



Abordagem multicritério na seleção de máquinas para o corte mecanizado de madeira

William MASIOLI ¹, Nilton César FIEDLER ¹, Lucíelia Lacerda da SILVA ^{*1},
Luís Carlos de FREITAS ², Leonardo Cassani LACERDA ¹

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.

² Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil.

*E-mail: lucielialacerda@gmail.com

Submetido: 05/04/2025; Aceito: 30/09/2025; Publicado: 18/11/2025.

RESUMO: A seleção de máquinas para o corte mecanizado de madeira pode tornar-se uma decisão altamente complexa devido ao equilíbrio necessário entre critérios tradicionais e inovadores de comparação. O objetivo deste estudo foi aplicar uma abordagem multicritério na seleção de máquinas para o corte mecanizado de madeira. Foram propostas três alternativas de harvesters (PH7, JDW, VM6), avaliadas com base em seis critérios relativos à telemetria das máquinas, sendo: produtividade, eficiência operacional, disponibilidade mecânica e razão de apontamentos produtivos, improdutivo e mecânicos (PR, EO, DM, RAP, RAI, RAM). Por meio da comparação por pares, a máquina VM6 obteve 72% de chances de ser escolhida, seguida da JDW, com 70%, e da PH7, com 60%. Os resultados foram validados por meio de análise estatística, que indicou que a máquina PH7 foi significativamente inferior à VM6 e à JDW em relação a PR, RAI e RAM. A análise multicritério apresentou resultados significativos quanto à ponderação das variáveis consideradas no estudo, com base nas opiniões de especialistas. No entanto, recomenda-se que estudos futuros considerem um maior número de variáveis, como custo de aquisição, durabilidade a longo prazo, custos de manutenção e compatibilidade com as condições do terreno florestal, para uma decisão mais assertiva no processo de escolha.

Palavras-chave: análise AHP; harvester; mecanização florestal; telemetria; tecnologia embarcada.

Multi-criterion approach in selecting machines for mechanized wood cutting

ABSTRACT: The selection of machines for mechanized wood cutting can become a highly complex decision due to the necessary balance between traditional and innovative comparison criteria. The objective of this study was to apply a multicriteria approach in the choice of machines for mechanized wood cutting. Three harvester alternatives (PH7, JDW, VM6) were proposed, evaluated on six criteria based on machine telemetry, being Productivity, Operational Efficiency, Mechanical Availability, Ratio of Productive, Unproductive and Mechanical Notes (PR, EO, DM, RAP, RAI, RAM). Through peer comparison, the VM6 machine had a 72% chance of being chosen, followed by JDW with 70% and PH7 with 60%. The results were validated by means of statistical analysis, which indicated that the PH7 machine was significantly inferior to the VM6 and the JDW in relation to PR, RAI and RAM. The multicriteria analysis showed significant results regarding the weighting of the variables considered in the study based on the opinion of experts. However, it is recommended that future studies consider a greater number of variables, such as acquisition cost, long-term durability, maintenance costs, and compatibility with the conditions of the forest terrain, for a more assertive decision in the selection process.

Keywords: AHP analysis; harvester; forestry mechanization; telemetry; embedded technology.

1. INTRODUÇÃO

Diante da variedade de máquinas destinadas à colheita de madeira, considerando o sistema de toras curtas, a escolha da melhor alternativa é pautada pelo custo, exigindo a avaliação do investimento inicial e dos custos operacionais para o gerenciamento do orçamento. Outro fator a ser considerado é a capacidade da máquina de produzir resultados de alta qualidade que impactam diretamente a produtividade geral (ÖZCEYLAN et al., 2015). Ademais, a facilidade de manutenção, a disponibilidade de peças de reposição e o suporte de serviço são fatores críticos que podem impactar a eficiência geral da máquina. Özgen et al. (2011) enfatizam a importância das considerações de manutenção na seleção de

máquinas. Para uma escolha adequada, é fundamental considerar variáveis técnicas, como produtividade, eficiência operacional e disponibilidade mecânica, além de monitorar os dados relativos aos apontamentos produtivos e mecânicos. Nesse contexto, o uso de informações provenientes da telemetria satelital, que fornecem dados em tempo real sobre os equipamentos, não só potencializa a produtividade dos processos, como também contribui para decisões mais assertivas (SILVA; LONGHINI, 2020).

A aplicação de métodos como a AHP (Análise Hierárquica de Processos) tem-se mostrado eficaz em diversos contextos florestais, como na seleção de sistemas de extração em bosques de carvalho no Mediterrâneo. Nesse

caso, a escolha de forwarders e transportadores de cabos revelou-se a opção mais apropriada para a operação (TOCCI et al., 2022). Esse método, entre os métodos multicritérios, tem sido amplamente aplicado em análises de preferências de problemas complexos com vários critérios, por ser considerado de fácil utilização (KNIERIM, 2021).

O método AHP foi considerado mais adequado para a aplicação na gestão florestal sustentável do que outros métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) em duas dimensões competitivas: design e cálculo (GROŠELJ et al., 2024).

As contribuições da AHP no corte mecanizado são significativas, permitindo o aprimoramento dos processos de tomada de decisão em diversos aspectos da colheita e do processamento da madeira. A AHP pode ser utilizada para avaliar critérios como custos operacionais, rendimento por hectare e consumo de combustível na otimização do corte de madeira (GHAFFARIYAN; BROWN, 2018). Essa ferramenta pode ser integrada a um sistema de apoio à decisão baseado em SIG, combinando critérios operacionais e silviculturais, permitindo uma seleção mais eficiente de locais para colheita mecanizada em terrenos íngremes (EDERHAHRD et al., 2025). Pode ser integrada à avaliação do desempenho de máquinas, bem como aprimorar a produtividade por meio de técnicas avançadas de redes neurais artificiais (CHTVERIIKOVA et al., 2024; SHUKLA; GUPTA, 2024).

Embora a análise multicritério ofereça benefícios substanciais no corte mecanizado de madeira, é essencial considerar possíveis limitações, como a complexidade de integrar múltiplos critérios e a necessidade de dados precisos. Equilibrar os fatores é crucial para maximizar a eficácia da análise nesse campo.

Neste sentido, o presente trabalho propõe empregar o método de Análise Hierárquica (AHP) no tratamento de um problema decisório sob múltiplos critérios, cujo objetivo principal é a escolha de máquinas para o corte mecanizado de madeira no sistema de toras curtas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em sete áreas operacionais de povoamentos de *Eucalyptus* sp., submetidos ao regime de corte raso aos sete anos para produção de celulose, no município de Eunápolis, Bahia (Figura 1). Eunápolis é classificada como clima Aw, segundo a classificação de Köppen-Geiger. Ademais, a temperatura média é de 23,5 °C e a pluviosidade média é de 990 mm anuais (PINHEIRO; PINHEIRO, 2023).

O sistema de colheita adotado foi o de toras curtas, com o uso de harvesters e forwarders. Para atender a uma demanda produtiva de 24,00 m³ PMH⁻¹, foram analisados dados de três harvesters: Ponsse Ergo H8, John Deere 2144G e Volvo EC 220 DL. Esses equipamentos estavam equipados, respectivamente, com cabeçotes das marcas Ponsse (H7 HD Euca), Waratah (H225E) e Maskiner (SP 661 LF). As características técnicas das máquinas-base e dos cabeçotes estão detalhadas na Tabela 1.

2.2. Base de dados

Os dados da pesquisa foram obtidos por meio de consulta a um banco de dados derivado da tecnologia embarcada nas máquinas, referentes a sete áreas de corte raso

durante os meses de janeiro a junho de 2022. Os dados consistiram em atributos técnicos relacionados à região, à identificação do talhão, ao grau de declividade da área, ao ciclo, à rotação, à distância percorrida, à idade de corte, aos dados do inventário pré-corte (IPC), ao tipo de manejo, ao tipo de máquina e ao sistema de colheita, e aos dados de telemetria das máquinas.

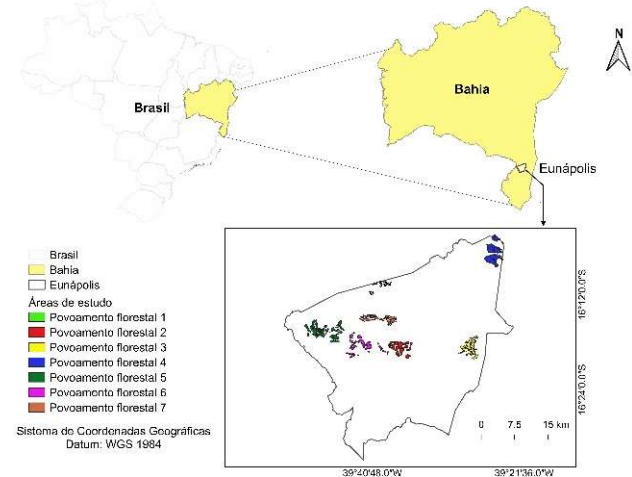


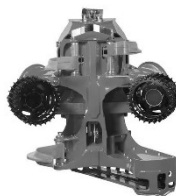


Figura 1. Localização dos povoamentos florestais de estudo.
Figure 1. Location of the study forest stands.

Tabela 1. Características técnicas dos harvesters analisados.
Table 1. Technical characteristics of the harvesters analyzed.

Ponsse Ergo H8, com cabeçote Ponsse H7 HD Euca (PH7)	
	Máquina base com peso operacional de 21.500 kg, rodados de pneus (8X8), potência de 210 kW, força de tração de 195 kN, equipada com grua C44+, com alcance de 10 m e ângulo de giro de 250°. Implemento com peso operacional de 1.300 kg, abertura máxima de 650 mm, força de alimentação de 30 kN e sistema de alimentação com 3 rolos, com velocidade de 5 m/s.
John Deere 2144G, com cabeçote Waratah H225 E (IDW)	
	Máquina base com peso operacional de 25.572 kg, rodados de esteiras, potência de 222 kN, força de tração de 119 kN, equipada com grua padrão com alcance de 8,5 m. Implemento com peso operacional de 2.300 kg, abertura máxima de 660 mm, força de alimentação de 21,2 kN e sistema de alimentação com 3 rolos, com velocidade de 5,2 m/s.
Volvo EC 220 DL, com cabeçote SP Maskiner 661 LF (VM6)	
	Máquina base com peso operacional de 21.000 kg, rodados de esteiras, potência bruta de 123 kW, força de tração de 115 kN, equipada com grua padrão com alcance de 5,7 m. Implemento com peso operacional de 1.520 kg, abertura máxima de 550 mm, força de alimentação de 21,4 kN e sistema de alimentação com 2 rolos, com velocidade de 0,7 m/s.

Fonte: Adaptado de Ponsse Harvester H8 (2025); Ponsse cabeçote H7 HD Euca (2025); John Deere 2144G (2025); Waratah H225 E (2025); Volvo EC 220 DL (2025); SP Maskiner 661 LF (2025).

Source: Adapted from Ponsse Harvester H8 (2025); Ponsse head H7 HD Euca (2025); John Deere 2144G (2025); Waratah H225 E (2025); Volvo EC 220 DL (2025); SP Maskiner 661 LF (2025).

Para este estudo, foram utilizados o tipo e os dados de telemetria das máquinas, e as variáveis quantitativas contínuas foram estimadas pela média aritmética diária. Para minimizar as fontes de variação externa, assumiram-se valores médios para as variáveis não consideradas no estudo. Assim, dos 181 dias de trabalho, apenas 61 apresentaram dados suficientes para as análises. Para assegurar maior homogeneidade dos dados de tecnologia embarcada, dentre os 61 dias com dados suficientes para as análises, foram selecionados aleatoriamente 20 dias em todas as máquinas analisadas.

2.3. Construção de hierarquias e definição de prioridades dos critérios

Em seguida, foram identificadas, por meio de pesquisas na literatura disponível, três variáveis reportadas como indicadores de qualidade na operação: produtividade, eficiência operacional e disponibilidade mecânica, conforme as Equações 1, 2 e 3, respectivamente (BROWN et al., 2020; STOILOV et al., 2021; VARCH et al., 2023). Sugerimos o uso de três variáveis derivadas de dados da tecnologia embarcada: a razão de apontamentos produtivos, a razão de apontamentos improdutivos e a razão de apontamentos mecânicos, conforme as Equações 4, 5 e 6, respectivamente.

De acordo com a Figura 2, foram estabelecidos seis critérios de análise, divididos em duas categorias: critérios técnicos recorrentes (CTR) e critérios de telemetria (CTT). Os CTR incluem a Produtividade (m³·h⁻¹), a Eficiência

Operacional (EO%) e a Disponibilidade Mecânica (DM%). Já os CTT abrangem o Volume Médio por Apontamento (VMA), a Razão de Apontamentos Produtivos (RAP%) e a Razão de Apontamentos Improdutivos (RAI%).

$$PR = \frac{vmi}{nHT} \tag{01}$$

$$EO\% = \frac{HT-HI}{HT} \times 100 \tag{02}$$

$$DM\% = \frac{HT-HM}{HT} \times 100 \tag{03}$$

$$RAP\% = \frac{AP}{AT} \times 100 \tag{04}$$

$$RAI\% = \frac{AI}{AT} \times 100 \tag{05}$$

$$RAM\% = \frac{AM}{AT} \times 100 \tag{06}$$

em que: Pr = produtividade (m³·h⁻¹); vmi = volume médio individual da árvore (m³); n = número de árvores processadas; HT = tempo total de trabalho (horas); EO% = eficiência operacional (%); HI = tempo de interrupções totais (horas); DM% = disponibilidade mecânica (%); HM = tempo de interrupções mecânicas totais (horas); RAP% = razão de apontamentos produtivos (%); AP= apontamentos produtivos (unidades); AT = apontamentos totais (unidades); RAI% = razão de apontamentos improdutivos (%); AI = apontamentos improdutivos (unidades); RAM% = razão de apontamentos mecânicos (%), AM = apontamentos mecânicos (unidades).

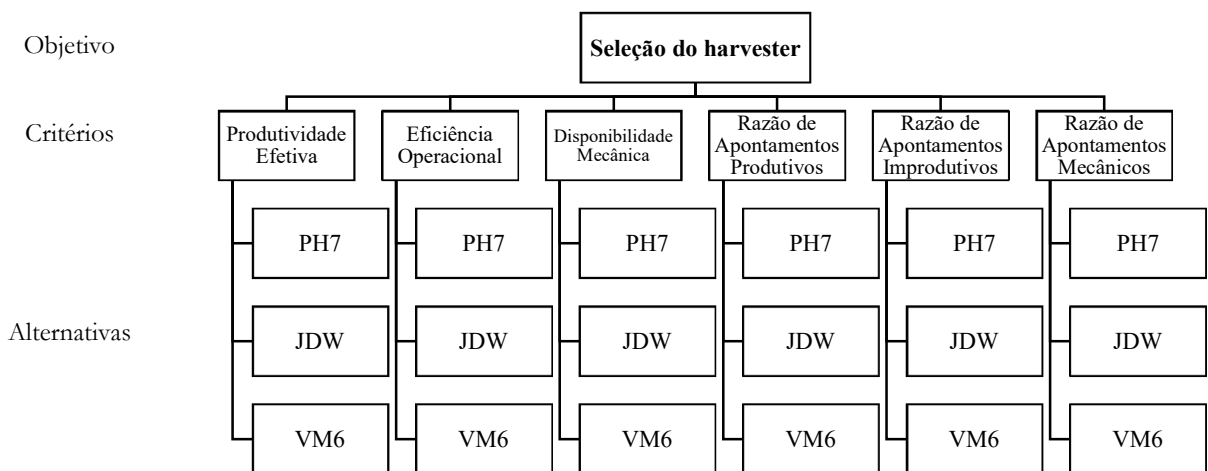


Figura 2. Objetivo, critérios e alternativas da análise multicritério de seleção do harvester para o corte mecanizado de madeira. Figure 2. Objective, criteria and alternatives of the multicriteria analysis of harvester selection for mechanized timber harvesting.

Uma metodologia baseada em análise multicritério foi adotada, conforme abordado por Latterini et al. (2022). A análise AHP é uma técnica que simplifica a tomada de decisões complexas, transformando avaliações subjetivas em valores numéricos. Ao organizar um problema em uma estrutura hierárquica, o AHP permite comparar critérios e alternativas em pares, atribuir pesos de importância e verificar a consistência das decisões por meio de uma taxa de consistência. Essa abordagem estruturada e quantitativa auxilia na escolha da melhor opção, garantindo que as decisões sejam coerentes e bem fundamentadas.

Para maximizar a confiabilidade da análise multicritério, foi desenvolvido e distribuído um questionário a especialistas

em operações florestais em todo o Brasil. Conforme a metodologia proposta por Saaty (1977), a análise multicritério determina um grau de importância dos critérios, que varia de 1 a 9. Os valores de comparação são definidos conforme a seguinte escala: 1 indica igual importância, 3 indica uma dominância fraca, 5 uma dominância moderada, 7 uma dominância forte e 9 uma dominância absoluta. Valores intermediários (2, 4, 6, 8) correspondem a escolhas entre os níveis de dominância estabelecidos, permitindo uma comparação mais detalhada entre os critérios e fornecendo uma base sólida para a tomada de decisão.

Conforme a Tabela 2, foram estimados valores diários para cada Critério (CR) e para cada Critério de Telemetria

(CT). A partir desses valores, obteve-se um índice da variável com base no máximo da estatística descritiva de cada critério, considerando todas as máquinas (PH7, JDW e VM6). Em seguida, o valor foi ponderado conforme o grau de importância obtido na análise hierárquica de processos

(AHP). Finalmente, foi estimado o percentual de chances de escolha, que corresponde à soma do produto do índice da variável pelo grau de importância da AHP, de modo que, quanto maior o valor percentual, maiores as chances de escolha da máquina.

Tabela 2. Classificação do grau de importância dos diversos critérios, segundo a AHP.
Table 2. Classification of the AHP importance level for the different criteria.

Critério (Cr)	Descrição	Índice da variável (iCr)	Grau de Importância AHP (gCr)
Produtividade (PR)	Rendimento por hora efetiva de trabalho da máquina, em metros cúbicos. O incremento do critério aumenta as chances de escolha.	$iPR = \frac{PR_i}{PR_{máx}}$	$iPR \times gPR$
Eficiência Operacional (EO%)	Tempo, em termos percentuais, de trabalho efetivo da máquina. O incremento do critério aumenta as chances de escolha.	$iEO = \frac{EO_i}{EO_{máx}}$	$iEO \times gEO$
Disponibilidade Mecânica (DM%)	Tempo, em termos percentuais, durante o qual a máquina esteve mecanicamente disponível para a operação. O incremento do critério aumenta as chances de escolha.	$iDM = \frac{DM_i}{DM_{máx}}$	$iDM \times gDM$
Razão de Apointamentos Produtivos (RAP%)	Indicador percentual de apontamentos produtivos da máquina. O incremento do critério aumenta as chances de escolha.	$iRAP = \frac{RAP_i}{RAP_{máx}}$	$iRAP \times gRAP$
Razão de Apointamentos Improdutivos (RAI%)	Indicador percentual de apontamentos improdutivo da máquina. O incremento do critério reduz as chances de escolha.	$iRAI = 1 - \frac{RAI_i}{RAI_{máx}}$	$iRAI \times gRAI$
Razão de Apointamentos Mecânicos (RAM%)	Indicador percentual de apontamentos mecânicos da máquina. O incremento do critério reduz as chances de escolha.	$iRAM = 1 - \frac{RAM_i}{RAM_{máx}}$	$iRAM \times gRAM$
Chances de Escolha (%)			$\Sigma iCr \times gCr$

2.4. Análise Estatística

Para verificar o efeito do posicionamento de pilha na produtividade e no custo de produção da extração e do carregamento, foram conduzidos delineamentos inteiramente casualizados (DIC) para as variáveis-resposta: produtividade (m³.h⁻¹), eficiência operacional (%), disponibilidade mecânica (%), volume médio por apontamento (m³) e razão de apontamentos produtivos (%). Foram consideradas 20 repetições por tratamento.

Os dados dos diferentes experimentos estatísticos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (α=5%). Em seguida, foram submetidos ao teste de Bartlett para homogeneidade de variâncias (α = 5%), no qual as médias foram comparadas posteriormente por meio de ANOVA e do teste de Tukey (α = 5%). Para dados não paramétricos, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn (α = 5%).

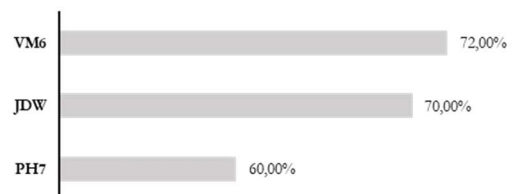
3. RESULTADOS

Os resultados da análise multicritério da seleção de harvester para o corte mecanizado de madeira são apresentados na Tabela 3. Foram realizadas 15 comparações em pares, nas quais os critérios PR, EO% e PR% apresentaram os melhores rankings na análise multicritério, com pesos superiores a 80% de prioridade, em detrimento dos critérios RAP, RAI e RAM. O intervalo de consistência dos critérios foi inferior a ±11,2%, e os critérios RAM e RAI apresentaram intervalos de consistência inferiores a ±1,3%.

Tabela 3. Matriz de comparação por pares que apresenta a importância relativa de cada critério para a seleção do harvester.

Table 3. Pairwise comparison matrix, showing the relative importance of each criterion for harvester selection.

Cr	PR	EO	DM	RAP	RAI	RAM
PR	1	2	3	6	7	8
EO	-	1	1	4	5	6
DM	-	-	1	4	5	5
RAP	-	-	-	1	2	2
RAI	-	-	-	-	1	1
RAM	-	-	-	-	-	1
Peso	0,415	0,226	0,208	0,068	0,043	0,043
RC ^d	0,015					



em que: PR = produtividade; EO = eficiência operacional; DM = disponibilidade mecânica; RAP = razão de apontamentos produtivos; RAI = razão de apontamentos improdutivo; RAM = razão de apontamentos mecânicos; ^a $\lambda_{máx}$ = maior autovalor da matriz de comparação; ^b IC = O índice de consistência IC é calculado por $\frac{\lambda_{máx} - n}{(n-1)}$ onde n é a ordem da matriz; ^c IR = índice de consistência randômico IR para $n = 6$ é 1,24; ^d A razão de consistência é definida por $RC = \frac{IC}{IR}$.

A Figura 3 apresenta os valores de eficiência operacional (%), disponibilidade mecânica (%), razão de apontamentos produtivos (%), razão de apontamentos improdutivos (%) e razão de apontamentos mecânicos (%) para as máquinas

PH7, VM6 e JDW. Destaca-se que a máquina PH7 apresentou os menores valores em todas as variáveis analisadas, diferindo significativamente das máquinas VM6 e JDW.

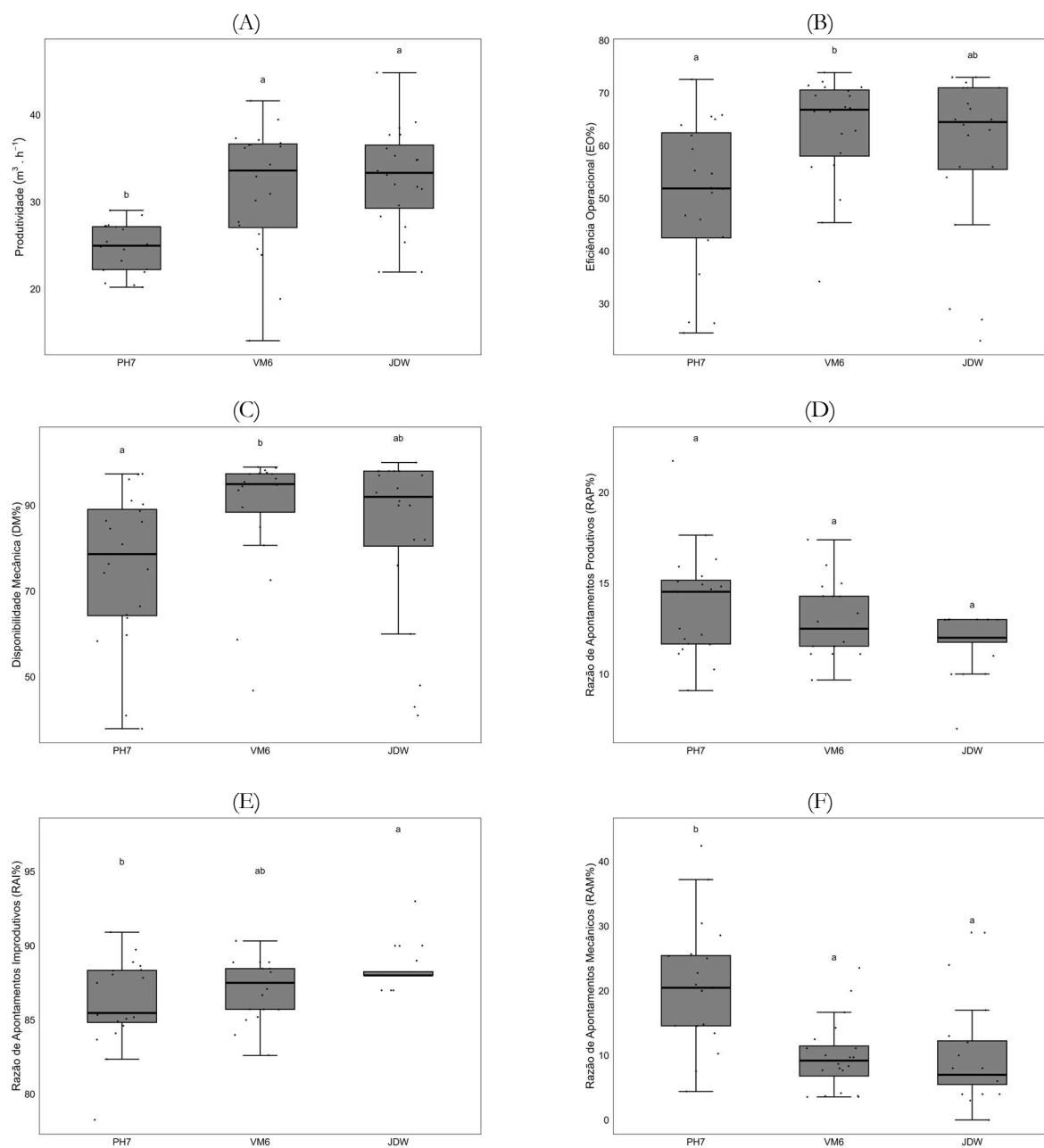


Figura 3. Resultado da análise estatística da produtividade (A), da eficiência operacional (B), da disponibilidade mecânica (C), da razão de apontamentos produtivos (D), da razão de apontamentos improdutivos (E) e da razão de apontamentos mecânicos (F) para as máquinas PH7, VM6 e JDW. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Dunn com 5% de probabilidade de erro.

Figura 3. Result of the statistical analysis of productivity (A), operational efficiency (B), mechanical availability (C), ratio of productive appointments (D), ratio of unproductive appointments (E) and ratio of mechanical appointments (F) for machines PH7, VM6 and JDW. Means followed by the same letter do not differ from each other by Dunn's test with a 5% probability of error.

4. DISCUSSÃO

Conforme a Tabela 3, os critérios estão claramente divididos em dois grupos: o primeiro, de maior prioridade (PR, EO, DM), e o segundo, de menor prioridade (RAP, RAI, RAM). O primeiro grupo representa mais de 85% da importância total. A matriz de julgamento mostra que o critério PR é claramente o mais importante, com valores elevados em todas as comparações em pares. A EO e a DM

têm importância semelhante, mas são menos importantes do que a PR e mais importantes do que os critérios do grupo 2, que correspondem aos critérios de telemetria (RAP, RAI e RAM).

Os resultados destacam que os indicadores apontados na literatura devem ser priorizados na seleção de um maquinário adequado para o corte mecanizado de madeira, com destaque para a produtividade da máquina. Por outro lado, os

indicadores de telemetria tiveram menor prioridade na escolha de um maquinário ideal para a operação.

Embora a tecnologia embarcada nas máquinas florestais ofereça a possibilidade de gestão baseada em dados em tempo real, ela ainda é pouco explorada em relação aos índices mais frequentemente reportados na literatura. Para Picchi et al. (2021) e Silva et al. (2021), indicadores de telemetria em máquinas florestais têm favorecido a obtenção de métricas de desempenho e a tomada de decisões baseadas em dados de forma mais eficaz. Todavia, a dependência de tecnologia, a sobrecarga de dados e a necessidade de pessoal qualificado para interpretar conjuntos de dados complexos podem constituir um impeditivo à utilização desses recursos.

Alguns desafios técnicos apontados na literatura devem contribuir para o desuso de critérios de telemetria. Por exemplo, Hargrove et al. (2008) demonstraram que o grande volume de dados e a exigência de elevado poder de processamento constituem desafios inerentes ao uso de dados de telemetria. Para Congalton (2018), pode haver variabilidade na precisão dos dados devido a fatores ambientais e ao processo recorrente de calibração dos sensores, o que pode levar a resultados não confiáveis e complicar o processo de tomada de decisão. Fassancht et al. (2023) relatam, como consequência, que há grande resistência à adoção de novas tecnologias entre os gestores florestais, o que deve limitar o uso de telemetria.

Com base na AHP, o VM6 é o harvester com as maiores chances de seleção para o corte mecanizado de madeira, apresentando pontuação global de 72%, ligeiramente superior à da JDW (70%). O VM6 parece oferecer o melhor equilíbrio entre PR, EO e DM, com os critérios mais importantes segundo os pesos AHP atribuídos. Além disso, o VM6 apresenta menos pausas improdutivas e mecânicas, maximizando o tempo efetivo de operação do corte mecanizado. A opção de máquina PH7 pode ser considerada uma alternativa secundária, em função da pontuação global observada (60%), especialmente em relação ao custo de aquisição de máquinas ou a parcerias específicas entre empresas que não foram avaliadas na pesquisa.

Os resultados da análise estatística (Figura 3) indicaram que, em relação à PR (A), a máquina PH7 obteve média de 24,7 m³ h⁻¹, enquanto as máquinas VM6 e JDW alcançaram médias de 31,5 e 32,77 m³ h⁻¹, respectivamente. Além de apresentarem PR significativamente superiores, as máquinas VM6 e JDW também exibiram distribuições mais amplas e medianas mais elevadas em comparação à máquina PH7.

Conforme Hiesl; Benjamin (2014), a PR da PH7 varia entre 6,1 e 26,5 (m³ h⁻¹), corroborando os valores encontrados na pesquisa. Além das características das máquinas, a idade dos operadores também pode influenciar a produtividade. Operadores com 20 anos de experiência apresentaram aumento de 23,6% na PR em cortes rasos, em comparação com aqueles com apenas 3 anos de experiência (MALINEN et al., 2018).

A máquina PH7 apresenta um coeficiente de variação mais elevado e uma média de EO de 50%. Silva et al. (2022), ao analisarem os indicadores operacionais de harvesters na Bahia e no Espírito Santo, observaram que as empresas avaliadas estabeleciam uma meta de EO de 78,4%. Segundo os autores, essa alta EO estava associada à redução do tempo de paradas operacionais. No caso do único harvester analisado que não atingiu a meta, o desempenho inferior foi atribuído ao maior tempo dedicado à manutenção corretiva e preventiva, às inspeções e ao transporte da máquina.

As máquinas VM6 e JDW não apresentaram diferenças significativas, com médias de EO de 63% e 59%, respectivamente. A baixa EO pode ser atribuída à duração das paradas não operacionais, sendo as principais: troca de turno, troca de material de corte, instrução/treinamento, abastecimento e inspeção. Os principais contribuintes para a diminuição da EO foram o tempo de manutenção corretiva e o aguardo de manutenção da frota. Esse resultado foi atribuído ao dimensionamento ineficiente da sua equipe de manutenção, considerando a demanda de serviços (SILVA et al., 2022). Quanto à DM (C), a máquina PH7 obteve média de 76%; a VM6, de 89%; e a JDW, de 84%. Sendo as principais paradas mecânicas relacionadas ao reparo da máquina principal e/ou de regulagens, seguidas do reparo do cabeçote. Lopes et al. (2017), ao avaliarem harvesters na colheita de *Pinus taeda* no Paraná em cenários otimizados de manutenção, observaram uma média de 91%.

Apesar do baixo volume de informações sobre o tipo e a qualidade dos apontamentos ao longo da operação de corte mecanizado, é possível observar que os harvesters utilizam diversos métodos de registro de telemetria operacional. Mediante computadores de bordo, por exemplo, é possível obter dados padronizados de tempo, posição e consumo de combustível, essenciais para avaliar o desempenho e a produtividade da máquina (KEMMERER; LABELLE, 2021). Dados de imagem e de medição permitem o monitoramento abrangente das atividades de colheita, facilitando a coleta de dados operacionais e de localização, o que favorece os cálculos de eficiência (LAPPALAINEN, 2021). Por fim, dispositivos projetados especificamente para registrar dados de corte registram automaticamente informações operacionais, aprimorando a precisão das avaliações de produtividade (XIAOGAN; JINGCHUAN, 2012).

Apesar da baixa representatividade dos critérios baseados na telemetria (15,4%), considera-se que estes critérios são úteis para monitorar o desempenho operacional dos harvesters. Todavia, os desafios técnicos e culturais limitam a utilização prática dos dados indiretos de telemetria, levando os tomadores de decisão a priorizar indicadores tradicionais como PR, EO e DM ao invés da RAP. Os resultados sugerem que o VM6 permaneceu se destacando como uma alternativa a ser considerada como equipamento ideal para o corte mecanizado. Ele apresenta um desempenho estatisticamente semelhante ao do JDW, mas sua pontuação elevada na AHP sugere que seu desempenho seja mais consistente e confiável em condições operacionais reais de trabalho.

O JDW é uma alternativa viável em condições de restrição de custos, com facilidade de manutenção ou adaptação em terrenos complexos, haja vista o desempenho adequado reportado pelas análises e o tipo de rodado, que favorece a manobrabilidade em comparação com as esteiras. No entanto, ele apresenta desvantagens sutis que o tornam uma opção de escolha secundária.

Embora a análise multicritério seja robusta, um tomador de decisão pode querer complementar a análise com outros fatores não considerados, como o custo de aquisição, a durabilidade a longo prazo, a facilidade de manutenção ou a compatibilidade com as condições específicas do terreno florestal. Neste contexto, sugere-se que novas análises sejam conduzidas de modo a incluir um maior número de variáveis, para maior assertividade no processo de tomada de decisão.

5. CONCLUSÕES

Com base na análise multicritério e nos dados estatísticos de seis meses das três opções de máquinas para o corte mecanizado de madeira, o VM6 é a melhor escolha, com 72% de probabilidade. Ele oferece um bom equilíbrio entre produtividade (31,5 m³ h⁻¹), eficiência operacional (60%) e disponibilidade mecânica (80%), critérios de maior importância na análise multicritério. Além disso, o VM6 apresentou, em média, menos pausas improdutivas e mecânicas, maximizando o tempo efetivo de trabalho.

O JDW é uma alternativa muito próxima das opções de escolha para a operação em relação à VM6, com mais de 70% de probabilidade de ser escolhido. Sua escolha pode ser justificada por condições específicas, como restrições de custo de aquisição, facilidade de manutenção, disponibilidade de peças ou melhor adaptação a terrenos complexos.

A opção PH7 é a menos recomendada em relação aos critérios observados no estudo em questão, devido ao seu desempenho inferior em relação a PR, RAI e RAM. A máquina florestal em questão deve ser considerada apenas na hipótese de vantagens significativas em outros aspectos, como o custo de aquisição ou de parcerias comerciais.

A análise multicritério apresentou resultados significativos quanto à ponderação dos critérios considerados no estudo com base na opinião de especialistas. Todavia, recomenda-se que estudos futuros sejam desenvolvidos considerando um maior número de variáveis, incluindo custo de aquisição, durabilidade a longo prazo, custos de manutenção e compatibilidade com as condições do terreno florestal, para uma tomada de decisão mais assertiva.

6. REFERÊNCIAS

- CHETVERIKOVA, I.; ZIMARIN, S.; CHERENKOV, D. Multidimensional analysis of hydraulic manipulators of forest machines. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE ON MODERN FORESTRY AND FOREST COMPLEX, 7, 2024. *Anais...* p. 190-196. Disponível em: https://doi.org/10.58168/mfcc2024_190-196. Acessado em: 31 mar. 2025.
- BROWN, M.; GHAFFARIYAN, M. R.; BERRY, M.; ACUNA, M.; STRANDGARD, M.; MITCHELL, R. The progression of forest operations technology and innovation. *Australian Forestry*, v. 83, n. 1, 0. 1-3, 2020. <https://doi.org/10.1080/00049158.2020.1723044>
- DE SOUSA, B. M.; LONGHINI, T. M. Implantação de sistema de IOT para rastreamento de máquinas de terraplenagem a serviço de uma indústria de celulose. *Exacta*, v. 20, n. 3, p. 666-687, 2022. <https://doi.org/10.5585/exactaep.2021.16859>
- EBERHARD, B.; TRAILOVIĆ, Z.; MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. A Gis-Based Decision Support Model (DSM) for harvesting system selection on steep terrain: integrating operational and silvicultural criteria. *Forests*, v. 16, n. 5, e854, 2025. <https://doi.org/10.3390/f16050854>
- FASSNACHT, F. E.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A.; NÆSSET, E. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry*, v. 97, n. 1, p. 11-37, 2024. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad024>
- FRASER, B. T.; CONGALTON, R. G. Issues in Unmanned Aerial Systems (UAS) data collection of complex forest environments. *Remote Sensing*, v. 10, n. 6, e908, 2018. <https://doi.org/10.3390/RS10060908>
- GHAFFARIYAN, M. R.; BROWN, M. Selecting the efficient harvesting method using multiple-criteria analysis: A case study in south-west Western Australia. *Journal of Forest Science*, v. 59, n. 12, p. 479-486, 2018. <https://doi.org/10.17221/45/2013-JFS>
- GROŠELJ, P.; ZANDEBASIRI, M., & PEZDEVŠEK MALOVRH, Š. Evaluation of the European experts on the application of the AHP method in sustainable forest management. *Environment, Development and Sustainability*, v. 26, n. 11, p. 29189-29215, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03859-w>
- HARGROVE, W. W.; SPRUCE, J. P.; GASSER, G.; HOFFMAN, F. M. Toward a national early warning system for forest disturbances using remotely sensed canopy phenology. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 75, n. 10, p. 1150-1156, 2009. Disponível em: http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_hargrove002.pdf. Acessado em: 31 mar. 2025.
- HIESL, P.; BENJAMIN, J. G. Harvester productivity and cost in small diameter timber stands in Central Maine, USA. In: COUNCIL ON FOREST ENGINEERING ANNUAL MEETING, 37th, 2014. *Proceedings...* Moline, IL. 2014, 8p.
- JOHN DEERE. *Máquina Florestal 2144G*. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/m%C3%A1quinas-florestais/2144g/>. Acessado em: 31 mar. 2025.
- KNIERIM, L. F. **Emprego do método multicritério de análise hierárquica (AHP) como apoio à tomada de decisão na seleção de colhedoras de arroz irrigado**. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/23333>. Acessado em: 31 mar. 2025.
- LATTERINI, F.; STEFANONI, W.; VENANZI, R.; TOCCI, D.; PICCHIO, R. GIS-AHP Approach in forest logging planning to apply sustainable forest operations. *Forests*, v. 13, n. 3, e484, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13030484>
- MALINEN, J.; TASKINEN, J.; TOLPPA, T. Productivity of cut-to-length harvesting by operators' age and experience. *Croatian Journal of Forest Engineering*, v. 39, n. 1, p. 14-22, 2018.
- ÖZCEYLAN, E.; KABAK, M.; DAĞDEVIREN, M. A fuzzy-based decision-making procedure for machine selection problems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, v. 30, n. 3, p. 1841-1856, 2016. <https://doi.org/10.3233/IFS-151895>
- ÖZGEN, A.; TUZKAYA, G.; TUZKAYA, U. R.; ÖZGEN, D. A multi-criteria decision making approach for machine tool selection problem in a fuzzy environment. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, v. 4, n. 4, p. 431-445, 2011. <https://doi.org/10.2991/ijcis.2011.4.4.3>
- PICCHI, G.; SANDAK, J.; GRIGOLATO, S.; PANZACCHI, P.; TOGNETTI, R. Smart HARVEST OPERATIONS AND TIMBER PROCESSING FOR IMPROVED FOREST MANAGEMENT. In: TOGNETTI, R.; SMITH, M.; PANZACCHI, P. (Eds). *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions - Managing Forest Ecosystems*, v. 40, Springer, Cham.

2022. p. 317-359. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2_9

PINHEIRO, J. G. M.; PINHEIRO, C. M. Análise da arborização urbana do bairro Pequi, Eunápolis-Bahia. **Revista do Laboratório de Aprendizagem em História e Geografia**, v. 3, n. 3, p. 18-30, 2023.

PONSSE. **Cabeçote Harvester PONSSE H7 HD Euca**. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/ponsse/prod-uct-56915-1558035.html>. Acessado em: 31 mar. 2025.

PONSSE. **Harvester Ponsse Ergo H8**. 2025. Disponível em: https://www.ponsse.com/pt/produtos/harvesters/produto/-/p/ergo_8w#/. Acessado em: 07 de março de 2025.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

SILVA, A. A.; MACHADO, C. C.; GOMES, R. R. M.; SCHETTINI, B. L. S.; MINETTE, L. J.; NUNES, Í. L.; VILANOVA, P. H. Forest extraction management with the indicator of overall efficiency of forest machines (OEFM). **Revista Árvore**, v. 46, e4618, 2022. <https://doi.org/10.1590/1806-908820220000018>

SILVA, A. A.; MACHADO, C. C.; GOMES, R. R. M.; SCHETTINI, B. L. S.; MINETTE, L. J.; NUNES, I. L.; VILLANOVA, P. H. Indicador de eficiência global de Máquinas Florestais (EGMF) na gestão do corte florestal. **Scientia Forestalis**, v. 50, e3875, 2022. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.43>

SP MASKINER. **Cabeça Processadora SP 661 LF**. Disponível em: <https://spmaskiner.com/pt-br/cabecas-processadoras/cabecas-processadoras-lf/cabecas-processadora-sp-661-lf/>. Acessado em: 31 mar. 2025.

STOILOV, S.; PROTO, A. R.; ANGELOV, G.; PAPANDREA, S. F.; BORZ, S. A. Evaluation of salvage logging productivity and costs in the sensitive forests of Bulgaria. **Forests**, v. 12, n. 3, e309, 2021. <https://doi.org/10.3390/F12030309>

SHUKLA, H. M.; GUPTA, M. M. A comprehensive approach to enhance wood cutting productivity: Integration of spherical fuzzy DEMATEL and artificial neural networks. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/09544089241253083>. Acesso em: 31 mar. 2025.

TOCCI, D.; LATTERINI, F.; VENANZI, R.; GAGLIOPPA, P.; PICCHIO, R. GIS-AHP approach to select the most suitable extraction system in Mediterranean Oak Coppices under environmental constraints. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 22, n. 1, e61, 2022. <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13077>

VARCH, T.; MALLE, D.; ERBER, G.; GOLLOB, C.; SPINELLI, R.; VISSER, R.; HOLZINGER, A.; STAMPFER, K. A. A prototype for automated delimitation of work cycles from machine sensor data in cable yarding operations. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 44, n. 2, p. 233-243, 2023. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2248>

VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT. **Escavadeira Florestal EC220DL Forestry**. Disponível em: <https://www.volvoce.com/brasil/pt-br/about-us/news/2022/escavadeira-ec220dl-forestry/>. Acessado em: 31 mar. 2025.

WARATAH. **Cabeçote Processador H225E**. Disponível em: <https://www.waratah.com/pt/product/h225e/>. Acessado em: 31 mar. 2025.

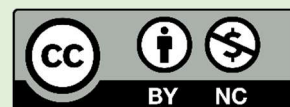
Agradecimentos: Agradecemos todo o amparo técnico e econômico à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).

Contribuições dos autores: W.M. – Conceptualization, methodology, Statistical analysis, writing (original draft); N.C.F. – Acquisition of financing, administration, supervision, validation and writing (review and editing); L.L.S. – Methodology, statistical analysis, writing (original draft, review and editing); L.C.F. – Administration, supervision, writing (review and editing); L.C.L. – Methodology, investigation, data collection and writing (review and editing). All authors read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiamentos: Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos por e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente ou ao segundo autor.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2025 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).