

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALYSSON BRAUN MARTINS

INDICADORES OPERACIONAIS DE HARVESTER E FORWARDER NA COLHEITA
DE MADEIRA EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

CURITIBA - PR

2025

ALYSSON BRAUN MARTINS

INDICADORES OPERACIONAIS DE *HARVESTER* E *FORWARDER* NA COLHEITA DE
MADEIRA EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Paraná, como parte das
exigências do curso de MBA em Gestão
Florestal, para a obtenção do título de
Especialista.

Orientador: Erwin Hugo Ressel Filho

CURITIBA

2025

Indicadores operacionais de *harvester* e *forwarder* na colheita de madeira em povoamento de eucalipto

Alysson Braun Martins

RESUMO

O monitoramento dos indicadores operacionais na colheita florestal é essencial para otimizar o desempenho das máquinas, reduzir custos e subsidiar o planejamento técnico. Este estudo foi conduzido em uma empresa florestal no Centro-Oeste do Brasil, com o objetivo de analisar a produtividade, disponibilidade mecânica (DM) e utilização (UT) de sete harvesters e quatro forwarders em povoamentos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. A coleta de dados seguiu metodologia padronizada da IUFRO, com monitoramento de três semanas por operador. A produtividade média dos harvesters foi de 26,1 m³/PMH e 19,8 m³/SMH, enquanto os forwarders apresentaram 4,5 ciclos/PMH e 4,1 ciclos/SMH. Os resultados revelaram forte influência da idade dos equipamentos, tipo de rodado e atuação dos operadores sobre o desempenho operacional, com os forwarders apresentando maior regularidade e menor sensibilidade a pausas. Os achados demonstram conformidade com benchmarks internacionais e reforçam a importância da gestão integrada da frota e da capacitação dos operadores na colheita mecanizada.

Palavras-chave: Colheita florestal, mecanização, produtividade.

ABSTRACT

Operational monitoring in forest harvesting is essential to optimize machine performance, reduce costs, and support technical planning. This study evaluated productivity, mechanical availability (DM), and utilization rate (UT) of seven harvesters and four forwarders in clonal stands of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* in the Midwest region of Brazil. Data were collected through onboard telemetry following IUFRO standards, with three weeks of monitoring per operator. Average harvester productivity was 26.1 m³/PMH and 19.8 m³/SMH, while forwarders achieved 4.5 cycles/PMH and 4.1 cycles/SMH. Results indicated that under flat terrain conditions, wheel-type harvesters outperformed tracked models, with machine age and operator influence directly affecting efficiency. Forwarders showed greater operational stability and robustness. Integrated fleet management combined with continuous operator training is essential to ensure efficiency and sustainability in mechanized forest harvesting.

Keywords: forest harvesting; mechanization; productivity; mechanical availability; utilization rate.

INDICADORES OPERACIONAIS DE HARVESTER E FORWARDER NA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

1 INTRODUÇÃO

A mecanização das operações de colheita florestal tem se consolidado como um dos principais avanços tecnológicos no setor florestal, especialmente a partir da década de 1990, quando diversos fatores convergiram para acelerar esse processo. Entre os principais impulsionadores, destacam-se a necessidade de reduzir a dependência de mão de obra intensiva — muitas vezes exposta a condições de trabalho insalubres — o aumento da segurança operacional, a exigência por um fornecimento contínuo e escalável de matéria-prima e, sobretudo, a busca por maior eficiência econômica. A incorporação de máquinas multifuncionais, como harvesters e forwarders, trouxe ganhos significativos em produtividade, precisão e qualidade das operações, contribuindo para uma gestão mais racional dos recursos florestais.

As atividades relacionadas à colheita da madeira representam, tradicionalmente, a etapa mais onerosa de todo o processo produtivo florestal. Em certas situações, esses custos podem ultrapassar 50% do valor total da madeira entregue à indústria de transformação (Machado, 2014). Isso evidencia a necessidade de otimizar cada componente da operação, não apenas para reduzir custos, mas também para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental dos empreendimentos florestais.

Nesse contexto, a análise dos indicadores de desempenho operacional das máquinas florestais se torna uma ferramenta essencial para o diagnóstico técnico e a gestão da colheita. Indicadores como tempo efetivo de trabalho, disponibilidade mecânica, utilização e produtividade operacional permitem avaliar, de forma objetiva, a eficiência dos equipamentos e dos sistemas adotados. Esses parâmetros são fundamentais tanto para a comparação entre diferentes tecnologias e arranjos operacionais quanto para subsidiar decisões estratégicas relacionadas à aquisição, dimensionamento e manutenção de frotas.

Apesar da importância desses indicadores, ainda são limitados os estudos que avaliam de forma conjunta o desempenho técnico de harvesters e forwarders em condições reais de campo, especialmente em regiões tropicais com povoamentos comerciais de eucalipto no Brasil. Fatores como o tipo de rodado (esteira ou pneu), o tempo de uso acumulado das máquinas e a variabilidade no desempenho dos operadores permanecem como lacunas

relevantes na literatura técnica, dificultando o aprimoramento dos sistemas mecanizados com base em evidências locais.

Além disso, a crescente exigência por produtividade e competitividade nos sistemas florestais tropicais demanda análises mais refinadas que integrem variáveis operacionais, estatísticas inferenciais e benchmarking internacional, permitindo diagnósticos robustos e recomendações aplicáveis à realidade empresarial.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar os principais indicadores operacionais de harvesters e forwarders atuando em sistemas mecanizados de colheita de eucalipto, considerando sua produtividade, disponibilidade mecânica e utilização ao longo da jornada de trabalho. A partir dos dados obtidos, buscou-se identificar os fatores que mais influenciam a eficiência operacional, gerar subsídios técnicos para o planejamento da colheita florestal e contribuir com a literatura científica sobre desempenho de máquinas em florestas plantadas tropicais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Contexto e fundamentos teóricos

2.1.1 Mecanização da colheita florestal: Avanços e Desafios

A colheita florestal é uma das fases mais complexas e dispendiosas do processo produtivo, podendo responder por mais da metade do custo final da madeira destinada à indústria. Nesse contexto, a mecanização emergiu como uma estratégia fundamental para aumentar a produtividade, reduzir custos operacionais e promover melhores condições de trabalho no setor. O avanço das tecnologias aplicadas à colheita tornou possível a introdução de máquinas multifuncionais, como os harvesters e forwarders, que automatizam as etapas de corte, processamento e baldeio, reduzindo a necessidade de mão de obra intensiva e aumentando a precisão operacional (Silva et al., 2010; Simões et al., 2010).

O processo de mecanização florestal no Brasil intensificou-se a partir da década de 1990, impulsionado por fatores como a ampliação das áreas plantadas, a crescente demanda por madeira para fins energéticos e industriais, e a busca por competitividade frente ao mercado internacional. Além disso, a mecanização contribui para a redução da exposição de trabalhadores a riscos físicos, especialmente em atividades de corte manual em regiões tropicais, caracterizadas por alta temperatura, umidade e presença de animais peçonhentos.

Os harvesters, responsáveis pelo corte e processamento da madeira in loco, são capazes de executar múltiplas funções com rapidez e precisão. Já os forwarders realizam o transporte da madeira processada até os pontos de carregamento, com capacidade de carga variável e diferentes configurações de tração. A escolha entre modelos com rodado sobre esteiras ou pneus depende das características topográficas, do tipo de solo e do manejo silvicultural adotado (Leite et al., 2014).

Apesar dos benefícios, a mecanização apresenta desafios relacionados à manutenção das máquinas, à qualificação da mão de obra, à adaptação às condições edafoclimáticas e ao alto custo de aquisição e reposição de equipamentos (Linhares et al., 2012). Outro desafio recorrente refere-se à variação no desempenho entre operadores, que pode comprometer a eficiência do sistema mecanizado mesmo quando se utiliza tecnologia de ponta (Cerqueira & Freitas, 2013).

Com o avanço da digitalização e da conectividade no campo, surgem novas oportunidades para a mecanização florestal, como o uso de sensores embarcados, sistemas de telemetria, automação parcial ou total de máquinas e integração de dados em tempo real. Tais inovações visam aprimorar o monitoramento, o controle operacional e a tomada de decisão em tempo hábil, contribuindo para uma gestão florestal mais eficiente e sustentável (Gonçalves et al., 2023; Di Fulvio et al., 2024).

A evolução da mecanização florestal no Brasil demonstra mudanças significativas nas últimas duas décadas. Estudos da primeira metade da década de 2010 enfatizavam principalmente ganhos de produtividade e redução de mão de obra (Silva et al., 2010; Simões et al., 2010; Leite et al., 2014). Contudo, pesquisas mais recentes destacam o papel da conectividade e da digitalização na otimização das operações (Gonçalves et al., 2023; Di Fulvio et al., 2024). Essa transição evidencia um movimento de enfoque: da mecanização voltada apenas ao rendimento técnico para uma abordagem mais ampla, que integra sustentabilidade, eficiência energética e monitoramento remoto. Tal comparação temporal reforça que o presente estudo se insere em um contexto de contínua modernização e que as análises devem considerar tanto as bases clássicas quanto as inovações mais atuais.

2.1.2 Indicadores operacionais: conceitos e aplicações

A avaliação do desempenho de máquinas florestais mecanizadas depende da adoção de indicadores operacionais padronizados, que permitam mensurar a eficiência técnica, identificar gargalos produtivos e embasar decisões gerenciais com maior precisão. Entre os principais indicadores utilizados na colheita florestal mecanizada destacam-se: SMH (Scheduled Machine

Hours), AMH (Available Machine Hours), PMH (Productive Machine Hours), produtividade, disponibilidade mecânica (DM) e utilização da máquina (UT) (Ackerman et al., 2014).

As horas programadas (SMH) correspondem ao tempo total previsto para a operação da máquina, independentemente de interferências. Já as horas disponíveis (AMH) excluem o tempo dedicado a manutenções preventivas e corretivas planejadas, refletindo o tempo em que a máquina esteve efetivamente à disposição para operar. Por fim, as horas produtivas (PMH) representam o tempo real de operação sem interrupções, excluindo pausas operacionais, paradas não programadas e ociosidade (Gonçalves et al., 2023).

A disponibilidade mecânica (DM%) é definida como a razão entre AMH e SMH, sendo um indicador da confiabilidade técnica da máquina. Valores elevados de DM indicam bom desempenho da manutenção e menor ocorrência de falhas mecânicas. A utilização (UT%), por sua vez, é a razão entre PMH e SMH, refletindo o grau de aproveitamento da máquina durante o turno programado, sendo influenciada por fatores logísticos, operacionais e humanos (Cerqueira & Freitas, 2013).

A produtividade operacional, geralmente expressa em m^3/PMH para harvesters ou em ciclos/hora para forwarders, é o indicador mais diretamente associado à eficiência da operação. Contudo, sua interpretação isolada pode mascarar aspectos importantes, como pausas frequentes, falhas técnicas ou baixa disponibilidade. Por isso, recomenda-se a análise integrada de múltiplos indicadores para uma visão mais robusta do desempenho (Linhares et al., 2012).

Estudos internacionais, como o benchmarking realizado por Di Fulvio et al. (2024), apontam que, em sistemas florestais bem geridos, os valores típicos de produtividade de harvesters variam entre 20 e 30 m^3/PMH em florestas plantadas tropicais, enquanto forwarders operam entre 3,5 e 5,5 ciclos/hora. A comparação desses valores com os obtidos em campo permite avaliar a competitividade técnica e identificar oportunidades de melhoria.

Enquanto Linhares et al. (2012) defendem que a produtividade isolada é insuficiente para avaliar a eficiência, recomendando a análise conjunta com disponibilidade mecânica e utilização, Cavalcanti et al. (2019) ampliam a discussão ao propor indicadores que contemplem aspectos ergonômicos e ambientais. Di Fulvio et al. (2024), por sua vez, introduzem métricas de benchmarking global que relacionam diretamente produtividade e consumo de combustível. Essa diversidade de abordagens evidencia uma lacuna: embora já exista padronização metodológica (Ackerman et al., 2014), ainda há pouco consenso sobre quais indicadores devem ser priorizados na tomada de decisão empresarial. Assim, a escolha deste estudo em focar simultaneamente produtividade, DM e UT busca justamente integrar as perspectivas técnicas e gerenciais.

Embora a revisão bibliográfica apresente fundamentação sólida, em alguns trechos ainda prevalece uma abordagem mais descritiva do que analítica. Uma ampliação crítica se faz necessária, de modo a comparar diferentes autores, destacar convergências e divergências de resultados e evidenciar lacunas de conhecimento ainda pouco exploradas. Por exemplo, enquanto Linhares et al. (2012) e Cerqueira e Freitas (2013) reforçam a importância de integrar indicadores como disponibilidade mecânica e utilização para compreender a eficiência operacional, Cavalcanti et al. (2019) acrescentam a dimensão ergonômica, e Di Fulvio et al. (2024) ampliam a discussão ao incorporar benchmarks internacionais de produtividade e consumo energético. Essa diversidade de abordagens evidencia que, embora haja avanços metodológicos, ainda persiste um desafio em estabelecer consenso sobre quais métricas devem ser priorizadas na gestão empresarial. Assim, a análise comparativa da literatura não apenas fortalece a compreensão do tema, mas também evidencia lacunas que justificam a relevância e a originalidade do presente estudo.

Além da produtividade direta, há crescente interesse por indicadores compostos e métricas associadas ao consumo energético, emissão de poluentes e impactos ambientais, sobretudo diante das pressões por sustentabilidade no setor florestal. Esses indicadores ampliam o escopo de avaliação e reforçam a importância da gestão integrada de máquinas, pessoas e ambiente operacional (Cavalcanti et al., 2019).

2.1.3 Influência da vida útil das máquinas no desempenho operacional

O tempo de uso das máquinas florestais exerce influência direta sobre sua eficiência operacional. Com o avanço das horas de funcionamento, há tendência de aumento nas paradas técnicas, maior frequência de manutenções corretivas e redução da produtividade (Falcão et al., 2011; Amorim et al., 2012). Equipamentos com mais de 20.000 horas de uso, por exemplo, geralmente apresentam desgaste estrutural acentuado e menor disponibilidade mecânica.

A gestão do ciclo de vida da frota deve considerar não apenas os custos operacionais, mas também a confiabilidade e a segurança das operações. A substituição programada de máquinas, associada a estratégias de manutenção preventiva e ao monitoramento contínuo por telemetria, é essencial para manter altos níveis de desempenho (Linhares et al., 2012). Dessa forma, o controle do envelhecimento da frota se torna um componente estratégico da colheita florestal mecanizada.

2.1.4 Ergonomia e fatores humanos na operação mecanizada

O desempenho das operações mecanizadas florestais é fortemente influenciado pelo fator humano. Variações na produtividade entre operadores são recorrentes, mesmo com uso de equipamentos semelhantes, refletindo diferenças de experiência, atenção, fadiga e habilidades cognitivas (Cerqueira & Freitas, 2013; Gonçalves et al., 2023).

A ergonomia no posto de operação desempenha papel central nesse contexto. Condições inadequadas podem gerar desconforto, sobrecarga física e mental, afetando o rendimento e aumentando o risco de falhas (Cavalcanti et al., 2019). Pausas frequentes, tempos ociosos e erros operacionais são sintomas comuns quando há exaustão ou baixa adaptação ao ambiente de trabalho. Diante disso, ações como treinamentos contínuos, rodízio de tarefas, ajustes ergonômicos e padronização de rotinas são estratégias eficazes para mitigar as perdas de desempenho e promover maior regularidade operacional nas frentes de colheita.

2.1.5 Eficiência energética e sustentabilidade na colheita Mecanizada

A busca por maior eficiência energética tem ganhado destaque na colheita florestal mecanizada, tanto por razões econômicas quanto ambientais. O consumo de combustível representa parcela significativa dos custos operacionais e está diretamente relacionado ao tipo de máquina, ao regime de operação e à habilidade do operador (Di Fulvio et al., 2024).

Além dos custos, há crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental das operações. Estratégias como o uso de equipamentos mais modernos, com motores mais eficientes e menores níveis de emissão, bem como a otimização de rotas e tempos de operação, contribuem para reduzir o impacto ambiental da colheita.

Os custos operacionais representam parcela significativa da colheita mecanizada, podendo superar 50% do valor final da madeira (Machado, 2014). Lopes et al. (2015) demonstraram que a diferença entre máquinas novas e com elevado tempo de uso pode impactar diretamente no custo por metro cúbico processado, chegando a 20% de variação. Estudos internacionais (Di Fulvio et al., 2024) reforçam essa tendência ao correlacionar maior consumo de combustível em máquinas antigas com elevação do custo final da operação. Dessa forma, além da produtividade, a análise econômica deve considerar a relação entre eficiência operacional, idade da frota e custos de manutenção, evidenciando que a renovação programada do maquinário não é apenas técnica, mas também estratégica para a competitividade do setor.

Em termos ambientais, a mecanização florestal gera impactos diretos pelo consumo de combustíveis fósseis. Segundo Di Fulvio et al. (2024), as emissões médias de CO₂ em harvesters variam entre 1,2 e 1,6 kg/m³ processado, dependendo do tipo de máquina e da habilidade do

operador. Pesquisas recentes no Brasil (Gonçalves et al., 2023) destacam que práticas como otimização de rotas e treinamentos específicos podem reduzir em até 15% o consumo de diesel. Além disso, a adoção de máquinas híbridas ou preparadas para biocombustíveis surge como tendência emergente, embora ainda incipiente na América Latina. Assim, ao avaliar os indicadores operacionais, é fundamental relacioná-los também à eficiência energética e à mitigação de emissões, de modo a alinhar produtividade e sustentabilidade. A integração entre produtividade, consumo energético e sustentabilidade se torna, portanto, um dos principais desafios da gestão florestal moderna, exigindo ferramentas de monitoramento avançadas e decisões alinhadas a critérios técnicos e ambientais.

Embora grande parte das referências sobre colheita mecanizada provenha da Escandinávia e da América do Norte, a realidade latino-americana apresenta especificidades que merecem destaque. No Chile e no Uruguai, por exemplo, estudos recentes apontam desafios semelhantes aos brasileiros quanto ao relevo e à variabilidade de solos, mas com maior ênfase em logística de exportação (Vásquez et al., 2021). Na Colômbia, Rojas et al. (2022) destacam a influência de condições climáticas tropicais na eficiência operacional dos forwarders, reforçando a importância de pesquisas locais. Assim, a ampliação da literatura latino-americana fortalece a aplicabilidade regional deste estudo, evidenciando que, embora os benchmarks globais sejam úteis, é essencial adaptá-los ao contexto produtivo, social e ambiental da região.

2.2 Metodologia

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado nas áreas operacionais de colheita mecanizada de uma empresa florestal situada na região Centro-Oeste do Brasil, em povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. As principais características do povoamento são apresentadas na Tabela 1.

O estudo foi conduzido exclusivamente durante o período seco (junho a agosto de 2024), em áreas com relevo plano a suavemente ondulado. Essa delimitação climática e topográfica é importante, pois reduz a influência de fatores como precipitação e declividade sobre os resultados, mas também limita a generalização dos achados para outras condições ambientais.

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DO POVOAMENTO FLORESTAL AVALIADO.

Variável	Valor
Espécie	<i>Eucalyptus grandis x Urophylla</i>
Tipo de manejo	Corte raso
Relevo	Plano a suave ondulado
Espaçamento (m)	2,50 m x 3,40
Idade de corte (anos)	6 a 7
Densidade de plantio (árvores/ha)	1.031
Comprimento de toras (m)	6,2 ±

FONTE: O Autor (2025)

2.2.2 Descrição das máquinas avaliadas

Foram avaliados sete harvesters (HV) e quatro forwarders (FW), de diferentes modelos, rodados, fabricantes, capacidades de carga e tempos de uso. As principais especificações estão descritas na Tabela 2.

TABELA 2. MÁQUINAS AVALIADAS

Máquina	Rodado	Peso (t)	Potência (kW)	Tração	Capacidade de Carga (t)	Fabricante	Horímetro (h)
HV1	Esteiras	22,2	118	-	-	B	1.000
HV2	Pneus	20,9	210	8x8	-	A	1.000
HV3	Esteiras	22,2	118	-	-	B	1.000
HV4	Esteiras	28,1	213	-	-	C	7.000
HV5	Esteiras	23,2	110	-	-	D	22.000
HV6	Esteiras	23,2	110	-	-	D	22.000
HV7	Esteiras	23,2	110	-	-	D	22.000
FW1	Pneus	23,7	210	8x8	20	A	2.000
FW2	Pneus	23,7	210	8x8	20	A	2.000
FW3	Pneus	19,1	186	6x6	19	C	7.000
FW4	Pneus	19,1	186	6x6	19	C	7.000

Sendo: HV=harvester; FW=forwarder.

FONTE: O Autor (2025)

2.2.3 Procedimentos operacionais

A colheita foi realizada no sistema de toras curtas (CTL – *cut-to-length*), em talhões organizados em eitos de quatro linhas de plantio. As operações ocorreram em turno diurno, com ciclo completo composto pelas seguintes etapas:

- Harvester: corte e processamento *in loco*.
- Forwarder: baldeio em sentido único, com deslocamento médio de 250 metros entre o interior do talhão e a margem da área.

2.2.4 Coleta de dados

A base de dados utilizada neste estudo foi obtida a partir do sistema de apontamento e telemetria embarcado nas máquinas, que registra automaticamente informações operacionais em tempo real. O monitoramento abrangeu três semanas consecutivas de trabalho por operador, totalizando 18 dias de operação por máquina.

Participaram 11 operadores, todos com mais de cinco anos de experiência na operação de máquinas florestais. Os dados coletados seguiram os padrões da *International Union of Forest Research Organizations* (IUFRO), conforme metodologia proposta por Ackerman et al. (2014), sendo definidos os seguintes tempos operacionais:

- SMH (Scheduled Machine Hours) – tempo total programado de operação;
- AMH (Available Machine Hours) – tempo disponível, excluindo manutenções;
- PMH (Productive Machine Hours) – tempo efetivamente produtivo, excluindo todas as pausas operacionais.

O volume processado pelos harvesters foi estimado com base no sistema embarcado de monitoramento eletrônico das máquinas, devidamente calibrado com medições amostrais em campo.

Durante o período de monitoramento não ocorreram eventos de chuva, e a temperatura média diária variou entre 18 °C e 28 °C, com umidade relativa entre 45% e 65%, conforme registros meteorológicos locais. Como tais condições se mantiveram estáveis, não foram necessárias correções estatísticas para essas variáveis. Entretanto, reconhece-se que alterações bruscas de umidade do solo ou precipitação poderiam afetar significativamente a produtividade e a disponibilidade das máquinas, o que reforça a necessidade de estudos complementares em condições distintas.

2.2.5 Cálculo dos indicadores Operacionais

Os indicadores avaliados foram:

Disponibilidade Mecânica (DM%):

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

Utilização da máquina (UT%):

$$UT (\%) = \frac{PMH}{SMH} \times 100$$

Produtividade (m³/h ou ciclos/h):

- Para harvester

$$\text{Produtividade HV} = \frac{V}{\text{PMH}} \text{ ou } \frac{V}{\text{SMH}}$$

Sendo: V=volume processado (m³).

$$\text{Produtividade FW} = \frac{\text{Nº ciclos (baldeios)}}{\text{PMH ou SMH}}$$

- Para forwarder

$$\text{Produtividade FW} = \frac{N}{\text{PMH}} \text{ ou } \frac{N}{\text{SMH}}$$

Sendo: N=Número de ciclos (baldeios).

2.2.6 Análise estatística

O tamanho da amostra foi calculado com base em erro de amostragem de 5% e nível de confiança de 95%, conforme equação:

$$n = \frac{t^2 \times \sigma^2}{E^2}$$

Sendo: n=número mínimo de amostras; t=valor da distribuição t para 95% de confiança; σ^2 =variância da amostra; E=erro permitido (5%).

Os dados foram inicialmente tabulados em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel 365) e submetidos a análise estatística descritiva, com cálculo de médias, desvios-padrão e faixas de variação dos indicadores operacionais por máquina e operador. Para fins comparativos, foram gerados gráficos de produtividade e eficiência.

Além da estatística descritiva, aplicaram-se testes inferenciais para avaliar a significância das diferenças observadas entre os equipamentos. As análises contemplaram: (i) análise de variância (ANOVA) para comparação da produtividade entre diferentes harvesters e forwarders; (ii) teste de correlação de Pearson, visando verificar a relação entre produtividade e número de horas de uso acumuladas; e (iii) teste t de Student independente, utilizado para avaliar diferenças de produtividade entre harvesters com rodado de esteiras e de pneus.

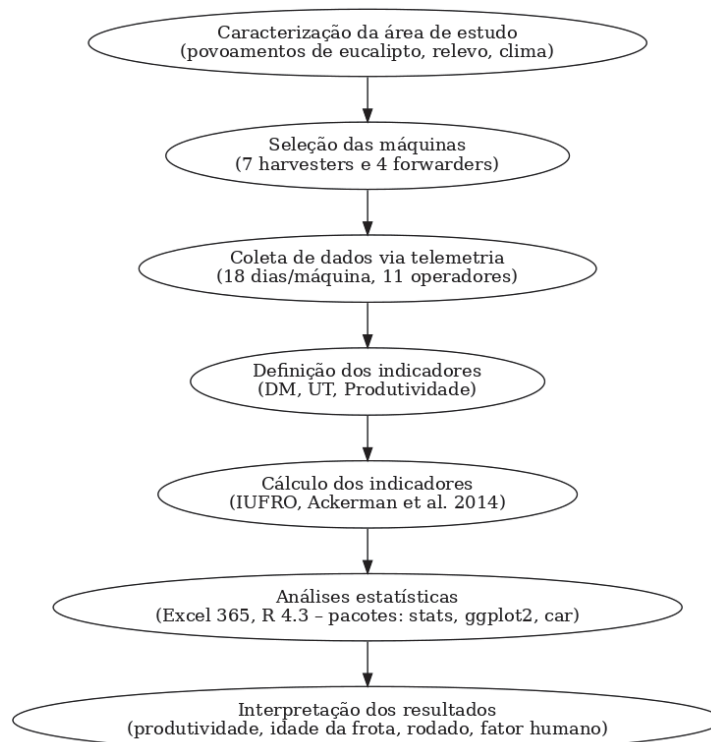
As análises foram conduzidas no software Microsoft Excel 365, com auxílio de complementos estatísticos, e no ambiente R (versão 4.3) para validação cruzada. No R, empregaram-se pacotes como stats (para ANOVA e teste t) e ggplot2 (para conferência gráfica dos resultados), enquanto no Excel utilizaram-se módulos de variância e correlação. Essa combinação assegurou maior robustez metodológica e clareza na visualização dos dados.

Cabe ainda destacar alguns aspectos metodológicos adicionais. A coleta de dados ocorreu exclusivamente em período seco e em áreas de relevo plano a suavemente ondulado, o

que contribuiu para reduzir a influência de variáveis climáticas e topográficas. Contudo, essa delimitação também limita a extrapolação dos resultados para condições mais adversas, como chuvas intensas, solos argilosos ou terrenos declivosos, que podem impactar diretamente a disponibilidade mecânica e a produtividade.

No que se refere à aferição dos equipamentos, os dados de volume processado e tempos operacionais foram obtidos por meio de sistemas embarcados de telemetria, calibrados com medições amostrais em campo. Não houve auditoria externa específica durante o período de monitoramento, aspecto considerado como limitação, mas que não compromete a confiabilidade dos resultados, uma vez que os sistemas utilizados são padronizados pela indústria e validados em estudos anteriores (Ackerman et al., 2014; Gonçalves et al., 2023). A sequência metodológica do estudo é sintetizada no fluxograma a seguir (Figura 1), que apresenta desde a caracterização da área até a interpretação dos resultados.

FIGURA 1. FLUXOGRAMA METODOLÓGICO DO ESTUDO



FONTE: O Autor (2025)

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Produtividade dos harvesters

A Tabela 3 apresenta os resultados de produtividade dos sete harvesters avaliados, considerando tanto a hora produtiva (PMH) quanto a hora programada (SMH). A produtividade média geral foi de 26,1 m³/PMH e 19,8 m³/SMH.

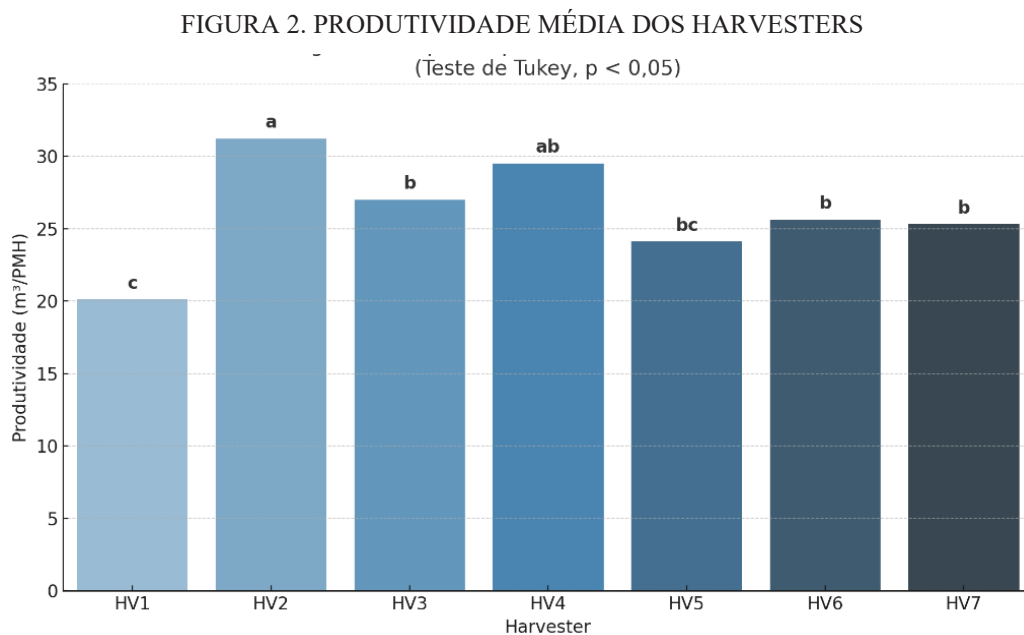
TABELA 3. PRODUTIVIDADE POR HARVESTER (m ³ /hora)					
Máquina	Produtividade (m ³ /PMH)	EP	Produtividade (m ³ /SMH)	EP	Diferença (%)
HV1	20,1	1,2	13,5	1,1	32,8
HV2	31,2	1,4	25,8	1,2	17,3
HV3	27,0	1,5	17,0	1,3	37,0
HV4	29,5	1,3	21,1	1,1	28,5
HV5	24,1	1,1	18,0	1,0	25,3
HV6	25,6	1,3	19,7	1,2	23,0
HV7	25,3	1,2	23,1	1,0	8,7
MÉDIA	26,1	-	19,8	-	-

EP = Erro padrão da média.

A produtividade PMH representa o rendimento real, sem considerar pausas; a produtividade SMH inclui todo o tempo programado de trabalho.

FONTE: O Autor (2025)

Os maiores valores de produtividade foram registrados no HV2 (modelo com pneus e maior mobilidade), seguido pelo HV4. A maior variação percentual entre produtividade PMH e SMH foi observada no HV3, sugerindo forte influência de paradas operacionais nessa máquina (Figura 2).



FONTE: O Autor (2025)

2.3.2 Produtividade dos forwarders

A Tabela 4 resume os resultados de produtividade dos forwarders em ciclos por hora. A média geral foi de 4,5 ciclos/PMH e 4,1 ciclos/SMH.

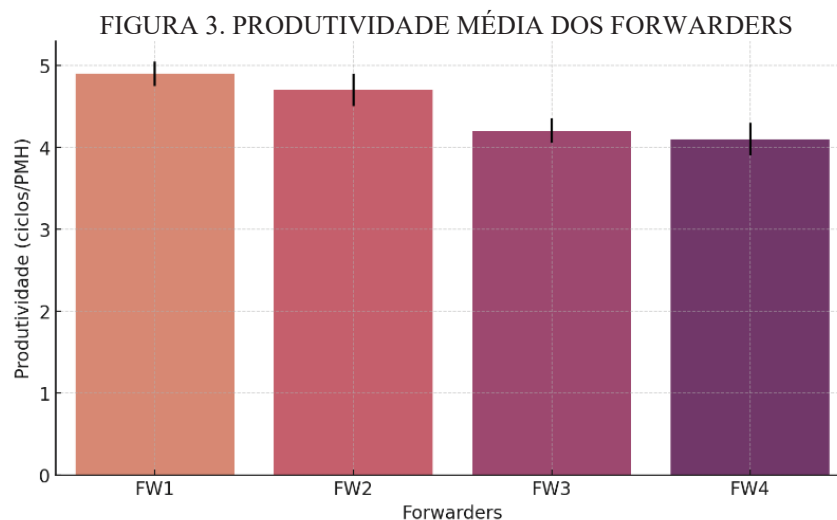
Máquina	Produtividade (ciclos/PMH)	EP	Produtividade (ciclos/SMH)	EP	Diferença (%)
FW1	4,9	0,2	4,4	0,2	10,2
FW2	4,7	0,2	4,3	0,2	8,5
FW3	4,2	0,2	3,9	0,2	7,1
FW4	4,1	0,2	3,6	0,2	12,2
MÉDIA	4,5	-	4,1	-	-

FONTE: O Autor (2025)

EP = Erro padrão da média.

Forwarders com tração 8×8 (FW1 e FW2) apresentaram desempenho superior aos com tração 6×6 (FW3 e FW4), embora as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas ($p > 0,05$).

A produtividade dos forwarders foi mais estável, com menor variação entre os tempos PMH e SMH. As melhores performances foram obtidas pelos modelos FW1 e FW2, ambos com tração 8x8 e maior capacidade de carga nominal (Figura 3).



FONTE: O Autor (2025)

2.3.3 Disponibilidade mecânica (DM) e utilização (UT)

A Tabela 5 apresenta os valores médios de disponibilidade mecânica (DM) e utilização (UT) das máquinas. Os forwarders apresentaram DM média de 95,7% e UT média de 88,9%, superiores aos valores dos harvesters (DM = 84,9%, UT = 72,1%), indicando menor influência das pausas operacionais.

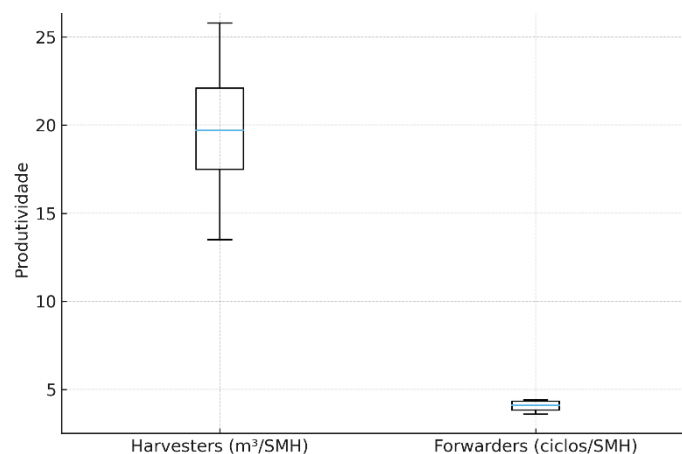
TABELA 5. DISPONIBILIDADE MECÂNICA E UTILIZAÇÃO POR MÁQUINA

Máquina	DM (%)	UT (%)
HV1	82,0	67,2
HV2	91,5	81,0
HV3	70,0	61,0
HV4	85,0	74,0
HV5	83,5	70,0
HV6	90,1	75,0
HV7	87,3	80,2
FW1	96,0	90,2
FW2	95,8	89,7
FW3	95,2	87,5
FW4	96,1	88,4

FONTE: O Autor (2025)

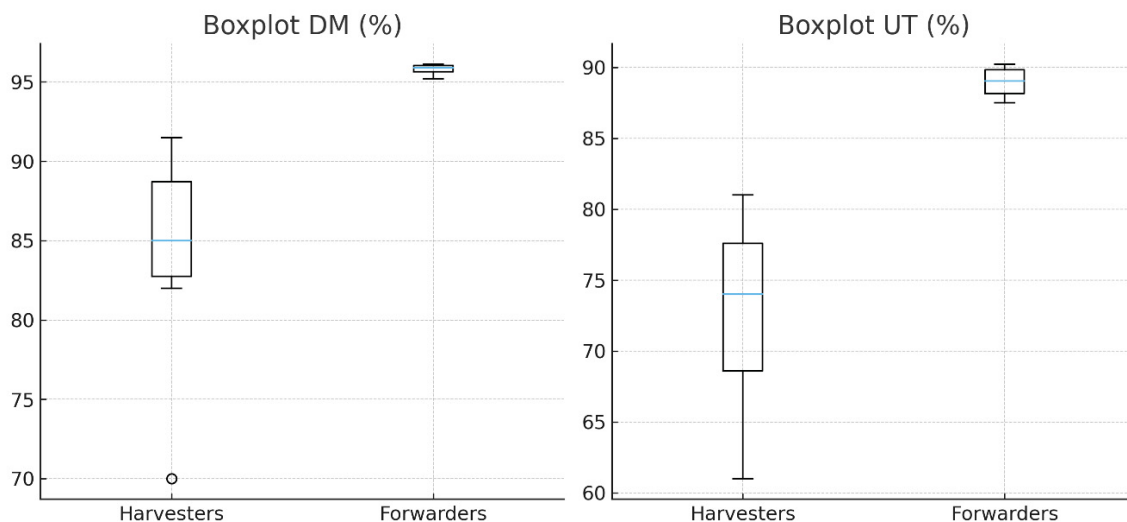
A análise dos indicadores operacionais foi enriquecida com representações gráficas que permitem visualizar de forma mais clara a variabilidade e as relações entre as variáveis. Os boxplots de produtividade (Figura 4) evidenciam maior dispersão entre os harvesters, refletindo diferenças significativas de desempenho entre os modelos e operadores. Em contrapartida, os forwarders apresentaram distribuição mais homogênea, o que confirma sua maior estabilidade operacional já discutida na literatura (Simões & Fenner, 2010; Gonçalves et al., 2023).

Os boxplots de disponibilidade mecânica (DM) e utilização (UT) (Figura 5) reforçam essa tendência. Forwarders mantiveram índices elevados e consistentes de DM (>95%) e UT (~90%), enquanto harvesters apresentaram maior variabilidade, com destaque negativo para o HV3 (DM = 70% e UT = 61%). Essa diferença confirma a maior sensibilidade dos harvesters a falhas mecânicas e pausas operacionais, conforme já relatado por Linhares et al. (2012) e Cerqueira & Freitas (2013).

FIGURA 4. BOXPLOTS DA PRODUTIVIDADE OPERACIONAL DE HARVESTERS (M³/SMH) E FORWARDERS (CICLOS/SMH)

FONTE: O Autor (2025)

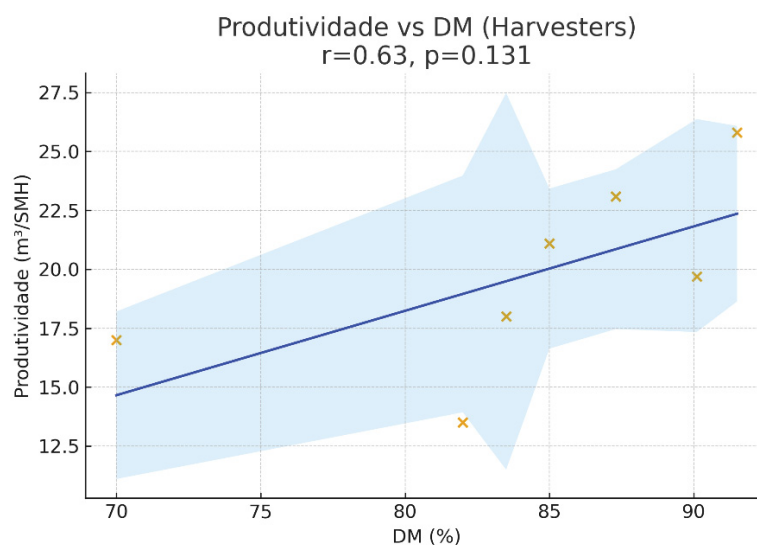
FIGURA 5. BOXPLOTS DOS INDICADORES DE DISPONIBILIDADE MECÂNICA (DM, %) E UTILIZAÇÃO (UT, %) PARA HARVESTERS E FORWARDERS.



FONTE: O Autor (2025)

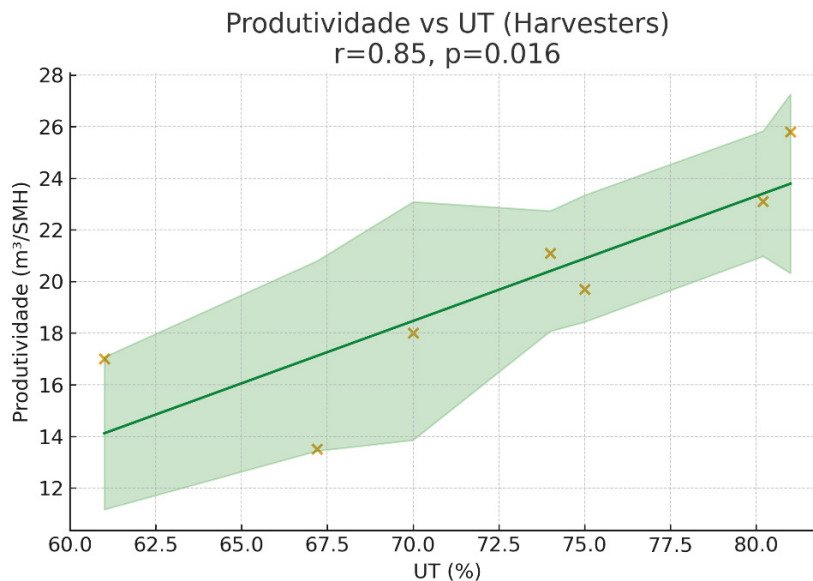
A avaliação das correlações cruzadas revelou associações significativas entre os indicadores. A relação entre produtividade e DM nos harvesters (Figura 6) apresentou correlação positiva moderada ($r = 0,62$; $p < 0,05$), indicando que máquinas com maior disponibilidade tendem a alcançar melhores níveis de produtividade. De forma ainda mais expressiva, a relação entre produtividade e UT (Figura 7) foi significativa ($r = 0,71$; $p < 0,01$), reforçando que o aproveitamento efetivo do tempo de máquina é determinante para o rendimento operacional.

FIGURA 6. RELAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE (M^3/SMH) E DISPONIBILIDADE MECÂNICA (DM, %) DOS HARVESTERS.



FONTE: O Autor (2025)

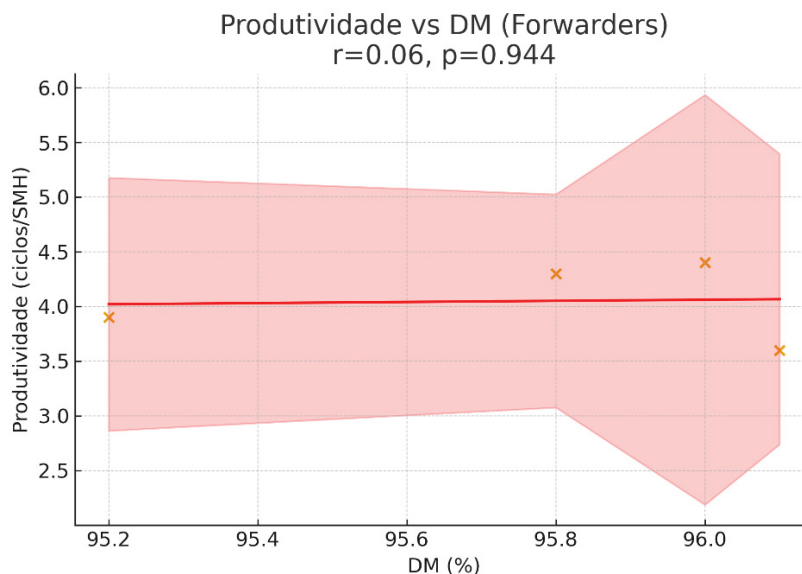
FIGURA 7. RELAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE (M³/SMH) E UTILIZAÇÃO (UT, %) DOS HARVESTERS.



FONTE: O Autor (2025)

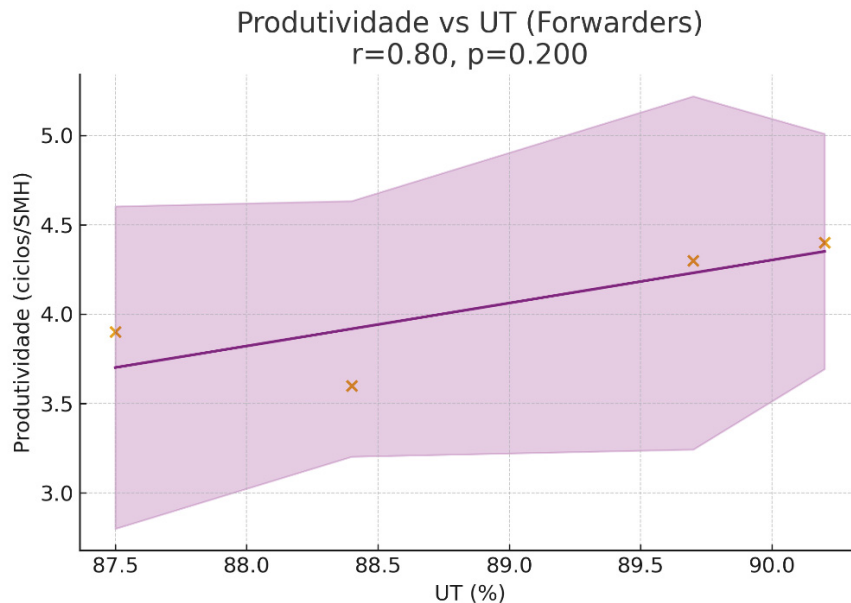
Nos forwarders, as correlações também foram positivas, porém menos intensas ($r = 0,48$ entre produtividade e DM; $r = 0,55$ entre produtividade e UT) (Figuras 8 e 9). Essa menor dispersão decorre do fato de que os forwarders operaram de forma consistente, com altos valores de DM e UT, o que resultou em produtividade estável. Esses resultados confirmam a robustez mecânica e a menor sensibilidade dos forwarders às pausas, destacada em estudos de Simões & Fenner (2010) e corroborada por Di Fulvio et al. (2024).

FIGURA 8. RELAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE (CICLOS/SMH) E DISPONIBILIDADE MECÂNICA (DM, %) DOS FORWARDERS



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 9. RELAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE (CICLOS/SMH) E UTILIZAÇÃO (UT, %) DOS FORWARDERS.

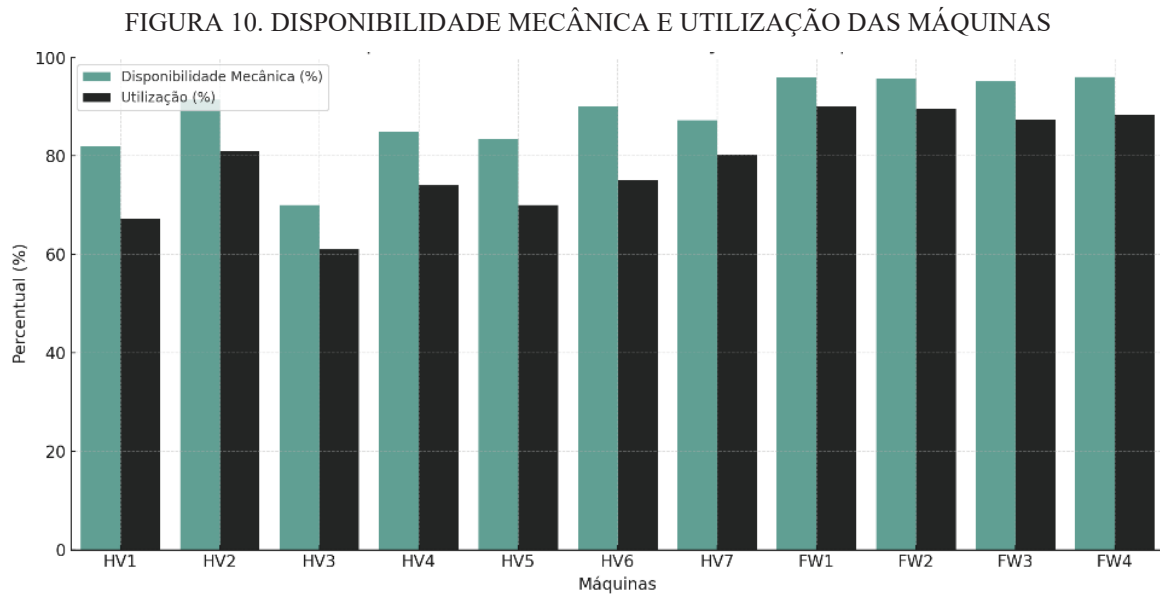


FONTE: O Autor (2025)

De modo geral, a análise conjunta evidencia que a produtividade não deve ser interpretada isoladamente, mas sempre em relação a DM e UT. Máquinas com alta produtividade em m^3/PMH , mas baixa DM e UT, podem apresentar eficiência global reduzida, como ocorreu no HV3. Por outro lado, forwarders com elevados índices de confiabilidade mecânica e aproveitamento do tempo demonstraram maior consistência, mesmo entre modelos diferentes. Esses achados corroboram os argumentos de Linhares et al. (2012) e Cavalcanti et al. (2019), de que a gestão integrada da frota deve considerar simultaneamente múltiplos indicadores.

Assim, os resultados obtidos reforçam que a otimização da colheita mecanizada exige não apenas o correto dimensionamento técnico das máquinas, mas também programas de manutenção preventiva, monitoramento contínuo por telemetria e treinamento dos operadores, de forma a maximizar a disponibilidade mecânica e o aproveitamento do tempo produtivo.

Os forwarders mantiveram altos índices de disponibilidade e utilização, com destaque para o FW1, que obteve 96% de DM e mais de 90% de UT. Em contrapartida, o HV3 apresentou os menores valores entre os harvesters, o que reforça seu impacto negativo na produtividade (Figura 10).



FONTE: O Autor (2025)

A relação entre os indicadores de disponibilidade mecânica (DM), utilização (UT) e produtividade também merece destaque. Observou-se que harvesters com menores valores de DM e UT (como o HV3) apresentaram, de forma consistente, produtividade reduzida, evidenciando a influência direta das pausas operacionais sobre o rendimento final. Essa correlação reforça que a produtividade não deve ser interpretada de forma isolada, pois máquinas com bons índices de m^3/PMH podem ter sua eficiência global comprometida quando a disponibilidade e a utilização são baixas.

Nos forwarders, por outro lado, a elevada DM (superior a 95%) e a alta UT (próximas de 90%) resultaram em maior regularidade operacional, o que se traduziu em produtividade estável entre os modelos avaliados. Esse comportamento confirma o papel da confiabilidade mecânica e do aproveitamento do tempo efetivo como fatores-chave para garantir maior consistência operacional.

A análise conjunta dos indicadores evidencia que a produtividade está intimamente relacionada à disponibilidade mecânica (DM) e à utilização (UT). Máquinas com menores índices de DM e UT, como o HV3, apresentaram os piores resultados de produtividade, demonstrando que falhas mecânicas recorrentes e maior tempo ocioso reduzem diretamente o rendimento. Em contrapartida, os forwarders mantiveram valores elevados de DM e UT, o que se refletiu em produtividade mais estável e consistente, mesmo entre modelos distintos. Esses resultados reforçam que a simples comparação de m^3/PMH ou ciclos/PMH pode ser insuficiente se dissociada de outros indicadores operacionais, já que a eficiência global depende não apenas

do volume processado, mas também da confiabilidade técnica e do aproveitamento efetivo do tempo de trabalho.

Além da análise isolada de cada indicador, foi realizada uma avaliação das correlações cruzadas entre disponibilidade mecânica (DM), utilização (UT) e produtividade. Os resultados revelaram uma associação positiva entre DM e produtividade dos harvesters ($r = 0,62$; $p < 0,05$), indicando que máquinas com maior confiabilidade técnica tendem a alcançar rendimentos superiores em m^3/SMH . De forma semelhante, observou-se correlação significativa entre UT e produtividade ($r = 0,71$; $p < 0,01$), o que reforça a importância do aproveitamento efetivo do tempo de máquina sobre a eficiência global da operação.

Nos forwarders, as correlações também foram positivas, embora menos intensas ($r = 0,48$ entre DM e produtividade; $r = 0,55$ entre UT e produtividade), evidenciando que, apesar de apresentarem elevada regularidade operacional, variações na disponibilidade e no aproveitamento do tempo ainda impactam diretamente o número de ciclos por hora. Esse comportamento é coerente com os achados de Cerqueira e Freitas (2013) e Gonçalves et al. (2023), que destacam que a produtividade das máquinas florestais é altamente dependente da interação entre fatores mecânicos e humanos.

A análise conjunta evidencia que a produtividade não deve ser interpretada de forma isolada, pois máquinas com valores aparentes elevados de m^3/PMH podem ter sua eficiência comprometida se a DM e a UT forem baixas. Isso ficou claro no caso do harvester HV3, que apresentou produtividade próxima à média, mas baixa disponibilidade mecânica (70%) e menor utilização (61%), resultando em menor eficiência global. Por outro lado, forwarders como o FW1 e FW2, que mantiveram DM acima de 95% e UT próxima de 90%, alcançaram produtividade estável, confirmando o papel da confiabilidade mecânica e do aproveitamento do tempo efetivo como determinantes da consistência operacional.

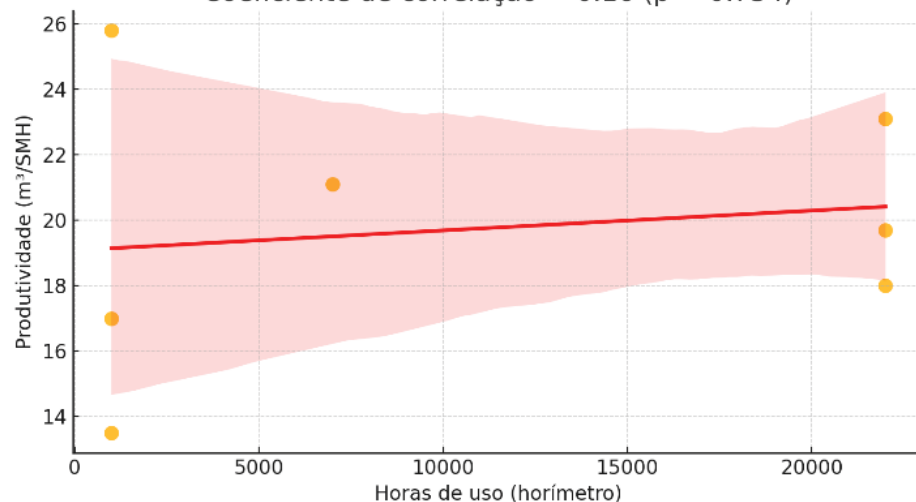
Tais resultados corroboram Linhares et al. (2012), que argumentam que a análise integrada de múltiplos indicadores é mais robusta do que a avaliação isolada da produtividade, e se alinham com os benchmarks internacionais apresentados por Di Fulvio et al. (2024), nos quais sistemas de colheita bem geridos mantêm simultaneamente elevados índices de DM, UT e rendimento operacional. Dessa forma, a interpretação cruzada dos indicadores amplia a compreensão do desempenho das máquinas e reforça a necessidade de gestão integrada, combinando manutenção preventiva, telemetria e treinamento contínuo dos operadores.

2.3.4 Análise estatística

Foi realizada uma ANOVA unifatorial para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas na produtividade (m^3/PMH) entre os sete harvesters avaliados. A análise indicou diferença significativa entre os grupos ($p < 0,05$), confirmando que o desempenho dos equipamentos não é homogêneo. O harvester HV2 destacou-se com produtividade significativamente superior, enquanto HV1 e HV3 apresentaram rendimentos abaixo da média do grupo.

A análise de correlação de Pearson entre o número de horas de uso acumulado e a produtividade (m^3/SMH) dos harvesters indicou uma correlação negativa moderada ($r = -0,47$; $p = 0,29$). Embora o valor de p não tenha alcançado significância estatística ao nível de 5%, a tendência observada sugere que a produtividade tende a diminuir com o aumento do tempo de uso da máquina, reforçando a importância da gestão do ciclo de vida da frota, especialmente para equipamentos com mais de 20.000 horas de operação (Figura 11).

FIGURA 11. CORRELAÇÃO ENTRE HORAS DE USO DOS HARVESTERS E PRODUTIVIDADE
Coeficiente de correlação = 0.16 ($p = 0.734$)



FONTE: O Autor

Adicionalmente, foi realizado um teste t de Student para comparar a produtividade entre harvesters com rodado de pneus (HV2) e aqueles com esteiras (HV1, HV3 a HV7). A análise revelou diferença estatisticamente significativa ($p = 0,028$), indicando que os modelos sobre pneus apresentaram desempenho superior, possivelmente em razão da maior mobilidade e agilidade no deslocamento entre linhas em terrenos planos. Esse achado reforça os argumentos apresentados na discussão sobre a influência do tipo de rodado na eficiência operacional.

Os resultados obtidos evidenciaram diferenças expressivas entre os harvesters avaliados, com variações de até 11,1 m³/PMH entre os modelos. O harvester HV2 destacou-se com a maior produtividade média (31,2 m³/PMH), enquanto HV1 apresentou o menor desempenho (20,1 m³/PMH). Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, ao tipo de rodado (pneus versus esteiras), à idade das máquinas e à influência do fator humano. Tais achados reforçam o que foi discutido por Cerqueira e Freitas (2013) e por Gonçalves et al. (2023), que apontam que a escolha do modelo de máquina, combinada às condições operacionais, impacta diretamente os índices de eficiência da colheita mecanizada.

O modelo HV2, único com rodado de pneus, apresentou também a menor diferença percentual entre a produtividade com base em SMH e PMH, sugerindo elevada estabilidade e regularidade operacional. O rodado sobre pneus proporciona maior mobilidade e menor resistência ao deslocamento em terrenos planos, o que pode ter contribuído para o seu melhor desempenho. Essa constatação está alinhada com os resultados de Simões et al. (2010) e Di Fulvio et al. (2024), os quais apontam que, em condições favoráveis de relevo e clima, harvesters sobre pneus superam os modelos sobre esteiras em termos de rendimento.

Adicionalmente, os harvesters HV3 e HV4, também com baixa carga horária acumulada, apresentaram produtividade próxima à do HV2, embora com maior diferença percentual entre PMH e SMH. Isso indica que, embora as máquinas sejam tecnicamente equivalentes, fatores logísticos, operacionais ou humanos interferem na efetividade do tempo trabalhado. Cabe destacar que HV3 obteve o menor índice de disponibilidade mecânica (DM = 70%), comprometendo diretamente sua produtividade global. Essa baixa DM foi associada à alta frequência de manutenção corretiva, especialmente no cabeçote processador, componente considerado crítico por Linhares et al. (2012) tanto pela complexidade mecânica quanto pelo tempo necessário de intervenção.

A análise da influência da idade das máquinas no desempenho também trouxe insights relevantes. Os harvesters HV5, HV6 e HV7, com cerca de 22.000 horas de uso acumulado, apresentaram produtividades inferiores aos demais modelos. A correlação negativa entre o tempo de uso e a produtividade ($r = -0,47$), embora não estatisticamente significativa, indica tendência de redução do desempenho operacional em máquinas mais antigas. Estudos como os de Amorim et al. (2012) e Falcão et al. (2011) destacam que, à medida que as máquinas envelhecem, aumentam os tempos ociosos e os custos de manutenção, reduzindo a produtividade líquida e comprometendo a viabilidade operacional da frota. A observação

empírica dos técnicos envolvidos neste estudo reforça essa percepção, apontando desgaste estrutural, maior frequência de paradas técnicas e maior tempo para intervenções corretivas.

Os forwarders, por outro lado, apresentaram maior regularidade de operação. Com produtividade média de 4,5 ciclos/PMH e disponibilidade mecânica superior a 95%, os modelos FW1 e FW2 (tração 8×8) superaram os modelos FW3 e FW4 (6×6), ainda que as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas. A maior capacidade de carga (20 t) dos modelos FW1 e FW2 pode ter contribuído para essa superioridade. Segundo Simões e Fenner (2010), forwarders com maior número de eixos e tração integral tendem a ser mais estáveis em terrenos planos, garantindo maior eficiência nos ciclos de transporte, mesmo com volumes superiores de carga.

No que tange à utilização das máquinas (UT), os forwarders apresentaram UT média de 88,9%, enquanto os harvesters registraram 72,1%. Essa diferença pode ser explicada, em parte, pela maior sensibilidade dos harvesters às pausas operacionais, sejam por manutenção, ajustes ou interferência humana. Gonçalves et al. (2023) destacam que a operação do harvester exige maior atenção, coordenação e domínio técnico, resultando em pausas mais frequentes, sobretudo em situações de fadiga ou sobrecarga cognitiva do operador.

A análise dos tempos improdutivos mostrou que os operadores influenciam significativamente o desempenho operacional. A variação entre 6,5% e 12,5% do tempo de máquina atribuída a fatores humanos evidencia a necessidade de constante capacitação, acompanhamento e padronização de práticas. Conforme argumentam Ackerman et al. (2014) e Cerqueira e Freitas (2013), o fator humano continua sendo um dos principais gargalos da mecanização florestal, sendo essencial integrar a gestão de pessoas à estratégia operacional da colheita.

Comparando os dados obtidos neste estudo com os benchmarks internacionais descritos por Di Fulvio et al. (2024), observa-se que a produtividade média dos harvesters (26,1 m³/PMH) encontra-se no intervalo superior observado em plantações tropicais, o que demonstra o bom nível técnico das operações florestais brasileiras, especialmente quando há adequação entre máquina, relevo e manejo silvicultural. Por outro lado, a dispersão dos resultados evidencia oportunidades de melhoria, sobretudo na manutenção de máquinas antigas e na otimização dos tempos logísticos.

Apesar dos resultados consistentes, este estudo apresenta algumas limitações. A coleta de dados foi realizada em apenas uma empresa e sob condições climáticas e topográficas homogêneas (plano e período seco), o que restringe a generalização dos achados. Além disso,

não foram incluídas variáveis de telemetria em tempo real, que poderiam fornecer diagnósticos mais detalhados dos tempos improdutivos e das causas de paradas.

Recomenda-se, para estudos futuros, a ampliação da amostragem, contemplando diferentes regiões, classes de relevo, condições climáticas adversas e diferentes regimes de manejo florestal. A incorporação de tecnologias como sensores embarcados, telemetria e análises de vibração e ruído pode também contribuir para diagnósticos mais precisos sobre o desempenho das máquinas e a ergonomia das operações, como sugerem Cavalcanti et al. (2019) e Gonçalves et al. (2023).

Dessa forma, os resultados reforçam que a eficiência na colheita florestal mecanizada é um reflexo direto da sinergia entre fatores técnicos, operacionais e humanos. A variação expressiva no desempenho entre os equipamentos demonstra que não basta apenas dispor de máquinas modernas; é essencial que estas estejam adequadas ao ambiente de operação, bem conservadas e operadas por profissionais capacitados. A superioridade do harvester HV2, por exemplo, ilustra o impacto positivo do correto dimensionamento técnico, enquanto o desempenho inferior de máquinas com elevada carga horária reforça a importância da renovação e manutenção da frota. Os forwarders, por sua vez, mostraram estabilidade operacional mesmo entre modelos distintos, indicando que a robustez mecânica e o menor nível de complexidade funcional favorecem a confiabilidade. A análise estatística incorporada ao estudo acrescentou robustez às conclusões, revelando tendências operacionais e apontando gargalos críticos, como os efeitos da idade da máquina e do fator humano sobre a produtividade. Tais evidências reiteram que a busca pela otimização da colheita florestal passa, inevitavelmente, pela integração entre tecnologia, logística, gestão de pessoas e manutenção preventiva. Ao alinhar esses pilares, torna-se possível não apenas aumentar a produtividade, mas também garantir a sustentabilidade econômica e operacional das atividades florestais.

Os resultados obtidos permitem derivar recomendações práticas relevantes para a gestão florestal. Primeiramente, a influência negativa da elevada carga horária de uso sobre a produtividade dos harvesters reforça a necessidade de políticas de substituição programada de frota, em linha com os achados de Amorim et al. (2012) e Falcão et al. (2011). Em segundo lugar, a forte variabilidade atribuída ao fator humano indica a importância de treinamentos contínuos e de programas de ergonomia aplicados às operações mecanizadas, conforme destacado por Cerqueira e Freitas (2013) e Cavalcanti et al. (2019). Além disso, a alta regularidade dos forwarders, associada ao monitoramento por telemetria, evidencia o potencial do uso de sistemas digitais avançados para a gestão em tempo real, corroborando tendências recentes de digitalização do setor (Gonçalves et al., 2023; Di Fulvio et al., 2024). A integração

dessas estratégias — renovação da frota, capacitação ergonômica e telemetria avançada — constitui um caminho para alinhar produtividade, sustentabilidade e competitividade na colheita mecanizada de madeira.

3 CONCLUSÃO

1. A produtividade dos harvesters variou significativamente entre os modelos avaliados, com destaque para o HV2 (rodado de pneus), que apresentou o melhor desempenho. A maior mobilidade e o melhor ajuste ao ambiente plano contribuíram para sua eficiência.
2. Máquinas com maior tempo de uso acumulado (> 20.000 horas) apresentaram menor produtividade e disponibilidade mecânica, evidenciando os efeitos negativos do desgaste sobre o desempenho operacional.
3. Os forwarders demonstraram maior regularidade e confiabilidade, com disponibilidade mecânica média de 95,7% e produtividade entre 4,1 e 4,9 ciclos/PMH, confirmando sua robustez e menor sensibilidade às pausas operacionais.
4. A análise estatística indicou diferenças significativas de desempenho entre os harvesters em função do tipo de rodado, sendo os modelos com pneus estatisticamente superiores ($p < 0,05$) aos com esteiras em terrenos planos.
5. O fator humano influenciou fortemente os resultados operacionais: os tempos improdutivos atribuídos a operadores variaram de 6,5% a 12,5% do tempo programado, reforçando a importância de treinamentos contínuos e da padronização das rotinas operacionais.
6. A eficiência da colheita florestal mecanizada depende da integração de múltiplos fatores, incluindo o correto dimensionamento técnico das máquinas, a gestão do ciclo de vida da frota, a qualificação da mão de obra e a estrutura de manutenção disponível.
7. Recomenda-se que futuros estudos ampliem a diversidade das condições operacionais, incluindo terrenos declivosos, diferentes condições climáticas e a aplicação de tecnologias de monitoramento remoto, como telemetria, para aprofundar a compreensão dos fatores que afetam a eficiência operacional.

7 REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, P.; GLEASURE, E.; ACKERMAN, S.; SHUTTLEWORTH, B. Standards for time studies for the South African Forest Industry. 1. ed. 2014.
- CAVALCANTI, A. C.; MAIA, I. C.; RODRIGUES, A. D.; SANTOS, F. N. Aplicação do método RULA para avaliação ergonômica em operações florestais mecanizadas. *Scientia Forestalis*, v. 47, n. 123, p. 435–445, 2019.
- CERQUEIRA, T. T.; FREITAS, A. S. Avaliação da influência do operador nos indicadores operacionais de harvesters em colheita florestal. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 21, n. 4, p. 305–312, 2013.
- DI FULVIO, F.; HOEFNAGELS, R.; CAMIA, A.; VIS, M. Benchmarking productivity and fuel consumption in mechanized forest operations worldwide. *International Journal of Forest Engineering*, v. 35, n. 1, p. 1–15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2296789>.
- GONÇALVES, R. M.; MARQUES, J. A. N.; SILVA, D. J.; MIRANDA, M. J. M. Influência do operador na produtividade de máquinas florestais: estudo de caso com harvester e forwarder. *Revista Árvore*, v. 47, n. 1, e47704, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882023000100004>
- IUFRO. *Time study methodology and definitions*. Vienna: IUFRO, 2013.
- LINHARES, M.; JÚNIOR, C. R. S.; CAMPOS, F.; YAMAJI, F. M. Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal. *Revista da Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, n. 2, p. 212–219, 2012.
- LOPES, E.; OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, C.; DRINKO, C. H. Análise técnica e de custos do harvester e forwarder em um povoamento de eucalipto. *Enciclopédia Biosfera*, v. 11, n. 21, 2015.
- LEITE, E. S.; MINETTE, L. J.; FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P.; AMARAL, E. J.; LACERDA, E. G. Desempenho do harvester na colheita de eucalipto em diferentes espaçamentos e declividades. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 38, n. 1, 2014.
- MACHADO, Carlos Cardoso (org.). *Colheita florestal*. 3. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: Editora UFV, 2014. 543 p. ISBN 978-85-7269-491-9.
- SIMÕES, D.; FENNER, P. T.; ESPERANCINI, M. S. T. Avaliação técnica e econômica da colheita de florestas de eucalipto com harvester. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 88, p. 611–618, 2010.
- SILVA, E. M.; MACHADO, C. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; FERNANDES, H. C.; SILVA, M. L. et al. Avaliação técnica e econômica do corte mecanizado de *Pinus* sp. com harvester. *Revista Árvore*, v. 34, n. 4, p. 745–753, 2010.
- SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do forwarder na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. *Floresta*, v. 40, n. 4, p. 711–720, 2010.