

Produtividade, rendimento energético, emissão e sequestro de carbono em florestas plantadas de *Pinus*

Rodrigo Dzedzej Leal¹; Quinny Soares Rocha²; Thamires da Silva³; Rafael Almeida Munis⁴; Danilo Simões⁵

¹. Engenheiro Florestal, Mestrando, estudante na Universidade Estadual Paulista(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. E-mail: rd.leal@unesp.br

². Engenheira Florestal, Doutoranda, estudante na Universidade Estadual Paulista(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. E-mail: quinny.rocha@unesp.br

³. Engenheira Florestal, Graduanda, estudante na Universidade Estadual Paulista(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. E-mail: thamires.silva@unesp.br

⁴. Engenheira Industrial Madeireira, Doutoranda, estudante na Universidade Estadual Paulista(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. E-mail: rafaele.munis@gmail.com

⁵. Administrador de Empresas, Pós-Dr., Professor pesquisador na Universidade Estadual Paulista(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. E-mail: danilo.simoese@unesp.br

Resumo

Na operação de colheita mecanizada de madeira, a produtividade e a sustentabilidade ambiental fazem parte do seu planejamento. Nesse contexto, objetivou-se a mensuração da produtividade, rendimento energético, emissão e sequestro de carbono na atividade corte de árvores por meio da máquina florestal autopropelida *harvester* em florestas plantadas de *Pinus*. Com base no estudo de tempos, foi determinada a produtividade, conseguinte, foi possível estimar o rendimento energético, a emissão de carbono do *harvester* e o sequestro de carbono da floresta de *Pinus*. A partir das condições analisadas, a produtividade média do *harvester* foi de 20,01 m³ h⁻¹ e o rendimento energético, de 7,90 g kW⁻¹ m³. A emissão e o armazenamento de carbono foram 1,72 kg m⁻³ e 48.796 mg.

Palavras-chave: operações florestais, colheita de madeira, *harvester*.

Introdução

Frente aos desafios das empresas florestais, como redução dos custos, aumento da produtividade e otimização dos recursos produtivos, a adoção de modernas tecnologias possibilita o aperfeiçoamento nas atividades florestais. Dessa forma, a colheita mecanizada de madeira, etapa final do ciclo produtivo florestal, engloba as atividades de planejamento, derrubada, processamento e extração da madeira do interior do talhão até a estrada florestal, a fim de realizar o carregamento em veículos de transporte até a unidade consumidora (LIMA; OLIVEIRA, 2019; GOMES et al., 2018).

Dentre os sistemas de colheita, destaca-se o *cut-to-length* (CTL) ou sistema de toras curtas. O CTL pode ser caracterizado pelo corte das árvores e processamento da madeira como descascamento, destopamento e traçamento das toras no interior do talhão, em seguida, a madeira é extraída até as estradas florestais. Esse sistema pode ser executado com máquinas florestais autopropelidas, a saber: *harvester* e *forwarder*. O *harvester* é capaz de efetuar as atividades de derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento das toras de madeira, sendo composto por uma máquina base de pneumáticos ou esteiras, com uma grua e um cabeçote (RODRIGUES; LOPES, 2018; MACHADO, 2014).

A produtividade das máquinas florestais que compõem a operação de colheita mecanizada de madeira é uma das principais variáveis que afetam a viabilidade dos empreendimentos florestais, sendo influenciada por variáveis externas como condições de plantio, clima, topografia, solo, treinamento dos operadores, e por variáveis internas como nível de tecnologia, disponibilidade mecânica e eficiência operacional (DINIZ; ROBERT; VARGAS, 2018; LOPES; PAGNUSSAT, 2017).

O aspecto da preservação ambiental relacionado às florestas plantadas está em ascensão devido a crescente preocupação com as mudanças climáticas causadas por ações antrópicas. O emprego de máquinas florestais autopropelidas e veículos de apoio, que compõem as atividades do ciclo de produção florestal, são potenciais emissores de gases emitidos pelo escapamento compostos por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOx) e hidrocarbonetos (HC), considerados gases poluentes (SANTOS et al., 2018; SOUZA et al., 2019).

Diante da importância da produtividade para o planejamento da colheita mecanizada de madeira e da sustentabilidade ambiental das florestas plantadas, objetivou-se a mensuração da produtividade, rendimento energético, emissão e sequestro de carbono na atividade de derrubada de madeira por meio da máquina florestal autopropelida *harvester* em florestas plantadas de *Pinus*.

Material e Métodos

Objeto de estudo

Os dados foram coletados na região do centro-leste no estado do Paraná. Segundo Alvares et al. (2013), a classificação de *Köppen Geiger* era clima temperado úmido - Cfb (Mesotérmico). A média do mês mais quente era inferior a 22 °C e do mês mais frio inferior a 18 °C. Não apresentava estação seca, o verão era brando e as geadas eram severas e frequentes (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, 2022). O solo era o Cambissolo Háplico Tb Distrófico de acordo com Santos et al. (2018) e o relevo foi identificado como forte ondulado conforme Viel, Rosa e Mendes Junior (2020).

A floresta era plantada de *Pinus* em espaçamento 3,3 m x 1,8 m, volume médio individual de árvores de $0,64 \pm 0,04 \text{ m}^3$ e idade de corte de $19,3 \pm 0,22$ anos. O sistema de colheita adotado foi o *cut-to-length*. A derrubada e o processamento da madeira foram executados pela máquina florestal autopropelida *harvester* da marca *Ponsse* - modelo *Bear 8W*, motor com potência nominal de 240 kW, massa aproximada de 24.500 kg, rodados de pneumáticos com tração 8 x 8.

Metodologia

O estudo de tempos foi aplicado para determinação da produtividade do *harvester* por meio do método de tempo contínuo. Os elementos de máquina consistiram em corte, descascamento, traçamento e alocação das toras ao solo. O tamanho da amostra (Equação 1) foi determinado de acordo com Stevenson (2017), com nível de confiança de 95% e erro de 5%.

$$n = \left(\frac{z \times s}{a \times \bar{x}} \right)^2 \quad (1)$$

em que:

n é o número de observações de ciclos operacionais necessários;

z é o número de desvios padrões em uma distribuição normal necessário para se obter o nível de confiança desejado;

s é o desvio padrão da amostra inicial;

a é a precisão desejada da amostra em %;

\bar{x} é a média da amostra inicial.

A produtividade do *harvester* (Equação 2) foi obtida segundo Costa et al. (2017).

$$\prod \dot{v} = \frac{NA * VA}{HE} \quad (2)$$

em que:

$\prod \dot{v}$ é a produtividade em $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$;

NA é o número de árvores cortadas e processadas;

VA é o volume médio por árvore em m^3 ;

HE é o tempo de trabalho efetivo.

O rendimento energético indica a massa de combustível necessária para produzir uma unidade de potência na unidade de tempo (PEREIRA et al., 2015). No cálculo (Equação 3), aplicou-se o consumo específico efetivo de combustível, o qual expressa a quantidade de combustível consumida por unidade de potência nominal da máquina florestal em consonância a Brown et al. (2021).

$$\mathfrak{R} = \frac{C_{spc}}{Pr} \quad (3)$$

\mathfrak{R} é o rendimento energético em $\text{g kW}^{-1} \text{ m}^3$;

C_{spc} é o consumo específico em $\text{g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

Pr é a produtividade em $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$.

As estimativas de emissão de carbono do *harvester* (Equação 4) foi calculada conforme Ackerman et al. (2017).

$$Emiss\tilde{a}o = \frac{Combust\tilde{v}el * FD * FO * C}{C_{(m.w.)}} \quad (4)$$

em que:

Emissão é a quantidade de carbono emitido pelo *harvester* em kg m⁻³;

Combustível é o volume de diesel consumido diariamente;

FD é o teor de carbono do diesel, assumido como 0,731757 kg C L⁻¹;

FO é a fração de diesel oxidado, assumido como 1,00;

$\frac{CO_{2(m.w.)}}{C_{(m.w.)}}$ é o fator de conversão de *C* em CO₂ baseado no peso molecular, 3,6667 g CO₂ g C⁻¹;

Proposta por Christie e Scholes (1995), a equação 5 demonstra a estimativa do armazenamento de carbono na madeira da floresta de *Pinus*.

$$C_p = V_k \times p_h \times F_{carbon} \quad (5)$$

em que:

C_p é a quantidade de carbono armazenada em produtos madeireiros em Mg;

V_k é o volume de madeira colhida em m³;

p_h é a densidade de madeira seca ao ar em Mg m⁻³;

F_{carbon} é a fração de carbono, assumida como sendo 0,5.

Resultados e Discussão

Foi observado um total de 380 ciclos de trabalho, portanto, superior ao tamanho mínimo da amostra. Ademais, a produtividade média da máquina florestal autopropelida apresentou o valor de 20,01 m³ h⁻¹. Acosta et al. (2021) observou que o espaçamento e o volume médio individual (VMI) das árvores são fatores determinantes para a produtividade do *harvester* em plantios florestais na colheita de madeira. Portanto, quanto maior o VMI e menor o espaçamento, maior será a produtividade.

Ao considerar o rendimento energético de 7,90 g kW⁻¹ m³, constatou-se a existência de uma relação inversa deste com a produtividade média. Diante disso, torna-se desejável que as máquinas florestais autopropelidas tenham uma maior produtividade com um menor consumo de combustível, buscando a otimização dos recursos produtivos (SANTOS et al., 2021).

A emissão de carbono pelo *harvester* foi de 1,72 kg m⁻³ e o armazenamento de carbono apresentou o valor de 48.796 mg. Prinz et al. (2018), ao estudar três modelos de *harvesters* em diferentes condições operacionais, verificou uma variação de emissão de carbono entre 2,80 e 4,00 kg m⁻³. Esses autores destacam que a maior emissão de carbono é ocasionada quando a redução do consumo de combustível não é prioridade, visando atender, por exemplo, o prazo da colheita de madeira. O planejamento adotado pela empresa e a produtividade, pode explicar a baixa emissão de carbono da máquina florestal autopropelida *harvester* nas condições estudadas.

Conclusões

A produtividade média do *harvester* em florestas plantadas de *Pinus* apresenta uma relação inversamente proporcional ao rendimento energético.

A emissão de carbono é 197,67% menor que a média de emissão de carbono por *harvester* em florestas de *Pinus*.

O armazenamento de carbono de florestas plantadas de *Pinus* é de 48.796 mg.

Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Referências Bibliográficas

ACKERMAN, P.; WILLIAMS, C.; ACKERMAN, S.; NATI, C. Diesel consumption and carbon balance in South African Pine clear-felling CTL operations: a preliminary case study. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 38, n. 1, p. 65-72, 2017.

ACOSTA, F. C.; SILVA, I. M.; GARCIA, M. L.; MELO, R. R. de. Productivity and costs of harvester cutting of teak trees for thinning. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 2, p. 1-8, 2021.

ALVARES, C. A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711- 728, 2014.

BROWN, R. O.; RODRIGUES, C. R. C.; RODRIGUES, C. K.; NAKAJIMA, N. Y.; SILVA, D. A.; ROBERT, R. C. G. Productivity and energy efficiency of winching operations in pine stands in mountainous regions. **Floresta**, v. 51, n. 2, p. 502-511, 2021.

CHRISTIE, S. I.; SCHOLLES, R.J. Carbon storage in eucalyptus and pine plantations in South Africa. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 38, p. 231–241, 1995.

COSTA, E. M. da; MARZANO, F. L. da C.; MACHADO, C. C.; LEITE, E. da S. Desempenho e custos operacionais de um *harvester* em floresta de baixa produtividade. **Revista Engenharia na Agricultura**. v. 25, n. 02, p. 124-131, 2017.

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

GOMES, C. A. F. C.; PALUDETO, J. G. Z.; PORTELA, R. M.; MARCOLIN, G. Influência da declividade na produtividade e altura de tocos no corte de *Pinus taeda* L. por *harvester*. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**. v.13, p. 1-13, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Tempo**. Brasília, DF: INMET. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 05 maio 2022.

LIMA, G. F. de; OLIVEIRA, F. M. de. Manutenção mecânica, eficiência operacional e custo de produção de *harvesters* de pneus e esteiras. **Scientia Rural**. v.18, p. 1-13, 2019.

LOPES, E. da S.; PAGNUSSAT, M. B. Effect of the behavioral profile on operator performance in timber harvesting. **International Journal of Forest Engineering**. v. 28, p. 1-6, 2017.

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

PEREIRA, A. L. N.; LOPES, E. S.; DIAS, A. N. Análise técnica e de custo do *feller buncher* e *skidder* na colheita de madeira em diferentes produtividades do povoamento. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 981-989, 2015.

PRINZ, R.; SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; ROUTA, J.; ASIKAINEN, A. Modifying the settings of CTL timber harvesting machines to reduce fuel consumption and CO₂ emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 208-217, 2018.

SANTOS, D. W. F. do N.; FERNANDES, H. C.; VALENTE, D. S. M.; LEITE, E. da S. Desempenho técnico, econômico e ambiental do *harvester* em distintas rotações do motor. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 118, p. 319-326, 2018.

SANTOS, H. G.; ALMEIDA, J. A.; OLIVEIRA, J. B.; LUMBRERAS, J. F.; ANJOS, L. H. C.; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018, 353 p.

SANTOS, D. W. F. do N.; FERNANDES, H. C.; VALENTE, D. S. M.; LEITE, E. da S. Desempenho operacional de máquinas florestais em função do número de dias da escala de trabalho. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 64, p. 1-7, 2021.

SOUZA, C. L.; SCHETTINO, S.; SILVA, D. D.; GUIMARÃES, N. V. Balanço de Carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais. **Caderno de Ciências Agrárias**. v. 11, p. 01-08, 2019.

STEVENSON, W. J. **Operations management**. 13ª ed. New York: McGraw Hill, 928 p. 2017.

VIEL, J. A.; ROSA, K. K.; MENDES JUNIOR, C. W. Avaliação da Acurácia Vertical dos modelos digitais de elevação SRTM, ALOS, World 3D e ASTER GDEM: um estudo de caso no Vale dos Vinhedos, RS – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 13, n. 05, p. 2255 – 2268, 2020.

