

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE CURITIBANOS
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, BIODIVERSIDADE E FLORESTAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Marcelo Antonio Galon Antunes

**Performance e custo do *forwarder* na extração e carregamento de toras no corte final de
Pinus taeda L.**

Curitibanos, SC

2025

Marcelo Antonio Galon Antunes

**Performance e custo do *forwarder* na extração e carregamento de toras no corte final de
Pinus taeda L.**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bonazza.

Coorientador: Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro.

Curitiba, SC

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC

Antunes, Marcelo Antonio Galon
Performance e custo do forwarder na extração e carregamento de toras no corte final de Pinus taeda L. / Marcelo Antonio Galon Antunes ; orientador, Marcelo Bonazza, coorientador, Jean Alberto Sampietro, 2025.
55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos, Graduação em Engenharia Florestal, Curitibanos, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Florestal. 2. Extração Florestal. 3. Carregamento Florestal. 4. Custos Operacionais. 5. Desempenho Operacional. I. Bonazza, Marcelo. II. Sampietro, Jean Alberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

Marcelo Antonio Galon Antunes

**Performance e custo do *forwarder* na extração e carregamento de toras no corte final de
Pinus taeda L.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Florestal” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Florestal

Curitibanos/SC, 14 de novembro de 2025.

Prof. Dr. Marcelo Bonazza
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Bonazza
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro
Avaliador
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Magnos Alan Vivian
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus honrados e adorados pais e a minha querida irmã.

AGRADECIMENTOS

É com gratidão que agradeço a Deus por ter me concedido a oportunidade de realizar este trabalho, me abençoando com força e persistência. Agradeço também os meus pais, Lurdes Galon Sobrinha e Adair Ronconi Antunes pelo apoio e dedicação que me auxiliaram a concluir esta etapa, a minha irmã Michaelle Aldina Antunes por toda ajuda e companheirismo que foram essências nesta jornada.

Agradeço, de modo especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Bonazza, pela confiança, paciência e pelos ensinamentos que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, ao meu coorientador Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro por toda contribuição neste trabalho. Estendo meu agradecimento à Madeireira Samistraro pela colaboração e por tornar possível a execução deste estudo, concedendo acesso e apoio imprescindíveis em seu módulo de colheita.

Por fim, agradeço aos amigos que foram essenciais durante a realização deste trabalho.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia, com amor pelo que se faz”.

(Robert Collier. 1926)

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estimar a produtividade e os custos do *forwarder* na extração da madeira de *Pinus taeda* L. do interior do talhão para a margem da estrada e no carregamento de veículos de transporte principal, avaliando a influência de variáveis do processo sobre os indicadores operacionais e simulando cenários de atendimento do abastecimento industrial. Os dados foram coletados em área de corte final de um povoamento de 20 anos, sob o método de toras curtas (*cut-to-length*), em São Cristóvão do Sul – SC, realizada pela empresa Madeireira Samistraro. A análise operacional ocorreu por meio de estudo de tempos e movimentos, contabilizando o tempo dos ciclos e determinando produtividades, custos e indicadores de uso do tempo e desempenho operacional da extração e do carregamento, admitindo erro amostral de 10%. Foi analisada a significância da variável “volume médio por tora” na produtividade e no custo de produção do carregamento e dessa variável aliada à “distância de extração” e “declividade” sobre produtividade e custos da extração, utilizando-se Modelo Linear Geral (GLM) ao nível de significância de 5%. Também foram projetados cenários de abastecimento industrial considerando combinações de horas destinadas à extração e ao carregamento, tendo como restrição um turno diário de 10 horas. O erro amostral foi de 8% para extração e 6% para carregamento. A extração apresentou disponibilidade mecânica de 91,3%, reflexo de ser a operação para a qual o *forwarder* é projetado e do bom estado do equipamento, enquanto o carregamento registrou 82,5%, influenciado por interrupções para abastecimento realizadas na borda do talhão. A taxa de utilização do tempo programado foi de 86,0% para extração, decorrente de ser sua atividade principal, e de 69,5% para o carregamento, influenciado por esperas entre trocas de caminhões. As etapas mais representativas do ciclo de extração foram o carregamento e as manobras de descarregamento, com 36,5 e 30,8% do ciclo total, respectivamente. As produtividades médias foram de 30,42 m³ PMH₀⁻¹ para extração e 86,92 m³ PMH₀⁻¹ para carregamento. As variáveis “distância de extração” e “declividade” não foram significativas para a extração, enquanto o “volume médio por tora” apresentou efeito significativo sobre a produtividade e o custo de produção em ambas as operações. O combustível representou 25,7% do custo na extração, e a depreciação 18,3% no carregamento. Os custos médios de produção foram de R\$ 12,96 m⁻³ na extração e R\$ 3,86 m⁻³ no carregamento, e os custos operacionais horários foram de R\$ 394,12 PMH₀⁻¹ e R\$ 335,80 PMH₀⁻¹, respectivamente, diferença associada ao consumo médio de combustível de cada atividade. O cenário mais equilibrado foi o com alocação de 7 h dia⁻¹ dedicadas à extração e 3 h dia⁻¹ ao carregamento, resultando em produções diárias mensais e anuais muito próximas. Os resultados demonstram o bom desempenho técnico e econômico do *forwarder*, evidenciando o “volume médio por tora” como principal variável de influência, cuja elevação aumenta a produtividade e reduz o custo de produção. As análises fornecem subsídios para o planejamento otimizado das operações, assegurando maior eficiência no uso do equipamento.

Palavras-chave: Colheita Florestal. Otimização. Produtividade.

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the productivity and costs of a forwarder in the extraction of *Pinus taeda* L. logs from within the stand to the roadside, as well as in loading trucks for primary transport, evaluating the influence of process variables on operational indicators and simulating industrial supply scenarios. Data were collected in a final harvest area of a 20-year-old stand under the cut-to-length method, in São Cristóvão do Sul, SC, operated by the company Madeireira Samistraro. Operational analysis was carried out through a time-and-motion study, recording cycle times and determining productivity, costs, and indicators of time use and operational performance for extraction and loading, adopting a sampling error of 10%. The significance of the variable “average log volume” on productivity and production costs of loading was analyzed; additionally, its combined effect with “extraction distance” and “slope” on extraction productivity and costs was assessed using a General Linear Model (GLM) at a 5% significance level. Industrial supply scenarios were projected considering combinations of hours allocated to extraction and loading, constrained by a 10-hour daily work shift. Sampling error was 8% for extraction and 6% for loading. Extraction presented a mechanical availability of 91.3%, reflecting the operation for which the forwarder is designed and the good condition of the equipment, whereas loading recorded 82.5%, influenced by refueling interruptions at the stand edge. The utilization rate of scheduled time was 86.0% for extraction—its main activity—and 69.5% for loading, affected by waiting intervals between truck exchanges. The most representative stages of the extraction cycle were loading and unloading maneuvers, accounting for 36.5% and 30.8% of the total cycle, respectively. Mean productivities were 30.42 m³ PMH⁻¹ for extraction and 86.92 m³ PMH⁻¹ for loading. The variables “extraction distance” and “slope” were not significant for extraction, whereas “average log volume” had a significant effect on both productivity and production cost in both operations. Fuel accounted for 25.7% of extraction costs, while depreciation represented 18.3% of loading costs. The average production costs were R\$ 12.96 m⁻³ for extraction and R\$ 3.86 m⁻³ for loading, and hourly operating costs were R\$ 394.12 PMH⁻¹ and R\$ 335.80 PMH⁻¹, respectively—a difference associated with the average fuel consumption of each activity. The most balanced scenario was the allocation of 7 h day⁻¹ to extraction and 3 h day⁻¹ to loading, resulting in very similar monthly and annual production levels. The results demonstrate the strong technical and economic performance of the forwarder, highlighting “average log volume” as the main influencing variable, whose increase improves productivity and reduces production costs. The analyses provide support for optimized operational planning, ensuring greater efficiency in equipment use.

Keywords: Forest Harvesting. Optimization. Productivity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA	15
2.1.1	Extração florestal.....	16
2.1.2	Carregamento florestal	18
2.2	ESTUDO DO TRABALHO	19
2.3	CUSTOS OPERACIONAIS.....	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	ÁREA DE ESTUDO	22
3.2	MÉTODO DE COLHEITA	23
3.3	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO <i>FORWADER</i>	23
3.4	COLETA DE DADOS.....	24
3.4.1	Análise Operacional da Extração e Carregamento.....	25
3.5	INDICADORES DE DESEMPENHO OPERACIONAL	26
3.5.1	Classificação dos tempos operacionais	26
3.5.2	Indicadores de eficiência no uso do tempo	28
3.5.2.1	<i>Disponibilidade Mecânica.....</i>	28
3.5.2.2	<i>Taxa de utilização do tempo disponível</i>	28
3.5.2.3	<i>Taxa de utilização do tempo programado.....</i>	28
3.5.2.4	<i>Produtividade operacional média</i>	29
3.6	DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS	29
3.6.1	Custos fixos.....	29
3.6.1.1	<i>Depreciação</i>	29
3.6.1.2	<i>Pessoal operacional</i>	30
3.6.1.3	<i>Juros e seguros.....</i>	30
3.6.2	Custos variáveis	31
3.6.2.1	<i>Combustível.....</i>	31
3.6.2.2	<i>Custo com óleo lubrificante e graxas</i>	31
3.6.2.3	<i>Óleo hidráulico.....</i>	32

3.6.2.4	<i>Material rodante</i>	32
3.6.2.5	<i>Manutenção</i>	33
3.6.3	Custo administrativo	33
3.6.4	Custo operacional horário	33
3.6.5	Custo de produção	34
3.7	ANÁLISE DE DADOS	34
3.8	CENÁRIOS DE ABASTECIMENTO INDUSTRIAL	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	ERRO AMOSTRAL	36
4.2	ESTATÍSTICA DOS SORTIMENTOS.....	36
4.3	INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DO TEMPO	37
4.4	COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS CICLOS DA EXTRAÇÃO	38
4.5	INDICADORES DE DESEMPENHO OPERACIONAL.....	40
4.6	CUSTOS OPERACIONAIS	42
4.7	VARIÁVEIS INFLUENTES NO DESEMPENHO E CUSTOS	44
4.7.1	Extração	44
4.7.2	Carregamento	46
4.8	CENÁRIOS DE ABASTECIMENTO INDUSTRIAL	47
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas desempenham papel estratégico na economia brasileira, tanto pela geração de empregos quanto pelo fornecimento de matéria-prima para diversos setores industriais (IBÁ, 2024). Esse cenário reforça a importância das operações que compõem a cadeia produtiva da madeira, especialmente aquelas relacionadas à colheita florestal.

As operações de colheita e transporte detêm grande importância na cadeia produtiva, pois estão sujeitas a variações de produtividade e custo decorrentes de fatores como local, povoamento, aspectos silviculturais, dentre outras características operacionais e ambientais, o que pode gerar perdas econômicas e riscos para o processo (Louis *et al.*, 2022; Masioli *et al.*, 2023).

Somado a isso, alguns autores como Gagliardi *et al.* (2020) ao avaliar extração com *forwarders* em corte final de *Pinus patula*, ou ainda Nunes *et al.* (2021) no estudo de curvas de produtividade e na extração da madeira de *Eucalyptus* spp. também com *forwarders*, relatam representatividade da operação de colheita em torno de 60 a 70% dos custos totais da madeira posta em pátios industriais, oriundas de florestas plantadas.

Dentro das etapas desta operação, a extração é atividade com maior complexidade devido a influência de diversos fatores externos como declividade do terreno, distância de extração, habilidade do operador, volume individual de árvores ou toras, dentre outros (Malinovski *et al.*, 2006).

A extração pode ser definida como a movimentação da madeira em forma de toras do interior dos talhões, até a estrada ou pátio intermediário, onde são empilhadas para posteriormente serem carregadas e transportadas até o destino final (Masioli *et al.*, 2023). Quando se emprega o método de toras curtas (*cut-to-length*) mecanizado, essa atividade normalmente é realizada por *forwarder*, que são tratores florestais autocarregáveis (Ferreira *et al.*, 2025).

Este equipamento pode possuir diferentes configurações de tração, com chassi articulado e sistema de rodado de pneus em tandem, podendo ser equipados com esteiras auxiliares para aumentar a capacidade de tração. Além disso, realiza a extração na forma de baldeio, sendo composto por braço hidráulico com grua para carregamento ou descarregamento do compartimento de carga, com capacidade variável de acordo com marca e modelo.

Nas operações de colheita da região Sul do Brasil, além de realizar a extração da madeira do local de corte até a estrada, é comum que os *forwarders* sejam empregados no carregamento de veículos de transporte. Isso ocorre na ausência de um equipamento exclusivo

dedicado a essa atividade, sobretudo em situações em que há sobressalência de capacidade produtiva do equipamento que realiza a extração em relação a meta de abastecimento madeireiro. No entanto, não há na literatura trabalhos que analisaram os indicadores operacionais de desempenho e custos dessa atividade.

Diante disso, a realização de estudos que visem conhecer a produtividade operacional e seu comportamento em relação às possíveis variáveis que interferem no desempenho de máquinas empregadas na colheita florestal, torna-se uma preocupação crescente das empresas florestais. Portanto, esse estudo analisou operacionalmente a extração de madeira com *forwarder* visando compreender seus indicadores operacionais, possibilitando melhorias no desempenho operacional, eficiência no uso do tempo das máquinas, buscando a maximização da produtividade e redução dos custos de produção.

As variáveis “volume médio por tora”, “declividade” do terreno e a “distância de extração”, afetam diretamente a produtividade e os custos de produção do *forwarder* (Malinovski *et al.*, 2006; Ünver-Okan, 2019; Nunes *et al.*, 2021).

Assim, formula-se a hipótese de que o aumento do “volume médio por tora”, aliado a menores “declividades” e “distâncias de extração”, resulta em melhor desempenho operacional do equipamento pois minimiza o tempo médio por ciclo de trabalho. Além disso, propõe-se a análise de diferentes cenários de uso do tempo programado, com o objetivo de identificar a forma mais eficiente de utilização do *forwarder* nas operações de extração e carregamento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Determinar a produtividade e custos do *forwarder* na extração da madeira do interior do talhão para a margem da estrada e no carregamento de veículos de transporte principal no corte final de *Pinus taeda* L. destinado a multiprodutos, avaliando a influência de variáveis do processo sobre a produtividade e custos operacionais, além da projeção de cenários com diferentes alocações de tempo em cada atividade.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Estimar indicadores de eficiência do uso do tempo de trabalho do *forwarder* na atividade de carregamento e extração da madeira.
- Analisar o tempo consumido de cada ciclo, bem como determinar os elementos do ciclo da extração mais representativos.
- Estimar o custo operacional do *forwarder* na atividade de carregamento e extração da madeira.
- Analisar o efeito do “volume médio das toras”, “distância de extração” e “declividade” sobre o desempenho da extração da madeira até a margem do talhão e o efeito do “volume médio das toras” sobre o desempenho do carregamento da madeira.
- Analisar a correlação e significância da “distância de extração” sobre o tempo total do ciclo.
- Avaliar diferentes cenários de uso do tempo programado, visando identificar a forma mais eficiente de utilização do *forwarder* nas atividades de extração e carregamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA

A cadeia de produção madeireira engloba diversas operações, dentre elas, destaca-se a colheita e transporte florestal. Estas operações detêm grande importância dado sua participação expressiva no custo final da floresta (Diniz *et al.*, 2018). A operação final do ciclo de produção florestal, representado pela operação de colheita florestal, é a etapa onde se obtém os produtos mais valiosos, sendo assim fator determinante na rentabilidade florestal (Arce *et al.*, 2004).

De acordo com Machado *et al.* (2014), a colheita florestal corresponde ao um conjunto de atividades realizadas no maciço florestal, com objetivo de preparar e transportar a madeira até local de carregamento, levando em consideração técnicas e padrões previamente estabelecidos. De maneira resumida, Robert (2013) relata as principais etapas que compõem a colheita florestal, sendo elas: corte, extração e carregamento.

As atividades que compõem a colheita são influenciadas por elevado número de variáveis, as quais interferem diretamente na produtividade da colheita florestal. Autores como Malinovski *et al.* (2006), observaram 37 variáveis que interferem na produtividade da colheita florestal. Estas variáveis são relacionadas às características do povoamento, aos aspectos físicos do terreno e ao planejamento das operações. Os autores ainda relatam a variável declividade com grande influência sob a operação de corte, enquanto que na extração esta mesma variável, aliada com a distância de extração, são as que interferem na produtividade da operação.

O processo de mecanização promoveu avanços expressivos na produtividade da colheita florestal, bem como melhorias nas condições de trabalho na floresta. No entanto o incremento de máquinas de grande porte nos povoamentos florestais tem contribuído para provocar alterações no solo, especialmente na compactação e desequilíbrios nos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo (Dias Júnior; Pierce, 1996; Lopes *et al.*, 2006; Ampoorter *et al.*, 2010).

Outro impacto no solo está relacionado com o impedimento mecânico ao crescimento radicular o que gera menor volume de solo explorado pelas plantas, conseqüentemente, menor desenvolvimento em futuras rotações (Sampietro e Lopes, 2016). Além disso, esta operação envolve atividades potencialmente de riscos à segurança dos operadores, o que reforça sua relevância social (Schettino, 2016).

Conforme Ovaskainen *et al.* (2004), nos últimos anos houve um crescente avanço tecnológico e conseqüentemente aumento na produtividade das máquinas florestais, porém este avanço vem acompanhado da necessidade de mão de obra qualificada, afim de obter maior desempenho operacional. Diante disso, para obter o aproveitamento máximo dos equipamentos de colheita florestal, se faz necessário operadores com experiência e qualificação.

A evolução da telemetria e dos sistemas de gestão tem impulsionado melhorias significativas na colheita florestal, especialmente pelo monitoramento contínuo, pela integração entre máquinas e pela rapidez na análise de dados operacionais. As tecnologias atuais favorecem maior eficiência, planejamento aprimorado e tomadas de decisão mais consistentes, ampliando o desempenho e a produtividade das operações. Contudo, persistem desafios para empresas de menor porte, que enfrentam limitações para adotar tais sistemas (Dantas e Andreoli, 2017; Bakkari e Khatory, 2017; Zambon *et al.*, 2019; Arnhold, 2020; Long, Jordaan e Castro-Santos, 2023; Alhamed *et al.*, 2023).

2.1.1 Extração florestal

A extração florestal corresponde à atividade da colheita responsável pelo deslocamento da madeira desde o local de corte até vias de escoamento, como estradas, carregadores ou pátios intermediários. No contexto brasileiro, essa atividade é comumente realizada de forma mecanizada por máquinas como o *forwarder* ou o *skidder*, sendo denominada, respectivamente, de baldeio ou arraste, conforme o método adotado. Dentro da colheita florestal, a extração é considerada a atividade que requer maior atenção devido sua complexidade (Seixas, 2008; Machado, 2014).

O *forwarder* é classificado como um trator florestal autocarregável articulado, cuja principal função é transportar a madeira do interior do povoamento sem que haja contato com o solo durante o deslocamento. Este equipamento é prioritariamente utilizado no método colheita de toras curtas (*cut to length*), onde a árvore é processada no local de derrubada, extraída para a margem da estrada ou para o pátio temporário em forma de pequenas toras, com menos de seis metros de comprimento (Malinovski *et al.*, 2006; Seixas, 2008).

A literatura conta com diversos estudos acerca da extração florestal, como Robert (2013) avaliando um *forwarder* Komatsu modelo 860.4 em dois tipos de relevo acidentado, já Fielder *et al.* (2017) apresentaram estudos no Sul da Bahia na extração de toras de 6 m de comprimento, para povoamentos de eucaliptos. Autores como Rodrigues *et al.* (2018) realizaram modelagem da produtividade e do custo do *forwarder* no desbaste de *Pinus taeda* L,

enquanto que Masioli *et al.* (2023) analisaram o efeito do empilhamento na madeira sob a produtividade e custo da extração.

Autores internacionais como Dvorák *et al.* (2021) avaliaram três diferentes *forwarders* na República Tcheca para extração de coníferas, ao passo que Pandur *et al.* (2019) realizaram comparação do consumo de combustível entre dois *forwarders* na extração de toras de carvalho para fins energéticos na Croácia.

Além disso, outros autores como Gagliardi *et al.* (2020) estudaram dois modelos de *forwarders* comparando os efeitos das principais variáveis como capacidades da máquina, sortimento de produtos, tamanho da carga, distância de extração, consumo de combustível, além da correlação entre produtividade e volume médio por tora. Ferreira *et al.* (2025) avaliaram a influência do volume médio individual por árvore na produtividade de *forwarders* e no custo de produção em plantações de eucalipto localizadas no sul da Bahia.

Já Santos *et al.* (2016) propuseram equação para estimar o custo de produção do *forwarder*, considerando como variáveis independentes a produtividade e as horas efetivas de trabalho. Enquanto que Bonazza (2019), ao comparar os métodos *full-tree* e *cut-to-length*, ajustou uma equação com as variáveis distância de extração, volume por tora e declividade. Por outro lado, Leite *et al.* (2014) estimaram a produtividade da atividade de extração em aclave utilizando como variáveis preditoras de declividade e deslocamento.

Assim como Gagliardi *et al.* (2020) e Masioli *et al.* (2023), que estimaram a produtividade do *forwarder* utilizando a distância de extração como variável independente. Por sua vez Ferreira *et al.* (2025) consideraram o volume médio individual por árvore como variável preditora. Já Rodrigues *et al.* (2018) empregaram uso do logaritmo do volume por ciclo para estimativa da produtividade.

A complexidade da operação de extração deve-se ao elevado número de variáveis que exercem influência sob esta atividade. Algumas destas principais variáveis são: sortimento, distância média de extração, declividade, experiência do operador, perigosidade, volume médio por tora, tipo de solo e dimensões dos estaleiros (Malinovski *et al.*, 2006).

Dessa forma, os diferentes métodos de extração de madeira possuem a capacidade de ocasionar diversos danos ambientais, além de apresentarem um menor rendimento operacional o que leva ao aumento do custo desta atividade. Portanto, necessitam ser previamente analisados com rigor técnico antes de postos em prática, bem como seu constante monitoramento durante sua execução (Fiedler, 2012).

2.1.2 Carregamento florestal

No método de colheita CTL (*cut to length*), onde após o corte e através da extração, as pilhas de madeira são postas às margens da estrada. Em seguida é realizado o carregamento das pilhas de madeira nos caminhões através de um carregador de toras, sendo essa a atividade que liga a colheita com transporte florestal (Minette *et al.*, 2002; Lima *et al.*, 2025).

A ineficiência nesta etapa pode afetar negativamente outras atividades que compõem a colheita, como a extração e transporte pelos caminhões, reduzindo assim a produtividade da colheita florestal, sendo esta operação considerada como um ponto de grande relevância. Além disso, a forma de empilhamento da madeira nos caminhões, bem como a organização no tráfego dos mesmos, é determinante no custo da operação (Ghaffariyan *et al.*, 2021; Ghotb *et al.*, 2024).

Existem diversos fatores que afetam a produtividade do carregador florestal, dentre elas o volume médio por tora, e organização da pilha de madeira. Além de fatores como declividade e distância percorrida afetam negativamente a operação, enquanto que a capacidade da máquina e volume útil da carga apresentam influência positiva (Gan *et al.*, 2021; Simões *et al.*, 2022).

Aspectos relacionados a velocidade, método e organização da madeira nos caminhões, tem influência direta na quantidade de carga transportada bem como na segurança do transporte, o que conseqüentemente impacta no custo da operação. Desta maneira é essencial planejamento adequado com estratégias eficazes na otimização e redução dos custos desta atividade (Diniz *et al.*, 2018; McEwan *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2025).

Ademais, a operação de carregamento desempenha um papel essencial na determinação dos custos operacionais e na eficiência da demanda de suprimentos na silvicultura (Melchiori *et al.*, 2022). Um carregamento mal organizado resulta em desperdício de espaço, elevação do custo por tonelada e aumento do tempo total da operação, refletindo na redução da produtividade (Akay *et al.*, 2020).

Diante disso, o uso de ferramentas como regressão linear é fundamental para auxiliar nas tomadas de decisão, Rocha *et al.* (2009) ao estimarem a produtividade no carregamento de toras de *Eucalyptus grandis*, utilizando como variáveis independentes o volume por tora e número de manobras, ou ainda Lima *et al.* (2025), utilizando apenas volume por tora como variável preditora. Posto isso, a implementação de estratégias eficazes para aprimorar esta atividade, é fundamental para reduzir custos e aumentar a produtividade do transporte florestal.

Usualmente, o equipamento mais adequado que realiza o carregamento de toras são escavadeiras hidráulicas equipadas com garra, cuja função é movimentar as toras da pilha de

madeira para os veículos de transporte. No entanto, a forma de carregamento pode sofrer variações técnicas de acordo com os padrões adotados por cada empresa florestal (Diniz *et al.*, 2018; Masioli *et al.*, 2023).

Os carregadores utilizados na colheita florestal apresentam variações em relação à área útil da garra. Fiedler *et al.* (2008), em método *cut-to-length* (CTL), e Rocha *et al.* (2009), avaliando operações *full-tree* de *Eucalyptus grandis*, relataram garras com 0,37 m² de área útil, enquanto Simões *et al.* (2009) verificaram 0,5 m² em um Caterpillar CAT 320 BL.

Valores mais elevados foram observados por Lima *et al.* (2025) e Masioli *et al.* (2023), ambos com 0,8 m² em carregadores Caterpillar CAT 320 e Doosan DX 225LCA, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Bonazza (2019) em um Hyundai 220LC-95 e por Santos *et al.* (2009) em um Caterpillar CAT 1 L, ambos com 1,0 m². Esses dados evidenciam a diversidade de configurações disponíveis, com impacto direto no desempenho operacional.

No método de colheita *cut to length*, amplamente utilizado na região Sul do Brasil, é comum o uso do *forwarder* para realizar a operação de carregamento além de desempenhar sua função principal de extração. Essa prática está associada às particularidades operacionais de cada empresa, o que se relaciona diretamente com a demanda de abastecimento da indústria.

Quando o andamento da operação permite que o *forwarder* destine parte de seu tempo ao carregamento, sem comprometer o fluxo de madeira ou provocar acúmulo excessivo no interior do talhão, torna-se possível ampliar o aproveitamento do equipamento. Com isso, reduz a necessidade de empregar um carregador florestal, o que representa uma alternativa economicamente viável.

2.2 ESTUDO DO TRABALHO

Também chamado de estudos de tempos e movimentos, o estudo do trabalho teve seus primeiros registros em 1881 e 1885. Precursores como Frederick Taylor dedicou-se ao desenvolvimento de estudos do tempo com objetivo de definir tempo-padrão para executar uma determinada tarefa. Já Frank B. Gilbreth, abordou estudos de movimentos com intenção de determinar o método mais adequado para execução de dado trabalho (Barnes, 1977).

No setor florestal, estes mesmos conceitos foram determinados, a medida que se desenvolviam nas demais áreas (Magagnotti *et al.*, 2013). Atualmente, um dos principais objetivos dos estudos sobre medição do trabalho florestal ainda é promover a máxima eficiência

das operações, sendo essa a abordagem consolidada entre cientistas do trabalho florestal em todo o mundo (Bonazza, 2019).

A produtividade está diretamente ligada ao tempo consumido nas operações florestais, sendo estas as principais variáveis respostas nos estudos de medição do trabalho florestal. Uma vez que a produtividade pode ser definida como relação entre as saídas que se referem ao produto produzido e as entradas que são os tempos levados para produzir o produto em questão (Magagnotti e Spinelli 2012). Portanto, evidencia-se a importância do tempo no contexto dos estudos de trabalho florestal, o qual é um elemento essencial na produção que deve ser gerenciado com atenção (Bonazza, 2019).

Para realização da medição do trabalho florestal, Ackerman *et al.* (2014) apresentam metodologias ou técnicas de amostragem de tempos que são comumente utilizadas, sendo elas: Estudo ao nível de turno; Estudo ao nível de parcela; Estudo ao nível de ciclo; Estudo ao nível de elemento do ciclo; Amostragem do trabalho e Contagem do tempo e produção. Cada método leva em consideração variados tipos de amostragem, com finalidade de se obter diferentes graus de detalhamento do trabalho, de acordo com objetivo do estudo.

Após medição dos tempos de trabalho, pode se realizar agrupamentos ou subdivisões do tempo despendido para cada atividade de acordo com as etapas do processo. Em seguida, com as classificações dos tempos feita, pode-se determinar algumas taxas essenciais para o gerenciamento das operações e obtenção dos custos operacionais (Bonazza, 2019).

2.3 CUSTOS OPERACIONAIS

O estudo dos custos nas operações florestais é de suma importância, uma vez que é através destes que é possível determinar os custos resultantes do projeto, sendo possível identificar e verificar às atividades mais onerosas na composição do custo total, e buscar alternativas para redução dos mesmos (Santos *et al.*, 2016). Os custos na colheita florestal dividem-se em duas categorias sendo os custos fixos e custos variáveis.

De acordo com Robert (2013), os custos fixos não alteram conforme a quantidade de horas da operação e são independentes da produção. Já Lopes (2007) denomina os custos fixos sendo aqueles que não variam com as horas de operação, além disso, não são influenciados pelas atividades da máquina, nem produção, ou seja, ocorrem de qualquer forma mesmo que a máquina esteja trabalhando ou não.

Com relação aos custos variáveis, Morais (2012) define como sendo aqueles que se alteram conforme o nível de produção, dependendo assim da atividade desempenhada pela

máquina. Outra definição abordada sobre custos variáveis de acordo com Lopes (2007), refere-se aos custos que variam proporcionalmente com a quantidade produzida e com uso da máquina.

Os custos inerentes a operação de colheita dependem de uma série de fatores como tamanho do povoamento, espécies de árvores, volume removido, terreno e até mesmo grau de dificuldade devido à proximidade de casas, linhas de energia, estradas públicas, áreas de restrição de ruído e outras restrições impostas por portarias relacionadas à silvicultura (Malinovski *et al.*, 2016).

Diante disso, considerando o alto investimento em máquinas como o *forwarder*, se faz necessário pesquisas que visem o aumento da produtividade, identificando melhorias nos aspectos técnicos da operação, com finalidade de promover maior vida útil do equipamento, bem como diminuir seus custos operacionais (Malinovski *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2016).

3.2 MÉTODO DE COLHEITA

A empresa utiliza o método de colheita de toras curtas ou *cut-to-length* (CTL) mecanizado, onde as operações de derrubada e processamento da madeira são realizadas pelo *haverster* no interior do talhão, onde os sortimentos eram previamente classificados em quatro classes de diâmetros conforme (Tabela 1) e retirados da floresta em até 5 dias.

Tabela 1. Classificação dos sortimentos.

Sortimento	Classe de Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	Volume Médio por Tora (m ³)	Uso da Madeira
1	>35	2,4	0,314	Laminação
2	25 a 35	2,4	0,193	Laminação
3	18 a 25	2,4	0,136	Laminação
4	<18	2,4	0,052	Comércio

Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, o *forwarder* realiza a extração da madeira em forma de baldeio até a beira da estrada, onde na maioria das vezes descarrega sua carga diretamente no caminhão, sendo poucas vezes o descarregamento na pilha. Já o trator esteira com lâmina realiza a manutenção das estradas.

3.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO *FORWARDER*

O *forwarder* estudado é da marca Komatsu modelo 895 e suas respectivas dimensões são mostradas na Figura 2.

Figura 2. Dimensões do *forwarder*.



Dimensões (oito rodas com a opção de chassi traseiro mais curto e pneus de 780 mm)	
A	Largura 3.160 mm
B	Comprimento, total 11.000 mm
C	Comprimento, do eixo dianteiro à junta articulada 2.150 mm
D	Comprimento, da junta articulada ao eixo traseiro 3.900 mm
E	Altura de transporte, com mangueiras e compressão de pneus 4.050 mm
F	Vão livre até o solo, no acoplamento da direção 790 mm

Fonte: Komatsu (2022).

Já com relação às especificações técnicas e estruturais do *forwarder*, estas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações técnicas do *forwarder*.

Motor	
Marca	AGCO Power
Potência (kw, rpm)	214,00 1.850,00
Número de cilindros	6
Operacional	
Peso – 8WD (kg)	24.830,00
Capacidade de combustível (L)	245,00
Capacidade de óleo hidráulico (L)	150,00
Transmissão	
Tipo	Mecânico-hidroestático
Força de tração (kN)	262,00
Velocidade máxima (km/h)	23,00
Caixa de Carga	
Capacidade de carga (kg)	22.000,00
Área de carga (m ²)	5,8 à 7,8
Grua	
Modelo	Komatsu 165F
Alcance máximo (m)	10,00
Torque de elevação (kNm)	165,00
Torque de giro (kNm)	43,40
Garra	
Área (m ²)	0,34
Abertura máxima (m)	2,04
Modelo	G84
Carga máxima permitida (kg)	5.000,00
Força de fechamento (kN)	20,20

Fonte: Komatsu (2022).

3.4 COLETA DE DADOS

Para determinação do número ideal de amostras foi utilizado a metodologia proposta por Barnes (1977), onde, primeiramente, realizada amostragem piloto para então, determinar o número mínimo de observações do ciclo, de forma a proporcionar um erro de amostragem máximo de 10% ao nível de probabilidade de 10%. Em seguida, foi determinado o erro amostral de cada operação levando em consideração a produtividade, conforme a Equação 1.

$$E = \frac{(t \times Dp)}{\sqrt{n \times \bar{X}}} \times 100 \quad (1)$$

Onde: E = erro amostral (%); t = t Student ao nível de 10% de probabilidade; Dp = desvio padrão amostral; n = número de amostras; \bar{X} = média da produtividade.

Durante a operação de colheita foi avaliado o tempo consumido de extração e carregamento da madeira realizado pelo *forwarder*, além de contabilizado o número de toras por sortimento em cada ciclo, permitido a correlação com o volume médio de cada sortimento, obtido através do computador de bordo do *harvester*, considerando um total de 8.561 amostras de toras. Relacionado a isso foi coletado dados das covariáveis influentes na operação de extração como declividade e distância de extração.

3.4.1 Análise Operacional da Extração e Carregamento

A análise operacional da extração da madeira ocorreu por meio de estudo de tempos e movimentos ao nível de elementos do ciclo, seguindo a abordagem de modelagem, conforme apresentado por Magagnotti e Spinelli (2012) e Ackerman *et al.* (2014). Os elementos do ciclo que foram avaliados estão apresentados na Tabela 3 conforme descrito por Bonazza (2019).

Tabela 3. Elementos do ciclo de trabalho do *forwarder* na extração de madeira.

Viagem vazio: começa quando o *forwarder* vazio começa a se deslocar para a área de colheita a partir da margem da estrada ou pátio intermediário e termina com o início do primeiro movimento do braço hidráulico para a coleta das toras nas ‘pilhas’ do ramal de extração.

Carregamento: começa com o início do primeiro movimento do braço hidráulico para a coleta das toras nas ‘pilhas’ do ramal de extração e termina quando a viagem carregada para a margem da estrada ou pátio intermediário inicia (grua posicionada sobre a carga como procedimento de segurança).

Viagem durante o carregamento: inclui o movimento do *forwarder* entre as ‘pilhas’ de toras ao longo do ramal de extração, sem o movimento do braço hidráulico. Inicia somente quando a máquina começa a se mover (rodas começam a girar) ao longo do ramal de extração para outras ‘pilhas’ de toras. Esse elemento termina quando o movimento do braço hidráulico inicia em uma nova ‘pilha’ de toras.

Viagem carregado: começa quando a viagem para a margem da estrada ou pátio intermediário com uma carga completa ou concluída inicia e termina com o início do movimento do braço hidráulico para o descarregamento à margem da estrada ou pátio intermediário.

Descarregamento: começa com o início do movimento do braço hidráulico para descarregar as toras do compartimento de carga do *forwarder* e termina com o posicionamento da grua no compartimento de carga da máquina após o término do descarregamento de todas as toras.

Viagem durante o descarregamento: inclui o movimento do *forwarder* entre diferentes pilhas de toras à margem da estrada ou pátio intermediário. Inicia somente quando a máquina começa a se mover (rodas começam a girar) após parte das toras serem descarregadas na(s) pilha(s) à margem da estrada ou pátio intermediário e termina com o início do movimento do braço hidráulico para descarregamento das toras do compartimento de carga em outra(s) pilha(s) de toras.

Interrupções: inicia quando a máquina para de realizar atividades relacionadas ao ciclo de trabalho e termina quando o trabalho recomeça.

Fonte: adaptado de Bonazza (2019).

Já a análise operacional do carregamento ocorreu ao nível de ciclo de trabalho, também seguindo a abordagem de modelagem (Magagnotti e Spinelli, 2012). O ciclo iniciava quando a grua começava a se movimentar para pegar uma certa quantidade de toras e terminava quando a grua retornava ao compartimento de carga do *forwarder* para recomeçar o ciclo.

Para realizar a cronometragem dos tempos foi empregada a técnica de tempo individual, com os tempos coletados através do software WorkStudy versão 7 em tablet e formulários específicos para identificação dos ciclos de trabalho e registro das covariáveis, conforme atividade realizada. A “distância de extração” e “declividade” do terreno foram mensuradas com um TruPulse 200B (Laser Technology, Inc.), sendo consideradas covariáveis na extração de madeira. Além dessas, também foi considerado como covariável o “volume médio por tora”, tanto na extração, quanto no carregamento de veículos de transporte.

A mensuração e caracterização das toras dos diferentes sortimentos foi utilizada uma trena métrica, registrando-se em formulário específico o diâmetro cruzado nas duas pontas da tora, bem como seu comprimento. Esses dados foram utilizados para determinação do volume médio por sortimento utilizando método de cubagem de Smalian conforme Equação 2.

$$V = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) \times L \quad (2)$$

Onde: V = volume médio da tora (m³); g1 e g2 = área basal das duas extremidades da tora (m²); L = comprimento da tora (m).

3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO OPERACIONAL

3.5.1 Classificação dos tempos operacionais

Para obtenção dos indicadores de desempenho operacional, levou-se em consideração a classificação de diferentes tempos medidos durante o estudo, os quais são: horas-máquina programadas (*Schedule Machine Hour*, SMH), horas-máquina disponíveis (*Available Machine Hour*, AMH) e horas-máquina produtivas (*Productive Machine Hour*, PMH). A Tabela 4 mostra as equações utilizadas para a determinação dos tempos citados.

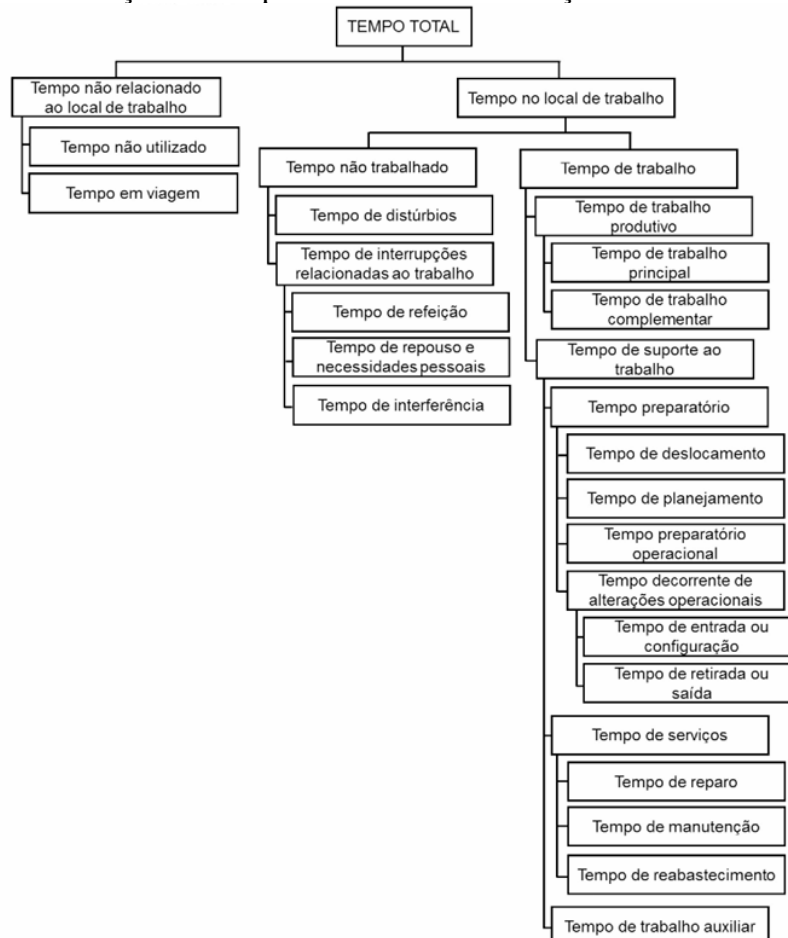
Tabela 4. Cálculo dos tempos operacionais do *forwarder*.

Tempo Operacional	Equações
SMH	PMH+ TM+ OI
AMH	SMH- TM
PMH	SMH- TM-OI

Em que: SMH – horas-máquina programadas; AMH – horas-máquina disponíveis; PMH - horas-máquina produtivas.

Fonte: Autor (2025).

A classificação dos tempos coletados foi definida a partir da classificação proposta por Björheden *et al.* (1995), conforme Figura 3. Foi considerado tempo de trabalho produtivo aquele período em que a máquina está realizando sua função de trabalho principal ou complementar. Já o tempo de trabalho não produtivo está relacionado ao tempo de manutenção do equipamento, interrupções de ordem operacional e não-operacional, como tempo de refeição, repouso, necessidades pessoais ou outras interferências.

Figura 3. Classificação do tempo nos estudos de medição do trabalho florestal.

Fonte: Bonazza (2019) adaptado de Björheden *et al.* (1995).

3.5.2 Indicadores de eficiência no uso do tempo

3.5.2.1 Disponibilidade Mecânica

Este indicador refere-se a aptidão da máquina encontrar-se em perfeitas condições para uso para sua determinada função em um dado intervalo de tempo (Equação 3).

$$DM = \frac{AMH}{SMH} \times 100 \quad (3)$$

Onde: DM = disponibilidade mecânica (%); AMH = horas-máquinas disponíveis (s); SMH = horas-máquina programadas (s).

3.5.2.2 Taxa de utilização do tempo disponível

Este percentual, também chamado de eficiência operacional, indica proporção do tempo disponível para o trabalho que efetivamente é utilizado na execução da operação/trabalho (Equação 4).

$$TU_{TD} = \frac{(AMH-OI)}{AMH} \times 100 \quad (4)$$

Onde: TU_{TD} = taxa de utilização do tempo disponível (%); AMH = horas-máquinas disponíveis (s); OI = outras interrupções (s).

3.5.2.3 Taxa de utilização do tempo programado

Já este indicador, demonstra o percentual do tempo programado de trabalho efetivamente utilizado na execução da operação/trabalho (agregando valor), este percentual é diretamente ligado ao operador e as condições de operação como por exemplo paradas de ordem técnica e operacional, obstáculos no percurso ou deslocamento entre talhões (Equação 5).

$$TU_{TP} = \frac{(AMH-OI)}{SMH} \times 100 \quad (5)$$

Onde: TU_{TP} = taxa de utilização do tempo programado (%); AMH = horas-máquinas disponíveis (s); OI = outras interrupções (s); SMH = horas-máquina programadas (s).

3.5.2.4 Produtividade operacional média

A produtividade média representa a quantidade de um produto gerado em determinado tempo. Este indicador, aliado com os tempos consumidos, são as principais variáveis respostas na medição do trabalho florestal segundo Maganotti e Spinelli (2012). Além disso, esses autores definem a produtividade, como sendo uma relação entre as entradas que são relacionadas a unidades de tempo, e as saídas como unidade de produção como m³, tonelada ou hectare (Equação 6).

$$\text{Prod.média} = \frac{\left(\sum \frac{3600}{TE} \times \text{Vol./ciclo} \right)}{n} \quad (6)$$

Onde: Prod. média = produtividade média (m³ PMH₀⁻¹); Vol./ciclo = volume do ciclo (m³); TE = tempo efetivo do ciclo (s); n = número de ciclos.

3.6 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS

3.6.1 Custos fixos

3.6.1.1 Depreciação

Para determinação deste parâmetro considerou-se o valor de aquisição do equipamento, obtido junto a empresa, sendo este na ordem de R\$ 2.150.340,00 (dois milhões, cento e cinquenta mil, trezentos e quarenta reais).

Além disso, o valor residual da máquina o qual devido à complexidade e grande diferenças em relação a este item, optou-se em utilizar valor comumente encontrado na literatura de 20% conforme apresentado por Proto *et al.* (2018) que avaliaram outros modelos de *forwarders* em seu estudo.

Quanto à vida útil do equipamento expressa em horas produtivas, sem conversão para anos, considerando que o equipamento apresentava aproximadamente 2.000 horas produtivas no início da coleta de dados, e tomando como referência as 30.000 horas produtivas indicadas por Santos *et al.* (2016), definiu-se 28.000 horas produtivas para o presente estudo (Equação 7).

$$DP = \frac{(Va - Vr)}{N \times PMH_0} \quad (7)$$

Onde: DP = depreciação (R\$ PMH_0^{-1}); Va = valor de aquisição (R\$); Vr = valor de revenda (R\$); N = vida útil estimada em anos; PMH_0 = horas-máquina produtivas anualmente (hora ano^{-1}).

3.6.1.2 Pessoal operacional

A determinação deste parâmetro considera-se o número de operadores, neste caso sendo apenas 1 operador. Utiliza-se ainda o salário base do operador de R\$ 6.000,00. Já a taxa com encargos sociais foi obtida considerando décimo terceiro, férias, FGTS e INSS, correspondendo a 28,86% do salário base. É considerado ainda as horas-máquinas produtivas anualmente do equipamento neste caso sendo de 1.731 horas. (Equação 8).

$$PO = N_p \times \frac{[S + (S \times Es)] \times 12}{PMH_0} \quad (8)$$

Onde: PO = pessoal operacional (R\$ PMH_0^{-1}); N_p = número de operadores; S = salário base (R\$); Es = encargos sociais (%); PMH_0 = horas-máquina produtivas anualmente (hora ano^{-1}).

3.6.1.3 Juros e seguros

Para obtenção deste parâmetro é necessário antes calcular o investimento médio anual (IMA) o qual leva em consideração o valor de aquisição e valor residual do equipamento, além de levar em conta a vida útil do equipamento, estimada em anos a qual neste trabalho estimou-se em 16 anos (Equação 9).

$$IMA = \frac{(Va - Vr) \times (N + 1)}{2 \times N} + Vr \quad (9)$$

Onde: IMA = investimento médio anual (R\$); Va = valor de aquisição (R\$); Vr = valor de revenda (R\$); N = vida útil estimada (anos);

Em seguida, calcula-se os juros e seguros, utilizando como base uma taxa destinada a esta categoria de custo, sendo este o percentual de 7,5% conforme fornecido pela empresa, considerando ainda as horas-máquinas programadas anualmente (Equação 10).

$$JS = \frac{(IMA \times i)}{PMH_0} \quad (10)$$

Onde: JS = juros e seguros (R\$ PMH_0^{-1}); IMA = investimento médio anual (R\$); i = taxa com juros e seguros (%); PMH_0 = horas-máquina produtivas anualmente (hora ano^{-1}).

3.6.2 Custos variáveis

3.6.2.1 Combustível

O consumo médio de óleo diesel foi obtido através dos dados fornecido pelo computador de bordo do *forwarder* em estudo, onde foi possível encontrar consumo médio de deslocamento o qual foi utilizado para análise da extração, assim como consumo médio para movimentação de grua empregado na análise do carregamento, sendo estes de 15,5 L PMH_0^{-1} e 7,0 L PMH_0^{-1} respectivamente.

O preço do óleo diesel considerado foi de R\$ 6,60 por litro, conforme valor cobrado pelo posto fornecedor da empresa onde realizou-se o presente trabalho (Equação 11).

$$CC = Pu \times c \quad (11)$$

Onde: CC = custo com combustível (R\$/ PMH_0); Pu = preço por litro de óleo diesel (R\$/L); c = consumo de óleo diesel por hora efetiva (L PMH_0^{-1}).

3.6.2.2 Custo com óleo lubrificante e graxas

O valor gasto com óleo lubrificante foi determinado com base em informações fornecidas pela fabricante Komatsu, em relação as especificações técnicas de revisão e custos aplicados na manutenção do *forwarder* em estudo.

Diante disso foi calculado o custo (R\$ PMH_0^{-1}) para cada categoria de óleo lubrificante, levando em consideração o tempo em que se é feito a troca ou revisão, capacidade armazenamento e seu respectivo valor de balde com 20 L conforme Tabela 5 (Equação 12).

Tabela 5. Informações técnicas de óleos lubrificantes.

Revisão 500 Horas - Forwarder 895	Capacidade de Armazenamento (L)	R\$/20 L
Óleo motor	20	346,78
Óleo caixa transferência	6	459,90
Diferencial dianteiro	18	1.289,90
Diferencial traseiro	18	1.289,90
Redutor do cubo do tanden	5	459,90
Carcaça giro da grua	15	459,90
Revisão 2000 Horas - Forwarder 895		
Carcaça do bogie	220	1.289,90

Fonte: Autor (2025).

$$OL = \frac{((Vb/20) \times C)}{R} \quad (12)$$

Onde: OL = óleos lubrificantes (R\$ PMH_0^{-1}); Vb = valor balde (R\$ 20 L^{-1}); C = capacidade armazenamento (L); R = horas de revisão (Horas).

Já para determinação do consumo com graxa, considerou-se o valor obtido na literatura de 0,8 kg a cada 10 horas, conforme demonstrado por Malinovski *et al.* (2016). Para obtenção do custo, foi considerado um valor médio de R\$ 1.010,00 em quantidade de 20L obtido na internet, tendo assim R\$ 50,50/L. Utilizou-se ainda a vida útil estimada em 28.000 PMH_0 (Equação 13).

$$G = \frac{((Vu \times Co)/10) \times V}{Vu} \quad (13)$$

Onde: G = graxa (R\$ PMH_0^{-1}); Vu = vida útil (PMH_0); Co = consumo (kg/10h); V = valor da graxa (R\$ L^{-1}).

3.6.2.3 Óleo hidráulico

O custo horário do óleo hidráulico foi determinado a partir informação passada por equipe técnica da fabricante Komatsu, como o consumo médio de 0,34 L PMH_0^{-1} e do valor de R\$ 599,90 por tambor de 20 L, resultando em custo de R\$ 29,99/L (Equação 14).

$$OH = Pu \times c \quad (14)$$

Onde: OH = óleo hidráulico (R\$/ PMH_0); Pu = preço por litro (R\$/L); c = consumo de óleo hidráulico por hora efetiva (L PMH_0^{-1}).

3.6.2.4 Material rodante

Para determinação do custo com material rodante (R\$ PMH_0^{-1}), considerou-se valor de aquisição de cada pneu, obtido pela empresa de R\$ 35.264,73. A vida útil estimada em 8.000 horas de cada pneu, foi determinado junto a fabricante, assim como número de 8 pneus que compõem o *forwarder*. Foi considerado ainda as horas-máquinas produtivas anualmente (Equação 15).

$$MR = \frac{((PMH_0/Hr) \times Nr) \times Vp}{PMH_0} \quad (15)$$

Onde: MR = material rodante (R\$ PMH_0^{-1}); PMH_0 = horas-máquina produtivas anualmente (horas); Hr = vida útil de um pneu (anos); Nr = número de rodados; Vp = valor de um pneu (R\$).

3.6.2.5 Manutenção

O custo com manutenção (R\$ PMH_0^{-1}), é determinado com base no percentual do valor da depreciação, sendo assim levou-se em consideração valor obtido na literatura, sendo este de 100%, conforme proposto por Brinker *et al.* (2002) (Equação 16).

$$MAN = IME \times DP \quad (16)$$

Onde: MAN = manutenção (R\$ PMH_0^{-1}); IME = índice de manutenção em função da depreciação (%); DP = depreciação (R\$ PMH_0^{-1}).

3.6.3 Custo administrativo

O custo com administração do equipamento (R\$ PMH_0^{-1}), é obtido utilizando somatório das categorias de custos fixos e variáveis, bem como taxa de administração de 5% em relação ao salário base, fornecido pela empresa (Equação 17).

$$CA = (CF+CV) \times TA \quad (17)$$

Onde: CA = custo administrativo (R\$ PMH_0^{-1}); CF = custos fixos (R\$/ PMH_0); CV = custos variáveis (R\$/ PMH_0^{-1}); TA = taxa de administração (%).

3.6.4 Custo operacional horário

O custo operacional horário do *forwarder* (R\$ PMH_0^{-1}), foi determinado utilizando os custos fixos, variáveis e administrativos (Equação 18).

$$CH = CF+CV+CA \quad (18)$$

Onde: COH = custo operacional horário (R\$ PMH_0^{-1}); CF = custos fixos (R\$ PMH_0^{-1}); CV = custos variáveis (R\$ PMH_0^{-1}); CA = custo administrativo (R\$ PMH_0^{-1}).

3.6.5 Custo de produção

O custo de produção (R\$/m³) para operações de extração e carregamento do *forwarder*, foi determinado levando em consideração o custo operacional horário e a produtividade cada atividade (Equação 19).

$$CP = \frac{COH}{Prod.} \quad (19)$$

Onde: CP = custo de produção (R\$ m⁻³); COH = custo operacional horário (R\$ PMH₀⁻¹); Prod. = produtividade média (m³ PMH₀⁻¹).

3.7 ANÁLISE DE DADOS

Os dados de consumo do tempo após coletados, foram importados para arquivos Excel, onde procedeu a organização destes dados em planilhas, bem como o processamento dos cálculos referente aos indicadores de desempenho operacional, determinação dos custos, erros amostrais e demais estatísticas descritivas como valores máximos, mínimos, médias e coeficientes de variação, visando identificar comportamento das variáveis avaliadas da extração e do carregamento.

Com relação aos dados da mensuração dos sortimentos registrados em planilhas físicas, estes foram digitalizados para planilhas digitais também em Excel, onde realizou-se toda estatística descritiva de cada sortimento bem como a obtenção de seus respectivos volumes médios individuais e depois correlacionados com cada operação procedendo assim as demais análises.

Além disso, foi empregado uso do software estatístico R Studio para geração de gráficos que permitem a melhor representação visual dos resultados obtidos. Visto que os dados atenderam a normalidade, realizou-se também a análise dos efeitos das variáveis “distância de extração”, “declividade” e “volume médio por tora”, por meio de Modelo Linear Geral (GLM) adotando nível de significância de 5% (p<0,05).

Utilizou-se ainda o software R Studio para determinar a correlação de Pearson e avaliar a influência e significância da “distância de extração” sobre o tempo total do ciclo.

As equações ajustadas foram avaliadas por meio do R², do erro de syx (%) e pela análise gráfica de seus resíduos.

3.8 CENÁRIOS DE ABASTECIMENTO INDÚSTRIAL

Com o objetivo de analisar a produtividade do *forwarder* e identificar a melhor combinação de horas destinadas às atividades de extração e carregamento, foram projetados diferentes cenários operacionais.

Realizou-se, portanto, a projeção de 5 cenários, com diferentes proporções de configurações de horários de execução de cada operação considerando a produção diária, mensal e anual do equipamento na realização de cada atividade, além de um turno diário de 10 horas programadas (SMH), com 20 dias úteis de trabalho por mês e 11,5 meses trabalhados anualmente. A restrição adotada nos cenários foi o limite diário de 10 horas de trabalho programado (Tabela 6).

Tabela 6. Horas despendidas por cada atividade conforme cenário projetado.

Cenários de operação	Extração	Carregamento
	Duração (h dia ⁻¹)	Duração (h dia ⁻¹)
Cenário A	5	5
Cenário B	6	4
Cenário C	8	2
Cenário D	10	-
Cenário E	7	3

Em que: h = horas
Fonte: Autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ERRO AMOSTRAL

O erro amostral para atividade de extração foi de 8%, enquanto que no carregamento observou-se erro de 6%, em ambas as atividades se nota que o erro foi menor do que o estabelecido de 10%. Desta forma estas análises trazem confiabilidade e segurança aos dados utilizados no presente trabalho.

4.2 ESTATÍSTICA DOS SORTIMENTOS

Esses indicadores permitem avaliar a variabilidade dos volumes e a homogeneidade dos sortimentos, caracterizando a composição volumétrica da madeira processada na operação fornecendo subsídios para a análise do desempenho operacional do *forwarder* (Tabela 7).

Tabela 7. Estatística descritiva dos sortimentos estudados.

Sortimentos	Classe de Diâmetro (cm)	Média (m ³)	Desvio padrão (m ³)	Mín (m ³)	Máx (m ³)	CV (%)	n ° amostras
1	>35	0,359	0,102	0,217	0,669	28,4	30
2	25 a 35	0,172	0,028	0,123	0,228	16,3	30
3	18 a 25	0,103	0,030	0,066	0,195	28,6	30
4	<18	0,045	0,016	0,017	0,074	34,4	30

Em que: CV = coeficiente de variação.

Fonte: Autor (2025).

É possível notar que o sortimento 1 possui a maior média volumétrica, dado suas maiores dimensões, por corresponder a toras da base das árvores. Enquanto que sortimento 4, referente as toras das pontas finas são as que apresentam o menor volume médio individual, e a maior variabilidade em sua composição. Já o sortimento 2 demonstra o menor coeficiente de variação, indicando assim toras mais homogêneas nesta classe.

4.3 INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DO TEMPO

A Tabela 8, demonstra os indicadores de eficiência no uso do tempo para a extração e o carregamento obtidos no presente estudo.

Tabela 8. Indicadores operacionais de uso do tempo.

Operação	DM (%)	TU_{TP} (%)	TU_{TD} (%)
Extração	91,3	86,0	78,6
Carregamento	82,5	69,5	57,4

Em que: DM – Disponibilidade mecânica; TU_{TD} – Taxa de utilização do tempo disponível;

TU_{TP} – Taxa de utilização do tempo programado.

Fonte: Autor (2025).

Através da Tabela 8 observa-se que na atividade de extração, os indicadores DM e TU_{TP} apresentaram valores elevados, condizente com as condições de trabalho e com a função específica para a qual o equipamento foi projetado, bem como a TU_{TP} superior do percentual de 70,0% considerado como aceitável para Machado (1989). Já a DM e TU_{TP} inferior no carregamento, podem estar associadas às interrupções decorrentes pelas trocas e manobras de caminhões durante a operação.

Autores como De Oliveira, Da Silva Lopes e Fiedler (2009), obtiveram valores para TU_{TP} de 70,0% na extração de toras de *Pinus taeda*, inferior a porcentagem encontrada nesse estudo. Além disso, os autores apresentam DM de 89%, próximo ao valor do presente trabalho. Já Robert (2013) apresentou uma TU_{TP} de 69,4 e 60,7%, sendo inferiores ao demonstrado na Tabela 8, o autor demonstra ainda, uma DM de 88,2 e 93,6%, próxima daquela encontrada neste trabalho.

Linhares (2012), encontrou o valor médio para DM de 92,0% e para TU_{TP} média de 82,2% que se aproximam ao do presente estudo. Já Ferreira *et al.* (2025) demonstrou percentual de 80,4%, embora inferior é compatível com o valor constatado neste trabalho. Linger (2017) relatou uma TU_{TP} de 92,8% sendo esta superior ao presente estudo. Além disso, o autor demonstrou DM de 75,0 e 67,0%, ambos abaixo do valor apresentado na Tabela 8 para o mesmo indicador, no entanto o percentual de 98,0% mostrou-se superior ao encontrado nesta avaliação.

Dvorák *et al.* (2021) encontraram uma TU_{TP} entre 64,4 e 74,3% durante os anos de 2006 e 2019, valores inferiores ao obtido no presente trabalho. Já Masioli *et al.* (2023) apresentaram percentual de 82,6%, enquanto Rodrigues *et al.* (2018) relataram valor de 84,0%, valores que apesar de inferior aproxima-se ao encontrado no presente estudo.

Com relação ao carregamento, devido ausência de trabalhos avaliando carregamento feito por *forwarders*, buscou-se na literatura trabalhos avaliando carregadores florestais. Diniz *et al.* (2018) demonstraram uma TU_{TP} de 59,7%, valor este inferior ao obtido no presente estudo, já Fiedler *et al.* (2008) obtiveram uma DM de 96,8% sendo esta consideravelmente superior ao valor obtido para o *forwarder* avaliado, o autor cita ainda uma TU_{TP} de 40,3%, a qual é consideravelmente inferior do percentual obtido no presente estudo.

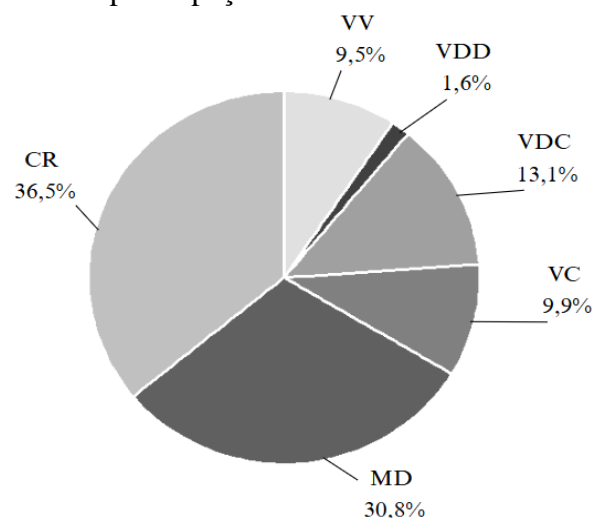
Já Masioli *et al.* (2023) apresentaram TU_{TP} de 75,0% superior ao demonstrado no presente trabalho. Enquanto que Simões *et al.* (2012) apresentam DM de 70,0% e percentual de TU_{TP} de 82,0% valores próximos ao demonstrado na Tabela 8.

Santos *et al.* (2009) mostraram uma TU_{TP} de 31,4 e 38,4%, já Rocha *et al.* (2009) apresentam percentual de 40,3%. Esses resultados mostram-se significativamente inferiores à taxa apresentada na Tabela 8. Segundo os autores, este baixo desempenho foi ocasionado pelo elevado tempo em que a máquina permaneceu aguardando os veículos de transporte principal. De forma semelhante ao observado no presente estudo, essa foi uma das principais causas de interrupções no ciclo operacional.

4.4 COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS CICLOS DA EXTRAÇÃO

A constituição média dos ciclos operacionais do *forwarder* são demonstrados na Figura 4. Estes valores correspondem a uma distância de extração média de 271,3 m nos ciclos avaliados, sendo esta superior ou próxima das distancias de extração relatadas na literatura.

Figura 4. Percentual de participação dos elementos do ciclo na extração.



Em que: CR = Carregamento; MD = Manobra de descarregamento; VC = Viagem carregado; VDC = Viagem durante carregamento; VDD = Viagem durante descarregamento; VV = Viagem vazio.

Fonte: Autor (2025).

Conforme Figura 4, a atividade de carregamento foi a mais representativa do ciclo, seguido da manobra de descarregamento. Em comparação, viagens durante o descarregamento apresentou menor percentual de participação do ciclo operacional, devido a característica particular da operação, em que na maioria das vezes o descarregamento era feito diretamente no compartimento de carga dos veículos de transporte principal, não necessitando assim de deslocamento durante do descarregamento.

Já viagem carregado, viagens durante descarregamento e viagem vazio obtiveram uma representatividade muito próximas entre si.

Minette *et al.* (2004) apresentaram percentuais de carregamento na participação do ciclo de 52,8, 53,3, e 65,2%. Assim como Oliveira *et al.* (2009), demonstram para o carregamento e para o descarregamento um consumo do tempo total do ciclo de 34,9 e 20,5% respectivamente.

Além de percentuais próximos ao presente estudo, estes valores demonstraram que ambas as atividades ocupam a maior parte do tempo do ciclo estando de acordo com demonstrado neste trabalho. Por outro lado, Linger (2017), observou percentuais de ocupação do ciclo para o carregamento de 47,9, 49,4 e 57,3%. Com relação ao descarregamento o autor demonstra percentuais de 29,2, 35,0 e 36,8%. Valores estes que expressam sua representatividade superior em relação aos outros elementos que compõem o ciclo, em concordância com o registrado no presente (Figura 4).

Gagliardi *et al.* (2020) também demonstraram o carregamento ocupando a maior parte do ciclo com percentual de 53% seguido do descarregamento com 27% do ciclo total. No entanto Rodrigues *et al.* (2017), que reportaram percentuais de 15,8 e 17,3% para carregamento e 9,3 e 8,2% para descarregamento. Posto isso, leva-se em consideração adotar estratégias de aprimoramento da etapa de carregamento no ciclo de extração.

4.5 INDICADORES DE DESEMPENHO OPERACIONAL

As variáveis estudadas, bem como suas respectivas estatísticas descritivas em ambas operações, estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9. Estatística descritiva das operações.

Extração				
Váriavel	Média	Mín	Máx	CV%
VV (s)	193,5	66,4	415,3	42,9
CR (s)	744,0	210,1	1.630,9	34,4
VDC (s)	266,3	27,8	565,0	56,3
VC (s)	201,2	17,2	645,0	60,6
MD (s)	627,1	103,0	1.131,6	36,0
VDD (s)	32,8	3,5	74,2	78,3
TT.ef (s)	2036,1	891,0	2.974,7	24,3
Prod. (m ³ PMH ₀ ⁻¹)	30,42	15,12	46,91	28,4
Vol/Tora (m ³)	0,178	0,052	0,314	35,7
Vol/Ciclo (m ³)	17,032	4,085	27,326	33,5
DE (m)	271,3	57,0	465,0	36,2
Declividade ° (aclave)	9,5	5,3	18,0	32,6
Carregamento				
TT.ef (s)	32,5	4,6	71,9	38,5
Prod. (m ³ PMH ₀ ⁻¹)	86,92	8,12	340,72	55,7
Vol/Tora (m ³)	0,160	0,045	0,359	61,8
Vol/Ciclo (m ³)	0,680	0,090	1,440	37,6

Em que: CR = Carregamento; MD = Manobra de descarregamento; VC = Viagem carregado; VDC = Viagem durante carregamento; VDD = Viagem durante descarregamento; VV = Viagem vazio; TT.ef = Tempo total efetivo; Prod. = Produtividade média; DE = Distância de extração; Vol/tora = Volume médio por tora; Vol/Ciclo = Volume médio por ciclo

Fonte: Autor (2025).

Com relação aos elementos do ciclo da extração, é possível notar que VDD teve o maior coeficiente variação (CV = 78,3%), evidenciando a heterogeneidade operacional nessa etapa. Em contrapartida, o elemento CR obteve menor variabilidade dentro do ciclo, indicando padronização e estabilidade nesta atividade.

Segundo Gomes e Garcia (2002), é possível categorizar o grau de dispersão de um parâmetro utilizando o coeficiente de variação (CV%), considerando como baixo quando igual ou inferior a 10%, moderado entre 10% e 20%, elevado de 20% a 30% e extremamente elevado acima de 30%.

Desta maneira as variáveis “declividade”, “distancia de extração” e “volume médio por tora”, observa-se elevada variabilidade, inferindo complexidade operacional. Tais resultados reforçam a importância de se considerar essas variáveis no planejamento e na tomada de decisão, especialmente para otimização da produtividade e redução de custos operacionais.

Na atividade de carregamento nota-se uma alta variabilidade em seu TT.ef, indicando que não há padronização nos ciclos operacionais. Essa instabilidade está associada com a alta variabilidade registrada no “volume médio por tora” nesta operação, influenciando o tempo consumido em função da organização e acomodação das toras no compartimento de carga dos veículos de transporte.

Na extração, Oliveira *et al.* (2009) registraram as maiores produtividades média de 39,0 e 34,8 m³ PMH₀⁻¹. Já Rodrigues *et al.* (2017) demonstraram produtividades médias de 37,0 e 37,6 m³ PMH₀⁻¹ também na extração de toras de *Pinus taeda*. Valores superiores ao encontrado neste trabalho, em função dos maiores volumes dos sortimentos e das menores distâncias de extração (Tabela 9).

Robert (2013) obteve produtividades de 31,79 m³ PMH₀⁻¹ e 36,21 m³ PMH₀⁻¹, em áreas de relevo acidentado, ao passo que Masioli *et al.* (2023) apresentaram produtividade de 55,40 m³ PMH₀⁻¹, assim como Gagliardi *et al.* (2020) identificaram produtividade de 45,85 m³ PMH₀⁻¹, enquanto Ferreira *et al.* (2025) reportaram produtividades entre 42,76 e 60,97 m³ PMH₀⁻¹, valores superiores a produtividade obtida no presente trabalho devido as melhores características de relevo dos trabalhos da literatura.

Fielder *et al.* (2017) encontraram produtividades médias de 47,65 e 55,01 m³ PMH₀⁻¹. Enquanto Linger (2017) observou produtividades médias de 48,1, 61,7 e 50,3 m³ PMH₀⁻¹. As maiores produtividades em relação à Tabela 9 resulta da avaliação de apenas duas classes de diâmetro, elevando o desempenho dos *forwarders* da literatura.

Para operação de carregamento, Fiedler *et al.* (2008) constataram uma produtividade média de 94,7 m³ PMH₀⁻¹. Por sua vez Lima *et al.* (2025) encontraram uma produtividade média de 185,51 m³ PMH₀⁻¹, por outro lado Masioli *et al.* (2023) obtiveram produtividade média de 146,8 m³ PMH₀⁻¹. Estes valores superiores ao encontrado no presente estudo, deve-se em função da maior área útil da garra em comparação aquela avaliada neste trabalho.

Simões *et al.* (2009) reportaram uma produtividade média de 94,75 m³ PMH₀⁻¹, apesar de próximo, este valor ainda é superior ao resultado encontrado (Tabela 9). No entanto os autores trazem uma produtividade máxima de 120,10 m³ PMH₀⁻¹, sendo esta inferior à produtividade máxima encontrada para o presente estudo.

4.6 CUSTOS OPERACIONAIS

Os custos das atividades de extração e carregamento com *forwarder* são descritos na Tabela 10.

Tabela 10. Custos das operações de extração e carregamento.

Categoria de Custo	Extração		Carregamento	
	(R\$ PMH ₀ ⁻¹)	(%)	(R\$ PMH ₀ ⁻¹)	(%)
Custos Fixos				
Depreciação	61,41	15,6	61,41	18,3
Pessoal operacional	38,66	9,8	38,66	11,5
Juros e seguros	49,43	12,5	49,43	14,7
Custos Variáveis				
Combustível	101,32	25,7	45,77	13,6
Óleo lubrificantes e graxas	17,67	4,5	17,67	5,3
Óleo hidráulico	10,20	2,6	10,20	3,0
Material rodante	35,26	8,9	35,26	10,5
Manutenção	61,41	15,6	61,41	18,3
Custos administrativos	18,77	4,8	16,00	4,8
Custo operacional horário	394,12	100	335,80	100
Custo de produção (R\$ m⁻³)	12,96		3,86	

Em que: PMH₀ = horas produtivas; R\$ = reais; m³ = metro cúbico; % = porcentagem.

Fonte: Autor (2025).

Com relação à extração, nota-se custo operacional horário de R\$ 394,12 PMH₀⁻¹, além disso o custo maior representatividade inerente ao combustível com 25,7% do custo operacional horário, seguido da depreciação e manutenção com 15,6% e custos com juros e seguros representando 13,7%.

Já no carregamento, verifica-se o custo operacional horário de R\$ 335,80 PMH₀⁻¹, a depreciação e manutenção detém do maior valor representando 18,3% do custo total, seguido do custo com juros e seguros que compõem 14,7%, e custo do combustível com 13,6%, sendo estes os componentes mais representativos do custo operacional horário. Além disso, tem-se um custo de produção de 12,96 e 3,86 R\$ m⁻³ para extração e carregamento respectivamente.

Bonazza (2019) avaliando *forwarder* também em corte final de *Pinus taeda* L. apresentou as maiores representatividades de custos para combustível (24,3%), seguido da depreciação (24,1%), manutenção (16,9%) e pessoal operacional (16,2%) com custo médio de produção de 5,65 R\$ m⁻³. Esses valores são inferiores ao encontrado neste trabalho (Tabela 9), em função dos custos de combustível, valor de aquisição, dentre outros custos utilizados pelo autor, sobretudo devido ao maior volume médio por tora.

Por outro lado, Oliveira *et al.* (2009), observaram um custo médio de produção de 6,84 R\$ m⁻³, ao passo que Masioli *et al.* (2023) encontraram custos de produção de 7,66 e 2,50 R\$

m^{-3} para extração e carregamento respectivamente, sendo estes valores também inferiores ao obtido neste trabalho.

Oliveira *et al.* (2009), obtiveram um custo operacional por hora efetiva de 209,13 R\$ PMH_0^{-1} e um custo de produção médio de 6,84 R\$ m^{-3} , valores abaixo daqueles apresentados no presente estudo (Tabela 10). Nos custos variáveis, manutenção e reparos representaram 27,3%, combustíveis 12,4% e administrativos 8,9%.

Já Santos *et al.* (2016) demonstram manutenção e reparos, mão-de-obra, combustível e depreciação, sendo estes valores da ordem de 57,7, 17,0, 8,8 e 8,3% respectivamente. O autor apresenta ainda custos com juros sobre capital investido, seguro, taxas administrativas, lubrificantes e graxas, óleo hidráulico, material rodante, corresponderam juntos a 8,1%. Já no presente trabalho estas mesmas categorias de custos representam juntas 35,9% do custo operacional total.

Robert (2013) identificou a maior representatividade nos custos de manutenção e reparos (37,5%), depreciação (17,0%) e combustível (13,5%), sendo o custo de manutenção expressivamente superior ao do presente estudo, enquanto a depreciação apresentou valor semelhante e o combustível inferior.

Assim como, Ferreira *et al.* (2025) observaram maiores percentuais em manutenção (33,6%) e mão de obra (22,3%), ambos acima dos verificados neste estudo, enquanto depreciação (14,3%) e combustível (10,1%) foram inferiores (Tabela 10).

Simões *et al.* (2012), ao avaliar um carregador florestal, encontrou um custo de produção de 1,34 R\$ t^{-1} , em contrapartida, Bonazza (2019) demonstrou custo de produção de 1,77 R\$ m^{-3} além de as maiores representatividades observadas para pessoal operacional (27,9%) e combustível (26,7%), ambos valores inferiores ao obtido neste estudo (Tabela 10). A superioridade do custo de produção do presente trabalho em relação a literatura, ocorre em função da menor área da grua do *forwarder*.

No entanto, Rocha *et al.* (2009) observaram um custo de produção igual a 4,28 R\$ m^{-3} , sendo o custo com mão-de-obra com maior representatividade (65,7%) seguido do percentual de combustível (7,5%) valores superiores ao do presente estudo para operação de carregamento do *forwarder* (Tabela 10).

As diferenças dos valores encontrados na literatura em comparação com os resultados obtidos no presente estudo, estão relacionadas a uma diversidade de fatores, como marca e modelo da máquina avaliada, despesas de cada cenário de estudo, dentre outros. Além disso, a conjuntura econômica do país nos diferentes anos de ambos os estudos, bem como a inflação, influencia diretamente nos custos obtidos.

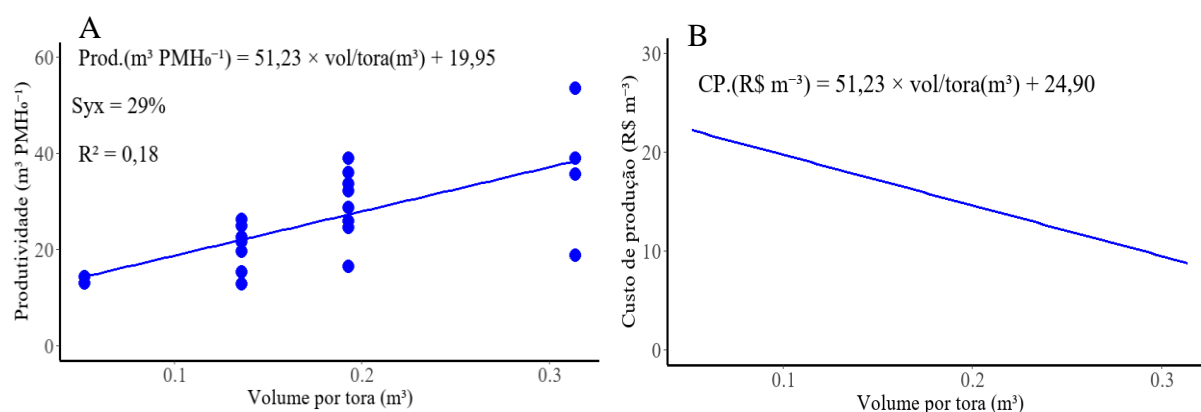
4.7 VARIÁVEIS INFLUENTES NO DESEMPENHO E CUSTOS

4.7.1 Extração

Para esta atividade somente ciclos que tiveram a extração de um único sortimento apresentaram relação significativa com o “volume médio por tora”, excetuando-se aqueles em que mais de um sortimento foi extraído por ciclo de trabalho. A variável “volume por tora” apresentou valor-p de 0,04 demonstrando sua influência na produtividade desta atividade.

O comportamento da produtividade e do custo de produção em função do volume por tora na atividade de extração é ilustrado na Figura 5.

Figura 5. Produtividade (A) e custo de produção (B) em função do “volume médio por tora”.



Em que: PMH_0 = horas produtivas; m^3 = volume.

Fonte: Autor (2025).

Santos *et al.* (2016) ao estimarem o custo de produção do *forwarder*, obteve R^2 de 0,70. De forma semelhante, Bonazza (2019), apresenta R^2 ajustado de 0,69. valores superiores ao observado no item A (Figura 5). Essa diferença pode estar relacionada ao uso de múltiplas variáveis preditoras e ao maior número de observações consideradas nos estudos citados.

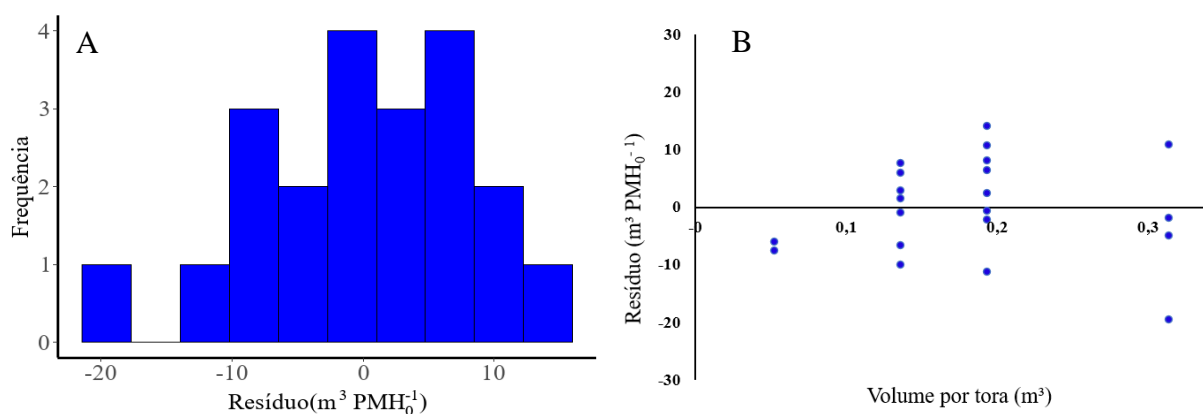
Já Leite *et al.* (2014) relataram um valor de R^2 igual a 0,89, este resultado é superior em comparação ao valor do presente trabalho. Em comparação, Gagliardi *et al.* (2020) e Masioli *et al.* (2023) estimaram a produtividade do *forwarder*, obtendo R^2 ajustados de 0,43 e 0,85, respectivamente. Enquanto que Ferreira *et al.* (2025), por sua vez, alcançaram R^2 de 0,92, ao passo que Rodrigues *et al.* (2017), obteve R^2 ajustado de 0,64.

De modo geral, observa-se que as estimativas reportadas na literatura apresentaram maior eficiência em comparação ao modelo desenvolvido no presente estudo, o que se deve principalmente a diferença de quantidade e origem de variáveis preditoras utilizadas, bem como

maior número amostral observado na literatura. Além disso, o erro de syx de 29% do modelo não inviabiliza seu uso.

Conforme Figura 6 é possível verificar os pressupostos da regressão da produtividade da extração.

Figura 6. Histograma (A) e dispersão (B) dos resíduos em função do “volume médio por tora” para a extração.



Em que: PMH_0 = horas produtivas; m^3 = volume.

Fonte: Autor (2025).

De acordo com o item A da Figura 6, nota-se que há tendência a normalidade dos resíduos da regressão da produtividade, bem como observa-se alta heterocedasticidade dos resíduos conforme item B da Figura 6, porém o gráfico ressalta a influência da variável dependente volume por tora sob a variável independente produtividade.

Com relação as variáveis “distância de extração” e “declividade” estas não foram significativas, apresentando valor p de 0,83 e 0,21, respectivamente, portanto não havendo influência destas variáveis sob a produtividade e custo de produção da extração neste estudo.

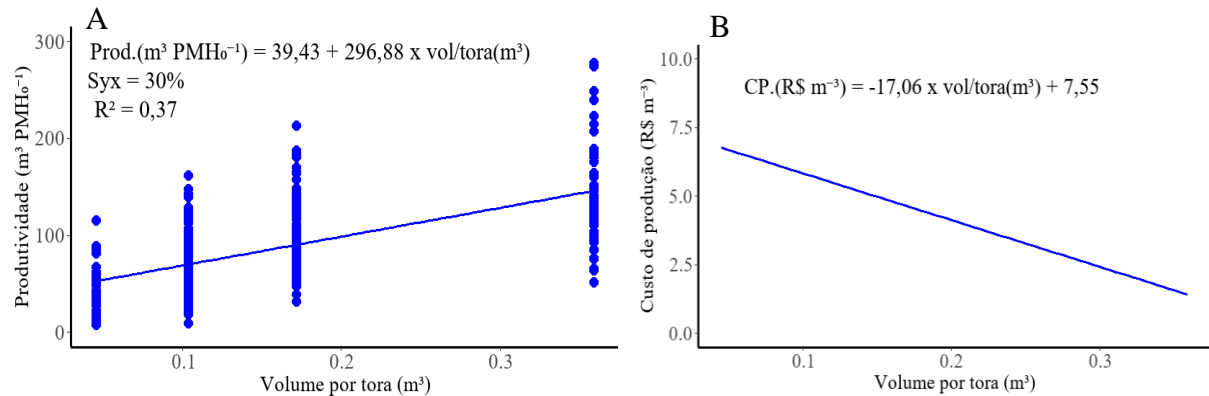
Embora a “distância de extração” não tenha sido significativa para produtividade, esta variável mostrou-se significativa para o tempo total do ciclo apresentando correlação de Pearson de $r = 0,52$ com valor-p de 0,01. Este resultado demonstra a importância de considerar a “distância de extração” no planejamento do corte final, visto que seu aumento reflete significativamente no aumento do tempo total do ciclo de extração do *forwarder*.

Os resultados da literatura corroboram este estudo, Rodrigues *et al.* (2017) identificaram forte correlação entre tempo total do ciclo e distância de extração ($r = 0,74$; $p < 0,01$), enquanto Bonazza (2019) também verificou relação significativa com as viagens vazio e carregado ($r = 0,40$ e $0,42$; $p < 0,01$). Da mesma forma, Strandgard *et al.* (2017) relataram a influência da distância sobre o tempo total do ciclo.

4.7.2 Carregamento

A relação entre a produtividade e o custo de produção em função do volume por tora na atividade de carregamento é demonstrado na Figura 7.

Figura 7. Produtividade (A) e custo de produção (B) do carregamento de veículos de transporte em função do “volume médio por tora”.



Em que: PMH₀ = horas produtivas; m³ = volume.

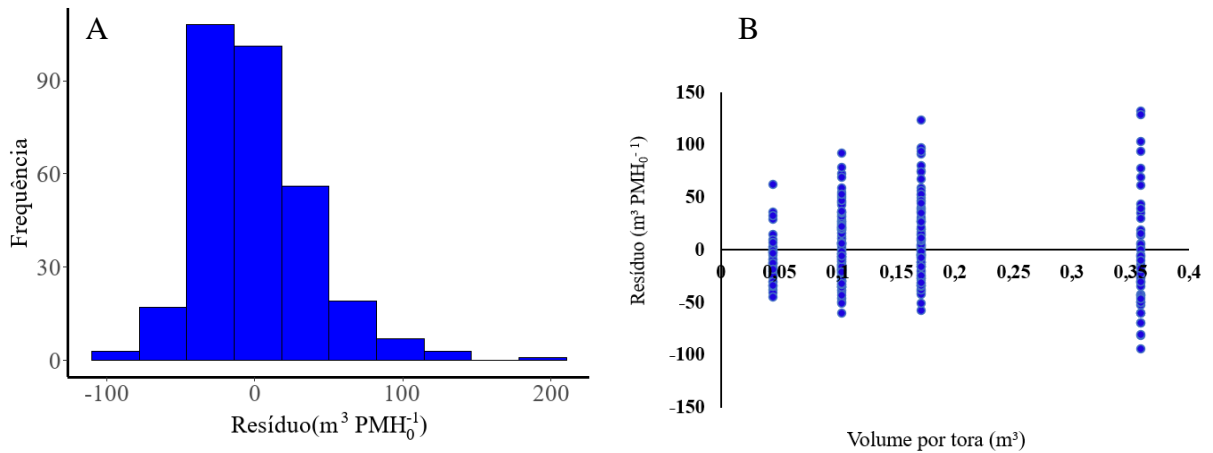
Fonte: Autor (2025).

Rocha *et al.* (2009) ao estimar produtividade de um carregador florestal, observaram R² igual a 0,56, valor superior ao ilustrado no item A (Figura 7). Já trabalhos como de Lima *et al.* (2025), obtiveram um valor de R² igual a 0,95.

A diferença de eficiência entre a equação encontrada na literatura e a do presente estudo pode ser atribuída tanto ao menor número de variáveis preditoras, limitado ao volume por tora, quanto ao reduzido número de observações consideradas, fatores que justificam a menor capacidade explicativa obtida neste trabalho. Apesar do modelo apresentar um erro de suas estimativas de syx de 30%, sua utilização não é inviabilizada desde que haja atenção a sua replicação.

Através da Figura 8 verifica-se os pressupostos da regressão da produtividade do carregamento.

Figura 8. Histograma (A) e dispersão (B) dos resíduos em função do “volume médio por tora” para o carregamento.



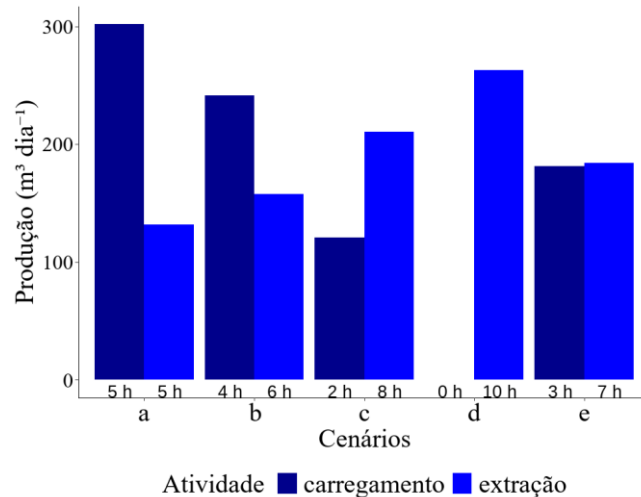
Em que: PMH_0 = horas produtivas; m^3 = volume.
Fonte: Autor (2025).

Conforme Figura 8, nota-se comportamento dos resíduos tendendo a normalidade (A), ao passo que demonstram alta heterogeneidade na sua variância (B), principalmente para toras com maiores volumes, porém reforçando a influência desta variável sob a produtividade do equipamento.

4.8 CENÁRIOS DE ABASTECIMENTO INDUSTRIAL

Conforme Figura 9, é possível verificar a produção diária do *forwarder* de acordo com as horas investidas em cada atividade dos diferentes cenários.

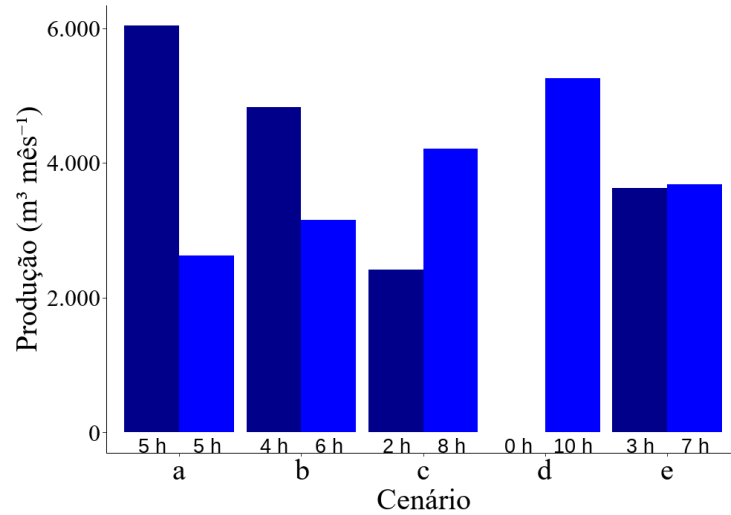
Figura 9. Produção diária em cada atividade conforme cenário.



Em que: m^3 = volume de produção; h = horas.
Fonte: Autor (2025).

Já na Figura 10, apresenta-se a produção mensal do *forwarder* em função das horas alocadas a cada atividade nos cenários avaliados.

Figura 10. Produção mensal em cada atividade conforme cenário.



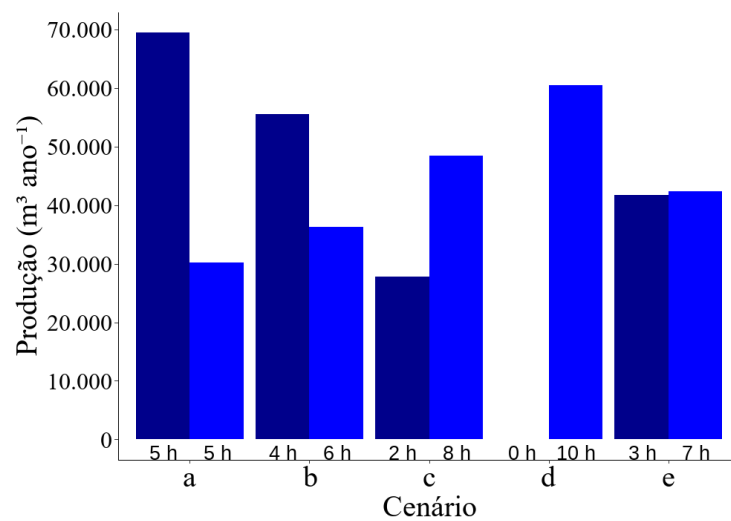
Operação ■ carregamento ■ extração

Em que: m³ = volume de produção; h = horas.

Fonte: Autor (2025).

Na Figura 11, é demonstrado a produção anual do *forwarder* de em função das horas destinadas a cada atividade nos diferentes cenários.

Figura 11. Produção anual em cada atividade conforme cenário.



Atividade ■ carregamento ■ extração

Em que: m³ = volume de produção; h = horas.

Fonte: Autor (2025).

Conforme as Figuras 9, 10 e 11, no cenário A apesar do *forwarder* despender seu tempo de maneira igual para as atividades de carregamento e extração, este apresenta diferença expressiva na produção individuais de cada atividade. Enquanto no cenário B e C, ambos representaram maior dispêndio do equipamento no tempo de extração, sua atividade principal, contudo, verifica-se variações em suas produções diárias, mensais e anuais para ambas atividades.

Já no cenário D, buscou-se compreender a produção do *forwarder* realizando apenas a extração, resultando em produções diárias, mensais e anuais superiores, compatíveis com o maior tempo dedicado à atividade para qual foi projetado. O cenário E mostrou-se o mais equilibrado, onde se tem um investimento maior no tempo de extração do que no carregamento, mas mantendo produções diárias, mensais e anuais muito semelhantes entre as atividades, indicando um bom uso do equipamento.

A avaliação desses cenários é essencial para o planejamento operacional da colheita florestal, permitindo estimar com o desempenho do *forwarder* conforme a alocação de tempo entre as atividades e as metas produtivas da empresa. Tais resultados auxiliam na definição de estratégias de utilização do equipamento, ajustando a jornada e o foco operacional conforme as necessidades de produção, o que depende diretamente também da disponibilidade de veículos de transporte, para que o *forwarder* realize o carregamento.

5 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que o *forwarder* apresentou elevada eficiência no uso do tempo programado, além de produtividades relativamente altas dados as condições operacionais.

Constatou-se que o carregamento e o descarregamento nos caminhões concentraram a maior parte do tempo do ciclo de extração, reforçando a necessidade de considerar essas etapas como pontos-chaves no planejamento da colheita florestal.

A estimativa dos custos operacionais identificou os componentes mais representativos do custo operacional horário, reforçando a importância do planejamento adequado da extração e do carregamento que priorize o controle e monitoramento destes componentes.

As equações ajustadas para predição da produtividade, mesmo com limitações para volumes maiores, mostraram utilidade no planejamento por aumentarem a previsibilidade das atividades.

As análises confirmaram que o “volume médio por tora” é a variável de maior influência, à medida que aumenta eleva a produtividade e reduz os custos de produção em ambas atividades, confirmando a hipótese proposta em partes. Ao passo que a “declividade” e a “distância de extração” não apresentaram efeito significativo nas condições avaliadas.

A “distância de extração” apresentou influência significativa sobre o tempo total do ciclo, aumentando-o conforme sua extensão cresce, o que reforça a importância de considerar esse parâmetro no planejamento da atividade de extração.

A simulação dos diferentes cenários de uso do tempo de trabalho programado, evidenciou que a combinação equilibrada entre as operações de extração e carregamento proporciona melhor aproveitamento do *forwarder*, dispensando a necessidade de outro equipamento para a operação de carregamento.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, P. et al. **Standards for time studies for the South African forest industry.** South African: ICFR/FESA, 2014. 49 p.
- AKAY, A. E. et al. Productivity analysis of front-end loader in timber harvesting. **European Journal Of Forest Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 7-13, 26 jun. 2020. European Journal of Forest Engineering. <http://dx.doi.org/10.33904/ejfe.713860>.
- ALHAMED, F. et al. P4 Telemetry collector. **Computer Networks**, v. 227, p. 109727, 2023.
- AMPOORTER, E. et al. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 10, p. 1664 - 1676, 2010.
- ARCE, J.E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R.A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 207-217, abr. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622004000200007>.
- ARNHOLD, S. M. **Análise do Desempenho Operacional da Colheita Florestal Adotando o Sistema de Monitoramento Timberfleet.** 2020. 37 f. Tese (MBA em Manejo Florestal de Precisão– Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho.** São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1977. 635 p.
- BAKKARI, M.; KHATORY, A. Industry 4.0: strategy for more sustainable industrial development in SMEs. In: **Proceedings of the IEOM 7th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Rabat, Morocco.** 2017. p. 11-13.
- BONAZZA, M. **Produtividade e custos de sistemas de colheita florestal mecanizados em diferentes condições operacionais.** 2019. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- BJÖRHEDEN, R. et al. **IUFRO Forest work study nomenclature.** Garpenberg: Department of Operational Efficiency, Swedish University of Agricultural Science, 1995. 16 p.
- DANTAS, M. B.; ANDREOLI, C. V. **Código Florestal Anotado: Observações de ordem técnica e judicial.** Editora Lumen Juris, 2017.
- DE OLIVEIRA, D.; DA SILVA LOPES, E.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do *forwarder* na extração de toras de pinus Technical and economical evaluation of the *forwarder* in the extraction of the pine logs. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 84, 2009.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p. 175 - 182, 1996.

DINIZ, C. C. C.; CERQUEIRA, C. L.; DE OLIVEIRA, F. M. Influência do sortimento de toras na produtividade de um carregador florestal. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 3, p. 247-253, 2018.

DOS SANTOS, M. D. et al. Avaliação técnica de um carregador florestal com diferentes sortimentos de madeira. Technical assessment of a forest loader with different assortments of wood. **Ambiência**, v. 5, n. 1, p. 13-26, 2009.

DOS SANTOS, L. N. et al. Avaliação de custos da operação de extração da madeira com *forwarder*. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 27-34, 2016.

DVOŘÁK, Jiří et al. Operational Costs of Mid-Performance *Forwarders* in Czech Forest Bioeconomy. **Forests**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 435, 4 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/f12040435>.

EPAGRI, 2003. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Curitibanos Caracterização Regional**. Disponível em: https://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicacoes/diagnostico/CURITIBANOS.pdf . Acesso em: 6 jun. 2025.

EMBRAPA SOLOS. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 46.

FERREIRA, F. et al. *Forwarder* Machine Performance in Eucalyptus Forests in Brazil with Different Productivity Levels: An Analysis of Production Costs. **Forests**, v. 16, n. 4, p. 646, 2025.

FIEDLER, N. C. et al. Operational analysis of mechanical cut-to-length forest harvesting system. **Revista Árvore**, v. 41, n. 3, p. e410301, 2017.

FIEDLER, N. C. Colheita e transporte em áreas declivosas. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 27, p. 22, 2012.

GAGLIARDI, K.; ACKERMAN, S.; ACKERMAN, P. Extração de madeira baseada em *forwarders* multiprodutos: análise de consumo de tempo e produtividade de dois modelos de *forwarders* em múltiplos produtos e distâncias de extração. **CROJFE**. v.41, n.2, pág. 231-242. 2020.

GAN, K. S. et al. Life cycle assessment on log harvesting from natural forest in peninsular Malaysia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 33, n. 2, p. 213-223, 2021. <https://doi.org/10.26525/jtfs2021.33.2.213>.

GHAFFARIYAN, M. R. et al. Predicting productivity of timber loading operations: a literature review. **Silva Balcanica**, v. 22, n. 2, p. 81-90, 2021. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e69240>.

GHOTB, S.; SOWLATI, T.; MORTYN, J. Scheduling of log logistics using a metaheuristic approach. **Expert Systems With Applications**, [S.L.], v. 238, p. 122008, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122008>.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: ESALQ, 2002, 309 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual 2024**. Brasília: Ibá, 2024. Disponível em: <https://iba.org>. Acesso em: 15 out. 2025.

KOMATSU FOREST. **Forwarder Komatsu 895**. 2022. Disponível em: <https://www.komatsuforest.com.br/produtos/forwarders/novo-895>. Acesso em: 02 fev. 2025

LIMA, C. F. et al. Analysis of Operational Performance and Costs of Log Loaders Under Different Conditions. **Forests**, v. 16, n. 6, p. 913, 2025.

LINHARES, M. et al. Eficiência e desempenho operacional de máquinas *harvester* e *forwarder* na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 212-219, 2012.

LINGNER, D. **Desempenho de forwarder em corte final de Pinus spp. considerando diferentes operadores**. 2017. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2017.

LEITE, E. S. et al. Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo *forwarder*. **Revista Árvore**, v. 38, p. 879-887, 2014.

LONG, M.; JORDAAN, A.; CASTRO-SANTOS, T. Environmental factors influencing detection efficiency of an acoustic telemetry array and consequences for data interpretation. **Animal Biotelemetry**, v. 11, n. 1, p. 1-13, 2023.

LOUIS, L. T. et al. Fatores que afetam o custo operacional e a produtividade de máquinas de colheita de madeira terrestres: uma meta-análise. **Current Forestry Reports**, v. 8, n. 1, p. 38-54, 2022.

LOPES, E. S. et al. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego do *clambunk*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 72, p. 23 - 28, 2006.

LOPES, E. S. L. Avaliação técnica e econômica do corte de madeira de pinus com cabeçote *harvester* em diferentes condições operacionais. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, 2007.

MACHADO, C.C. Exploração florestal, 6. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1989. 34 p.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2014. 543p.

MAGAGNOTTI, N. et al. A new guide for work studies in forestry. **International Journal of Forest Engineering**, Umea, v. 24, n. 3, p. 249 - 253, 2013.

MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. **Good Practice Guidelines for Biomass Production Studies**. Sesto Fiorentino: CNR IVALSÀ, 2012. 52 p.

MCEWAN, Andrew et al. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, p. 339-351, 2020.

MALINOVSKI, R. A. et al. 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.

MASIOLI, W. et al. Efeito do empilhamento de madeira na produtividade e no custo de extração e carregamento florestal. **Floresta**, v. 53, n. 3, 2023.

MELCHIORI, L. et al. A mathematical modeling for simultaneous routing and scheduling of logging trucks in the forest supply chain. **Forest Policy and Economics**, v. 136, p. 102693, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102693>.

MINETTE, LJ et al. Carregamento e descarregamento. **Machado CC. Colheita florestal**, v. 3, 2002.

MINETTE, L. J. et al. Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2004.

MORAIS, M.G.A. **Colheita e Transporte de Madeira: terceirização X verticalização das operações**. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

NUNES, I. B.; LOPES, E.S.; PAGNUSSAT, MB; ARCE, JA; Modelos de curva de produtividade no encaminhamento de madeira de eucalipto. **Southern Forests**, v.83, n.3, p. 01-09. 2021.

OVASKAINEN, H.; UUSITALO, J.; VAATAINEN, K. Characteristics and significance of a *harvester* operators' working technique in thinnings. **International Journal of Forest Engineering**. v.15, n. 2, p. 67-78, 2004.

PROTO, A. R. et al. Factors affecting *forwarder* productivity. **European Journal of Forest Research**, v. 137, n. 2, p. 143-151, 2018.

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.

ROCHA, E. B. da. et al. Produtividade e custos de um sistema de colheita de árvores inteiras. **Cerne**, v. 15, n. 3, p. 372, 2009.

RODRIGUES, C. K. et al. Modeling of *forwarder* productivity and costs in thinned pine stands. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 285-292, 2018.

SAMPIETRO, Jean Alberto; LOPES, E. da S. Compactação de um cambissolo causada por máquinas de colheita florestal especializada com geoestatística. **Floresta**, v. 46, n. 3, p. 307-314, 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v46i3.37217>.

- SCHETTINO, S. **Precarização do trabalho: riscos e agravos à saúde e segurança ocupacional dos trabalhadores na colheita florestal em propriedades rurais**. 2016. 116 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- SEIXAS, F. Extração florestal. In: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2008. p. 97-145.
- SIMÕES, D. et al. Avaliação operacional da garra florestal no carregamento de toras curtas de eucalipto. **Revista Forestal Latinoamericana**, v. 24, n. 1, p. 55-65, 2009.
- SIMÕES, D. et al. Optimal forest road density as decision-making factor in wood extraction. **Forests**, v. 13, n. 10, p. 1703, 2022.
- SIMÕES, D.; MARCELINO, F. A.; FENNER, P. T. Rendimentos e custos operacionais de dois modelos de carregadores florestais. **Comunicação Científica**, Cruz das Almas, v. 4, n. 1, p. 63-69, 2012.
- SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. Performance and cost of a new *mini-forwarder* for use in thinning operations. **Journal of Forest Research**, v. 15, n. 6, p. 358-364, 2010.
- ÜNVER-OKAN, S. Modelling of work efficiency in cable traction with tractor implementing the least-squares methods and robust regression. **Croatian Journal Of Forest Engineering**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 109-117, 9 dez. 2020. Faculty of Forestry, University of Zagreb. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2020.677>.
- PANDUR, Z. et al. Fuel consumption comparison of two *forwarders* in lowland forests of pedunculate oak. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 12, n. 1, p. 125, 2019.
- ZAMBON, I. et al. Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. **Processes**, v. 7, n. 1, p. 36, 2019.