades 7, 8 e 9 anos. Notou-se, também, que as acículas apresentaram os menores IVC, ocasionado pela baixa densidade e elevado teor de cinzas.

Tabela 30. Índice valor de combustível na umidade verde e a 40% na base úmida e os coeficientes de variação (%) dos componentes das árvores de *Pinus taeda* nas idades de 7, 8, 9 e 10 anos.

Idade dos povoamentos (anos)	Índice Valor de Combustível na umidade verde dos componentes das árvores			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	4.231 b (16,7)	164 a (17,6)	778 c (23,7)	1.276 b (24,6)
8	4.777 ab (33,7)	161 a (15,4)	1.302 a (21,0)	1.222 b (18,6)
9	5.308 ab (37,8)	145 a (16,7)	1.165 ab (20,4)	1.706 a (21,9)
10	6.072 a (23,6)	106 b (15,6)	937 bc (18,5)	1.434 ab (18,0)
Média	5.097 (30,9)	145 (22,8)	1.045 (29,3)	1.409 (24,6)
Idade dos povoamentos (anos)	Índice Valor de Combustível na umidade de 40% dos componentes das árvores			
	Toras finas+ponteiras	Acículas	Casca	Galhos
7	6.574 a (16,6)	273 a (17,7)	1.025 b (24,3)	1.974 b (22,5)
8	7.446 a (33,2)	263 a (15,4)	1.560 a (20,4)	1.857 b (18,7)
9	8.044 a (37,8)	233 a (15,7)	1.357 a (19,6)	2.540 a (20,8)
10	8.461 a (25,3)	176 b (15,1)	1.262 ab (18,3)	2.137 ab (16,6)
Média	7.631 (29,5)	236 (23,0)	1.301 (25,8)	2.127 (22,8)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação (%); as médias seguidas de mesmas letras não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; letras minúsculas para comparação na coluna (idades).

Ao simular uma umidade de 40%, considerada como usual para biomassa florestal como fonte de combustível, verificou-se que no componente toras finas+ponteiras não houve diferença estatística entre as idades dos povoamentos, sendo neste componente encontrados os melhores índices valor de combustível, com um valor médio de 7.631. Em seguida, os galhos obtiveram índice médio de IVC de 2.127, onde os maiores índices encontram-se nos povoamentos de 9 e 10 anos.

De maneira geral, tal resultado mostrou a possibilidade de realizar um ranqueamento dos produtos avaliados, tanto em idade de corte no desbaste como nos componentes das árvores, devido à relação com os seus principais parâmetros energéticos obtidos, como: massa específica básica, poder calorífico, teor de cinzas e umidade (RAI et al., 2002; DEKA et al., 2007; SAHOO et al., 2014; MAYER, 2016). Esta variável pôde melhor auxiliar o julgamento da melhor idade para a realização do desbaste, sendo possível verificar que os maiores IVC foram encontrados nas maiores idades (9 e 10 anos), principalmente nos componentes toras finas+ponteiras e galhos.

4 CONCLUSÕES

- A variabilidade das características energéticas foi evidente entre os componentes das árvores se comparado às idades de execução do primeiro desbaste;
- As toras finas, as ponteiros e os galhos foram os componentes da árvore com melhor potencial para uso como fonte de energia renovável, considerando os parâmetros energéticos avaliados;
- Os componentes acículas e casca apresentaram os maiores valores de poder calorífico superior, entretanto, a baixa massa específica básica e o elevado teor de cinzas proporcionaram baixa qualidade energética;
- Por meio do IVC foi possível constatar que os melhores produtos para fins energéticos se encontram nos povoamentos com idades de 9 e 10 anos, principalmente, em relação às toras finas, ponteiros e galhos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, P.; LOWORE, J.; KHOFI, C.; WERREN, M. Defining firewood quality: A comparison of quantitative and rapid appraisal technique to evaluate firewood species from a Southern African Savanna. **Biomass and Bioenergy**, v. 12, n. 6, p. 429-437, 1997.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “**D2395 – 14: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials**”. West Conshohocken: ASTM International, 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “**D5865-13: Standard Test Methods for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter**”. Annual Book of ASTM Standards. vol.05.06. 19 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. “**D1762-84: standard method for chemical analyses of wood charcoal**”. Philadelphia, 2007. 2 p.

BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAWICK, L. F. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 59-68, 2003.

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

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D. Nutrientes minerais, biomassa e deposição da serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 31-41, 2008.

BHATT, B. P.; TODARIA, N. P. Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs. **Biomass**, v. 21, n. 3, p. 233-238, 1990.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da Época de Colheita e da estocagem na composição química da biomassa florestal. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 66-78, 2012.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Árvore**, v. 38, n. 2, p. 353-360, 2014.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**, 1 ed, Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 127 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CASTRO, A. **Uma investigação teórico-experimental da combustão de madeira**. São José dos Campos: INPE, 2009. 378 p.

COSTA, E. R. O.; MAROS, D.; GOES, B. C.; LIMA, E. A. Avaliação da umidade e energia útil em cavacos de pinus armazenados em local coberto e descoberto. **Comunicado Técnico 347**. Colombo: EMBRAPA, 2014. 2 p.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de Carbono de Cinco Espécies Florestais e seus Compartimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DEKA, D.; SAIKIA, P.; KONWER, D. Ranking of Fuelwood Species by Fuel Value Index, Energy Sources, Part A: **Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 29, n. 16, p. 1499-1506, 2007.

ELOY, E.; SILVA, D. A.; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q.; BEHLING, A.; ELLI, E.; MONTEIRO, G. C. Caracterização da biomassa da madeira e da casca de *Mimosa scabrella* Benth cultivada em dois diferentes espaçamentos. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p. 38-46. 2015.

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

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para a geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 795-802, 2012b.

GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. **Polímeros**, v. 8, n. 1, p. 23-38, 1998.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT D. **Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices**. FES, 2002. 116 p. Relatório técnico.

GOEL, V. L.; BEHL, H. N. Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, n. 1, p. 57-61, 1996.

HEDING, N. The critical moisture content. In: **Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels**, Danish Institute of Forest Technology, p. 6-11, 1984.

HIGA, A. R.; KAGEYAMA, P. Y.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *P. elliotii* var. *elliotii* e *P. taeda*. **IPEF**, n. 7, p. 79-91, 1973.

JONG, J.; AKSELSSON, C.; BERGLUND, H.; EGNELL, G.; GERHARDT, K.; LÖNNBERG, L.; OLSSON, B.; VON STEDINGK, H. **Consequences of an increased extraction of forest biofuel in Sweden: A synthesis from the biofuel**

research programme 2007– 2011, supported by Swedish Energy Agency. Swedish Energy Agency, Eskilstuna, 2014. 51 p.

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

LÚCIO, A. D. C.; ROSSATO, R. A. R.; SCHUMACHER, M. V.; FORTES, F. O.; STORCK, L.; WITSCHORECK, R. Limites de preocupação e de controle em análises nutricionais de espécies florestais. **Árvore**, v. 34, n. 3, p. 529-537, 2010.

MARTÍ, B. V. Situacion de los sistemas de aprovechamiento de los residuos florestales para su utilización energética. **Ecosistemas**, v. 15, n. 1, p. 77-86, 2006.

MAYER, S. L. S. **Dendroenergia de cinco espécies nativas do Niger no sahel africano.** 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MILLER, H. G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. **Plant and Soil**, v. 168, n. 1, p. 225-232, 1995.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações.** 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 200 p.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation Salix crops. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 4, p. 245-249. 1995.

NURMI, J.; HILLEBRAND, K. Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway spruce logging residues. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 31, n. 3, p. 289-297, 2002.

ORO, D. **Análise técnica de um cavaqueador e caracterização energética de cavacos de biomassa da colheita de madeira.** 2015. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2015.

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A.; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 2, p. 112-121, 2015.

PEREIRA JÚNIOR, V. P. **Alternativa para co-geração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira.** 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2001.

RAI, Y. K.; CHETTRI, N.; SHARMA, E. fuel wood value index of woody tree species from Mamlay Watershed in South Sikkim, India. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 12, n. 3, p. 209-219, 2002.

SAHOO, U. K.; LALREMRUATA, J.; LALRAMNGHINGLOVA, H. Assessment of fuelwood based on community preference and wood constituent properties of tree species in Mizoram, north-east India. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 23, n. 4, p. 280-288, 2014.

SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Quantificação da biomassa e nutrientes em povoamentos de pinus. **Madeira**, n. 99, 2006. Disponível em: www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=962&subject=Nutrientes&title=Quantifica%20da%20biomassa%20e%20nutrientes%20em%20povoamentos%20de%20pinus>. Acesso em: 05 Dez 2016.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and application**. London: Academic Press, 1993. 293 p.

SOUZA, M. M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de *Pinus taeda* L.** 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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

SPANHOL, A. **Proposta para normalização de péletes de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Estadual de Santa Catarina, Lages, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Sinauer Associates, Inc, Publishers, 2009.

TAMM, C.O. **Nitrogen in Terrestrial Ecosystems**. Ecological Studies 81. Berlin: SpringerVerlag, 1991. 116 p.

THÖRNQVIST, T. Drying and Storage of Forest Residues for Energy Production. **Biomass**, v. 7, n. 2, p. 125-134, 1985.

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

WIONZEK, F. B. **Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage**. 2014. 64 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2014.

XAVIER, J. A. **Variabilidade da massa específica básica de *Pinus taeda* L. em diferentes idades de plantio**. 2009. 25 f. Monografia (Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CAPÍTULO 4 - Potencial de energia e de emissões de CO₂ em povoamentos de *Pinus taeda* L. de diferentes idades submetidos ao desbaste

Resumo: Objetivou-se neste estudo quantificar o potencial de energia e as emissões de carbono da biomassa energética de povoamentos de *Pinus taeda* L., com diferentes idades submetidos ao regime de desbaste. O estudo foi realizado na empresa Araupel, no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná. Os dados foram provenientes de povoamentos com idades de 7, 8, 9 e 10 anos situados em condições semelhantes de produtividade, solo e relevo. Inicialmente, realizou-se um inventário florestal e quantificou a biomassa pelo método destrutivo, onde as árvores foram segmentadas em componentes: toras grossas, toras finas, ponteyras, acículas, cascas e galhos. Em seguida, em laboratório, obtiveram-se os valores de massa seca, poder calorífico superior e teor de carbono dos componentes das árvores. Com os dados de inventário, foram obtidas as estimativas do estoque de biomassa, energia, carbono e potenciais emissões de CO₂ por unidade de área nas diferentes idades. Por meio de um Delineamento Inteiramente Casualizado, aplicou-se a ANOVA, e em seguida, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Ao avaliar o potencial de produção de energia e emissões de carbono com a biomassa energética, verificou-se que todas as idades foram semelhantes entre si, mostrando que a escolha da idade não afetou na produção de matéria-prima como fonte energética. Além disso, verificou-se a necessidade da utilização dos resíduos de colheita da madeira, devido ao potencial de emissão de aproximadamente 29 t ha⁻¹ de CO₂, que pode ser considerada emissões neutras, pois a biomassa recuperada após a operação de desbaste nas árvores remanescentes irá sequestrar os gases de efeito estufa emitidos.

Palavras-chave: Bioenergia; Efeito estufa; Sustentabilidade ambiental.

Potential energy and CO₂ emissions in *Pinus taeda* L. stands at different ages under thinning

Abstract: The aim of this study was to quantify the energy potential and carbon emissions of the energy biomass of *Pinus taeda* L. stands, with different ages under thinning regime. The study was carried out at Araupel company, in the municipality of Quedas do Iguaçu, Paraná State. The data were obtained from stands at 7, 8, 9, and 10 years old located in similar conditions of productivity, soil and relief. Initially, a forest inventory was carried out and biomass was quantified by the destructive method, where the trees were segmented into components: saw wood, firewood, tips, leaves, barks, and branches. Then, in the laboratory, the values of dry mass, higher heating value, and carbon content of the tree components were obtained. With the inventory data, estimates of biomass, energy, carbon, and potential CO₂ emissions per unit area were obtained at different ages. By means of a completely randomized design, the ANOVA was applied and the means were compared by the Tukey's test at a 5% level of error probability. When assessing the potential of energy production and carbon emissions with energy biomass, it was found that all ages were similar to each other, showing that the choice of age did not affect the production of raw material as an energy source. In addition, there was a need to use the wood harvesting residues, due to the emission potential of approximately 29 t ha⁻¹ of CO₂, which can be considered as neutral emissions, since the biomass recovered after tree thinning will capture the emitted greenhouse gases.

Keywords: Bioenergy; Greenhouse effect; Environmental sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por fontes renováveis de energia tem colocado a biomassa florestal em destaque nas questões energéticas, devido a grande disponibilidade deste produto no Brasil. Nesse sentido, os principais motivadores para o uso dessa fonte alternativa de energia são o desenvolvimento econômico e as questões ambientais relacionadas ao setor energético, principalmente, em relação à substituição do uso de combustíveis fósseis (CANADELL; RAUPACH, 2008; ABIB, 2015; ANATER et al., 2016; KILPELÄINEN et al., 2016).

No Brasil, a crise energética de 2001, advinda da baixa ocorrência de precipitações naquele período, afetou a geração de eletricidade, visto que esta é a principal fonte de energia interna do país. Consequentemente, isso evidenciou a necessidade de diversificação e expansão da matriz energética brasileira, que proporcionou diversas medidas emergenciais tomadas pelo governo, como, por exemplo, o estabelecimento do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que instituiu o aumento da participação de outras fontes de energia, como a biomassa florestal, na sua matriz energética (BRASIL, 2002; BRASIL, 2004).

Atualmente, as empresas do setor florestal brasileiro possuem extensas áreas plantadas, as quais produzem significativa quantidade de resíduos que podem gerar a maior parte da energia consumida em seus processos produtivos, podendo, ainda, serem autossuficientes ou gerarem excedentes para comercialização (CENBIO, 2003). Segundo IBÁ (2016), o setor florestal gerou 67% da energia consumida pelo Setor em 2015, representando 65,1 milhões de Giga-Joules, dos quais 18% foram comercializados pela rede pública, sendo esta energia gerada por meio de subprodutos de seus processos, como o licor negro e a biomassa florestal.

Atualmente, na operação de desbaste em florestas plantadas no Brasil, os resíduos de colheita da madeira, grande parte não são utilizados para fins comerciais, porém possuem um considerável potencial como fonte de matéria prima para a geração de energia renovável. Entretanto, a Agência Ambiental Europeia (EEA), menciona que o uso de biomassa florestal como fonte energética, por meio de resíduos de desbaste, proporciona emissões de carbono biogênico, sendo este carbono definido como as emissões de CO₂ que são geradas da queima

de um material biológico constituído de carbono, hidrogênio e oxigênio (EEA, 2011). Para o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), esta queima acarreta em emissões neutras em termos de impacto climático, pois o CO₂ provém do ciclo biológico e não do ciclo geológico, como é o caso do CO₂ de origem fóssil (IPCC, 2000).

Na literatura existem divergências de teorias, onde de um lado é defendida a idéia de que a utilização da biomassa florestal para fins energéticos acarreta em altas emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo maior em relação às emissões geradas pelo uso de combustíveis fósseis na geração de uma unidade de energia (LAMERS; JUNGNER, 2013). A outra linha defende a idéia de que as emissões de GEE oriundos da biomassa florestal podem ser compensadas pelo sequestro de carbono como parte do crescimento contínuo das florestas (IPCC, 200; EEA, 2011).

Segundo a EEA (2011) para afirmar que a substituição dos combustíveis fósseis pela queima de biomassa é sustentável, existem dois fatores que devem ser considerados: a origem da biomassa e a forma como é produzida e colhida, para que seja garantido o ciclo fechado do carbono, tornando as suas emissões neutras. Portanto, dentro deste aspecto é necessário realizar um bom manejo florestal, para que o uso da biomassa não afete o estoque de carbono, com o aumento das suas emissões.

Esta demanda por biomassa energética destaca a importância do desbaste florestal como fonte de matéria-prima para a geração de energia renovável (HARTSOUGH; YOMOGIDA, 1996). A biomassa proveniente do desbaste pode garantir a sustentabilidade, sendo que a biomassa recuperada após a área ser desbastada garante o equilíbrio de energia e emissões de carbono para a atmosfera (MANGOYANA, 2011; ALVAREZ et al., 2016; BORYS et al., 2016).

Portanto, objetivou-se quantificar o estoque de energia e carbono e o potencial de emissões de dióxido de carbono a partir da biomassa energética gerada na operação da colheita de madeira em povoamentos de *Pinus taeda* L., submetidos ao primeiro desbaste, a fim de garantir a sustentabilidade econômica e ambiental da produção florestal.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

Este estudo foi realizado na empresa Araupel, localizada no município de Quedas do Iguaçu, estado do Paraná, Brasil, entre as coordenadas geográficas 25°26'27" S e 52°55'17" W.

O clima da região é classificado como subtropical Cfa (Köppen), com temperaturas médias inferiores a 18°C no mês mais frio e superiores a 22°C mais quente. Além disso, os verões são quentes, geadas são pouco frequentes e há tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo, com ausência de estação seca definida (CAVIGLIONE et al., 2000).

Os povoamentos estudados foram de *Pinus taeda* plantados nos anos de 2008, 2007, 2006 e 2005, com uma densidade inicial de 1.667 árvores por hectare (espaçamento de 3,0 m x 2,0 m), onde foi aplicado o primeiro desbaste comercial aos 7, 8, 9 e 10 anos, respectivamente (Tabela 31).

Tabela 31. Características gerais dos plantios de *Pinus taeda* L.

Informações	Idade dos povoamentos (anos)			
	7	8	9	10
Ano de plantio	2008	2007	2006	2005
Área de plantio (ha)	439,1	263,9	141,3	162,5
Poda baixa (Ano de execução)	2012	2011	2010	2009
Árvores plantadas (ha)	1.667	1.667	1.667	1.667
Árvores existentes em 2015 (ha)	1.470	1.487	1.437	1.417
Taxa de mortalidade (%)	12	11	14	15
DAP médio (cm)	18,1	18,3	19,6	19,1
h média (m)	12,8	13,6	15,2	15,6
VMI (m ³)	0,160	0,173	0,225	0,215

Em que: DAP = Diâmetro à 1,3 m do solo; h = Altura total (m); e VMI = Volume individual das árvores (m³).

2.2 Descrição dos desbastes

Os desbastes avaliados foram realizados conforme descrito no Capítulo 1, no Item 2.3 Descrição dos desbastes.

2.3 Coleta de dados

2.3.1 Inventário florestal e seleção das árvores amostra

O inventário florestal foi realizado conforme descrito no Capítulo 1, no Item

2.5.1 Avaliações dendrométricas.

2.3.2 Quantidade de energia por unidade de área

Inicialmente, a quantificação da biomassa dos componentes das árvores foi realizado conforme descrito no Capítulo 1, no Item 2.5.4 Quantificação da biomassa energética. Em seguida, a estimativa do estoque de biomassa seca existente por hectare, em cada componente e idade, considerando antes e após a operação de desbaste, assim como a quantidade removida na operação de desbaste, foi obtida com auxílio dos dados do inventário florestal de frequência dos indivíduos existentes em cada classe diâmetro das parcelas, sendo estas convertidas para a unidade hectare.

Para a determinação da quantidade de energia por componentes das árvores, as amostras de cada componente das árvores foram trituradas e tiveram o poder calorífico superior determinado, seguindo a norma ASTM D5865, com auxílio de uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA-WERNE; C5000. Em seguida, realizou-se o cálculo para a determinação do poder calorífico inferior, utilizando-se os valores do teor de hidrogênio existente nos componentes das árvores.

Para obtenção da quantidade de energia por componente das árvores (Est E), utilizou-se a seguinte equação (28):

$$\text{Est E} = \text{MS.PCI} \quad (28)$$

Em que: Est E = Estoque de energia (Gcal ha^{-1}); MS (c) = Biomassa seca dos componentes das árvores por unidade de área (Mg ha^{-1}); PCI = Poder calorífico inferior dos componentes das árvores (Gcal Mg^{-1}).

2.3.3 Estoque de carbono e potencial de emissões de CO₂ por unidade de área

Para a determinação do teor de carbono em cada componente da árvore, foram obtidas amostras compostas nas diferentes idades de corte, sendo os componentes agrupados em três classes diamétricas, classificadas em baixa (3,5 a 13,5 cm), média (13,6 a 21,0 cm) e alta (21,1 a 33,5 cm). Em seguida, as amostras foram encaminhadas à Central Analítica da Universidade de São Paulo - USP, e o teor de carbono total (Tc) foi obtido por meio de análise elementar, com auxílio do equipamento Perkin Elmer – CHN 2400.

A quantificação de estoque de carbono existente em cada componente (Est C) foi realizada, utilizando-se a seguinte equação (29):

$$\text{Est C} = \text{MS} \cdot \frac{\text{Tc}}{100} \quad (29)$$

Em que: Est C = Estoque de carbono (Mg ha^{-1}); MS = Biomassa seca dos componentes das árvores por unidade de área (Mg ha^{-1}) e Tc = Teores médios de carbono dos componentes das árvores (%).

Em seguida, para quantificar as emissões de CO_2 liberadas no processo da queima da biomassa energética de maneira teórica e considerando uma eficiência fictícia de 100%, utilizou-se o fator de conversão de 44/12, para transformar o estoque de carbono em seu potencial de emissões de CO_2 (IPCC, 2000).

2.4 Análises estatísticas

Nas análises estatísticas foi utilizado um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), considerando as diferentes idades e componentes das árvores como tratamentos e as parcelas do inventário florestal como repetições. Os dados da quantidade de energia, carbono e potencial de emissões de CO_2 , tiveram a normalidade avaliada pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov*, seguida da verificação da homogeneidade da variância pelo teste de *Bartlett* ao nível de 5% de probabilidade de erro, sendo os tratamentos comparados por meio da ANOVA, seguido do teste de Tukey, ao mesmo nível de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Quantificação da quantidade de energia por unidade de área

A quantificação de energia existente nos povoamentos de *Pinus taeda* é apresentada na Tabela 32. Os dados apresentaram distribuição normal, com homogeneidade das variâncias ao nível de 5% de probabilidade de erro. Logo, realizou-se a ANOVA e o teste de Tukey ao mesmo nível de probabilidade de erro. A maior quantidade de energia encontrou-se nas toras finas destinadas ao uso energético, seguido dos galhos, cascas e acículas, enquanto o menor valor apresentado encontrou-se nas ponteiras.

Nos produtos gerados com a operação de desbaste, verificou-se que a quantidade total de energia obtida de biomassa energética foi aproximadamente 137,4 Gcal ha⁻¹, não havendo diferença estatística significativa entre as idades avaliadas. A quantidade de energia existente nas toras finas foi de 63,6 Gcal ha⁻¹, valor similar aos resíduos, compostos pelos galhos, casca, acículas e ponteiras, com aproximadamente 73,7 Gcal ha⁻¹. Este resultado mostrou que o uso dos resíduos da colheita de madeira apresenta potencial de duplicar a quantidade de energia utilizada, visto que, atualmente, são utilizadas apenas as toras finas para fins energéticos.

A princípio, a quantidade de energia presente nos resíduos parece pequena. Porém, ao considerar um rendimento de três hectares por dia de um módulo da colheita de madeira na operação de desbaste, é possível estimar que podem ser gerados apenas os resíduos deixados no campo, aproximadamente 19.457 Gcal ha⁻¹ ano⁻¹, independente das quatro idades avaliadas para ser executado o primeiro desbaste comercial. Desta maneira, verificou-se a potencialidade técnica de uso destes resíduos, podendo ser utilizado na geração de vapor na própria indústria, comercializado como cavaco sujo, ou até mesmo, ser destinado para a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas convencionais, situadas próximo à região produtora de biomassa (GOMES et al., 2006).

Tabela 32. Valores médios de energia da biomassa existente, remanescente e removida nos povoamentos com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial e seus coeficientes de variação (%) com os resultados do teste de Tukey.

Energia da biomassa existente antes da aplicação do desbaste (Gcal ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	303,6 b (5,2)	139,7 a (8,8)	3,6 bc (7,0)	36,9 c (6,5)	46,2 b (4,8)	104,6 b (6,3)	191,3 c (5,5)	331,0 b (6,4)	634,6 b (5,6)
8	301,3 b (11,6)	137,5 a (6,8)	3,5 c (7,7)	46,8 a (7,1)	45,7 b (7,1)	104,8 b (11,99)	200,9 bc (9,6)	338,3 ab (5,3)	639,6 b (7,92)
9	373,5 a (7,4)	127,8 a (8,1)	4,1 a (5,2)	42,3 b (5,8)	52,7 a (5,2)	127,3 a (8,3)	226,4 a (6,7)	354,3 a (4,9)	727,8 a (5,7)
10	348,3 a (4,9)	139,0 a (8,7)	3,8 b (3,5)	40,9 b (6,4)	51,5 a (4,3)	118,9 a (3,8)	215,0 ab (3,8)	354,0 ab (4,9)	702,3 a (4,6)
Média	331,7 (11,89)	136,0 (8,5)	3,7 (8,5)	41,7 (10,8)	49,0 (8,3)	113,9 (11,6)	208,4 (11,6)	344,4 (6,0)	676,1 (8,3)

Energia da biomassa remanescente com a aplicação do desbaste (Gcal ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	210,7 c (5,0)	75,1 a (4,53)	1,8 bc (6,9)	23,8 b (4,8)	28,7 c (4,2)	68,5 b (6,3)	122,8 c (5,2)	197,9 b (4,1)	408,6 c (4,4)
8	208,1 (9,6)	74,3 a (5,9)	1,8 c (9,7)	29,1 a (6,4)	28,4 c (6,4)	69,5 b (10,6)	128,8 bc (8,6)	203,1 b (3,7)	411,2 c (6,6)
9	265,3 a (6,8)	67,3 b (4,5)	2,2 a (5,5)	28,1 a (9,9)	33,8 a (4,7)	86,7 a (10,8)	150,8 a (8,9)	218,0 a (5,6)	483,3 a (6,2)
10	235,8 b (6,5)	72,9 a (5,5)	2,0 b (5,8)	25,6 a (6,7)	31,6 b (5,6)	77,1 b (7,9)	136,3 b (6,6)	209,2 ab (5,3)	445,0 b (5,6)
Média	230,0 (12,3)	72,4 (6,5)	2,0 (11,2)	26,7 (10,7)	30,6 (8,9)	75,4 (13,2)	134,7 (10,7)	207,0 (5,8)	437,0 (9,0)

Energia da biomassa removida com a aplicação do desbaste (Gcal ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	92,9 b (11,8)	64,6 a (15,6)	1,8 a (9,8)	13,1 b (14,4)	17,5 a (9,5)	36,1 a (12,1)	68,5 a (11,0)	133,1 a (12,9)	226,0 a (12,2)
8	93,2 ab (17,9)	63,2 a (10,8)	1,7 a (7,7)	17,7 a (10,3)	17,3 a (10,3)	35,3 a (16,3)	72,0 a (12,9)	135,3 a (9,5)	228,5 a (12,2)
9	108,2 ab (18,5)	60,6 a (14,5)	1,9 a (5,6)	14,2 b (14,7)	18,9 a (13,0)	40,7 a (16,7)	75,7 a (14,7)	136,3 a (13,3)	244,4 a (14,7)
10	112,5 a (13,2)	66,2 a (17,7)	1,8 a (8,5)	15,2 ab (14,4)	19,8 a (12,0)	41,8 a (11,5)	78,6 a (11,9)	144,8 a (14,0)	257,3 a (13,0)
Média	101,7 (17,4)	63,6 (14,6)	1,8 (8,4)	15,1 (17,2)	18,4 (12,3)	38,5 (15,6)	73,7 (13,3)	137,4 (12,4)	239,0 (13,7)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação; Gcal ha⁻¹ = Gigacalorias por hectare; Toras grossas = Sortimento destinado a serraria, composto por toras de 3,60 m de comprimento e diâmetro mínimo de 15,0 cm; Toras finas = Sortimento destinado a energia, composto por toras de 3,05 m e diâmetro de 15,0 a 3,5 cm; Resíduos = Soma dos componentes ponteiras, acículas, casca e galhos; Biomassa energética = Soma das toras finas e dos componentes dos resíduos; e Total = Soma de todos os componentes da árvore. As médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3.2 Quantificação do estoque de carbono e potenciais emissões de CO₂

Na Tabela 33 são apresentados os valores médios do estoque de carbono por unidade de área nos povoamentos de *Pinus taeda* nas diferentes idades avaliadas, antes e após a realização do desbaste, bem como a quantidade que foi removida na operação, nos diferentes componentes das árvores.

Como esperado, a maior quantidade de carbono estocado, encontram-se nos povoamentos com idade de 9 e 10 anos, com aproximadamente 75 Mg ha⁻¹, em que, as toras grossas e finas possuíam a maior quantidade armazenada de carbono, com 49% e 20%, respectivamente, seguida dos galhos, casca, acículas e ponteiros com 17%, 7%, 6% e 1%. Os resultados obtidos foram semelhantes aos de Balbinot et al. (2008) que verificaram que povoamentos de *Pinus* spp. com idades de 5 a 15 anos, apresentaram um estoque de carbono de aproximadamente 75,55 Mg ha⁻¹, sendo 68% localizados no fuste, 4% nas acículas, 7% nos galhos e 21% nas raízes.

Nos povoamentos de *Pinus taeda* submetidos ao primeiro desbaste comercial nas quatro idades avaliadas, houve uma remoção de aproximadamente 33% do estoque de carbono existente inicialmente nos povoamentos. Portanto, após a aplicação de desbaste o estoque de carbono nos povoamentos remanescentes foi em média 46,0 Mg ha⁻¹, que variou de 42,6 Mg ha⁻¹ na idade de 7 anos e 50,9 Mg ha⁻¹ na idade de 9 anos.

O total de estoque de carbono removido na operação de desbaste foi de 25,2 Mg ha⁻¹, sem diferença estatística significativa nas diferentes idades avaliadas. Aproximadamente 42% estavam contidos nas toras grossas removidas, que indiretamente contribuíram para o estoque de carbono, devido ao ciclo de vida longa dos produtos gerados (madeira serrada para construção civil). Os 58% restantes estavam presentes na biomassa energética, representando aproximadamente 14,5 Mg ha⁻¹ de carbono, e destes, aproximadamente 7,8 Mg ha⁻¹, estão presentes na biomassa residual da colheita de madeira. Estes resíduos quando deixados na área, pode emitir uma quantidade considerável de dióxido de carbono para atmosfera por meio do processo de decomposição, e também, pode se agregar ao estoque de carbono do solo na formação de matéria orgânica (GATTO et al., 2010; PEGORARO et al., 2011).

Tabela 33. Valores médios de carbono na biomassa existente, remanescente e removida nos povoamentos com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial e seus coeficientes de variação (%) com os resultados do teste de Tukey.

Carbono da biomassa existente antes da aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	31,3 b (5,2)	14,4 a (8,8)	0,4 b (7,0)	3,8 c (6,5)	5,0 b (4,8)	11,2 b (6,3)	20,4 c (5,5)	34,8 b (6,4)	66,1 b (5,6)
8	32,0 b (11,6)	14,6 a (6,8)	0,4 b (7,7)	4,8 a (7,1)	4,9 b (7,1)	11,1 b (12,0)	21,2 bc (9,6)	35,8 ab (5,3)	67,8 b (7,9)
9	39,2 a (7,4)	13,4 a (8,1)	0,4 a (5,2)	4,4 b (5,8)	5,6 a (5,2)	13,6 a (8,3)	24,0 a (6,7)	37,4 a (4,9)	76,6 a (5,7)
10	37,1 a (5,0)	14,8 a (8,7)	0,4 a (3,5)	4,2 bc (6,4)	5,5 a (4,3)	12,5 a (3,8)	22,5 ab (3,8)	37,3 a (4,9)	74,4 a (4,6)
Média	34,9 (12,2)	14,3 (8,6)	0,4 (8,6)	4,6 (10,8)	5,2 (7,8)	12,1 (11,6)	22,0 (9,0)	36,3 (6,0)	71,2 (8,5)

Carbono da biomassa remanescente com a aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	21,7 c (5,0)	7,7 a (4,5)	0,2 c (6,9)	2,5 b (4,8)	3,1 c (4,2)	7,3 b (6,3)	13,1 b (5,2)	20,8 b (4,2)	42,6 c (4,4)
8	22,1 c (9,6)	7,9 a (5,9)	0,2 c (9,7)	3,0 a (6,4)	3,0 c (6,4)	7,4 b (10,6)	13,6 b (8,6)	21,5 b (3,7)	43,6 c (6,6)
9	27,8 a (6,8)	7,1 b (4,5)	0,2 a (5,5)	2,9 a (9,9)	3,6 a (4,7)	9,3 a (10,8)	16,0 a (8,9)	23,0 a (5,7)	50,9 a (6,17)
10	25,1 b (6,5)	7,8 a (5,5)	0,2 b (5,6)	2,6 b (6,7)	3,4 b (5,6)	8,1 b (7,9)	14,3 b (6,6)	22,1 ab (5,2)	47,1 b (5,6)
Média	24,2 (12,4)	7,6 (6,6)	0,2 (11,3)	2,7 (10,7)	3,3 (8,5)	8,0 (13,3)	14,2 (10,6)	21,8 (5,9)	46,0 (9,1)

Carbono da biomassa removida com a aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores							Total	
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	9,6 b (11,8)	6,7 a (15,6)	0,2 a (9,8)	1,4 b (14,4)	1,9 a (9,5)	3,9 a (12,1)	7,3 a (11,0)	14,0 a (12,9)	23,5 a (12,2)
8	9,9 ab (17,9)	6,7 a (10,8)	0,2 a (7,7)	1,8 a (10,3)	1,8 a (10,3)	3,7 a (16,3)	7,6 a (12,9)	14,3 a (9,5)	24,2 a (12,2)
9	11,3 ab (18,5)	6,4 a (14,5)	0,2 a (5,6)	1,5 b (14,7)	2,0 a (13,0)	4,3 a (16,7)	8,0 a (14,8)	14,4 a (13,)	25,7 a (14,7)
10	12,0 a (13,2)	7,0 a (17,7)	0,2 a (8,5)	1,5 b (14,4)	2,1 a (12,0)	4,4 a (11,5)	8,2 a (11,8)	15,3 a (14,0)	27,3 a (13,0)
Média	10,7 (17,7)	6,7 (14,7)	0,2 (8,4)	1,5 (17,1)	2,0 (12,0)	4,1 (15,5)	7,8 (13,1)	14,5 (12,5)	25,2 (13,8)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação; Mg ha⁻¹ = Megagrama por hectare; Toras grossas = Sortimento destinado a serraria, composto por toras de 3,60 m de comprimento e diâmetro mínimo de 15,0 cm; Toras finas = Sortimento destinado a energia, composto por toras de 3,05 m e diâmetro de 15,0 a 3,5 cm; Resíduos = Soma dos componentes ponteira, acículas, casca e galhos; Biomassa energética = Soma de toras finas e componentes dos resíduos; e Total = Soma de todos os componentes da árvore. As médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Na Tabela 34 é apresentado o potencial de emissões de CO₂ dos povoamentos de *Pinus taeda*, antes e após a operação de desbaste, bem como o potencial da biomassa removida da operação. Observa-se que antes da operação de desbaste, o potencial de emissões de CO₂ dos povoamentos de *Pinus taeda* nas quatro idades avaliadas era em média 245,5 Mg ha⁻¹ para as idades 7 e 8 anos, e 276,8 Mg ha⁻¹ para as idades 9 e 10 anos. E destes, 49% do potencial estão presentes no componente toras grossas e o restante nos componentes toras finas, ponteiros, acículas, casca e galhos.

Com a aplicação de desbaste e remoção da biomassa energética, o potencial de emissões de CO₂ reduziu em 35%, com uma média de 168,8 Mg ha⁻¹. Isto mostra que a operação de desbaste florestal é uma estratégia vantajosa, pois, além de obter diversos produtos, tanto para serraria como para energia, reduz as competições intraespecíficas, que auxilia no desenvolvimento das árvores remanescentes, há uma redução dos riscos de incêndios florestais e de suas emissões, bem como reduz a dependência de combustíveis fósseis.

Em relação ao potencial de emissões da combustão da biomassa florestal obtida com o desbaste florestal, verificou-se que não houve diferença estatística significativa entre as idades dos povoamentos. Tal resultado mostrou que o potencial das emissões de dióxido de carbono é semelhante nas quatro idades avaliadas. Para Dellasala e Koopman (2015), o uso da biomassa florestal como fonte de energia quando realizados o desbaste em povoamentos jovens é vantajoso, pois os indivíduos apresentam menores teores de carbono quando comparados com árvores adultas, e caso contrário, a emissão de carbono para a atmosfera seria tão dolorosa quanto o uso de combustíveis fósseis, o que levariam anos para o carbono ser novamente sequestrado.

O uso da biomassa energética obtida da operação de desbaste apresenta um potencial de emissão entorno de 53,1 Mg ha⁻¹ de CO₂. Os resíduos apresentam um potencial de emissão superior em reação às toras finas, com aproximadamente 28,6 Mg ha⁻¹, sem diferença estatística nas diferentes idades. Dentro do aspecto do manejo, ao executar o desbaste precocemente, obtém-se maior reação de crescimento, que conseqüentemente, auxilia no sequestro do carbono emitido na combustão dos resíduos.

Tabela 34. Valores médios do potencial de emissões de dióxido de carbono da biomassa existente, remanescente e removida nos povoamentos com diferentes idades submetidos ao desbaste comercial e seus coeficientes de variação (%) com os resultados do teste de Tukey.

Potencial de emissões de CO ₂ da biomassa existente antes da aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores						Total		
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	114,8 b (5,2)	52,8 a (8,8)	1,4 b (7,0)	14,0 c (6,5)	18,4 b (4,8)	41,1 b (6,3)	74,8 c (5,5)	127,6 b (6,4)	242,4 b (5,6)
8	117,4 b (11,6)	53,6 a (6,8)	1,4 b (7,7)	17,7 a (7,1)	17,9 b (7,1)	40,7 b (12,0)	77,7 bc (9,6)	131,2 ab (5,3)	248,6 b (7,9)
9	143,6 a (7,4)	49,1 a (8,1)	1,6 a (5,2)	16,0 b (5,8)	20,6 a (5,2)	49,9 a (8,3)	88,0 a (6,7)	137,1 a (4,9)	280,7 a (5,7)
10	135,9 a (5,0)	54,2 a (8,7)	1,5 a (3,5)	15,2 bc (6,4)	20,0 a (4,3)	45,9 a (3,8)	82,7 ab (3,8)	136,9 a (4,9)	272,8 a (4,6)
Média	127,9 (12,2)	52,4 (8,6)	1,4 (8,6)	15,7 (10,8)	19,2 (7,8)	44,4 (11,6)	80,8 (9,0)	133,2 (6,0)	261,1 (8,5)
Potencial de emissões de CO ₂ remanescente com a aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores						Total		
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	79,7 c (5,0)	28,4 a (4,5)	0,7 c (6,9)	9,0 b (4,8)	11,4 c (4,2)	26,9 b (6,3)	48,0 b (5,2)	76,4 b (4,4)	156,1 c (4,4)
8	81,1 c (81,1)	28,9 a (5,9)	0,7 c (9,7)	11,0 a (6,4)	11,1 c (6,4)	27,0 b (10,6)	49,8 b (8,6)	78,8 b (3,7)	159,8 c (6,6)
9	102,0 a (102,0)	25,9 b (4,5)	0,9 a (5,5)	10,6 a (9,9)	13,2 a (4,7)	33,9 a (10,8)	58,6 a (8,9)	84,4 a (5,7)	186,4 a (6,2)
10	92,0 b (92,0)	28,4 a (5,5)	0,8 b (5,8)	9,6 b (6,7)	12,3 b (5,6)	29,8 b (7,9)	52,4 b (6,6)	80,8 ab (5,2)	172,9 b (5,6)
Média	88,7 (12,4)	27,9 (6,6)	0,8 (11,3)	10,0 (10,7)	12,0 (8,5)	29,4 (13,3)	52,2 (10,6)	80,1 (5,9)	168,8 (9,1)
Potencial de emissões de CO ₂ da biomassa removida com a aplicação do desbaste (Mg ha ⁻¹)									
Idade (anos)	Componentes das árvores						Total		
	Toras grossas	Toras finas	Ponteiras	Acículas	Casca	Galhos	Resíduos	Biomassa energética	Total
7	35,1 b (11,8)	24,4 a (15,6)	0,7 a (9,8)	5,0 b (14,4)	7,0 a (9,5)	14,2 a (12,1)	26,8 a (11,0)	51,2 a (12,9)	86,3 a (12,2)
8	36,3 ab (17,9)	24,6 a (10,8)	0,7 a (7,7)	6,7 a (10,7)	6,8 a (10,3)	13,7 a (16,3)	27,8 a (12,9)	52,5 a (9,5)	88,8 a (12,2)
9	41,6 ab (18,5)	23,3 a (14,5)	0,7 a (5,6)	5,4 b (14,7)	7,4 a (13,0)	15,9 a (16,7)	29,4 a (14,8)	52,7 a (13,3)	94,3 a (14,7)
10	43,9 a (13,2)	25,8 a (17,7)	0,7 a (8,5)	5,7 b (14,4)	7,7 a (12,0)	16,2 a (11,5)	30,2 a (11,8)	56,1 a (13,7)	99,9 a (13,0)
Média	39,2 (17,7)	24,5 (14,7)	0,7 (8,4)	5,7 (17,1)	7,2 (12,0)	15,0 (15,5)	28,6 (13,1)	53,1 (12,5)	92,3 (13,8)

Em que: Entre parênteses encontra-se o coeficiente de variação; Mg ha⁻¹ = Megagrama por hectare; Toras grossas = Sortimento destinado a serraria, composto por toras de 3,60 m de comprimento e diâmetro mínimo de 15,0 cm; Toras finas = Sortimento destinado a energia, composto por toras de 3,05 m e diâmetro de 15,0 a 3,5 cm; Resíduos = Soma dos componentes ponteira, acículas, casca e galhos; Biomassa energética = Soma de toras finas e componentes dos resíduos; e Total = Soma de todos os componentes da árvore. As médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

As emissões de CO₂ do uso da biomassa energética obtida na operação de desbaste podem ser consideradas neutras em termos de impacto climático, pois o CO₂ provém do ciclo biológico e não geológico, como é o caso do CO₂ de origem

fóssil (IPCC, 2000). Logo, dentro dos termos do atual Protocolo de Quioto, o uso da biomassa como fonte energética é uma forma de mitigar as emissões de GEE.

Quando os resíduos da colheita de madeira são deixados na floresta, o CO₂ é liberado lentamente para atmosfera, pelo processo de decomposição do material. E quando este material é utilizado para fins energéticos, o CO₂ é liberado imediatamente para a atmosfera durante a combustão. Esta diferença de tempo mostra a necessidade de muitos anos, para que as emissões de CO₂ provenientes da queima da biomassa seja novamente sequestrado pela floresta.

Portanto, para garantir o sucesso do uso da biomassa florestal como fonte de energia, deve-se considerar que o seu uso não deve afetar as necessidades humanas, além de sua produção ser elevada, para que haja plantas disponíveis para o uso de energia, sem prejudicar outros benefícios. Enquanto o uso dos resíduos florestais exige cuidados para garantir que não haja uma redução da fertilidade do solo, com a remoção destes resíduos, e que conseqüentemente possam levar a redução da produtividade, afetando o crescimento das plantas e reduzindo o sequestro de carbono no solo (EEA, 2011).

4 CONCLUSÕES

- Os povoamentos de *Pinus taeda* antes da operação de desbaste nas 9 e 10 anos apresentaram maior quantidade de energia e carbono presente na biomassa quando comparados com os povoamentos de 7 e 8 anos;
- A energia, o carbono e o potencial de emissões de CO₂ presente na biomassa energética removida no primeiro desbaste não apresentou diferença estatística significativa entre as idades estudadas;
- As idades de 9 e 10 anos apresentaram maior quantidade de toras grossas, podendo contribuir na geração de produtos de vida longa e auxiliando no estoque de carbono; e
- Os resíduos da colheita de madeira apresentaram um potencial de emissões de CO₂ de aproximadamente 29 t ha⁻¹, podendo ser considerada emissões neutras, pois a biomassa recuperada após a operação de desbaste nas árvores remanescentes irá sequestrar os gases de efeito estufa emitidos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIB - Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. **Atlas brasileiro biomassa florestal e industrial e agroindustrial**. Curitiba, PR, 2015. 154 p.

ALVAREZ, S.; ORTIZ, C.; DÍAZ-PINE, E.; RUBIO, A. Influence of tree species composition, thinning intensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean mountain forests: a case study using the CO₂Fix model. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 21, n. 7, p. 1045-1058, 2016.

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**”. Annual Book of ASTM Standards. v. 05.06. 19 p.

ANATER, M. J. N.; SANQUETTA, C.R.; CORTE, A. P. D.; SCHIAVO, B. N. V. Redução de gases de efeito estufa pelos projetos de crédito de carbono no setor energético brasileiro. **Holos**, v. 32, p. 310-326, 2016.

BALBINOT, R.; VALÉRIO, Á. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008.

BORYS, A.; SUCKOW, F.; REYER, C.; GUTSCH, M.; LASCH-BORN, P. The impact of climate change under different thinning regimes on carbon sequestration in a German forest district. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 21, n. 6, p. 861-881, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 5.025, de 30 de março de 2004**. Brasília, 30 de março de 2004; 183º da Independência e 116º da República.

BRASIL. **Lei Nº 10.438, de 26 de abril de 2002**. Brasília, 26 de abril de 2002; 181º da Independência e 114º da República.

CANADELL, J. G.; RAUPACH, M. R. Managing forests for climate change mitigation, **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1456-1457, 2008.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. Disponível em :<<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO. **Panorama do potencial de biomassa no Brasil**. Brasília: Dupligráfica, 2003. 80 p.

DELLASALA, D. A.; KOOPMAN, M. **Thinning combined with biomass energy production may increase, rather than reduce, greenhouse gas emissions**. Geos Institute, Ashland, OR, 2015. 13 p.

European Environment Agency - EEA. **Opinion of the EEA Scientific Committee on greenhouse gas accounting in relation to bioenergy**. 2011. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/about-us/governance/scientific-committee/sc->

opinions/opinions-on-scientific-issues/sc-opinion-on-greenhouse-gas/view. Acesso em: 28 Jul. 2016.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, E. M. A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1069-1079, 2010.

GOMES, S. I.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G. Análise preliminar da viabilidade de cultivos florestais para produção de energia elétrica. **Espaço Energia**, n. 4, p. 1-10, 2006.

HARTSOUGH B, YOMOGIDA D. Harvesting systems for short rotation woody crops. **Paper presented at the first conference of the short woody crops operations working group**, Paducah, KY, September 23 e 25, 1996. USDA Forest Services 1996.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2016, **Relatório anual da IBÁ 2016, ano base 2015**. 96 p. Disponível em: <<http://www.iba.org>>. Acesso em: 30 Ago. 2016.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry**, Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 24 p.

KILPELÄINEN, A.; ALAM, A.; TORSSONEN, P.; RUUSUVUORI, H.; KELLOMÄKI, S.; PELTOLA, H. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilisation from final felling of Norway spruce. **Biomass and Bioenergy**, v. 87, p. 1-8, 2016.

LAMERS, P.; JUNGNER, M. The 'debt' is in the detail: a synthesis of recent temporal forest carbon analyses on woody biomass for energy. **Biofuels, Bioproducts, and Biorefining**, v. 7, n. 4, p. 373-385, 2013.

MANGOYANA, R. B. Bioenergy from forest thinning: Carbon emissions, energy balances and cost analyses. **Renewable Energy**, v. 36, n. 9, p. 2368-2373, 2011.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; FONSECA, S.; DAMBROZ, C. S. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 261-273, 2011.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomassa energética produzida na operação de desbaste em povoamentos de *Pinus taeda* não foi afetada pela idade de execução do primeiro desbaste. Em todas as idades dos povoamentos avaliadas, a quantidade de biomassa energética produzida encontrou-se abaixo do valor considerado viável para uso na atualidade brasileira, pois é comum o uso de máquinas de maior porte que exigem grande quantidade de biomassa energética por unidade de área para viabilizar as operações do ponto de vista econômico.

Entretanto, é possível o uso de tecnologias alternativas, como o uso de máquinas de pequeno porte, tornando viável o uso para fins energéticos. Tal consideração é importante, visto que, a quantidade de biomassa residual foi similar à quantidade de toras finas produzidas na operação de desbaste, e que, atualmente, é o único produto aproveitado para energia pela empresa, podendo, desta forma, duplicar a capacidade na geração de biomassa energética.

Na análise técnica e operacional, foi verificada a influência significativa do volume individual das árvores na operação de corte realizada pelo *harvester*, enquanto o volume de carga foi a variável mais significativa na operação de extração realizada pelo *forwarder*, devendo tais variáveis serem consideradas no planejamento das operações de colheita de madeira no desbaste florestal.

Em relação ao aspecto qualitativo da biomassa energética, esta apresentou elevados índices de valor de combustível, ligados diretamente aos parâmetros de poder calorífico, massa específica básica e composição química. Neste aspecto, pode-se destacar os componentes toras finas, ponteira e galhos, que apresentaram características semelhantes em diversos parâmetros energéticos.

Outro importante aspecto a ser destacado é o uso da biomassa energética florestal como forma de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Esta fonte renovável de energia, gerada por meio da combustão deste material, proporciona a emissão de carbono neutro, onde a biomassa recuperada após a operação de desbaste sequestra o dióxido de carbono emitido, garantindo o equilíbrio das emissões dos gases de efeito estufa, por meio de um manejo florestal adequado e com sustentabilidade ambiental.

RECOMENDAÇÕES

O presente estudo pôde verificar a necessidade de estudos complementares, a fim de comprovar a viabilidade de uso da biomassa energética produzida na operação de primeiro desbaste, que são:

- Realizar uma análise de potenciais ganhos econômicos em relação ao armazenamento da biomassa energética no talhão e de cavacos processados na indústria;
- Desenvolver e estudar equipamentos de pequeno porte que permitam a realização simultânea da extração e picagem da biomassa energética em povoamentos florestais em regime de manejo;
- Realizar um estudo técnico e de custos do *forwarder* adaptado com aumento da caixa de carga, possibilitando proporcionar aumento do volume transportado e da produtividade da máquina; e
- Desenvolver modelos matemáticos para estimativa da biomassa residual da colheita de madeira, utilizando variáveis dendrométricas a partir do computador de bordo do *harvester*, a fim de acoplar tais modelos no *software* da máquina para maior controle na produção da biomassa.