

**DIEGO WESLLY FERREIRA DO NASCIMENTO SANTOS**

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E ERGONÔMICA DE  
MÁQUINAS FLORESTAIS EM FUNÇÃO DE CONFIGURAÇÕES DO MOTOR E  
BOMBA HIDRÁULICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Domingos Sárvio M. Valente

Coorientadores: Haroldo C. Fernandes  
Amaury Paulo de Souza  
Paulo Roberto Cecon

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2019**

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

S237a  
2019

Santos, Diego Weslly Ferreira do Nascimento, 1989-

Avaliação técnica, econômica, ambiental e ergonômica de  
máquinas florestais em função de configurações do motor e  
bomba hidráulica / Diego Weslly Ferreira do Nascimento Santos.  
- Viçosa, MG, 2019.

122 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Domingos Sârvio Magalhães Valente.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Máquinas florestais. 2. Combustíveis. 3. Doenças  
profissionais. 4. Gases. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

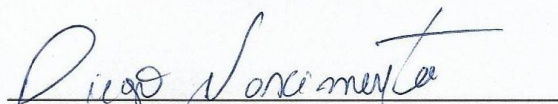
CDD 22. ed. 631.3

**DIEGO WESLLY FERREIRA DO NASCIMENTO SANTOS**

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E ERGONÔMICA DE  
MÁQUINAS FLORESTAIS EM FUNÇÃO DE CONFIGURAÇÕES DO MOTOR E  
BOMBA HIDRÁULICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 09 de agosto de 2019.

  
Diego Weslly Ferreira do Nascimento Santos  
Autor

  
Domingos Sarvio Magalhães Valente  
Orientador

*Dedico esse trabalho a Marcelino Nascimento, meu avô, por ser uma pessoa exemplar, com relação a respeito, honra, dedicação e trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por me conceder a vida e sempre iluminar meu caminho.

A minha mãe, pelo apoio incondicional e por ser essa pessoa maravilhosa, guerreira que sempre me deu muito carinho, amor e educação.

A Universidade Federal de Viçosa e em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela estrutura, acolhimento e pela realização do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola.

Ao professor Domingos Sárvio, por ter acreditado no meu trabalho e acreditar que a construção dessa pesquisa era possível.

Ao professor Haroldo Carlos Fernandes, por abrir as portas do Departamento de Engenharia para mim e pelos conselhos, confiança, paciência e por acreditar no meu trabalho. Muito obrigado professor.

Ao professor Amaury Paulo de Souza, pelos ensinamentos, conversas e distrações, além do mais me ensinou que quem envelhece é o corpo a essência da alma permanece jovem.

Ao professor Paulo Roberto Cecon, pela paciência, ensinamentos e enorme contribuição na construção dessa pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão do auxílio financeiro.

A todos os meus amigos e colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola, em especial a Marconi, Paulo, Anderson, Juliana, Larissa, Priscila, Wilson, Gustavo, Cleonice, Jessica, Geferson, Thiago, Zenil, Jorge, Rodrigo, Emanuel, Amélia, Inglith, Amanda e Gregory.

A Raoni, Wellington Cabeção, Gilmar Ramos, Brito, Weverton, Jackson e Rogério, pelo apoio incondicional e troca de conhecimento.

Ao laboratório de Ergonomia e Colheita Florestal da Universidade Federal de Viçosa, pelo apoio.

E aos demais que de alguma forma contribuíram para a realização desse estudo.

## BIOGRAFIA

DIEGO WESLLY FERREIRA DO NASCIMENTO SANTOS, filho de Marcelino Ferreira do Nascimento e Marineide Ferreira do Nascimento, nasceu no dia 25 de novembro de 1989 no município de Senhor do Bonfim, Bahia.

De 2006 a 2008 concluiu o ensino médio pelo Colégio Modelo Luiz Eduardo Magalhães.

De 2009 a 2014 graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia em 2014.

Em 2014, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Mecanização Agrícola, em nível de mestrado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2016, submeteu-se à defesa pública de dissertação, para a obtenção do título de Magister Scientiae

Em agosto de 2016, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa

Em julho de 2019, submeteu-se à defesa pública de tese, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

## RESUMO

SANTOS, Diego Weslly Ferreira do Nascimento, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2019. **Avaliação técnica, econômica, ambiental e ergonômica de máquinas florestais em função de configurações do motor e bomba hidráulica.** Orientador: Domingos Sárvio Magalhães Valente. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Amaury Paulo de Souza e Paulo Roberto Cecon.

O alto regime de rotação do motor e vazão da bomba hidráulica contribuem para a alta demanda de combustível das máquinas florestais. Normalmente esses tratores são operados com configurações de motor e bomba hidráulica que proporcionam a máxima força aos seus mecanismos hidráulicos e mecânicos, independentemente das condições operacionais. Contudo espera-se que em condições operacionais menos árduas, a exemplo de florestas de baixo volume, a máquina não demanda de toda a potência disponível. Mediante isso, objetivou-se com a presente pesquisa quantificar parâmetros técnicos, econômicos, ergonômicos e a emissão de gases poluentes de um *harvester* e um *forwarder* operando em distintas configurações do motor e da bomba hidráulica. As operações de ambas as máquinas foram analisadas em florestas com baixo, médio e alto volume. A operação com o *harvester* foi mensurada quando a máquina estava operando com rotação do motor em 2.060; 2.000; 1.950; e 1.900 rpm e vazões da bomba hidráulica em 300; 295; e 290 L min<sup>-1</sup>, totalizando 12 combinações. Com relação ao *forwarder*, a máquina foi configurada para trabalhar com a pressão da bomba em 240; 235; e 230 bar e rotações do motor de 1.550; 1.475; e 1.400 rpm, totalizando 9 combinações. O estudo técnico compreendeu a execução de um estudo de tempos e movimentos, produtividade, consumo horário de combustível e demanda de combustível. No que se refere a parâmetros econômicos, determinou-se o custo operacional e de produção das máquinas. Já o impacto ambiental foi mensurado por meio da determinação da quantidade de dióxido de carbono e metano emitidos. Por fim, avaliou-se os valores de aceleração resultante normalizada (Aren), Taxa de Ocupação Real (TOR) e Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR). As partir dos resultados, verificou-se que para obter os melhores resultados do ponto visto técnico, econômico, ambiental e ergonômico é necessário configurar o *harvester* e o *forwarder* de acordo com volume da madeira a ser cortada e processada ou extraída. A execução das operações com o *harvester* e

*forwarder* se caracteriza como causadora de doenças ocupacionais, com os sintomas de fadiga, cansaço físico e mental, produtividade comprometida e dores no braço, punho e mãos do lado esquerdo e direito dos operadores.

Palavras-chave: Demanda de combustível. Mecanização florestal. Doenças ocupacionais. Emissão de gases.

## ABSTRACT

SANTOS, Diego Wesly Ferreira do Nascimento, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2019. **Technical, economic, environmental and ergonomic evaluation of forest machines based on motor and hydraulic pump configurations**. Adviser: Domingos Sárvio Magalhães Valente. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes, Amaury Paulo de Souza and Paulo Roberto Cecon.

The high engine speed and flow rate of the hydraulic pump contribute to the high energy demand of forestry machines. Usually these tractors are operated with engine and hydraulic pump configurations that provide maximum strength to their hydraulic and mechanical mechanisms regardless of operating conditions. However, it is expected that in less arduous operating conditions, such as low volume forests, the machine does not lack all available power. Therefore, the objective of this research was to quantify technical, economic, ergonomic parameters and emission of polluting gases of harvester and forwarder operating in different engine and hydraulic pump configurations. The operations of both machines were analyzed in low, medium and high volume forests. The harvester operation was measured when the machine was operating with motor rotation at 2,060; 2,000; 1,950; and 1,900 rpm and hydraulic pump flows at 300; 295; and 290 L min<sup>-1</sup>, totaling 12 combinations. With regard to the forwarder, the machine has been configured to work with pump pressure at 240; 235; and 230 bar and engine revs of 1,550; 1,475; and 1,400 rpm, totaling 9 combinations. The technical study comprised the execution of a study of times and movements, productivity, hourly consumption of fuel and energy demand. With respect to economic parameters, the operational and production costs of the machines were determined. Environmental impact was measured by determining the amount of carbon dioxide and methane emitted. Finally, the values of the resulting normalized acceleration (Aren), the Real Occupancy Rate (TOR) and the Maximum Occupancy Rate were calculated considering Repetitive Activities (TOMCAR). From the results, it was verified that to obtain the best results from the technical, economic, environmental and ergonomic points it is necessary to configure the harvester and forwarder according to the volume of the wood to be cut and processed or extracted. The performance of harvester and forwarder operations is characterized as causing occupational diseases, with symptoms of fatigue, physical and mental fatigue,

compromised productivity and pains in the arm, wrist and hands on the left and right sides of operators.

Keywords: Fuel demand. Forest mechanization. Occupational diseases. Emission of gases.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E ERGONÔMICA DE HARVESTER EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR E VAZÃO DA BOMBA HIDRÁULICA.....	18
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	22
2.2. SISTEMA DE COLHEITA.....	22
2.3. UNIDADES EXPERIMENTAIS .....	23
2.4. MÁQUINA UTILIZADA.....	23
2.5. INSTRUMENTAÇÃO DA MÁQUINA.....	24
2.6. DETERMINAÇÃO DO VOLUME INDIVIDUAL DAS ÁRVORES .....	25
2.7. SELEÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR .....	26
2.8. SELEÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA HIDRÁULICA .....	26
2.9. PARÂMETROS TÉCNICOS.....	27
2.9.1. Estudo de tempos e movimentos .....	27
2.9.2. Produtividade.....	28
2.9.3. Consumo horário de combustível.....	28
2.9.4. Demanda de combustível.....	29
2.10. ANÁLISE DE CUSTOS.....	29
2.10.1. Custo operacional .....	29
2.10.1.1. Custo fixo .....	30
2.10.1.1.1. Custo com depreciação .....	30
2.10.1.1.2. Custo com juros .....	31
2.10.1.1.3. Custo com seguro.....	31
2.10.1.1.4. Custo com segurança .....	31
2.10.1.1.5. Custo com pessoal administrativo .....	32
2.10.1.1.6. Custo com salário de operador.....	32
2.10.1.1.7. Custo com pessoal de manutenção .....	33
2.10.1.2. Custo variável .....	33
2.10.1.2.1. Custo com combustível.....	33
2.10.1.2.2. Custo com óleo hidráulico .....	34
2.10.1.2.3. Custo com óleo lubrificante .....	34
2.10.1.2.4. Custo com graxa.....	34
2.10.1.2.5. Custo com óleo de corrente.....	34
2.10.1.2.6. Custo com peças de reposição .....	35
2.10.1.2.7. Custo com organização da área do módulo.....	35

2.10.2. Custo de produção .....	36
2.11. EMISSÃO DE GASES POLUENTES.....	36
2.12. PARÂMETROS ERGONÔMICOS .....	36
2.12.1. Avaliação da exposição a vibrações de corpo inteiro.....	36
2.12.2. Índice TOR (Taxa de Ocupação Real) – TOMCAR (Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas).....	37
2.13. ANÁLISE DOS DADOS .....	39
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
3.1. PARÂMETROS TÉCNICOS.....	41
3.2. PARÂMETROS ECONÔMICOS.....	54
3.3. EMISSÃO DE GASES POLUENTES.....	58
3.4. PARÂMETROS ERGONÔMICOS .....	61
4. CONCLUSÕES.....	69
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

## AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E ERGONÔMICA DE FORWARDER EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DA BOMBA HIDRÁULICA E ROTAÇÃO DO MOTOR .....

1. INTRODUÇÃO.....	75
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	77
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	77
2.2. SISTEMA DE COLHEITA.....	77
2.3. UNIDADES EXPERIMENTAIS .....	78
2.4. MÁQUINA UTILIZADA.....	78
2.5. INSTRUMENTAÇÃO DA MÁQUINA.....	79
2.6. DETERMINAÇÃO DO VOLUME INDIVIDUAL DAS ÁRVORES .....	80
2.7. SELEÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR .....	80
2.8. SELEÇÃO DA PRESSÃO DA BOMBA HIDRÁULICA.....	81
2.9. PARÂMETROS TÉCNICOS.....	81
2.9.1. Estudo de tempos e movimentos .....	81
2.9.2. Produtividade.....	82
2.9.3. Consumo horário de combustível.....	83
2.9.4. Demanda de combustível.....	83
2.10. PARÂMETROS ECONÔMICOS.....	84
2.10.1. Custo operacional.....	84
2.10.1.1. Custo fixo .....	84
2.10.1.1.1. Custo com depreciação .....	85
2.10.1.1.2. Custo com juros .....	85

2.10.1.1.3. Custo com seguro.....	85
2.10.1.1.4. Custo com segurança.....	86
2.10.1.1.5. Custo com pessoal administrativo.....	86
2.10.1.1.6. Custo com salário de operador.....	86
2.10.1.1.7. Custo com pessoal de manutenção.....	87
2.10.1.2. Custo variável.....	87
2.10.1.2.1. Custo com combustível.....	88
2.10.1.2.2. Custo com óleo hidráulico.....	88
2.10.1.2.3. Custo com óleo lubrificante.....	88
2.10.1.2.4. Custo com graxa.....	89
2.10.1.2.5. Custo com óleo de corrente.....	89
2.10.1.2.6. Custo com peças de reposição.....	89
2.10.1.2.7. Custo com organização da área do módulo.....	90
2.10.2. Custo de produção.....	90
2.11. EMISSÃO DE GASES POLUENTES.....	90
2.12. PARÂMETROS ERGONÔMICOS.....	91
2.12.1. Avaliação da exposição a vibrações de corpo inteiro.....	91
2.12.2. Índice TOR (Taxa de Ocupação Real) – TOMCAR (Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas).....	91
2.13. ANÁLISE DOS DADOS.....	94
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	95
3.1. PARÂMETROS TÉCNICOS.....	95
3.2. PARÂMETROS ECONÔMICOS.....	104
3.3. EMISSÃO DE GASES POLUENTES.....	108
3.4. PARÂMETROS ERGONÔMICOS.....	111
4. CONCLUSÕES.....	118
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

## INTRODUÇÃO GERAL

O setor de base florestal do Brasil é um grande impulsor do desenvolvimento econômico do país por representar cerca de 1,10% do Produto Interno Bruto e manter de forma direta 610 mil empregos (IBÁ, 2015). Entre as diversas áreas do setor, a colheita de madeira se destaca por ser uma atividade complexa, sendo influenciada por fatores técnicos, ambientais e sociais e por ser de alto custo econômico. A colheita é um conjunto de operações realizadas no interior do talhão, que tem o objetivo de preparar e transportar a madeira até as margens das estradas.

Há algumas décadas a colheita de madeira era realizada por diversas ferramentas rudimentares e com auxílio de máquinas oriundas do setor agrícola. No ano de 1970 começou a ser introduzida as máquinas genuinamente florestais, e a partir da década de 90 ocorreu uma intensa mecanização da atividade, em detrimento da abertura das importações (MACHADO et al., 2014). Tal acontecimento proporcionou aumento da produtividade, melhorou condições de trabalho dos operadores, proporcionou a realização das operações durante 24 horas por dia e reduziu o custo de produção.

No Brasil, o sistema de colheita de madeira de toras curtas é um dos mais utilizados, sendo caracterizado pela realização de todas as atividades complementares ao corte no próprio local de abate da árvore (MALINOVSKI et al., 2014). Nesse sistema *harvester* e *forwarder* são as máquinas mais utilizadas, sendo a primeira para executar o corte e processamento das toras e a segunda utilizada na extração. Esses tratores florestais possibilitam que grandes áreas sejam colhidas em pequeno espaço de tempo e assim proporcionam que a crescente demanda de madeira do mercado nacional seja atendida.

Apesar da evolução da colheita de madeira a mesma ainda carece de melhorias, pois nos últimos anos o custo para produzir florestas no Brasil aumentou de forma expressiva, sendo que a colheita pode representar até 50% do custo final da madeira posta na fábrica (SILVA et al., 2008; IBÁ, 2015). Um dos fatores que contribui para onerar o custo com colheita é o custo operacional de máquinas e equipamentos florestais, sendo o custo com combustível o dispêndio que mais onera o custo operacional do *harvester*, e o segundo que mais contribui com o custo operacional do *forwarder* (LEITE et al., 2014; SILVA et al., 2014). Além de elevar o

custo, o alto consumo de combustível contribui para o aumento da emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono e metano (PRINZ et al., 2018).

O alto regime de rotação dos motores e vazão da bomba hidráulica, das máquinas florestais, contribuem para a alta demanda de combustível, por proporcionarem a máxima potência aos componentes que acionam. *Harvester* e *forwarder* são empregados para operar em povoamentos florestais de baixo, médio e alto volume, no entanto espera-se que árvores mais leves, demandem menos potência dos tratores florestais. Contudo as máquinas são operadas no máximo regime de rotação do motor, gerando assim a máxima potência, independentemente das condições operacionais. Segundo Silveira et al. (2013) na maioria das vezes os operadores de máquinas utilizam máximas acelerações e marchas inadequadas o que contribuí para o aumento do consumo de combustível. Ackerman et al. (2014) afirmaram que o consumo de combustível depende da potência requerida pelo motor e da habilidade e nível de treinamento do operador.

Alterações na rotação do motor e vazão da bomba hidráulica podem afetar a ergonomia dos operadores de máquinas florestais, já que todos os comandos das máquinas são acionados por botões e joysticks. Pesquisas constataram que as operações com colheita de madeira são árduas e desconfortáveis, pois são realizadas na mesma postura (sentado), transmitem vibração aos operadores durante 75% da jornada de trabalho e apresentam exigências cognitiva e motora, com movimentos de mãos e punhos simultâneos, assimétricos, curtos, leves e com altos índices de repetitividade (GERASIMOV & SOKOLOV, 2014; ALMEIDA et al., 2015). Já Østensvik et al. (2008) concluíram que a maior prevalência de desconforto e dores entre os operadores de máquinas florestais norueguesas pode estar relacionada a fatores organizacionais.

Diante da evolução da colheita de madeira torna-se essencial a procura por novos desafios, já que a mecanização é processo contínuo de melhorias. Com isso é necessário buscar maneiras de ter o uso mais racional dos tratores florestais e o domínio total das atividades e assim aumentar a produtividade, reduzir os custos e proporcionar melhorias nas condições de trabalho dos operadores. Mediante isso, objetivou-se com esta pesquisa avaliar parâmetros técnicos, econômicos, ergonômicos e a emissão de gases poluentes de um *harvester* e um *forwarder*

operando em distintas configurações do motor e bomba hidráulica e em três categorias de volume do povoamento florestal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, P.; BELBO, H.; ELIASSON, L. JONG, A.; LAZDINS, A.; LYONS, J. The cost model for calculation of forest operations costs. **International Journal of Forest Engineering**, Uppsala, Vol. 25, N. 1, p. 75 – 81, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2014.903711>.

ALMEIDA, S. F.; ABRAHAO, R. F.; TERESO, M. J. A. Avaliação da exposição ocupacional à vibração de corpo inteiro em máquinas de colheita florestal. **Cerne**, Lavras, vol. 21, n. 1, p. 1 – 8. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521011446>.

GERASIMOV, Y.; SOKOLOV, A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia. **Applied Ergonomics**, v. 45, n. 2, p. 318-338, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório**. Brasília, 2015. 80 p. Disponível em: [http://iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf). Acesso em: 17/02/2017.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo “forwarder”. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.5, p.879-887, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000500012>.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S. O; CASTRO, G. P. setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C (Editor.). **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa-MG: UFV, 2014. P. 15-45.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; CASTRO, G. P. Sistemas. In: MACHADO, C. C (Editor.). **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa-MG: UFV, 2014. P. 178-205.

ØSTENSVIK, T.; VEIERSTED, K. B.; CUCHET, E.; NILSEN, P.; HANSE, J. J.; CARLZON, C.; WINKEL, J. A search for risk factors of upper extremity disorders among forest machine operators: A comparison between France and Norway. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 38, p. 1017–1027, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.016>.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.210>.

SILVA, E. N.; MACHADO, C. C.; FIEDLER, N. C.; FERNANDES, H. C.; PAULA, M. O.; CARMO, F. C.; MOREIRA, G. R.; COELHO, F. E. Avaliação de custos de dois modelos de harvester no corte de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 741-748, jul.-set., 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-509820142403021>.

SILVA, M. L.; MIRANDA, G. M.; CORDEIRO, S. A. Custos. In: MACHADO, C. C. (Editor). **Colheita florestal**. 2 ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 231-260.

SILVEIRA, J. C. M.; FERNANDES, H. C.; MODOLO, A. J.; SILVA, S. L.; TROGELLO, E. Demanda energética de uma semeadora-adubadora em diferentes velocidades de deslocamento e rotações do motor. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, 2013.

## CAPÍTULO 1

### AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E ERGONÔMICA DE HARVESTER EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR E VAZÃO DA BOMBA HIDRÁULICA

**Resumo:** *Harvesters* são tratores florestais, que normalmente, são operados no máximo regime de rotação do motor, proporcionando assim a máxima vazão da bomba hidráulica, independentemente das condições operacionais. Objetivou-se com esse trabalho quantificar parâmetros técnicos, econômicos, ergonômicos e a emissão de gases poluentes de um *harvester* em função da rotação do motor e vazão da bomba hidráulica. A pesquisa foi executada em áreas de operações florestais, localizadas no extremo sul da Bahia. As operações da máquina foram analisadas em povoamentos florestais com volume médio individual de 0,08; 0,12; 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. O *harvester* foi configurado para operar com rotação do motor em 2.060; 2.000; 1.950; e 1.900 rpm e vazões da bomba hidráulica em 300; 295; e 290 L min<sup>-1</sup>, totalizando 12 combinações. Com relação à análise técnica foi executado um estudo de tempos e movimentos, produtividade, consumo horário de combustível e demanda de combustível. No que se refere a parâmetros econômicos, determinou-se o custo operacional e de produção das máquinas. Já o impacto ambiental foi mensurado por meio da determinação da quantidade de dióxido de carbono e metano emitidos. Por fim, avaliou-se valores de aceleração resultante normalizada (Aren), Taxa de Ocupação Real (TOR) e Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR). Para assegurar os melhores resultados da perspectiva técnica, econômica, ambiental e ergonômica, no volume de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, deve-se configurar o *harvester* para trabalhar com rotação do motor em 2.000 rpm e vazão da bomba hidráulica em 295 L min<sup>-1</sup>. Já nos volumes de 0,12; e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> os melhores resultados foram obtidos na combinação com rotação do motor em 2.000 rpm e vazão da bomba hidráulica em 300 L min<sup>-1</sup>. A operação com *harvester* se caracteriza como causadora de doenças ocupacionais, sendo que as combinações de: 1.950 rpm e 290 L min<sup>-1</sup>; 1.900 rpm e 295 L min<sup>-1</sup>; e 1.900 rpm e 290 L min<sup>-1</sup>, intensificavam os sintomas.

## CHAPTER 1

### TECHNICAL, ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND ERGONOMIC EVALUATION OF HARVESTER IN THE FUNCTION OF THE ENGINE ROTATION AND FLOW OF THE HYDRAULIC PUMP

**Abstract:** Harvesters are forestry tractors that typically operate at full engine speed, thus providing maximum hydraulic pump flow regardless of operating conditions. The purpose of this chapter was to quantify technical, economic and ergonomic parameters and emission of polluting gases of harvester as a function of engine rotation and hydraulic pump flow. The research was carried out in areas of forest operations, located in the southernmost part of Bahia. The machine operations were analyzed in forest stands with individual mean volume of 0.08; 0.12; 0.16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. The harvester has been configured to operate with engine speed at 2.060; 2,000; 1.950; and 1,900 rpm and hydraulic pump flows at 300; 295; and 290 L min<sup>-1</sup>, totaling 12 combinations. Regarding the technical analysis, a study of times and movements, productivity, hourly consumption of fuel and energy demand. With respect to economic parameters, the operational and production costs of the machines were determined. Environmental impact was measured by determining the amount of carbon dioxide and methane emitted. Finally, the values of the resulting normalized acceleration (Aren), the Real Occupancy Rate (TOR) and the Maximum Occupancy Rate were calculated considering the Repetitive Activities (TOMCAR). In order to ensure the best results from a technical, economic, environmental and ergonomic perspective, in the volume of 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, the harvester must be configured to work with motor rotation at 2,000 rpm and hydraulic pump flow in 295 L min<sup>-1</sup>. Already in the volumes of 0.12; and 0.16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> the best results were obtained in combination with motor rotation at 2000 rpm and hydraulic pump flow at 300 L min<sup>-1</sup>. Harvester operation is characterized as causing occupational diseases, with combinations of: 1,950 rpm and 290 L min<sup>-1</sup>; 1,900 rpm and 295 L min<sup>-1</sup>; and 1,900 rpm and 290 L min<sup>-1</sup>, intensified the symptoms.

## 1. Introdução

O *harvester* é uma máquina florestal autopropelida, habilitada para desempenhar todas as operações que compõem o corte florestal. A introdução dessas máquinas para executar a colheita da madeira possibilitou a colheita de grandes áreas em curto espaço de tempo, melhorou as condições ergonômicas dos operadores e tornou a operação mais versátil. Tais características tornaram o *harvester* umas das máquinas mais utilizadas no setor florestal brasileiro.

Contudo nos últimos anos as empresas de base florestal têm observado uma elevação dos custos operacionais dessa máquina. Normalmente o custo operacional de *harvester* excede os 100 dólares por hora trabalhada, onerando assim o custo de produção e conseqüentemente o preço final da madeira (SANTOS et al., 2017). O custo com combustível é um dos dispêndios que mais oneram o custo horário do *harvester*, chegando a representar até 9% do total, ficando atrás somente do custo com manutenção e mão de obra (SANTOS et al., 2017). Já de acordo com Silva et al. (2014) o custo com combustível representa cerca 24% do custo operacional, sendo o mais eloquente.

Outro fator observado é o impacto ambiental que as operações com *harvester* podem ocasionar, principalmente em relação à emissão de gases poluentes oriundos do ciclo termodinâmico dos motores de combustão interna. Nos últimos anos os fabricantes de máquinas tiveram que aderir a limites cada vez mais rigorosos com relação à emissão de gases poluentes. Segundo Zhang et al. (2016) e Laschi et al. (2016) as condições operacionais influenciam diretamente na emissão de gases, como o dióxido de carbono e metano, principalmente aquelas condições que afetam o consumo horário de combustível e rendimento operacional das máquinas. Conforme Abbas e Handler (2018) a maioria dos impactos, relacionados à emissão de gases de efeito estufa, ocorrem na fase da colheita de madeira, devido à utilização de combustíveis fósseis empregado nas máquinas.

Além disso, a utilização de máquinas modernas, as quais os comandos são acionados por botões e manípulos eletrônicos, exige alto nível de concentração e atenção, movimentos simultâneos, rápidos e repetitivos e exposição a níveis de vibração de corpo inteiro (ALMEIDA et al., 2015). Na Europa, cerca de 2 milhões de operadores de máquinas sofrem com distúrbios musculoesqueléticos, provocados por posturas inadequadas e exposição a vibração (EU OSHA, 2010). Silva et al.

(2013) ratificaram que os sintomas apresentados por operadores têm características compatíveis com as de Lesão por Esforço Repetitivo (LER/DORT). Conforme Gerasimov & Sokolov (2014) e Silva et al. (2013) doenças ocupacionais em operadores de máquinas florestais são causadas por fatores como: longos períodos em posição fixa ergonomicamente inadequada, intensidade do trabalho, movimentos repetitivos de ciclo curto, pausas mal definidas, exigência de atenção, concentração e responsabilidade e falta de reconhecimento pela empresa.

Normalmente os *harvesters* são operados no máximo regime de rotação do motor, proporcionando assim a máxima vazão da bomba hidráulica, independentemente das condições operacionais. Silveira et al. (2013) afirmaram que os operadores de máquinas utilizam máximas acelerações e marchas inadequadas o que contribuí para o aumento do consumo de combustível. De acordo com Santos et al. (2018) a rotação do motor influencia de forma significativa no consumo horário de combustível do *harvester*, contudo não afeta o rendimento operacional da máquina. Já de acordo com Ramos et al, (2016) a rotação do motor do motor influencia de forma significativa no consumo horário de combustível de colhedora de cana-de-açúcar, no entanto, a depender das condições operacionais afeta de forma expressiva a capacidade operacional da máquina. Prinz et al. (2018) afirmaram que as configurações do *harvester*, no que se refere ao modo de operação, podem provocar impactos positivos na demanda de combustível do trator florestal.

A partir do exposto, objetivou-se com a presente pesquisa avaliar parâmetros técnicos, econômicos e ergonômicos e a emissão de gases poluentes de um *harvester* operando em distintas rotações do motor, vazões da bomba hidráulica e volume médio individual da madeira.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Caracterização da área de estudo**

A pesquisa foi executada em áreas de operações de colheita florestal, localizadas na região do sul do estado da Bahia. De acordo com a classificação de Köppen (1948) a região possui Clima Tropical Úmido (Af) com a ocorrência de precipitação significativa em todos os meses do ano e inexistência de estação seca definida. A região apresenta cobertura vegetal formada por Floresta Ombrófila Densa, com temperatura média anual de 24,4 °C e precipitação pluviométrica média anual de 1.350 mm (SOUZA et al., 2013). As áreas onde foram alocadas as parcelas experimentais apresentavam relevo plano.

A coleta de dados foi realizada no período entre outubro de 2017 e abril de 2018. As avaliações com as máquinas foram conduzidas no período diurno, sendo iniciadas as 06h00min e finalizadas as 15h00min. Os testes foram conduzidos na ausência de chuva.

As áreas de coleta de dados eram povoadas com clones híbridos de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, plantados em espaçamento de 3 metros entre linhas e 2,5 metros entre plantas. Em média as árvores foram colhidas com 6,3 anos de idade.

### **2.2. Sistema de colheita**

A pesquisa foi executada em um sistema de colheita florestal de toras curtas (*cut-to-length*) composto pelas máquinas *harvester* e *forwarder*.

O *harvester* era responsável pelo corte e processamento das árvores, deixando feixes sobre a superfície do solo com toretes de 6,20 metros de comprimento. A máquina realizava simultaneamente a derrubada de quatro linhas de árvores. Os feixes de madeira, normalmente, eram formados ao lado esquerdo da máquina e a derrubada das árvores era direcionada para o lado direito da máquina, a fim de evitar a sujidade dos feixes de madeira.

A extração da madeira do interior dos talhões até as margens das estradas era realizada pelo *forwarder*. A máquina adentrava nos talhões de marcha ré, sendo que o carregamento iniciava da parte final do talhão e seguia para a parte inicial do talhão, onde se encontrava a pilha de madeira. Em cada viagem do *forwarder* era

realizado o carregamento apenas em um lado do ramal, sendo escolhidos os feixes de madeira que se encontravam do lado esquerdo da máquina.

### 2.3. Unidades experimentais

A pesquisa foi executada em três Volumes Médios Individuais (VMI) das árvores, 0,08; 0,12; e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> sem casca, sendo os mesmos considerados como baixo, médio e alto, respectivamente. Em cada volume, as operações com *harvester* foram executadas em quatro rotações do motor, 2.060, 2.000; 1.950; e 1.900 rpm, e três vazões da bomba hidráulica, 300; 295; e 290 L min<sup>-1</sup>, totalizando doze tratamentos. Na Tabela 1 é possível observar as regiões de realização dos experimentos.

**Tabela 1.** Características das regiões onde a pesquisa foi executada.

Região	Latitude/longitude	Número de unidades	Tamanho da área (ha)	VMI (m <sup>3</sup> árvore <sup>-1</sup> )
M629	17°48'47"S 40°00'27"W	162	4,96	0,08
T059	17°41'58"S 39°21'53"W	160	4,89	0,12
T603	17°46'49"S 39°31'51"W	148	4,52	0,16

Onde: VMI = Volume Médio Individual por árvore.

Para demarcação das parcelas experimentais foi utilizada amostragem casual simples. Tais parcelas tinham formato retangular, dispostas em quatro linhas de 10 árvores cada, totalizando 40 árvores por parcela. Para demarcar os limites das parcelas foi utilizado spray para facilitar a visibilidade do operador. Foi quantificado o número de falhas de plantio, árvores mortas, árvores quebradas e árvores bifurcadas, sendo a última contabilizada como uma única árvore. A marcação das parcelas só iniciava após a quarta linha de plantio, sendo as primeiras linhas consideradas como bordadura.

### 2.4. Máquina utilizada

O *harvester* utilizado foi uma combinação entre a escavadeira hidráulica da marca *Komatsu*, modelo PC200F-8M0 e o cabeçote também da marca *Komatsu*, modelo 370E (Figura 1). A PC200F-8M0 era uma máquina de esteiras, equipada com o motor diesel *Komatsu* SAA6D107E-1 de 6 cilindros, turboalimentado com *aftercooler*, 4 tempos, sistema de injeção do tipo "*Common Rail*" e 110 kW de

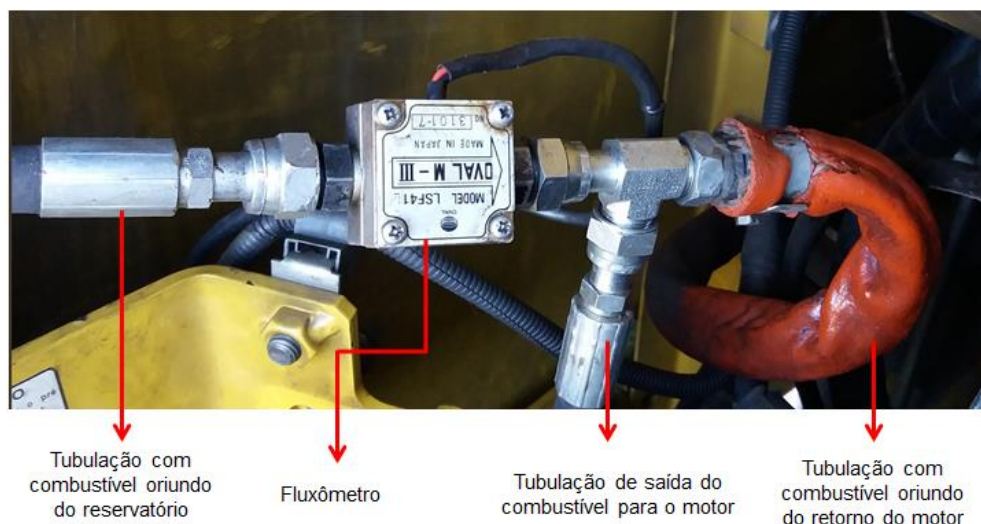
potência nominal a 2.000 rpm. Todas as funções da máquina eram controladas e monitoradas pelo sistema *MaxiXplorer*. O sistema hidráulico da máquina era do tipo *Hydraumind*, composto por duas bombas hidráulicas da marca *Komatsu*, modelo HPV95+95, ambas de pistão com deslocamento variável, pressão máxima de 37,2 MPa ou 380 kg cm<sup>-2</sup> e vazão máxima, para cada bomba, de 219 litros por minuto. A vazão hidráulica máxima para acionamento dos componentes do cabeçote variava de 225 a 330 litros por minuto e pressão hidráulica máxima necessária de 28 MPa.



**Figura 1.** *Harvester* da marca *Komatsu*, modelo PC200 e cabeçote da marca *Komatsu*, modelo 370E.

## 2.5. Instrumentação da máquina

A quantidade de combustível consumido durante o experimento pelo *harvester* foi determinada por meio da instalação de um medidor de fluxo volumétrico (fluxômetro) no sistema de alimentação de combustível do motor, logo após o filtro primário (Figura 2). O medidor de fluxo utilizado foi o da marca FLOWMATE M-III<sup>®</sup>, modelo LSF41C. O consumo foi determinado pelo equipamento com base na frequência de rotação dos rotores que constituem o mesmo, sendo que uma volta dos rotores correspondia a 1 mililitro de combustível consumido.



**Figura 2.** Fluxômetro instalado no sistema de alimentação de combustível do *harvester*.

Juntamente ao fluxômetro foi instalado um visor gráfico (indicador) da marca TechMeter, modelo LCT. O equipamento foi instalado dentro da cabine da máquina, com objetivo de facilitar as leituras de consumo e evitar danos ao equipamento. O fluxômetro e o indicador estavam interligados por fios de alimentação, sinal do sensor e de comunicação do sensor. O visor gráfico foi programado previamente para exibir os valores de consumo instantâneo e o consumo em determinado período, ambos em litros por hora.

## **2.6. Determinação do volume individual das árvores**

O volume individual das árvores (VMI) foi determinado por meio dos sensores de diâmetro e comprimento existentes no cabeçote da máquina. Posteriormente o VMI era calculado pelo sistema operacional *MaxiXplorer*.

O sensor de comprimento ficava posicionado nos rolos alimentadores do cabeçote. O valor era mensurado com base na circunferência e rotação dos rolos. O sensor de diâmetro ficava posicionado nas facas desganhadoras do cabeçote, sendo o diâmetro medido de acordo com ângulo de inclinação das facas.

Com o objetivo de verificar a precisão dos sensores, antes da execução da pesquisa, foi realizado o corte e processamento de quinze árvores pelo *harvester* e conseqüentemente mensurado o volume de cada árvore. Posteriormente foi medido manualmente, por meio de trena, o diâmetro e comprimento das toras. Em seguida

foi calculado o volume das árvores conforme a metodologia proposta por Husch et al. (2003).

## 2.7. Seleção da rotação do motor

A pesquisa foi executada nas rotações do motor de 2.060; 2.000; 1.950 e 1.900 rpm. As rotações foram obtidas por meio da alteração da posição do botão de aceleração da máquina, na posição de 100; 78; 75 e 71% foram obtidos, respectivamente, os valores de rotação do motor citados anteriormente. Os valores eram exibidos em um monitor de 12 polegadas presente no interior da cabine da máquina.

Os valores de rotação do motor eram controlados pelo Sistema de Controle e Informação da máquina denominado de *MaxiXplorer*, com sistema operacional *Windows* e disco rígido SSD. As configurações podiam ser modificadas por meio de um teclado ou da tela touchscreen.

## 2.8. Seleção da vazão da bomba hidráulica

Durante a execução da pesquisa a máquina trabalhou com vazões da bomba hidráulica de 300; 295 e 290 litros por minuto, sendo as alterações realizadas diretamente no Sistema de Controle e Informação *MaxiXplorer* e mostradas no monitor do trator florestal. Inicialmente a bomba hidráulica foi regulada manualmente para fornecer uma vazão de 300 litros por minuto, a uma rotação do motor 2.060 rpm e binário no valor cinco. Posteriormente, quando necessário, a vazão da bomba era modificada somente com alterações no valor do binário da máquina. Quanto maior o valor do binário menor era a vazão da bomba, caso inverso, quanto menor o valor do binário maior a vazão da bomba hidráulica. A vazão da bomba hidráulica foi confirmada com base na rotação dos rolos alimentadores do cabeçote, conforme a Equação 1.

$$VB = \frac{2 \cdot De}{1000} Rm \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

VB = vazão da bomba hidráulica (L min<sup>-1</sup>);

De = Volume deslocado pelo motor do rolo (cm<sup>3</sup>);

Rm = rotação dos rolos alimentadores (rpm)

A rotação dos rolos do cabeçote foi determinada mediante a utilização de um fototacômetro digital da marca Minipa, modelo MDT-2244B. Foi adicionada fita refletora aos rolos alimentadores, sendo o feixe de luz emitido pelo aparelho direcionado a fita. Quando a leitura estava estabilizada era feita a medição.

## 2.9. Parâmetros técnicos

### 2.9.1. Estudo de tempos e movimentos

O estudo de tempos e movimentos foi realizado por do meio do método de tempo contínuo. Como o *harvester* executava algumas operações de forma rápida, cerca de quatro segundos, o que dificultava a mensuração do início e final de cada atividade, foi instalado na máquina um sistema de vídeo composto por quatro câmeras de vídeo, um monitor de sete polegadas e um Gravador de Vídeo Digital Móvel (MVDR). Posteriormente os vídeos foram analisados e mensurados o tempo despendido com cada operação executada pela máquina.

Foi executado um estudo preliminar com o objetivo de determinar o número mínimo de observações necessárias para proporcionar um erro de amostragem admissível máximo de 5%, sendo utilizada a Equação 2, conforme metodologia proposta por Barnes (1968).

$$N' = \left[ \frac{40 \cdot N}{\sum X} \sqrt{\frac{\sum X^2 - (\sum X)^2 / N}{N - 1}} \right]^2 \quad \text{Eq. 2}$$

em que:

$N'$  = número de observações necessárias;

$N$  = número de observações utilizadas no estudo preliminar; e

$X$  = valor de cada observação.

O ciclo operacional do *harvester* foi subdividido nas operações de deslocamento e busca, corte de derrubada e processamento.

A primeira operação do ciclo operacional executada pela máquina foi o deslocamento e busca. Essa operação iniciava quando a máquina finaliza o processamento da madeira do ciclo anterior ou quando a máquina iniciava o deslocamento dentro do talhão em busca da árvore a ser abatida. A operação era finalizada quando o cabeçote era posicionado na árvore.

A segunda operação do ciclo foi o corte de derrubada. Essa operação iniciava quando o cabeçote era posicionado na árvore, estando às facas superior e inferior e os rolos alimentadores fixados na árvore. A operação era finalizada quando a árvore era posicionada no sentido horizontal, sendo iniciada a movimentação da mesma.

O processamento compreendia as operações de descascamento, desganhamento, traçamento e empilhamento. Iniciava quando a tora de madeira começa a ser movimentada, pelos rolos alimentadores, no sentido horizontal e era finalizado quando o último torete era seccionado.

### 2.9.2. Produtividade

Foi determinada em metros cúbicos de madeira por hora trabalhada (Equação 3).

$$P = \frac{Vol}{T} \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

P = produtividade ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ );

Vol = volume na parcela ( $\text{m}^3$ ); e

T = tempo gasto a parcela (h)

O volume nas parcelas foi calculado por meio da multiplicação entre o número de árvores presentes na parcela e volume individual médio das mesmas. Em média foram coletados os dados de quinze parcelas experimentais por tratamento, existindo a variação de duas parcelas para mais ou para menos. A variação do número de parcelas por tratamento se dava em razão da dinâmica da colheita florestal da empresa. O tempo gasto por parcela foi medido por um cronômetro digital da marca Vollo, modelo VL 1809.

### 2.9.3. Consumo horário de combustível

Foi calculado de acordo com a Equação 4.

$$Ch = \frac{Voc}{T} \quad \text{Eq. 4}$$

em que:

Ch = consumo horário de combustível (L h<sup>-1</sup>);

Voc = volume de combustível consumido na parcela (L); e

T = tempo gasto na parcela (h)

O consumo horário da máquina foi determinado simultaneamente com o rendimento operacional, mediante isso foi utilizado o mesmo número de parcelas para os dois parâmetros.

#### **2.9.4. Demanda de combustível**

A quantidade de combustível gasta para produzir um metro cúbico de madeira foi determinada conforme a Equação 5.

$$Dec = \frac{Ch}{P} \quad \text{Eq. 5}$$

em que:

Dec = demanda de combustível (L m<sup>-3</sup>);

Ch = consumo horário de combustível (L h<sup>-1</sup>); e

P = produtividade (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)

#### **2.10. Análise de custos**

##### **2.10.1. Custo operacional**

Foi determinado mediante o somatório dos custos fixos e variáveis (Equação 6). Algumas variáveis necessárias para o cálculo foram fornecidas pela empresa e outras obtidas por meio de avaliações em campo. O consumo horário de combustível foi à única variável alterada nas doze combinações estudadas, sendo as demais mantidas fixas. Tal medida tinha objetivo de verificar o efeito isolado do consumo horário de combustível sobre o custo operacional do *harvester*. Utilizou-se uma taxa de câmbio de 1 US\$ = R\$ 3,97, cotado no dia 27/03/2019

$$CO = Cf + Cv \quad \text{Eq. 6}$$

em que:

CO = custo operacional (US\$ h<sup>-1</sup>);

Cf = custo fixo (US\$ h<sup>-1</sup>); e

Cv = custo variável (US\$ h<sup>-1</sup>)

### 2.10.1.1. Custo fixo

Esse dispêndio foi calculado por meio do somatório dos custos de depreciação, juros, seguro, segurança, pessoal administrativo, salário de operadores e pessoal de manutenção (Equação 7).

$$Cf = CD + CJ + CS + CSG + CPA + CSO + CPM \quad \text{Eq. 7}$$

em que:

Cf = custo fixo (US\$ h<sup>-1</sup>);

CD = custo com depreciação (US\$ h<sup>-1</sup>);

CJ = custo com juros (US\$ h<sup>-1</sup>);

CS = custo com seguro (US\$ h<sup>-1</sup>);

CSG = custo com segurança (US\$ h<sup>-1</sup>);

CPA = custo com pessoal administrativo (US\$ h<sup>-1</sup>); e

CSO = custo com salário do operador (US\$ h<sup>-1</sup>); e

CPM = custo com pessoal de manutenção (US\$ h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.1. Custo com depreciação

Foi determinado pelo método linear, conforme a Equação 8 (SILVA et al., 2014).

$$CD = \frac{Va - Vr}{H.N} \quad \text{Eq. 8}$$

em que:

CD = custo com depreciação (US\$ h<sup>-1</sup>);

Va = valor de aquisição da máquina (US\$);

Vr = valor de revenda da máquina (US\$);

N = vida útil esperada (anos); e

H = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>);

#### 2.10.1.1.2. Custo com juros

O pagamento pelo uso do capital investido foi calculado por meio da Equação 9.

$$CJ = \frac{\left(\frac{Va + Vr}{2}\right) \cdot i}{N \cdot H} \quad \text{Eq. 9}$$

em que:

CJ = custo com juros (US\$ h<sup>-1</sup>);

Va = valor de aquisição da máquina (US\$);

Vr = valor de revenda da máquina (US\$);

i = taxa de juros anual (decimal);

N = vida útil esperada (anos); e

H = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.3. Custo com seguro

As despesas com seguro do trator florestal foi determinado em conformidade com a Equação 10.

$$CS = \frac{Vs}{H} \quad \text{Eq. 10}$$

em que:

CS = custo com seguro (US\$ h<sup>-1</sup>);

Vs = valor do seguro (US\$ ano<sup>-1</sup>); e

H = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.4. Custo com segurança

No período entre 00h00min e 06h00min era feita a vigilância das máquinas em campo por uma empresa terceirizada, sendo esse custo calculado conforme a Equação 11.

$$CSG = \frac{Vgs}{NM \cdot H} \quad \text{Eq. 11}$$

em que:

CSG = custo com segurança (US\$ h<sup>-1</sup>);

Vgs = valor gasto com segurança (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NM = número de máquinas monitoradas;

H = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### **2.10.1.1.5. Custo com pessoal administrativo**

Foi definido com base na Equação 12.

$$CPA = \frac{(SS + STO + STD + Es)}{NM \cdot H} \quad \text{Eq. 12}$$

em que:

CPA = custo com pessoal administrativo (US\$ h<sup>-1</sup>);

SS = salário do supervisor (US\$ ano<sup>-1</sup>);

STO = salário do técnico operacional (US\$ ano<sup>-1</sup>);

STD = salário do técnico de desenvolvimento (US\$ ano<sup>-1</sup>);

Es = encargos sociais (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NM = número de máquinas monitoradas; e

H = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### **2.10.1.1.6. Custo com salário de operador**

O custo obtido em decorrência do pagamento de salários dos operadores da máquina, mais encargos sociais e benefícios, foi estimado por meio da Equação 13.

$$CSO = \frac{(SOP \cdot NOP + Es)}{H} \quad \text{Eq. 13}$$

em que:

CSO = custo com salário de operador (US\$ h<sup>-1</sup>);

SOP = salário do operador (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NOP = número de operadores por máquina;

Es = encargos sociais (US\$ ano<sup>-1</sup>); e

H = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

### 2.10.1.1.7. Custo com pessoal de manutenção

As manutenções corretivas e preventivas eram executadas por uma empresa terceirizada. O custo com pessoal de manutenção preventiva e corretiva foi calculado por meio da Equação 14.

$$CPM = \frac{SPM}{NM.H} \quad \text{Eq. 14}$$

em que:

CPM = custo com pessoal de manutenção (US\$ h<sup>-1</sup>);

SPM = Salário do pessoal de manutenção (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NM = número de máquinas atendidas; e

H = quantidade de horas efetivas de uso anual por máquina (h ano<sup>-1</sup>).

### 2.10.1.2. Custo variável

O custo variável compreendeu ao somatório dos custos com combustível, óleo hidráulico, óleo lubrificante, graxa, peças de reposição e abertura de módulo (Equação 15).

$$CV = Cc + Coh + Cl + Cg + Coc + Cpr + Coa \quad \text{Eq. 15}$$

em que:

Cv = custo variável (US\$ h<sup>-1</sup>);

Cc = custo com combustível (US\$ h<sup>-1</sup>);

Coh = custo com óleo hidráulico (US\$ h<sup>-1</sup>);

Cl = custo com óleo lubrificante (US\$ h<sup>-1</sup>);

Cg = custo com graxa (US\$ h<sup>-1</sup>);

Coc = Custo com óleo de corrente (US\$ h<sup>-1</sup>);

Cpr = custo peças de reposição (US\$ h<sup>-1</sup>); e

Coa = custo com organização da área do módulo (US\$ h<sup>-1</sup>).

### 2.10.1.2.1. Custo com combustível

O custo com combustível foi estimado por meio da multiplicação entre a quantidade consumida por hora e preço do diesel, conforme Equação 16. A quantidade consumida foi mensurada por um fluxômetro como explicado no item 1.5.

$$Cc = Pc.Ch \quad \text{Eq. 16}$$

em que:

$C_c$  = custo com combustível (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $P_c$  = preço do combustível (US\$ L<sup>-1</sup>); e  
 $C_h$  = consumo horário (L h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.2. Custo com óleo hidráulico

Esse dispêndio foi calculado de acordo com a Equação 17.

$$C_{oh} = P_{oh}.C_{doh} \quad \text{Eq. 17}$$

em que:

$C_{oh}$  = custo com óleo hidráulico (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $P_{oh}$  = preço do óleo hidráulico (US\$ L<sup>-1</sup>); e  
 $C_{doh}$  = consumo com óleo hidráulico (L h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.3. Custo com óleo lubrificante

Foi calculado por meio da Equação 18.

$$C_l = P_l.C_{lu} \quad \text{Eq. 18}$$

em que:

$C_l$  = custo com óleo lubrificante (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $P_l$  = preço do óleo lubrificante (US\$ L<sup>-1</sup>); e  
 $C_{lu}$  = consumo com óleo lubrificante (Lh<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.4. Custo com graxa

Foi determinado de acordo com a Equação 19.

$$C_g = P_g.C_{gr} \quad \text{Eq. 19}$$

em que:

$C_g$  = custo com graxa (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $P_g$  = preço do graxa (US\$ kg<sup>-1</sup>); e  
 $C_{gr}$  = consumo com graxa (kg h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.5. Custo com óleo de corrente

Foi calculado por meio da Equação 20.

$$C_{oc} = P_{oc}.C_{ocr} \quad \text{Eq. 20}$$

em que:

$Coc$  = custo com óleo de corrente (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $Poc$  = preço do óleo de corrente (US\$ L<sup>-1</sup>); e  
 $Cocr$  = consumo com óleo de corrente (Lh<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.6. Custo com peças de reposição

O custo com peças de reposição colocadas na máquina durante a manutenção preventiva e corretiva foi calculado por meio da Equação 21. Tal custo inclui todos os tipos de peças da máquina, como por exemplo, filtros, mangueiras hidráulicas, sabre, esteira e dentre outros.

$$C_{pr} = \sum_{r=1}^n \frac{V_p}{V_u} \quad \text{Eq. 21}$$

em que:

$C_{pr}$  = custo com peças de reposição (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $V_p$  = valor da peça de reposição (US\$);  
 $V_u$  = vida útil esperada da peça de reposição (h); e  
 $n$  = número de peças de reposição.

#### 2.10.1.2.7. Custo com organização da área do módulo

O custo com a organização da área, onde era colocada a estrutura do módulo, foi calculado por meio da Equação 22. As operações de organização incluíam a derrubada de árvores, terraplanagem e limpeza da área.

$$C_{oa} = \frac{V_{po} \cdot N_a}{NM \cdot H} \quad \text{Eq. 22}$$

em que:

$C_{oa}$  = custo com organização da área (US\$ h<sup>-1</sup>);  
 $V_{po}$  = valor por área organizada (US\$ área<sup>-1</sup>);  
 $N_a$  = quantidade de áreas organizadas (áreas ano<sup>-1</sup>);  
 $NM$  = número de máquinas atendidas; e  
 $H$  = quantidade de horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

### 2.10.2. Custo de produção

O custo de produção do *harvester* foi determinado de acordo com a Equação 23.

$$Cp = \frac{CO}{P} \quad \text{Eq. 23}$$

em que:

$Cp$  = custo de produção (US\$ m<sup>-3</sup>);

$CO$  = custo operacional (US\$ h<sup>-1</sup>); e

$P$  = produtividade (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

### 2.11. Emissão de gases poluentes

A quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2eq</sub>) e metano (CH<sub>4eq</sub>) equivalente emitido pelo *harvester* durante a colheita de madeira, foi determinado de acordo com a Equação 24.

$$QE = FA.Pcc.Ch.P \quad \text{Eq. 24}$$

em que:

$QE$  = quantidade de gás emitido (kg m<sup>-3</sup>);

$FA$  = fator de emissão (kg TJ<sup>-1</sup>);

$Ch$  = Consumo horário (kg h<sup>-1</sup>); e

$Pcc$  = Poder calorífico (TJ kg<sup>-1</sup>).

$P$  = produtividade (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)

Foi estabelecido um fator de emissão específico para cada tipo de gás, conforme determinado pela *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006).

### 2.12. Parâmetros ergonômicos

#### 2.12.1. Avaliação da exposição a vibrações de corpo inteiro

Foram mensurados os valores de vibração de corpo inteiro conforme as recomendações técnicas estabelecidas pela Norma de Higiene Ocupacional 09 (FUNDACENTRO, 2013) e pela Diretiva da Comunidade Europeia 2002/44/EC. As medições dos níveis de vibração foram efetuadas com um acelerômetro do tipo triaxial, da marca 01dB, modelo Vib 008. O aparelho foi fixado no assento do operador e posicionado de acordo com as três direções do sistema de coordenadas

ortogonais (x, y e z). Foram mensurados os valores de aceleração em todos os tratamentos estudados e também em cada operação que compõem o ciclo operacional do *harvester*. Para contabilizar os valores de aceleração por operação, o horário do sistema de vídeo foi ajustado em relação ao horário do acelerômetro. As medições foram realizadas de forma a representar todas as atividades desempenhadas pelo operador. Em média as medições corresponderam, por tratamento, a 30% do tempo da jornada de trabalho. Os dados foram processados por meio do software dBMaestro 5.5.

### **2.12.2. Índice TOR (Taxa de Ocupação Real) – TOMCAR (Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas)**

O potencial da operação com máquinas florestais em ocasionar distúrbios como fadiga, desconforto, dificuldades e lesões foi quantificado por meio do índice TOR (Taxa de Ocupação Real) – TOMCAR (Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas), de acordo com a metodologia proposta por Couto (2012).

Inicialmente foi realizada a análise e descrição da operação. Posteriormente foi determinada a TOR, que pode ser entendida como a porcentagem da jornada de trabalho em que o trabalhador efetivamente estava executando alguma tarefa, sendo calculado por meio da Equação 25.

$$TOR = 100\% - PPR - PABE - PPIH - PPC \quad \text{Eq. 25}$$

em que:

TOR = taxa de ocupação real (%);

PPR = Porcentagem de repouso por pausas regulares (%);

PABE = Porcentagem de tempo com atividades de baixa exigência (%);

PPIH = Porcentagem de pausas irregulares habituais (%);

PPC = Porcentagem de pausas curtíssimas (%);

Para determinar a PPR foi quantificado o tempo gasto com pausas para ir ao banheiro e ginástica laboral. A PPR foi calculada por meio do quociente entre o somatório do tempo gasto com pausas regulares e a duração da jornada de trabalho.

Com relação à PABE foi mensurado o tempo gasto com a inspeção da máquina no início da jornada de trabalho, troca de material de corte e limpeza e

organização da máquina ao final da jornada de trabalho. Posteriormente o somatório desses valores foi dividido pelo tempo de duração da jornada de trabalho.

Para contabilizar o tempo gasto com pausas curtíssimas durante a execução do trabalho foi instalado um sistema de vídeo na cabine do operador. O sistema de vídeo era composto por quatro câmeras de vídeo, um monitor de sete polegadas e um Gravador de Vídeo Digital Móvel (MVDR). Uma câmera foi direcionada para o joystick esquerdo, outra para o para o joystick direito, uma para a cabeça do operador e a última para frente da máquina como o objetivo de visualizar a operação que a máquina estava executando.

Foram gravados vídeos de cem ciclos operacionais do *harvester*. Posteriormente foi analisado se existiam pausas curtíssimas entre os ciclos ou dentro do ciclo. Só foram considerados como pausas curtíssimas, intervalos com no mínimo três segundos. A PPC foi calculada conforme a Equação 26.

$$PPC = \frac{TPEC + TPC}{TT} \quad \text{Eq. 26}$$

em que:

PPC = Porcentagem de pausas curtíssimas (%);

TPEC = tempo de pausas entre os ciclos;

TPC = tempo de pausa no ciclo; e

TT = tempo total.

A Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas foi calculado de acordo com a Equação 27.

$$TOMCAR = 95\% - FR - FF - FEE \quad \text{Eq. 27}$$

em que:

TOMCAR = Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (%);

FR = Fator Repetitividade (%);

FF= Fator Força (%); e

FEE = Fator Esforço Estático (%).

Os fatores Repetitividade, Força e Esforço Estático foram determinados de acordo com fluxogramas e tabelas estabelecidos por Couto (2012). Para facilitar o estudo de repetitividade, foram identificados os componentes, e as respectivas

funções, acionados pelos operadores durante a execução do corte e processamento da madeira (Tabela 2).

**Tabela 2.** Comandos do *harvester* PC 200 e as respectivas funções.

Comando	Função
Joystick direito	Prolongamento e contração da grua por meio do acionamento do cilindro hidráulico primário
Joystick direito - botão 2	Promovia a abertura e o fechamento do cabeçote
Joystick esquerdo	Prolongamento e contração da grua por meio do acionamento do cilindro hidráulico secundário
Joystick esquerdo - botão 1	Promovia o corte e processamento automático das árvores
Joystick esquerdo - botão 2	Acionava o sabre do cabeçote
Joystick esquerdo - botão 3	Promovia o giro vertical de 90 graus do cabeçote
Joystick esquerdo - botão 4	Acionava os rolos alimentadores
Câmbio 1 e 2	Deslocamento da máquina

No início, meio e fim da jornada de trabalho os operadores eram submetidos a responder um questionário bipolar, com o objetivo de identificar a ocorrência ou ausência de fadiga ocasionada pela operação. O questionário foi elaborado em concordância com Couto (2012), no qual os operadores pontuavam sua percepção quanto a seu estado pessoal em relação a quatorze itens. Valores próximos de um, indicavam inexistência de qualquer incômodo ou dor, já valores vicinais a sete apontavam incômodo ou dor de alta intensidade.

### 2.13. Análise dos dados

O experimento foi realizado em um esquema fatorial 4x3, sendo quatro rotações do motor e três vazões da bomba hidráulica, totalizando 12 tratamentos, em um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 13 repetições.

Os dados referentes ao rendimento operacional, consumo horário de combustível, demanda de combustível, emissão de dióxido de carbono e metano, custo operacional e de produção e aceleração resultante de exposição normalizada foram analisados, dentro de cada volume, por meio de metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram selecionados baseados na significância dos coeficientes de regressão, utilizando o teste “t” e adotando o nível de 5% de

probabilidade, no coeficiente de determinação e no comportamento do fenômeno em estudo.

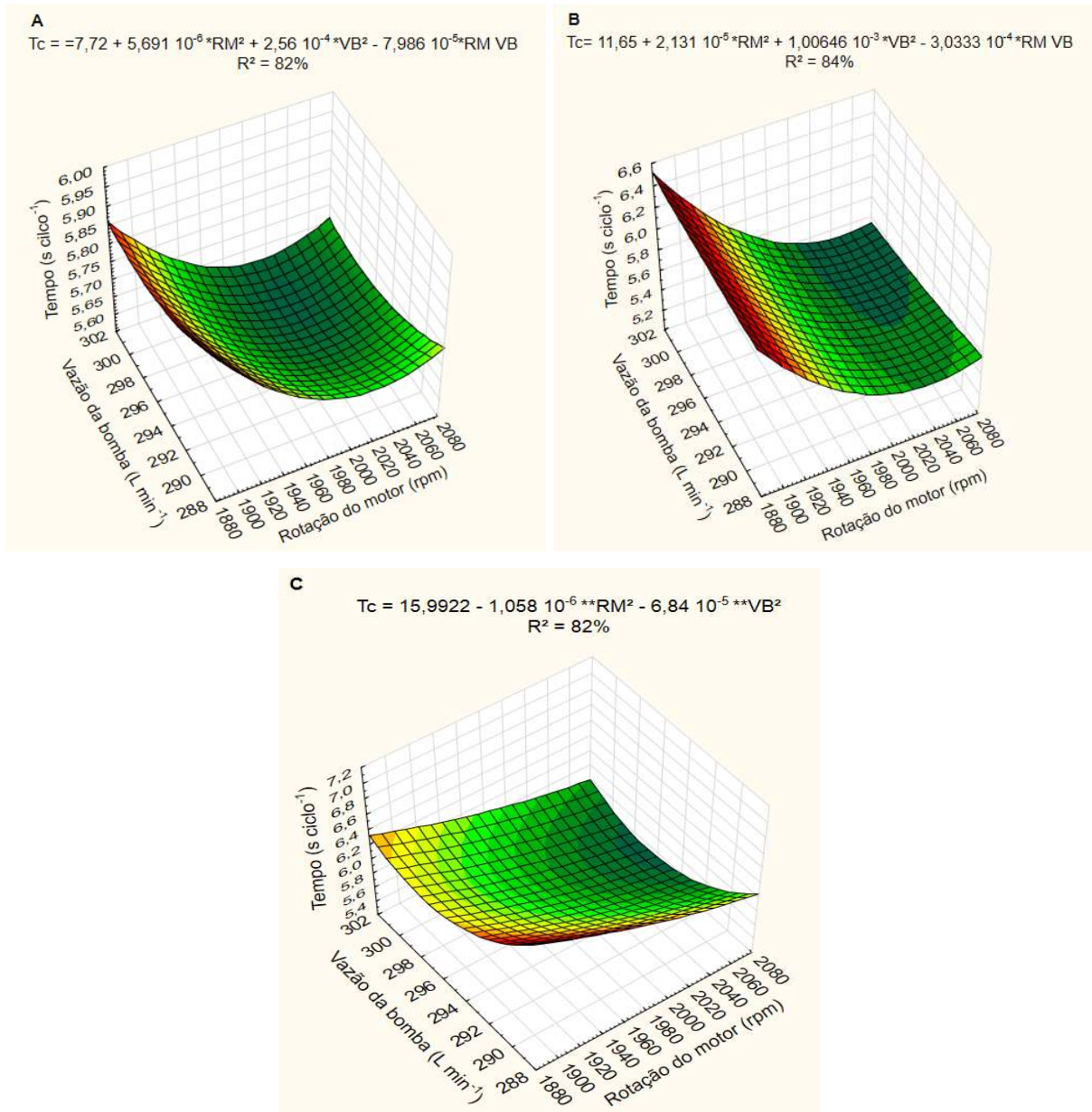
Os valores de aceleração resultante de exposição normalizada por operação executada nos três volumes estudados foram analisados por meio de Análise de Variância e quando significativos comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Todos os procedimentos estatísticos foram executados pelo programa computacional STATISTICA® 12.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Parâmetros técnicos**

Na Figura 3 é apresentado o comportamento do tempo por ciclo da operação deslocamento e busca em função da rotação do motor e vazão da bomba hidráulica. Ambas as variáveis independentes apresentaram efeito significativo e quadrático sobre o tempo da operação nos três volumes pesquisados. A influência das variáveis independentes no tempo da operação está relacionada à elevada força de tração necessária para promover o deslocamento da máquina sobre a superfície do solo, já que a referida operação é a que mais demanda potência da máquina para ser executada. Além do *harvester* ser uma máquina pesada, cerca de 22 toneladas, de acordo com Gabriel Filho et al. (2010) as condições do solo influenciam diretamente sobre a força de tração requerida.

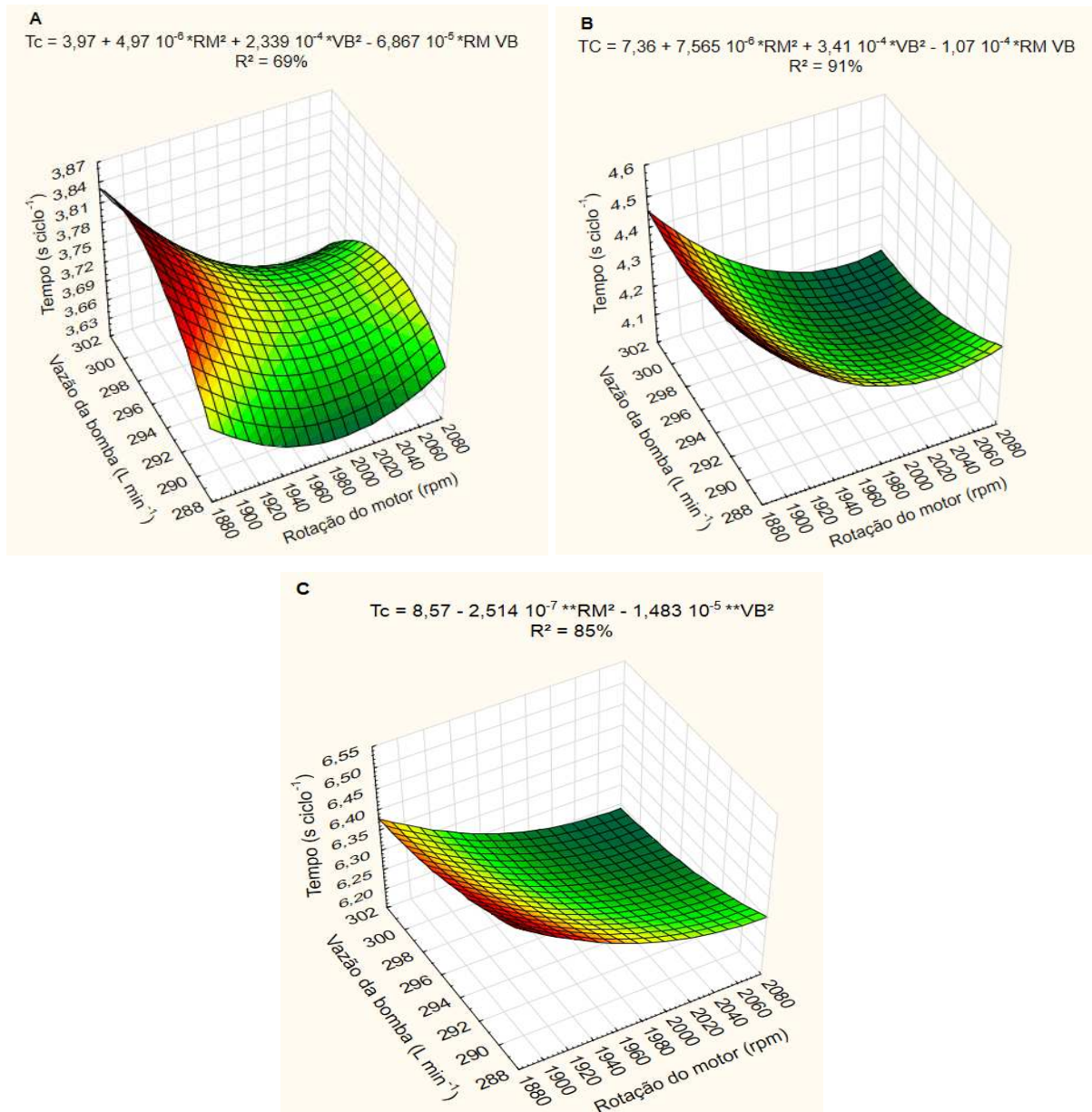


**Figura 3.** Superfície de resposta e Equação ajustada do tempo por ciclo ( $T_c$ ) da operação deslocamento e busca em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

Apesar da influência da rotação do motor e vazão da bomba sobre o tempo da operação deslocamento e busca, ao comparar os valores de tempo da operação quando a máquina trabalhava com rotação do motor em 2.060 rpm e vazão da bomba hidráulica em  $300 \text{ L min}^{-1}$  com os valores da rotação do motor em 2.000 rpm e vazão da bomba hidráulica de  $300 \text{ L min}^{-1}$  tem-se um aumento de 0,05; 0,27; e 0,29 segundos no ciclo operacional da máquina nos volumes de 0,08; 0,12; e  $0,16 \text{ m}^3$

árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Valores estes que não provocam impactos relevantes no tempo da operação, principalmente no menor volume pesquisado. Contudo ao avaliar os valores de tempo da operação na configuração com rotação do motor em 2.060 rpm e vazão da bomba hidráulica em 300 L min<sup>-1</sup> com os valores da rotação do motor em 1.900 rpm e vazão da bomba hidráulica de 290 L min<sup>-1</sup> tem-se um aumento de 0,23; 0,88; e 1,07 segundos no ciclo operacional da máquina nos volumes de 0,08; 0,12; e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Tais valores, exceto no volume de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, acarretaram em um impacto negativo sobre o tempo da operação.

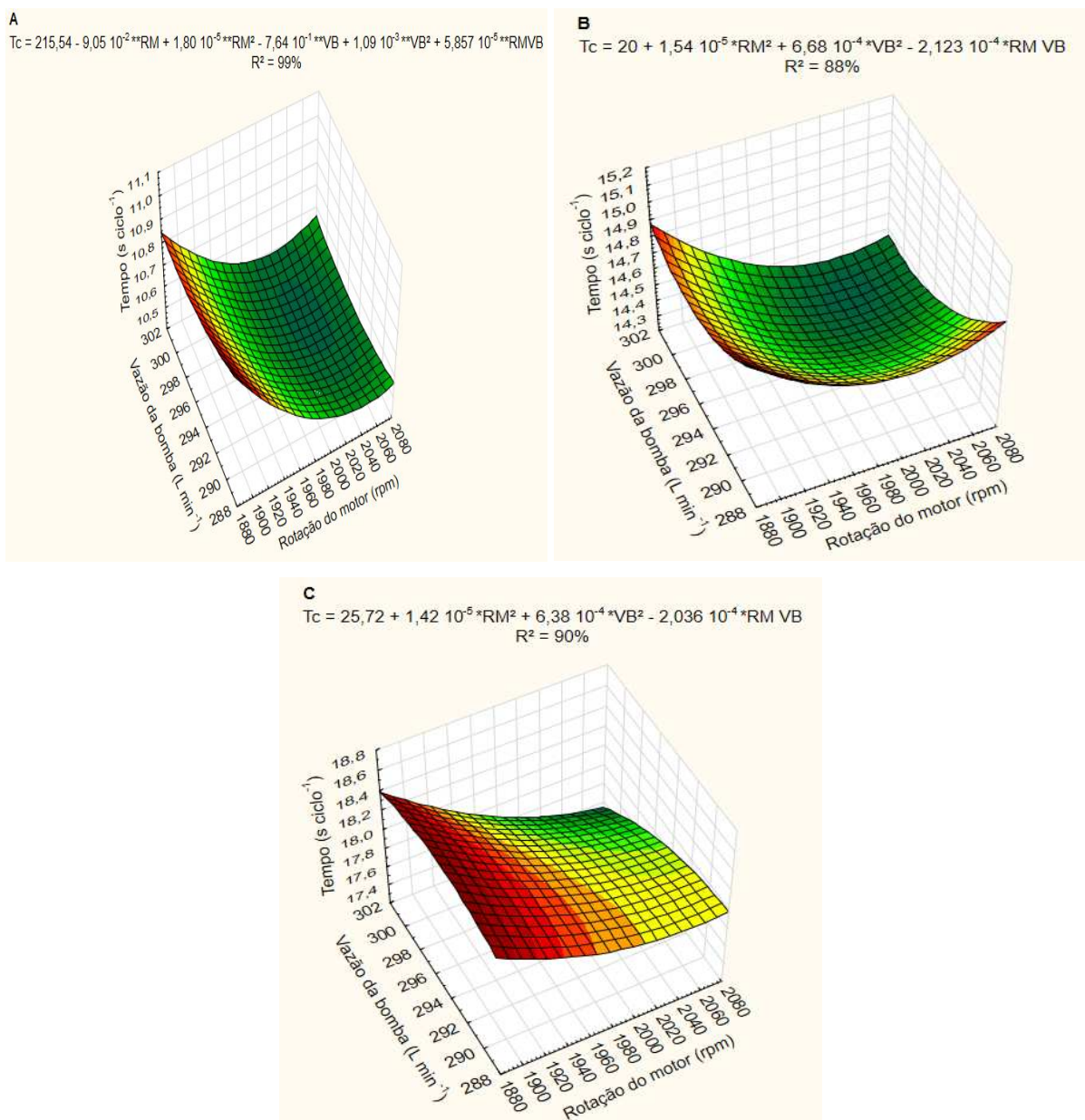
A rotação do motor e a vazão da bomba hidráulica apresentaram efeito significativo e quadrático sobre o tempo da operação de corte de derrubada, nos três volumes pesquisados (Figura 4). No menor volume, verificou-se que foi viável realizar a operação de corte de derrubada em quase todas as combinações estudadas, exceto na rotação do motor de 1.900 rpm com vazão da bomba de 300; 295 e 290 L min<sup>-1</sup>. Nos demais volumes, os valores de tempo da operação são próximos nas combinações de rotação do motor em 2.060 rpm com vazão da bomba em 300 ou 295 L min<sup>-1</sup>; rotação do motor de 2.000 rpm com vazão da bomba em 300 ou 295 L min<sup>-1</sup>, e rotação do motor em 1.950 rpm com vazão da bomba 300 L min<sup>-1</sup>.



**Figura 4.** Superfície de resposta e Equação ajustada do tempo por ciclo ( $T_c$ ) da operação corte de derrubada em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

A redução dos valores da rotação do motor e vazão da bomba provocou o decréscimo da rotação da serra do cabeçote e o aumento do tempo para a serra atingir a rotação de trabalho padrão, que era de 6.400 rpm. Tais circunstâncias provocaram o aumento do tempo do corte de derrubada, principalmente nos maiores volumes, nos quais as árvores apresentavam maior diâmetro e conseqüentemente demandava maior regime de rotação da serra.

Na Figura 5 está apresentada a Equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta para descrever o tempo por ciclo da atividade processamento em função das variáveis independentes. A rotação do motor e vazão da bomba apresentaram efeito quadrático, significativo e negativo em todos os volumes estudados. Contudo no volume de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  é possível operar a máquina, sem influenciar de forma expressiva no tempo da operação, em todas as combinações de rotação do motor igual e acima de 1.950 rpm e com vazão da bomba hidráulica igual e superior a  $295 \text{ L min}^{-1}$ . No volume intermediário os valores do tempo por ciclo da operação são próximos, nas combinações de rotação do motor de 2.060 rpm com vazão da bomba 300 ou  $295 \text{ L min}^{-1}$ ; rotação do motor em 2.000 rpm com vazão da bomba de 300 ou  $295 \text{ L min}^{-1}$ , e rotação do motor em 1.950 rpm com vazão da bomba em  $300 \text{ L min}^{-1}$ . No volume de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  as combinações de rotação do motor de 2.060 rpm com vazão da bomba em 300 ou  $295 \text{ L min}^{-1}$  e rotação do motor em 2.000 rpm com vazão da bomba em  $300 \text{ L min}^{-1}$  apresentaram valores de tempo por ciclo próximas.

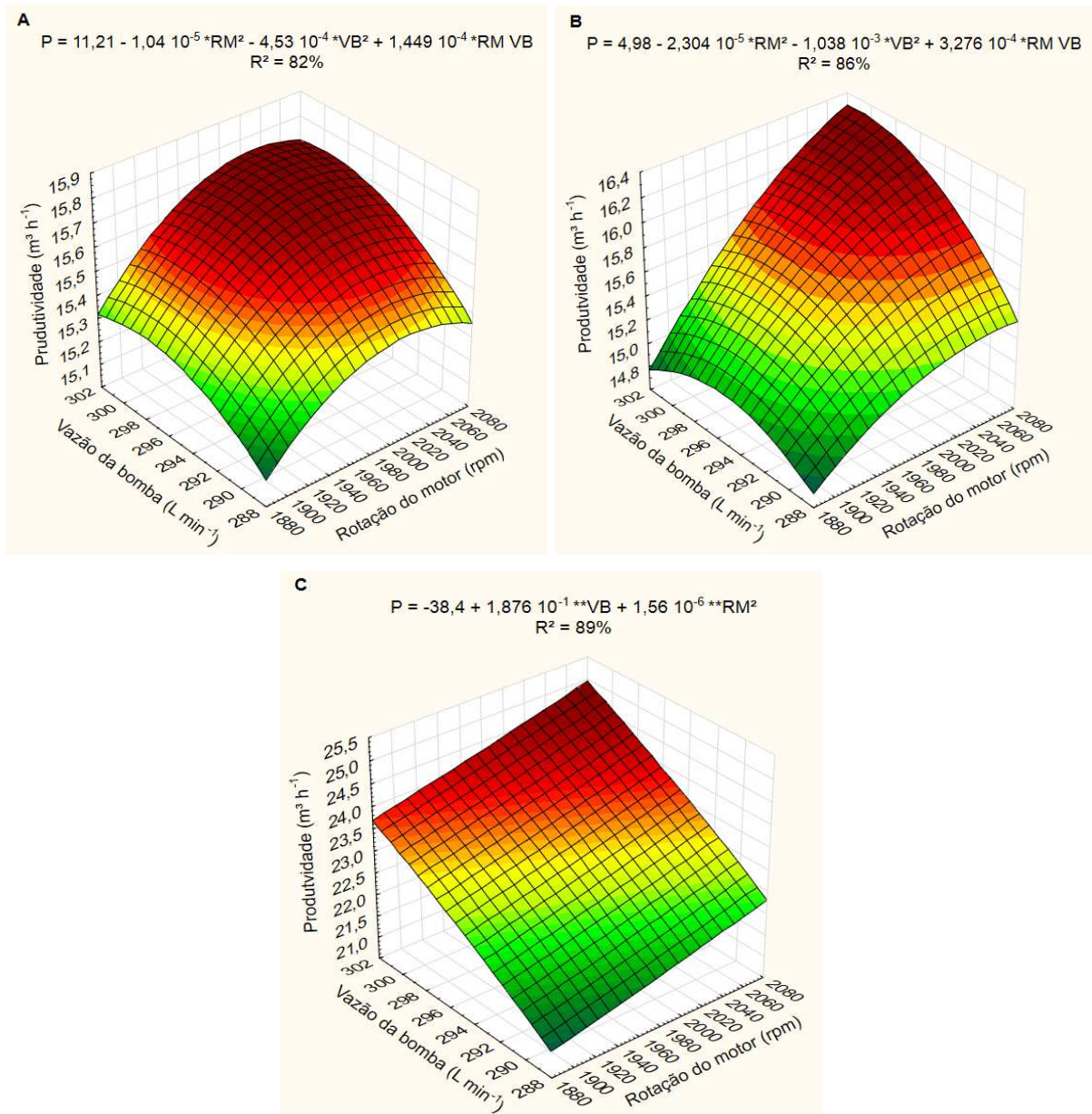


**Figura 5.** Superfície de resposta e Equação ajustada do tempo por ciclo ( $T_c$ ) da operação processamento em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

A influência da rotação do motor e vazão da bomba sobre o tempo da operação processamento tornou-se mais expressiva com o aumento do volume das árvores, em razão do maior peso da madeira, que proporcionava a redução da velocidade de alimentação das toras durante o processamento, principalmente nas rotações do motor de 1.950 e 1.900 rpm e vazões da bomba de 295 e 290  $\text{L min}^{-1}$ . Vale destacar que árvores bifurcadas e com muitos galhos ao longo do fuste,

dificultavam a ação dos rolos alimentadores, os quais apresentavam dificuldades para vencer os obstáculos, principalmente nas baixas rotações do motor e vazões da bomba.

A rotação do motor e vazão da bomba hidráulica influenciaram de forma significativa, quadrática e positiva sobre o rendimento operacional da máquina nos volumes de 0,08 e 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> (Figura 6). No maior volume a rotação do motor demonstrou efeito significativo e quadrático, já a vazão da bomba apresentou efeito significativo e linear. A influência tornou-se mais acentuada no maior volume, porque o alto peso das toras demandava mais força da máquina para executar as operações de busca, corte e processamento das árvores.



**Figura 6.** Superfície de resposta e Equação ajustada da produtividade (P) em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

Tal situação demonstra que nos menores valores de rotação do motor e vazão da bomba hidráulica a máquina não detém de toda sua potência, tornando o deslocamento da máquina base e os movimentos complementares de lança e cabeçote mais lentos. Cabe salientar que um menor regime de rotação do motor, proporciona o aumento dos intervalos de combustões no cilindro do motor e conseqüentemente a redução da potência nominal da máquina. Já a redução da

vazão da bomba diminui a pressão do sistema e, por conseguinte reduz a força e atrasa os movimentos da máquina.

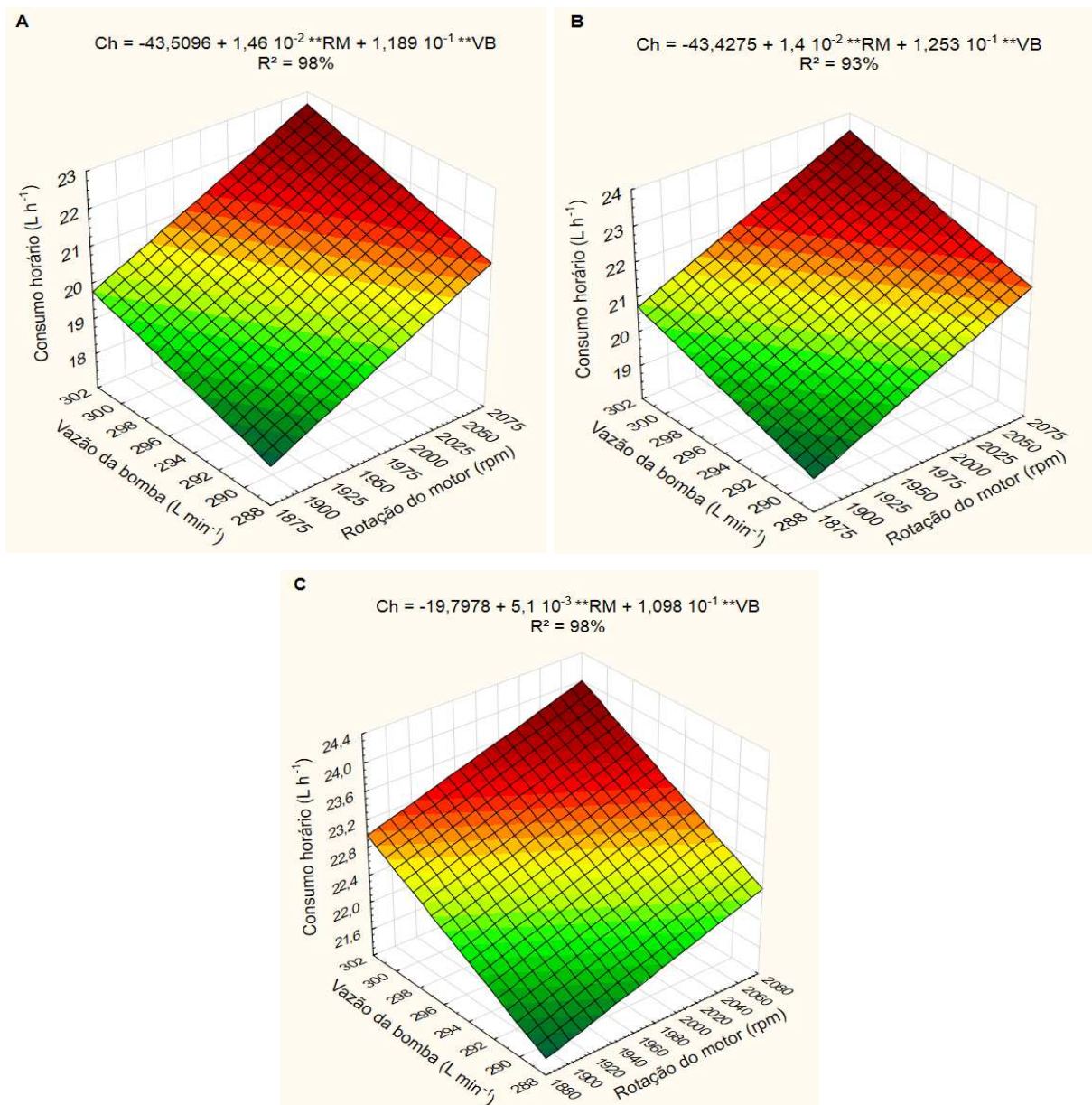
Apesar da influência das variáveis independentes sobre o rendimento operacional, é factível, no menor volume, configurar o *harvester* para executar as operações de colheita florestal com rotação do motor entre 1.950 a 2.060 rpm e vazão da bomba entre 295 a 300 L min<sup>-1</sup>, sendo que tais combinações não promovem decréscimos significativos na produtividade. No volume de 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> os valores de rendimento operacional se assemelham nas combinações de rotação do motor de 2.060 rpm com vazão da bomba de 300 ou 295 L min<sup>-1</sup> e rotação do motor de 2.000 rpm com vazão da bomba de 300 L min<sup>-1</sup>. Já no maior volume pesquisado os valores de produtividade são análogos nas combinações de rotação do motor de 2.060 ou 2.000 rpm com vazão da bomba em 300 L min<sup>-1</sup>.

Santos et al. (2018) avaliaram um *harvester* da marca Volvo, operando em distintas rotações do motor em um povoamento florestal com 0,25 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> e concluíram que o regime de rotação do motor não provoca mudanças significativas no rendimento operacional. Na pesquisa desenvolvida por Ramos et al. (2016) verificou-se que o regime de rotação do motor, no intervalo de 1.800 a 2.100 rpm, não afeta o rendimento operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar quando a mesma operava com velocidade de deslocamento de até 4 km h<sup>-1</sup>, no entanto em maiores velocidades de deslocamento a produtividade é influenciada de forma significativa. A partir de tais resultados, e os apresentados na atual pesquisa, demonstraram que em determinadas condições operacionais é desnecessário operar a máquina em seu máximo regime de rotação do motor e vazão da bomba hidráulica.

Cabe destacar, que o operador estava habituado a operar o *harvester* com rotação do motor de 2.060 rpm e vazão da bomba em 300 L min<sup>-1</sup>. É provável que a utilização das demais combinações, previamente a execução do estudo, poderia proporcionar ganhos no rendimento operacional durante a execução da pesquisa. Alguns operadores relataram que se sentiam psicologicamente afetados com a possibilidade de redução da rotação do motor e vazão da bomba hidráulica.

As variáveis independentes apresentaram efeito linear, positivo e significativo sobre o consumo horário da máquina em todos os volumes estudados (Figura 7). Mantendo fixo o valor da vazão da bomba e alterando de forma decrescente a

rotação do motor, nos níveis estudados, tem-se uma redução média de 0,78; 0,75; e 0,27 L h<sup>-1</sup> no consumo horário, nos volumes de 0,08; 0,12; e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Caso contrário, mantendo fixa a rotação do motor e alternando, de forma decrescente, a vazão da bomba, nos níveis estudados, ocorre redução média de 0,59; 0,63; e 0,55 L h<sup>-1</sup> no consumo horário da máquina nos volumes baixo, médio e alto, respectivamente.



**Figura 7.** Superfície de resposta e Equação ajustada do consumo horário (Ch) em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

O incremento do consumo horário da máquina, com o aumento do regime de rotação do motor, ocorre devido ao maior número de combustões nas maiores rotações do motor. Em média ocorriam 1.030; 1.000; 975; e 950 combustões por minuto nas rotações do motor de 2.060; 2.000; 1.950 e 1.900 rpm, respectivamente. No volume de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, em cada combustão ocorria em média à injeção de 0,350; 0,346; 0,342; 0,339 mililitros de diesel por combustão, nas rotações do motor de 2.060; 2.000; 1.950 e 1.900 rpm, respectivamente. Já no volume intermediário, obtiveram-se os valores de 0,362; 0,359; 0,356; e 0,353 mililitros de diesel por combustão, nas rotações do motor de 2.060; 2.000; 1.950 e 1.900 rpm, respectivamente.

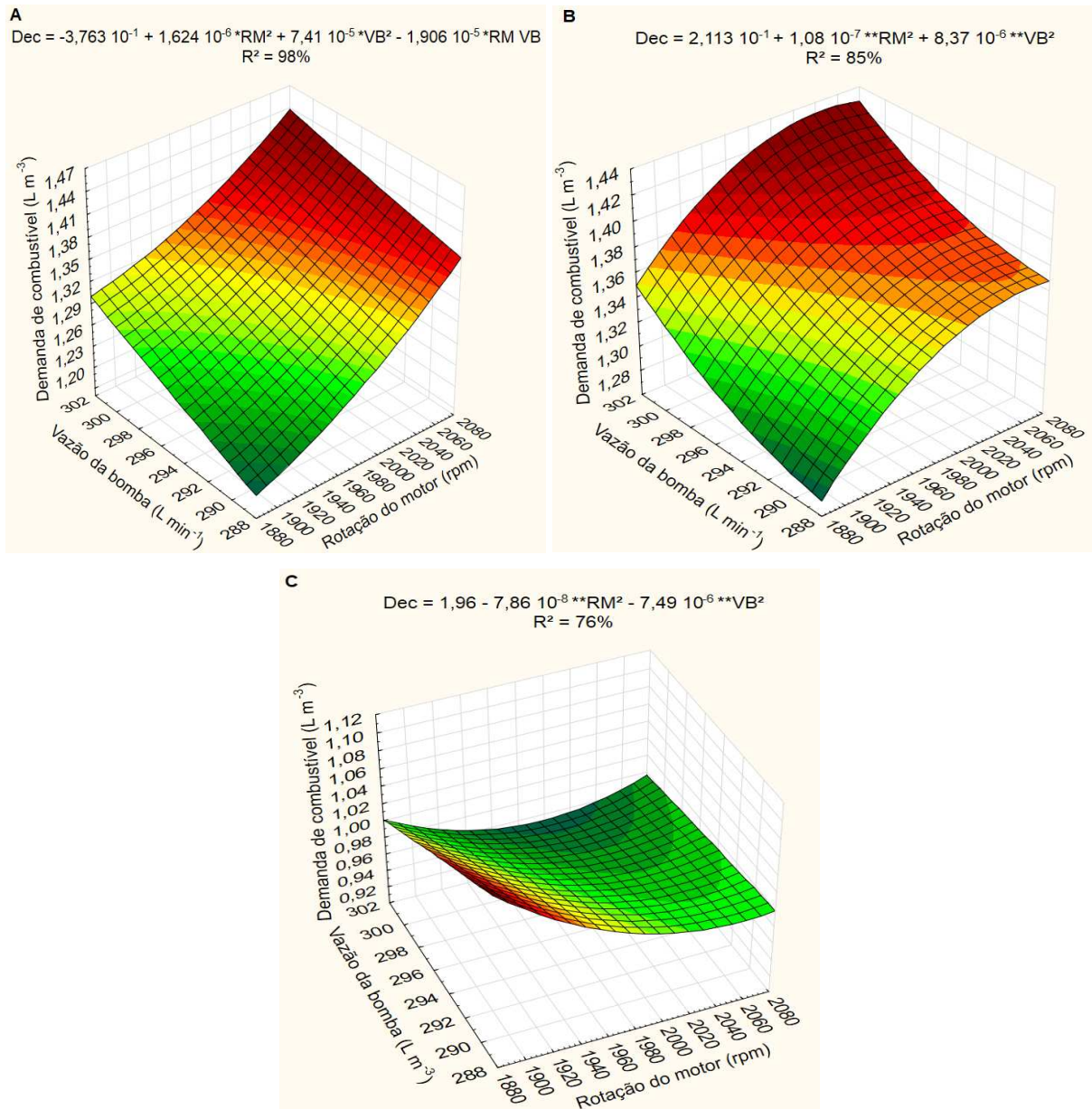
No maior volume estudado, a redução do consumo horário da máquina, devido à diminuição dos valores das variáveis independentes, foi menos acentuada, quando comparado com os demais volumes. Tal circunstância ocorreu porque a máquina demandava mais tempo para executar as operações de deslocamento, corte e processamento da madeira. Além disso, para compensar a redução da potência devido o decréscimo da rotação do motor, o sistema operacional da máquina aumentou a quantidade de combustível injetado por combustão. Era injetado em média 0,374; 0,380; 0,385; 0,391 mililitros de diesel por combustão, nas rotações do motor de 2.060; 2.000; 1.950; e 1.900, na devida ordem.

Em relação à rotação do motor, o comportamento do consumo horário da máquina foi semelhante aos resultados encontrados por Santos et al. (2018), Ramos et al. (2016) e Fiorese et al. (2015). Apesar das diferenças técnicas entre as máquinas, percebe-se que os operadores trabalham em máximas rotações do motor, independentemente das condições operacionais e sem atentar para o alto consumo horário de combustível. De acordo com Ackerman et al. (2014) o consumo de combustível de *harvester* é influenciado diretamente pelo nível de treinamento do operador.

A vazão da bomba hidráulica influencia sobre o consumo de combustível porque a potência solicitada ao motor, em maiores vazões, é superior em relação a potência requerida em baixas vazões. Mediante isso a bomba injetora aumenta a quantidade de combustível a ser injetado no interior do cilindro do motor.

A rotação do motor e vazão da bomba hidráulica apresentaram efeito quadrático e significativo sobre demanda de combustível em todos os cenários

estudados (Figura 8). Na rotação do motor de 1.900 rpm com vazão da bomba hidráulica de 290 L min<sup>-1</sup> foram obtidos os menores valores de demanda de combustível, 1,22; e 1,31 L m<sup>-3</sup>, para os volumes de 0,08; e 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. No maior volume estudado a menor demanda de combustível, 0,95 L m<sup>-3</sup>, foi atingida na rotação do motor de 2.060 rpm com vazão da bomba de 300 L min<sup>-1</sup>, valor similar, 0,97 L m<sup>-3</sup>, foi alcançado na rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba de 300 L min<sup>-1</sup>.



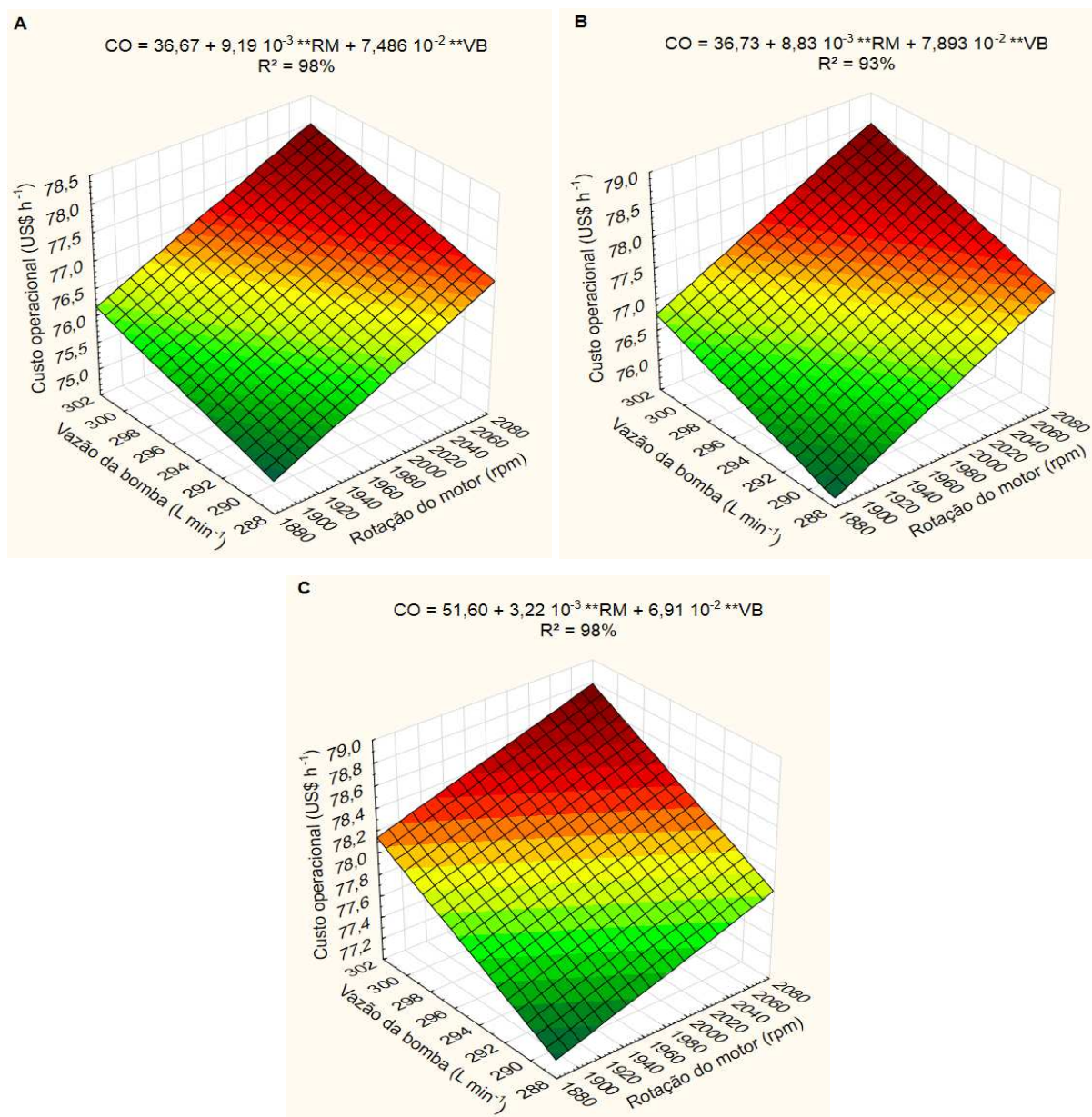
**Figura 8.** Superfície de resposta e Equação ajustada da demanda de combustível (Dec) em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

Ao analisar os valores de demanda de combustível, verificou-se que em algumas circunstâncias, a combinação que apresenta o menor valor de demanda de combustível não proporciona os melhores resultados, no que se refere ao desempenho operacional do trator florestal. No volume de 0,08 a melhor combinação é com rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba de 295 L min<sup>-1</sup>. Nos demais volumes, a melhor combinação é com rotação do motor em 2.000 rpm

e vazão da bomba em  $300 \text{ L min}^{-1}$ . Tais combinações não afetam de forma significativa o rendimento operacional do *harvester*. Prinz et al. (2018) estudaram o corte de madeira com os *harvesters* Ponsse *Beaver*, Ponsse *ScorpionKing* e Ponsse *Ergo*, operado no modo usual, econômico e de produção. Os autores constataram os menores valores de demanda de combustível quando a máquina trabalhava no modo usual, o qual ostentava a menor rotação do motor. Resultados estes semelhantes aos do atual trabalho.

### **3.2. Parâmetros econômicos**

A superfície de resposta e a equação ajustada do custo operacional em função da rotação do motor e vazão da bomba hidráulica estão apresentadas na Figura 9. Ambas variáveis apresentaram efeito linear e positivo sobre o custo operacional do *harvester*.



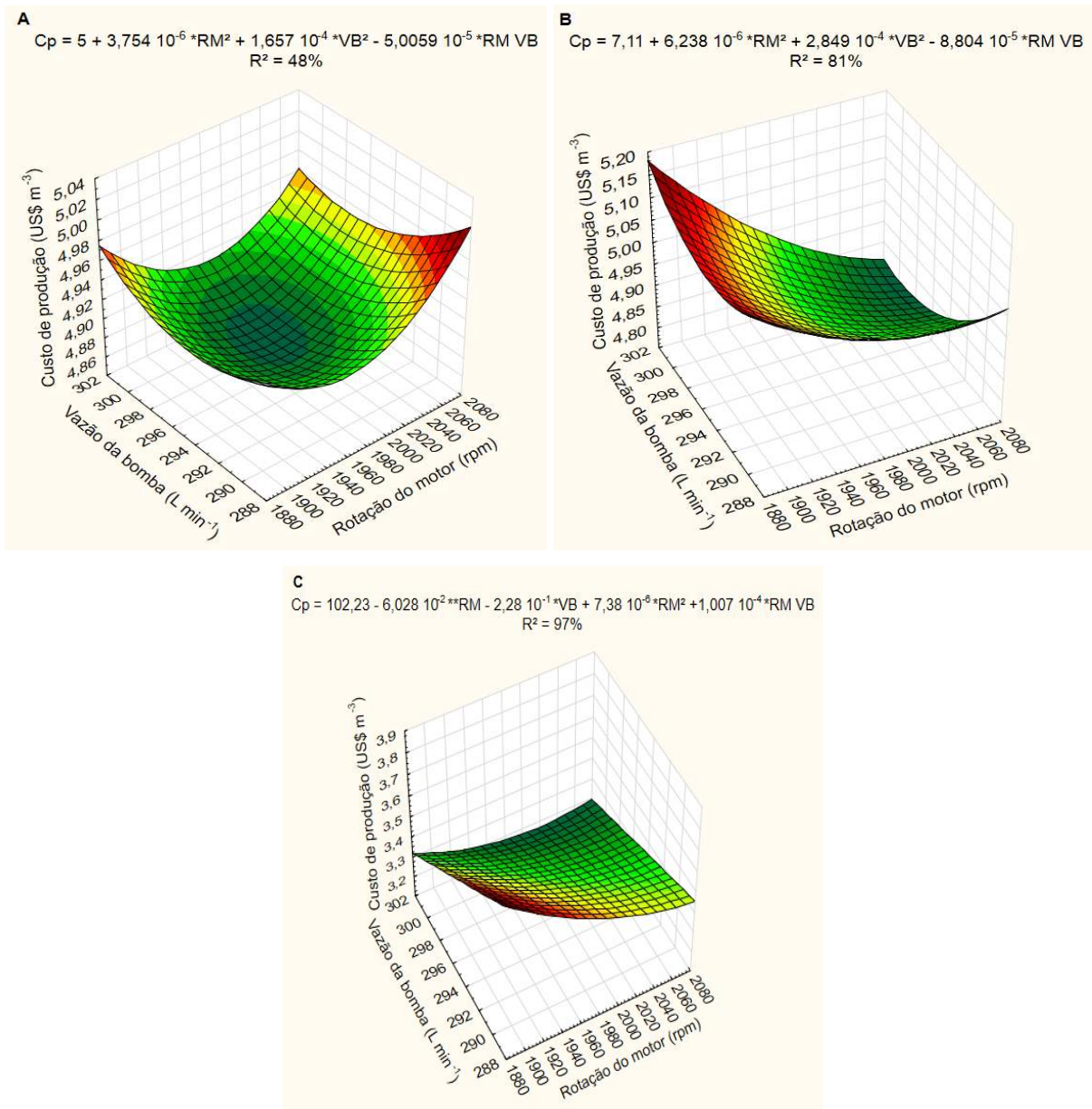
**Figura 9.** Superfície de resposta e Equação ajustada do custo operacional (CO) em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

Mantendo fixa a vazão da bomba e diminuindo, nos níveis estudados, a rotação do motor tem-se uma redução de 0,49; 0,47; e US\$ 0,17 h<sup>-1</sup> no custo operacional nos volumes baixo, médio e alto respectivamente. Caso contrário, mantendo fixa a rotação do motor e reduzindo, nos níveis avaliados, a vazão da bomba tem-se uma redução no custo operacional de 0,37; 0,39; e US\$ 0,34 h<sup>-1</sup>, nos volumes de 0,08; 0,12; e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. A redução do custo

operacional ocorreu devido ao decréscimo do consumo horário do trator florestal. Cabe salientar que nos menores valores das variáveis independentes, o motor da máquina não apresentava superaquecimento, o que pode prolongar a vida útil das partes móveis do motor e conseqüentemente reduzir os custos com manutenção. Quando o *harvester* operava nas maiores valores de rotação do motor, frequentemente, no período da tarde, era necessário parar a máquina e lavar o radiador com jato de água, a fim de evitar superaquecimento. Além disso, a redução da vazão da bomba diminui a pressão do sistema hidráulico e, portanto pode haver redução do número de mangueiras hidráulicas danificadas.

Quando a máquina estava operando com rotação do motor em 2.060 rpm e vazão da bomba de 300 L min<sup>-1</sup>, o custo com combustível representou 18; 18; e 19% do custo operacional nos volumes de 0,08; 0,12 e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Já na rotação do motor 1.900 rpm e vazão da bomba de 290 L min<sup>-1</sup>, a representatividade do custo com combustível reduziu para 16; 16; e 18% nos volumes 0,08; 0,12 e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Nas pesquisas desenvolvidas por Santos et al. (2017) e Silva et al. (2014) o custo com combustível representou 8,90 e 24,41% do custo operacional, respectivamente. Apesar das diferenças entre as porcentagens, devido às características técnicas das máquinas e empresas, os valores, quando transformados em dólares por hora, são expressivos, o que demonstram a necessidade de adoção de medidas visando à redução do consumo horário do trator florestal.

A rotação do motor e a vazão da bomba promoveram efeito significativo e quadrático sobre o custo de produção nos volumes de 0,08; e 0,12 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> (Figura 10). No maior volume pesquisado, a rotação do motor apresentou efeito significativo e quadrático, já vazão da bomba influenciou de forma significativa e linear.



**Figura 10.** Superfície de resposta e Equação ajustada do custo de produção ( $C_p$ ) em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

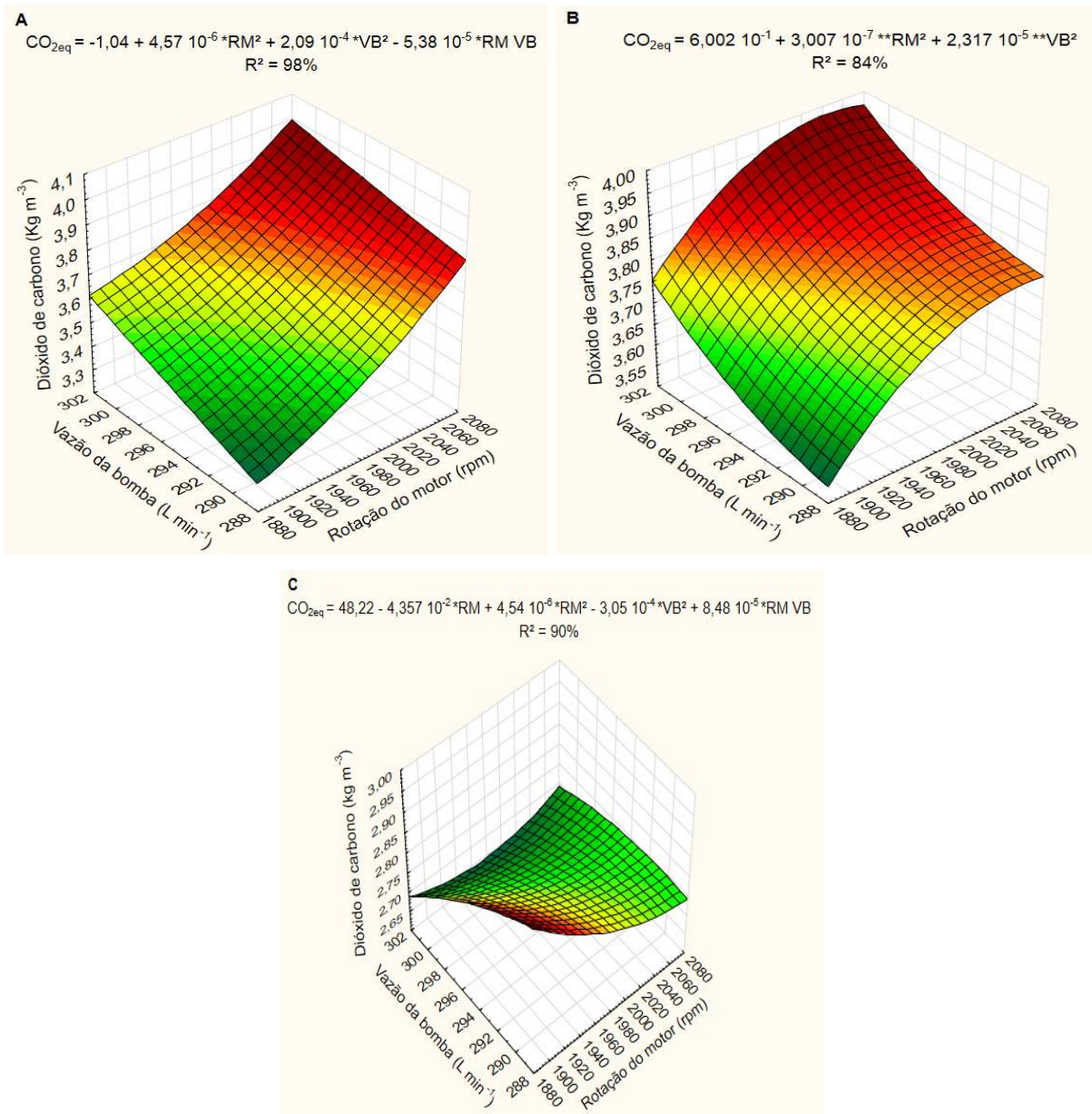
No Volume Médio Individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  o menor custo de produção, US\$  $4,90 \text{ m}^3$ , foi obtido na rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba de  $300 \text{ L min}^{-1}$ , o mesmo valor foi verificado na combinação de 1.950 rpm e vazão da bomba de  $295 \text{ L min}^{-1}$ . No volume intermediário a combinação que proporcionou o menor custo por metro cúbico, US\$  $4,81 \text{ m}^3$ , foi 2.060 rpm com  $300 \text{ L min}^{-1}$ . Já no volume de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , o menor valor do custo de produção, US\$  $3,20 \text{ m}^3$ , foi obtido na

rotação do motor de 2.060 rpm e vazão da bomba de 300 L min<sup>-1</sup>, valor próximo, US\$ 3,21 m<sup>-3</sup>, foi verificado na rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba de 300 L min<sup>-1</sup>.

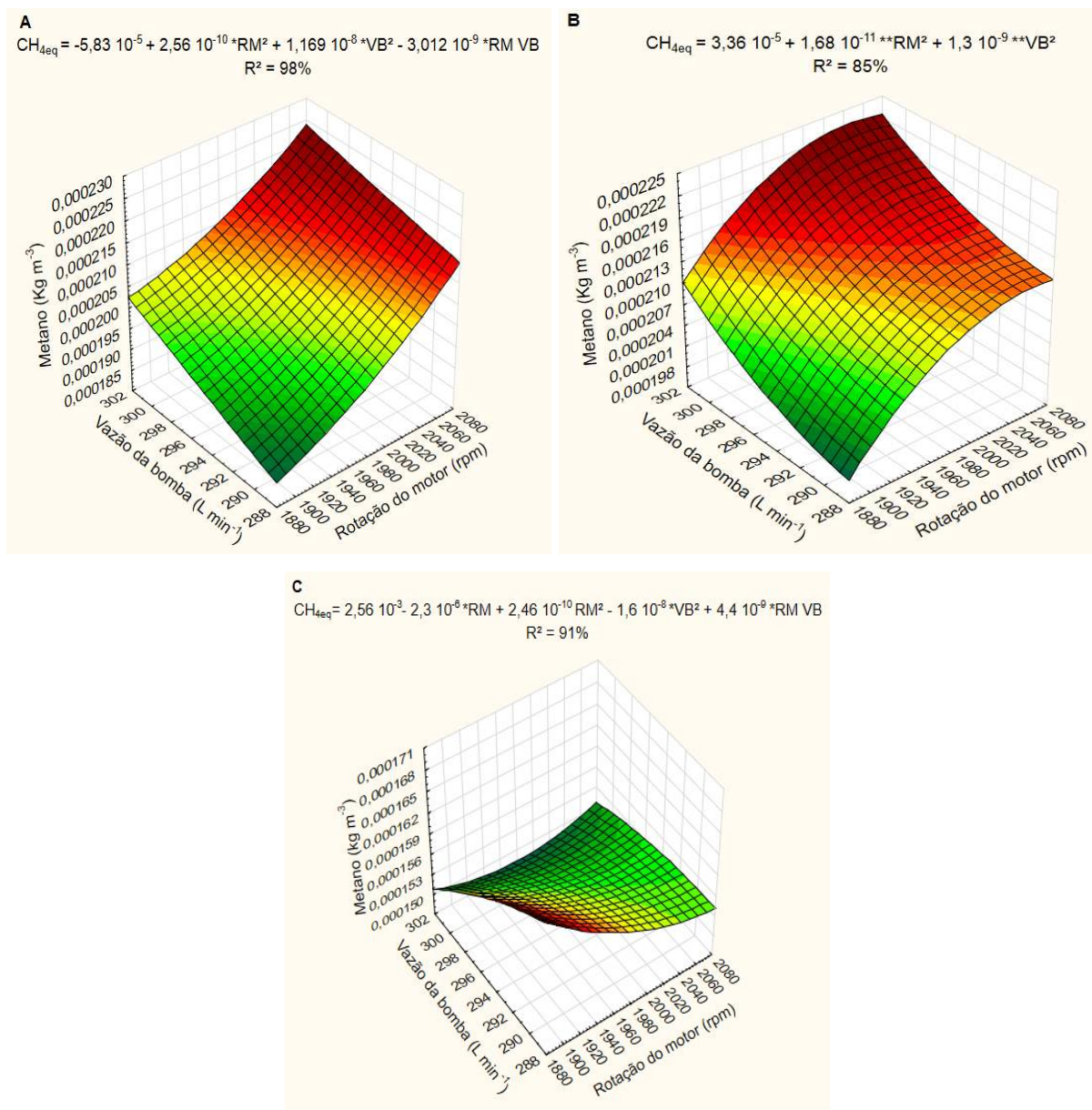
O rendimento operacional influenciou de forma mais expressiva no custo de produção, quando comparado com o custo operacional. De modo a exemplificar, em média, no volume de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, a modificação de 0,10 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> na produtividade altera o custo de produção em US\$ 0,03 m<sup>3</sup>, já a alteração de US\$ 0,10 h<sup>-1</sup> no custo operacional provoca mudança de US\$ 0,01 m<sup>-3</sup> no custo de produção. Tal circunstância contribuiu para aumentar o custo de produção com a redução da rotação do motor e vazão da bomba, já que os valores do custo operacional alteraram de forma mais acentuada, quando comparado com os valores de rendimento operacional.

### **3.3. Emissão de gases poluentes**

A superfície de resposta e a equação ajustada da quantidade de dióxido de carbono e metano emitidos, por metro cúbico de madeira colhida, em função da rotação do motor e vazão da bomba hidráulica estão apresentadas na Figura 11 e 12, respectivamente. Constatou-se efeito quadrático, significativo e positivo de ambas as variáveis independentes sobre os valores de dióxido de carbono e metano nos três volumes estudados.



**Figura 11.** Superfície de resposta e Equação ajustada da quantidade de dióxido de carbono ( $CO_{2eq}$ ) emitida em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.



**Figura 12.** Equação ajustada da quantidade de metano ( $CH_4$ ) emitida em função da rotação do motor (RM) e vazão da bomba hidráulica (VB). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

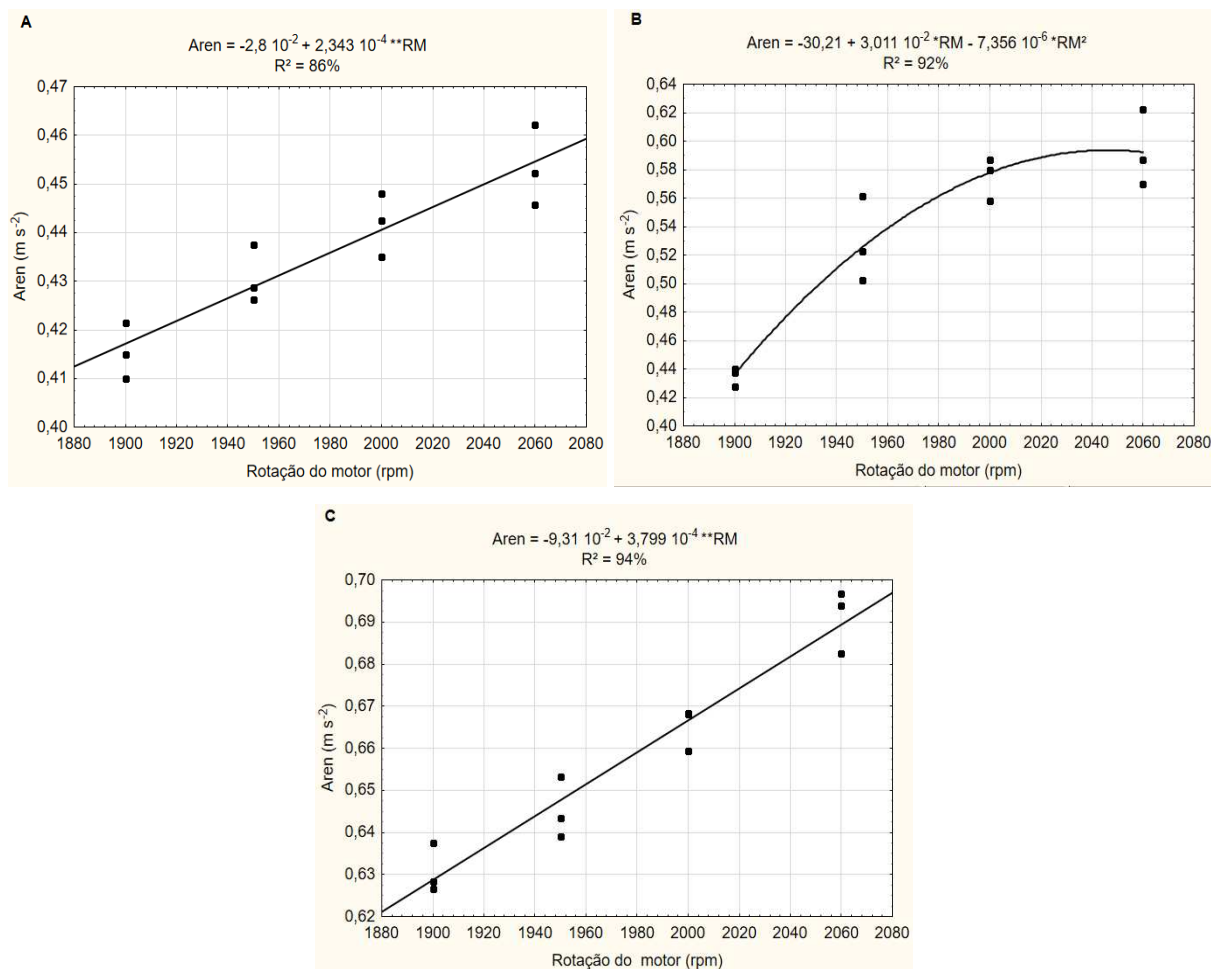
No volume de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  a menor quantidade de dióxido de carbono,  $3,39 \text{ kg m}^{-3}$ , e metano,  $0,000189 \text{ kg m}^{-3}$ , foram obtido no arranjo de 1.900 rpm e  $290 \text{ L min}^{-1}$ . No volume intermediário as menores quantidades de dióxido de carbono,  $3,63 \text{ kg m}^{-3}$ , e metano,  $0,000204 \text{ kg m}^{-3}$ , também foram obtidos no arranjo citado anteriormente. No maior volume pesquisado, a menor quantidade de  $CO_{2eq}$ ,  $2,67 \text{ kg}$

$\text{m}^{-3}$ , e metano,  $0,000144 \text{ kg m}^{-3}$ , foram obtidos na rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba de  $300 \text{ L min}^{-1}$

Resultados semelhantes foram obtidos por na pesquisa desenvolvida por Prinz et al. (2018), na qual verificou-se redução da quantidade de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  com o decréscimo da rotação do motor. Mediante isso, constata-se que a redução da rotação do motor não provoca efeito significativo sobre a produtividade da máquina, contudo ocasiona uma redução acentuada no consumo horário de combustível. Conforme Zhang et al. (2016) os fatores que mais influenciam na emissão de poluentes durante as operações de colheita florestal são o rendimento operacional e o consumo de combustível, sendo o primeiro um fator positivo e o segundo um fator negativo.

### **3.4. Parâmetros ergonômicos**

Em todos os volumes estudados a vazão da bomba hidráulica não apresentou efeito significativo sobre os valores de aceleração resultante de exposição normalizada (Aren). A rotação do motor apresentou efeito significativo, linear e positivo sobre os valores de Aren no volume de 0,08; e  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , à medida que no volume intermediário o efeito foi significativo e quadrático (Figura 13). Os valores de Aren, em todos os cenários estudados, não excederam o valor limite para a jornada de trabalho de 8 horas diárias, que de acordo com a Norma de Higiene Ocupacional (NHO 09) é de  $1,1 \text{ m s}^{-2}$ . No entanto, no volume de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , quando o motor está operando em rotações acima de 1.950 rpm e no volume de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , em qualquer rotação do motor, é necessário a adoção de medidas preventivas, pois os valores de Aren ultrapassam  $0,50 \text{ m s}^{-2}$ , e de acordo com o gráfico guia com zonas de precaução à saúde da norma ISO 2631-1:1997 (ISO, 1997), valores acima do citado apresentam riscos potências a saúde. Cabe salientar que a exposição a amplitudes de vibração de corpo inteiro pode ocasionar distúrbios musculoesqueléticos em operadores de máquinas florestais (OSBORNE et al., 2012).



**Figura 13.** Equação ajustada da aceleração resultante de exposição normalizada (aren) em função da rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

O aumento dos valores de Aren com o incremento do regime de rotação do motor ocorreu devido ao aumento do movimento ascendente e descende dos pistões e também aumento da velocidade de deslocamento da máquina, que consequentemente aumenta as vibrações na máquina, sendo as mesmas transmitidas até o operador, uma vez que entre o motor e o chassi da máquina não existe mecanismo para o amortecimento das vibrações. Além disso, tal situação demonstra a necessidade de melhorias no assento do operador.

Marzano et al. (2017) avaliaram os valores de aceleração resultante de exposição normalizada de diferentes modelos de *harvester*, e determinaram um valor de  $0,37 \text{ m s}^{-2}$ . Já Sherwin et al. (2004) determinaram os valores de aceleração entre  $0,277$  e  $0,527 \text{ m s}^{-2}$ , para um *harvester* operando com diferentes pressões de

insuflação dos pneus. Os resultados citados são similares aos observados na presente pesquisa quando o *harvester* estava operando no povoamento florestal com volume médio de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>.

Os valores de Aren, de todas as operações, diferiram estatisticamente entre si, sendo que a operação deslocamento e busca apresentou os maiores valores, seguida do processamento da madeira e corte de derrubada (Tabela 3). O volume médio individual também influenciou de forma de significativa nos valores de Aren, sendo os maiores valores observados no volume de 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>.

**Tabela 3.** Valores, por operação, de aceleração resultante de exposição normalizada (Aren) nos volumes pesquisados.

VMI (m <sup>3</sup> árvore <sup>-1</sup> )	Deslocamento e busca	Corte de derrubada	Processamento
0,08	0,65 ABa	0,19 Bb	0,22 Bb
0,12	0,72 Aa	0,21 Bc	0,33 Ab
0,16	0,55 Ba	0,28 Ac	0,35 Ab

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os maiores valores de Aren na operação deslocamento e busca, ocorrem porque durante a operação a máquina translada sobre a superfície irregular do solo, com a presença de tocos e pedras o que resulta em maiores valores de vibração transmitidos até o operador. Além disso, o *harvester* era de esteiras e não usufruía de sistema de suspensão que tem papel fundamental na absorção de níveis de vibração que os operadores são expostos, pois são eles que filtram o choque oriundo da interação dinâmica entre as rodas motrizes e terreno irregular.

O aumento dos valores de Aren nas operações processamento e corte de derrubada, com o incremento do volume das árvores ocorreu porque as toras com maior peso apresentam maior inércia, maior impacto sobre o solo durante a derrubada e maior impacto dos rolos de alimentação e das facas de desgalhamento e descascamento. Contudo, cabe destacar que a diferença estatística entre os valores da operação deslocamento e busca ocorreu devido às condições operacionais do solo e não necessariamente devido o volume da madeira, já que durante a execução da operação a máquina não entrava em contato com as toras.

As operações de colheita florestal eram realizadas em um sistema de escalas e em dois turnos, no qual os operadores trabalhavam durante quatro dias seguidos no mesmo turno e folgavam durante dois dias. Na Tabela 4 constam as ações

realizadas pelo operador, as respectivas exigências ergonômicas e os membros do corpo afetados durante o corte e processamento da madeira. Ficou evidente que a atividade do operador de *harvester* exige elevado nível de concentração e requer movimentos rápidos, diferentes e repetitivos de diversos membros do corpo, independente dos níveis dos fatores estudados.

**Tabela 4.** Sequência de ações técnicas durante a execução do ciclo operacional da máquina e os respectivos membros do corpo afetados.

Sequência da operação	Exigências ergonômicas	Partes do corpo
Movimentação da máquina	- Parado sentando; -Necessidade de visualização; e - Acionamento de comandos;	-Músculos das pernas; -Punho esquerdo com desvio ulnar; -Mãos; -Dedos; -Pescoço em constante movimento; Olhos; e -Ombro
Movimentação da lança	-Parado sentando; -Necessidade de visualização; e - Acionamento de comandos;	-Punho direito com desvio ulnar; -Olhos; -Mãos; -Dedos e -Ombro
Acionamento dos componentes do cabeçote	-Parado sentado; -Necessidade de visualização; e - Acionamento de comandos;	-Olhos; -Mãos; e -Dedos

Na Tabela 5 é possível observar os resultados obtidos com o cálculo da Taxa de Ocupação Real (TOR) e Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR), sendo que não houve diferenças expressivas entre os valores dos três volumes estudados, assim como dos valores das distintas combinações de rotação do motor e vazão da bomba hidráulica. Durante a execução da pesquisa não foram observadas Pausas Irregulares Habituais, Pausas Curtíssimas e Fator força. Como a TOMCAR apresentou valores inferiores a TOR, em todos os cenários estudados, a operação com *harvester* se caracteriza como de risco ergonômico, sendo necessários a adoção de medidas mitigadoras e o acompanhamento dos trabalhadores, independente dos valores de rotação do motor e vazão da bomba hidráulica. Tal resultado corrobora com os encontrados por Gerasimov e Sokolov (2014), os quais afirmaram que os operadores de máquinas

florestais estão sendo atingidos por lesões no pescoço, braços e coluna cervical, causados por intensidade excessiva no trabalho, ficar muito tempo em posições fixas ergonomicamente incorretas e por movimentos repetitivos de ciclo curto.

**Tabela 5.** Taxa de Ocupação Real (TOR) e Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR) em todos os volumes pesquisados.

Tipo de pausa	VMI (m <sup>3</sup> árvore <sup>-1</sup> )		
	0,08	0,12	0,16
PPR (%)	7,50	6,88	7,50
PABE (%)	8,75	8,54	8,96
PPIH (%)	0,00	0,00	0,00
PPC (%)	0,00	0,00	0,00
Mecanismo de regulação (%)	5,00	5,00	5,00
TOR (%)	78,75	79,58	78,54
FR (%)	3,00	3,00	3,00
FF (%)	0,00	0,00	0,00
FEE (%)	24,00	24,00	24,00
TOMCAR (%)	68,00	68,00	71,00

Em que: PPR = Porcentagem de repouso por pausas regulares (%); PABE = Porcentagem de tempo com atividades de baixa exigência (%); PPIH = Porcentagem de pausas irregulares habituais (%); PPC = Porcentagem de pausas curtíssimas (%); FR = fator repetitividade; FF = fator força; e FEE = fator esforço estático.

A cada duas horas de operação os operadores realizam pausas para executar exercícios físicos, o intervalo entre as mesmas pode ser reduzido, a fim de evitar danos à saúde dos operadores. Conforme Couto (2002) a operação com *harvester* exige movimentos repetitivos, posturas estáticas e capacidade psíquica dos trabalhadores, por isso, as pausas são mecanismos importantes e indispensáveis para equilibrar a biomecânica do organismo, compensando a sobrecarga do trabalho. De acordo com Silva et al. (2013) os operadores de *harvester* precisam usar sua capacidade psíquica para observar e operar painel, comandos, controles, grua ou cabeçote de corte, sinais luminosos, sonoros e rádio, o que pode provocar desgaste emocional, nervosismo e irritação.

A partir do questionário Bipolar, verificou-se que as combinações de: 1.950 rpm e 290 L min<sup>-1</sup>; 1.900 rpm e 295 L min<sup>-1</sup>; e 1.900 rpm e 290 L min<sup>-1</sup>, intensificavam os sintomas de fadiga, cansaço físico e mental, produtividade

comprometida e dores no braço, punho e mãos do lado esquerdo e direito. Tais sintomas foram mais expressivos no volume de  $0,16 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ . De acordo com os operadores, nas referidas combinações, as atividades executadas pela máquina ficavam lentas, tornando assim a operação monótona e mais pesada.

Na Tabela 6 é possível observar o número de vezes que operador acionava os componentes da máquina durante a jornada de trabalho. Observou-se que na rotação do motor de 1.900 rpm e vazão da bomba de  $290 \text{ L min}^{-1}$ , houve menor repetição dos movimentos em razão do decréscimo do rendimento operacional. No entanto os operadores relatavam que em tal combinação era necessário um maior esforço físico e mental para manter a produtividade da máquina elevada. Um dos trabalhadores fez o seguinte relato:

*“(...) quando a rotação do motor e vazão da bomba estão muito baixas eu tenho que trabalhar pela máquina, e não o contrário, que seria a máquina trabalhar para mim”.*

**Tabela 6.** Número de vezes, por turno, que o operador acionava os comandos da máquina em todos os cenários pesquisados.

Volume Médio Individual de 0,08 m <sup>3</sup> arv <sup>-1</sup>										
Motor (rpm)	Bomba (L min <sup>-1</sup> )	Número de ciclos	Joystick esquerdo	Joystick direito	Joystick direito botão 2	Joystick esquerdo botão 2	Joystick esquerdo botão 4	Joystick esquerdo botão 1	Joystick esquerdo botão 3	Câmbio 1 e 2
2060	300	1100	3336	1760	2200	1027	843	697	1100	201
2060	295	1114	3379	1782	2228	1040	854	706	1114	204
2060	290	1055	3202	1689	2111	985	809	668	1055	193
2000	300	1078	3269	1724	2156	1006	826	683	1078	197
2000	295	1105	3352	1768	2210	1031	847	700	1105	202
2000	290	1055	3201	1689	2111	985	809	668	1055	193
1950	300	1065	3232	1705	2131	994	817	675	1065	195
1950	295	1016	3081	1625	2031	948	779	643	1016	186
1950	290	990	3002	1583	1979	924	759	627	990	181
1900	300	1070	3246	1712	2140	999	820	678	1070	196
1900	295	1017	3084	1627	2034	949	780	644	1017	186
1900	290	996	3020	1593	1991	929	763	631	996	182
Volume Médio Individual de 0,12 m <sup>3</sup> arv <sup>-1</sup>										
Motor (rpm)	Bomba (L min <sup>-1</sup> )	Número de ciclos	Joystick esquerdo	Joystick direito	Joystick direito Botão 2	Joystick esquerdo Botão 2	Joystick esquerdo Botão 4	Joystick esquerdo Botão 1	Joystick esquerdo Botão 3	Câmbio 1 e 2
2060	300	752	2871	1465	1505	891	673	871	832	141
2060	295	751	2867	1463	1503	890	672	870	830	141
2060	290	726	2769	1413	1452	859	649	840	802	136
2000	300	747	2851	1455	1494	885	668	865	826	140
2000	295	759	2896	1478	1518	899	679	879	839	142
2000	290	720	2746	1401	1439	852	644	833	795	135
1950	300	719	2745	1401	1439	852	644	833	795	135
1950	295	691	2635	1345	1381	818	618	800	763	129
1950	290	658	2512	1282	1317	780	589	762	728	123
1900	300	678	2587	1320	1356	803	607	785	749	127
1900	295	707	2696	1376	1413	837	632	818	781	132
1900	290	665	2537	1295	1330	787	595	770	735	125
Volume Médio Individual de 0,16 m <sup>3</sup> arv <sup>-1</sup>										
Motor (rpm)	Bomba (L min <sup>-1</sup> )	Número de ciclos	Joystick esquerdo	Joystick direito	Joystick direito Botão 2	Joystick esquerdo Botão 2	Joystick esquerdo Botão 4	Joystick esquerdo Botão 1	Joystick esquerdo Botão 3	Câmbio 1 e 2
2060	300	848	3228	1368	1696	1204	903	903	1067	159
2060	295	823	3131	1327	1645	1167	876	876	1035	154
2060	290	801	3047	1291	1601	1136	852	852	1007	150
2000	300	853	3249	1377	1707	1211	909	909	1074	160
2000	295	821	3127	1325	1643	1166	874	874	1033	154
2000	290	772	2939	1245	1544	1096	822	822	971	145
1950	300	846	3222	1365	1693	1201	901	901	1065	159
1950	295	790	3007	1274	1580	1121	841	841	994	148
1950	290	752	2861	1212	1503	1067	800	800	945	141
1900	300	808	3077	1304	1617	1147	860	860	1017	152
1900	295	769	2927	1240	1538	1092	819	819	968	144
1900	290	734	2794	1184	1468	1042	781	781	923	138

As operações quando executadas no menor volume estudado, exigiam uma maior quantidade de movimentos dos membros dos operadores, pois era necessário abater um maior número de árvores para cumprir a meta estabelecida pela empresa. Cabe salientar que a meta estabelecida pela empresa só levava em consideração o Volume Médio Individual das árvores, desconsiderando diversos outros fatores que interferem diretamente no rendimento operacional.

O joystick esquerdo foi o componente mais acionado, principalmente no VMI de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. Esse componente era utilizado para acionar o cilindro hidráulico secundário da lança, que proporcionava o prolongamento ou recolhimento da mesma. Conforme Østensvik et al. (2008) movimentos repetitivos do punho podem causar diversas lesões na região, como Síndrome do Túnel Carpal, Síndrome do Manguito Rotador e Tendinite. Além dessas doenças de punho, conforme os

mesmos autores, a operação com *harvester* causa dores no pescoço dos operadores.

#### 4. Conclusões

Em todos os volumes pesquisados, a rotação do motor influenciou de forma significativa no tempo das operações deslocamento e busca, corte de derrubada e processamento, no rendimento operacional, consumo horário de combustível, demanda de combustível, custo operacional, custo de produção, na quantidade de dióxido de carbono e metano, nos valores de aceleração resultante de exposição normalizada e no grau de fadiga dos operadores.

A vazão da bomba hidráulica influenciou de forma significativa, em todos os volumes pesquisados, no tempo das operações deslocamento e busca, corte de derrubada e processamento, no rendimento operacional, consumo horário de combustível, demanda de combustível, custo operacional, custo de produção, na quantidade de dióxido de carbono e metano e no grau de fadiga dos operadores.

A combinação com rotação no motor de 2.000 rpm e vazão da bomba de 295 L min<sup>-1</sup>, assegura os melhores resultados da perspectiva técnica, econômica, ambiental e ergonômico no volume de 0,08 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>.

Para alcançar os melhores resultados do panorama técnico, econômica, ambiental e ergonômico, em áreas nas quais o povoamento florestal tem Volume Médio Individual de 0,12; e 0,16 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, o *harvester* deve ser operado na rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba hidráulica de 300 L min<sup>-1</sup>;

Da perspectiva técnica, econômica, ambiental e ergonômico é recomendável operar o *harvester*, independente do Volume Médio Individual das árvores, na rotação do motor de 2.000 rpm e vazão da bomba hidráulica de 300 L min<sup>-1</sup>;

A operação com *harvester* se caracteriza como causadora de doenças ocupacionais, sendo que as combinações de: 1.950 rpm e 290 L min<sup>-1</sup>; 1.900 rpm e 295 L min<sup>-1</sup>; e 1.900 rpm e 290 L min<sup>-1</sup>, intensificavam os sintomas de fadiga, cansaço físico e mental, produtividade comprometida e dores no braço, punho e mãos do lado esquerdo e direito nos operadores de *harvester*.

## 5. Referências bibliográficas

ABBAS, D.; HANDLER, R. M. Life-cycle of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. **Journal of Cleaner Production**. v. 176, p. 512 – 520, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>.

ACKERMAN, P.; BELBO, H.; ELIASSON, L. JONG, A.; LAZDINS, A.; LYONS, J. The cost model for calculation of forest operations costs. **International Journal of Forest Engineering**, Uppsala, Vol. 25, N. 1, p. 75 – 81, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2014.903711>.

ALMEIDA, S. F.; ABRAHAO, R. F.; TERESO, M. J. A. Avaliação da exposição ocupacional à vibração de corpo inteiro em máquinas de colheita florestal. **Cerne**, Lavras, vol. 21, n. 1, p. 1 – 8. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521011446>.

BARNES, R.M. **Motion and time study: design and measurement of work**. 6 ed. New York: John Willey & Sons, 1968. 799 p.

COUTO, H. A. **Ergonomia aplicada ao trabalho em 18 lições**. Belo Horizonte: Ergo, 2002.

COUTO, H. A. **Índice TOR-TOM: 25 aplicações práticas na análise ergonômica, na avaliação de risco ergonômico, na prescrição de ações corretivas e no gerenciamento da produtividade segura**. 2 ed. Belo horizonte: ERGO editora, 2012.

EU OSHA - European Risk Observatory Report. OSH in Figures: Work related Musculoskeletal Disorders in the EU e Facts and Figures. European Agency for Safety and Health at Work, Luxembourg. Available at: European Commission, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration)**. Official Journal of the European Communities, L177/13, 2002.

FIGLIANO, D. A.; MARASCA, I.; FERNANDES, B. B.; SANDI, J. FERREIRA, F.; LANÇAS, K. P. Desempenho de três tratores agrícolas em ensaios de tração. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 2, n. 2, p. 68-76, abr./jun. 2015.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. **NHO 09: Norma de Higiene Ocupacional: Avaliação da exposição ocupacional a vibrações de corpo inteiro**. São Paulo, 2013. 65p.

GABRIEL FILHO, A., LANÇAS, K. P., LEITE, F., ACOSTA, J. J. B., JESUÍNO, P. R. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de

deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.333-339, 2010.

GERASIMOV, Y.; SOKOLOV, A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia. **Applied Ergonomics**, v. 45, n. 2, p. 318 - 338, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration**. 4.ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 443p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Mobile Combustion. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf). Acesso em: 04 de setembro de 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARDIZATION. **ISO 2631-1**: mechanical vibration and shock: evaluation exposure to whole-body vibration: part 1, general requirements. Geneva, 1997. 32 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia com un studio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura econômica, 1948. 478 p.

LASCHI, A.; MARCHI, E.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Forest operations in coppice: Environmental assessment of two different logging methods. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 493–503, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.041>.

MARZANO, L. L. C.; PAULO, A. P.; MINETTE, L. J. Proposal for na ergonomic conformity index for evaluation of harvester and forwarders. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 4, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000400001>.

OSBORNE, A.; BLAKE, C.; FULLEN, B. M.; MEREDITH, D.; PHELAN, J.; MCNAMARA, J.; CAITRIONA, C. Risk factors for musculoskeletal disorders among farm owners and farm workers: A systematic review. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 55, n. 4, p. 376-389, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajim.22001>.

ØSTENSVIK, T.; VEIERSTED, K. B.; CUCHET, E.; NILSEN, P.; HANSE, J. J.; CARLZON, C.; WINKEL, J. A search for risk factors of upper extremity disorders among forest machine operators: A comparison between France and Norway. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 38, p. 1017–1027, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.016>.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.210>.

RAMOS, C. R.; LANÇAS, K. P.; LYRA, G. A.; SANDI, J. Fuel consumption of a sugarcane harvester in different operational settings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 6, p. 588-592, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n6p588-592>.

SANTOS, D. W. F. N.; FERNANDES, H. C.; VALENTE, D. S. M.; LEITE, E. S. Desempenho técnico, econômico e ambiental do harvester em distintas rotações do motor. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 118, p. 319-326, jun. 2018. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n118.17](http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n118.17).

SANTOS, L. N.; FERNANDES, H. C.; SILVA, R. M. F.; SILVA, M. L.; SOUZA, A. P. Evaluation of costs of harvester in cut and processing of Eucalyptus wood. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 5, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000500001>.

SHERWIN, L. M.; OWENDE, P. M. O.; KANALI, C. L.; LYONS, J.; WARD, S. M. Influence of tyre inflation pressure on whole-body vibrations transmitted to the operator in a cut-to-length timber harvester. **Applied Ergonomics**, v. 35, p. 253 – 261, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.02.002>.

SILVA, E. N.; MACHADO, C. C.; FIEDLER, N. C.; FERNANDES, H. C.; PAULA, M. O.; CARMO, F. C.; MOREIRA, G. R.; COELHO, E. C. Avaliação de custos de dois modelos de harvester no corte de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 741-748, jul.-set., 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-509820142403021>.

SILVA, E. P.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; MARÇAL, M. A.; SANCHES, A. L. P. Fatores organizacionais e psicossociais associados ao risco de LER/DORT em operadores de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.5, p.889-895, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000500011>.

SILVA, M. L.; MIRANDA, G. M.; CORDEIRO, S. A. Custos. In: MACHADO, C. C. (Editor). **Colheita florestal**. 2 ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 231-260.

SILVEIRA, J. C. M.; FERNANDES, H. C.; MODOLO, A. J.; SILVA, S. L.; TROGELLO, E. Demanda energética de uma semeadora-adubadora em diferentes velocidades de deslocamento e rotações do motor. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, 2013.

SOUZA, S. O.; VALE, C. C.; NASCIMENTO, F. H. Bacia do rio Peruípe (BA): ensaio de classificação morfométrica por meio de dados SRTM. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 14, n. 47, p. 208-2221, 2013.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; WANG, J.; YU, C. Cost, energy, use and GHG emissions for forest biomass harvesting operations. **Energy**, v. 114, p. 1053-1062, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.086>.

## CAPÍTULO 2

### AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E ERGONÔMICA DE FORWARDER EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DA BOMBA HIDRÁULICA E ROTAÇÃO DO MOTOR

**Resumo:** alterações na rotação do motor e na pressão da bomba hidráulica do *forwarder* podem ocasionar impactos positivos ou negativos no rendimento operacional e na demanda de combustível da máquina. Mediante isso, objetivou-se com esse capítulo quantificar parâmetros técnicos, econômicos e ergonômicos e a emissão de gases poluentes de um *forwarder* em função da pressão da bomba hidráulica e rotação do motor. A pesquisa foi executada em áreas de operações florestais, localizadas no extremo sul da Bahia. As operações da máquina foram analisadas em povoamentos florestais com volume médio individual de 0,10; 0,14; 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. Durante a execução da pesquisa a máquina foi configurada para operar com pressão da bomba em 240; 235; e 230 bar e rotação do motor em 1.550; 1475; e 1.400 rpm, totalizando 9 combinações. A análise técnica compreendeu ao estudo de tempos e movimentos, produtividade, consumo horário de combustível e demanda de combustível. Com relação aos parâmetros econômicos, determinou-se o custo operacional e de produção das máquinas. Já o impacto ambiental foi mensurado por meio da determinação da quantidade de dióxido de carbono e metano emitidos. Também foram quantificados os valores de aceleração resultante normalizada (Aren), Taxa de Ocupação Real (TOR) e Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR). Os resultados foram analisados por meio de regressão múltipla. No volume de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> a combinação com pressão da bomba em 230 bar e rotação do motor em 1.400 rpm apresentou os melhores resultados. No volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, os melhores resultados, foram obtidos com pressão na bomba em 230 bar e rotação do motor em 1.475 rpm. No volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, a combinação de vazão da bomba com 240 bar e rotação do motor de 1.550 rpm, proporcionou os melhores resultados. A operação com *forwarder* se caracterizou como causadora de doenças ocupacionais, no entanto a redução da pressão da bomba e rotação do motor não intensificou a ocorrência de doenças ocupacionais nos operadores de *forwarder*.

## CHAPTER 2

### TECHNICAL, ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND ERGONOMIC EVALUATION OF FORWARDER IN THE FUNCTION OF HYDRAULIC PUMP PRESSURE AND ENGINE ROTATION

**Abstract:** changes in engine speed and forwarder hydraulic pump pressure can have positive or negative impacts on machine operating efficiency and fuel demand. Thus, the objective of this chapter was to quantify technical, economic and ergonomic parameters and the emission of pollutant gases from a forwarder as a function of hydraulic pump pressure and engine speed. The research was carried out in areas of forest operations, located in the southernmost part of Bahia. The machine operations were analyzed in forest stands with average individual volume of 0.10; 0.14; 0.29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. During the execution of the survey the machine was configured to operate with pump pressure at 240; 235; and 230 bar and engine speed at 1,550; 1475; and 1,400 rpm, totaling 9 combinations. The technical analysis included the study of times and movements, productivity, hourly consumption of fuel and energy demand. Regarding the economic parameters, the operational and production costs of the machines were determined. Environmental impact was measured by determining the amount of carbon dioxide and methane emitted. The values of the resulting normalized acceleration (Aren), Real Occupancy Rate (TOR) and Maximum Occupancy Rate were also quantified considering Repetitive Activities (TOMCAR). The results were analyzed by means of multiple regression. In the volume of 0.10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> the combination with pump pressure at 230 bar and engine speed at 1,400 rpm showed the best results. In the volume of 0.14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, the best results were obtained with pump pressure at 230 bar and engine speed at 1,475 rpm. In the volume of 0.29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, the combination of pump flow at 240 bar and engine speed at 1,550 rpm provided the best results. Forwarder operation is characterized as causing occupational diseases, however the reduction of pump pressure and engine speed does not intensify the occurrence of occupational diseases in the forwarder operators.

## 1. Introdução

A extração da madeira consiste na retirada das toras do interior do talhão para as margens das estradas ou pátio intermediário. Existem diversas máquinas que fazem a extração da madeira, como *skidder*, trator autocarregável e *clambunk skidder*. No entanto, no sistema toras curtas (*cut to length*), o *forwarder* é máquina mais utilizada para executar essa operação. O *forwarder* é um trator florestal autocarregável, constituído, basicamente, pela cabine, caixa de carga, grua hidráulica e pinça.

Apesar da série de vantagens que a operação com o *forwarder* proporciona, como o alto rendimento operacional, versatilidade da operação e execução de atividades durante 24 horas por dia, Zhang et al. (2016) chamaram atenção para custo com *forwarder*, podendo representar até 43% do custo total do sistema *cut to length*. Já de acordo com Santos et al. (2016) o custo operacional médio do *forwarder* foi de US\$ 147,80 h<sup>-1</sup>, sendo que a redução de 10% nos custos com manutenção e reparos, mão-de-obra, combustível, e depreciação e aumento de 10% na quantidade de horas trabalhadas por ano, resultaria no decréscimo de 24% no custo operacional.

Outro impacto negativo oriundo das operações com *forwarder* é o impacto sobre o meio ambiente, no que se refere à emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono. Segundo Laschi et al. (2016), dentre as operações de colheita florestal, a extração é que emite mais gases poluentes, pois exige maior quantidade de energia em termo de combustíveis fósseis, chegando a representar até 47% do impacto ambiental.

A introdução do *forwarder* para executar a extração da madeira propiciou melhorias ergonômicas nos operadores, quando comparado com sistemas manuais e semimecanizados. No entanto, nos últimos anos, surgiram novas doenças ocupacionais nos operadores de máquinas florestais, decorrentes da execução de movimentos repetitivos, já que todos os comandos da máquina são acionados por botões e joystick. Segundo Gerasimov & Sokolov (2014) e Silva et al. (2013) a operação com máquinas florestais exige longos períodos em posição fixa ergonomicamente inadequada, intensidade do trabalho, movimentos repetitivos de ciclo curto, pausas mal definidas, exigência de atenção, concentração e

responsabilidade e falta de reconhecimento pela empresa, sendo esses os fatores causadores de doenças nos operadores.

Alterações na rotação do motor e na pressão da bomba hidráulica do *forwarder* podem ocasionar impactos positivos ou negativos nos parâmetros técnicos, econômicos, ambientais e ergonômicos durante a extração da madeira. Spinelli et al. (2018) afirmaram que ajustes simples do regime rotação do motor de picadores florestais, permite reduzir o consumo de combustível e os níveis de emissão de gases poluentes, sem perdas de produtividade e qualidade do produto, desde que o motor esteja entregando o torque máximo. Conforme Prinz et al. (2018) ajustes no modo de operação de *harvester*, que alteram a rotação do motor, podem reduzir o consumo de combustível e a emissão de dióxido de carbono. Já de acordo com Ramos et al. (2016), a depender das condições operacionais, mudanças na rotação do motor de colhedoras de cana-de-açúcar podem afetar negativamente a capacidade operacional da máquina.

Mediante ao exposto a presente pesquisa teve como o objetivo determinar a influência da pressão da bomba hidráulica e da rotação do motor sobre parâmetros técnicos, econômicos e ergonômicos e a emissão de gases poluentes durante a extração de madeira com *forwarder* em diferentes volumes individuais das árvores.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi executada em áreas de operações de colheita florestal, localizadas na região do sul do estado da Bahia. De acordo com a classificação de Köppen (1948) a região possui Clima Tropical Úmido (Af) com a ocorrência de precipitação significativa em todos os meses do ano e inexistência de estação seca definida. A região apresenta cobertura vegetal formada por Floresta Ombrófila Densa, com temperatura média anual de 24,4 °C e precipitação pluviométrica média anual de 1.350 mm (SOUZA et al., 2013). As áreas onde foram alocadas as parcelas experimentais apresentavam relevo plano.

A coleta de dados foi realizada no período entre outubro de 2017 e abril de 2018. As avaliações com as máquinas foram conduzidas no período diurno, sendo iniciadas as 06h00min e finalizadas as 15h00min. Os testes foram conduzidos na ausência de chuva.

As áreas de coleta de dados eram povoadas com clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, plantados em espaçamento de 3 metros entre linhas e 2,5 metros entre plantas. Em média as árvores foram colhidas com 6,3 anos de idade.

### 2.2. Sistema de colheita

A pesquisa foi executada em um sistema de colheita florestal de toras curtas (*cut-to-length*) composto pelas máquinas *harvester* e *forwarder*.

O *harvester* era responsável pelo corte e processamento das árvores, deixando feixes sobre a superfície do solo com toretes de 6,20 metros de comprimento. A máquina realizava simultaneamente a derrubada de quatro linhas de árvores. Os feixes de madeira, normalmente, eram formados ao lado esquerdo da máquina e a derrubada das árvores era direcionada para o lado direito da máquina, a fim de evitar a sujidade da madeira.

A extração da madeira do interior dos talhões até as margens das estradas era realizada pelo *forwarder*. A máquina adentrava nos talhões de marcha ré, sendo que o carregamento iniciava da parte final do talhão e seguia para a parte inicial do talhão, onde se encontrava a pilha de madeira. Em cada viagem do *forwarder* era

realizado o carregamento apenas em um lado do ramal, sendo escolhidos os feixes de madeira que se encontravam do lado esquerdo da máquina.

### 2.3. Unidades experimentais

A pesquisa foi executada em três Volumes Médios Individuais (VMI) das árvores, 0,10; 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> sem casca, sendo os mesmos considerados como baixo, médio e alto, respectivamente. Em cada volume, as operações com *harvester* foram executadas em três pressões da bomba hidráulica, 240; 235; e 230, e três rotações do motor, 1.550; 1.475; e 1.400, totalizando nove tratamentos. Para demarcação das parcelas experimentais foi utilizada amostragem casual simples, relacionando a pressão da bomba hidráulica e rotação do motor. Na Tabela 1 é possível observar as regiões de realização dos experimentos.

**Tabela 1.** Características das regiões onde a pesquisa foi executada.

Região	Latitude/longitude	Número de unidades	Tamanho da área (ha)	VMI (m <sup>3</sup> árvore <sup>-1</sup> )
M627	17°48'51"S 39°58'36"W	126	21,05	0,10
M624	17°48'11"S 39°56'37"W	135	16,64	0,14
T94	17°34'01"S 39°18'49"W	130	7,58	0,29

Onde: VMI = Volume Médio Individual por árvore.

### 2.4. Máquina utilizada

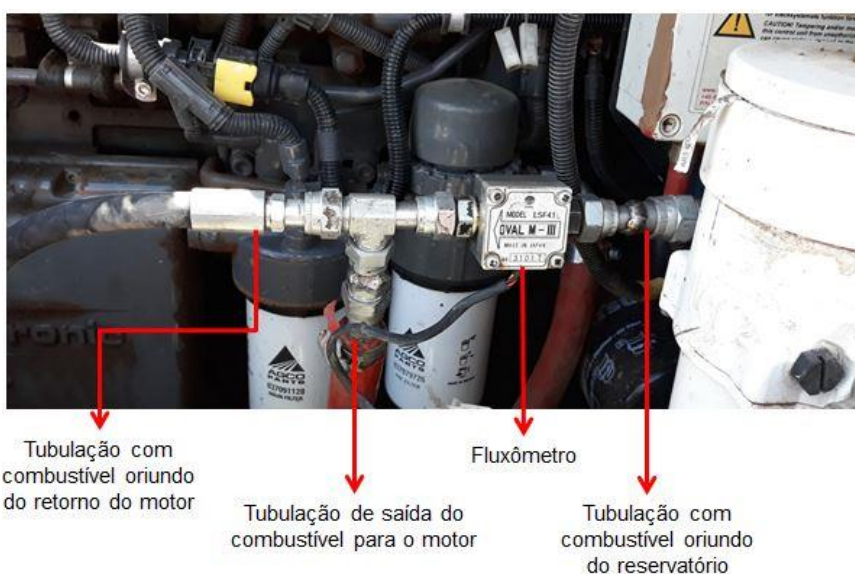
Foi utilizado o *forwarder* da marca *Komatsu*, modelo 895 com tração nas oito rodas. A máquina é equipada com o motor AGCO *power 74CW3* de 6 cilindros, 7,40 litros de cilindrada e 193 kW de potência a 1.950 rpm (Figura 1). A caixa de carga tinha capacidade para 23 metros cúbicos de madeira. O sistema hidráulico do *forwarder* era composto por uma bomba hidráulica de pistão variável com vazão máxima de 360 litros por minuto a 2.000 rpm e pressão máxima de trabalho de 24,5 MPa.



**Figura 1.** Forwarder da marca Komatsu, modelo 895.

## 2.5. Instrumentação da máquina

A quantidade de combustível consumido durante o experimento pelo *forwarder* foi determinada por meio da instalação de um medidor de fluxo volumétrico (fluxômetro) no sistema de alimentação de combustível do motor, logo após o filtro primário (Figura 2). O medidor de fluxo utilizado foi o da marca FLOWMATE M-III<sup>®</sup>, modelo LSF41C. O consumo foi determinado pelo equipamento com base na frequência de rotação dos rotores que constituem o mesmo, sendo que uma volta dos rotores correspondia a 1 mililitro de combustível consumido.



**Figura 2.** Fluxômetro instalado no sistema de alimentação de combustível do *forwarder*.

Juntamente ao fluxômetro foi instalado um visor gráfico (indicador) da marca TechMeter, modelo LCT. O equipamento foi instalado dentro da cabine da máquina, com objetivo de facilitar as leituras de consumo e evitar danos ao equipamento. O fluxômetro e o indicador estavam interligados por fios de alimentação, sinal do sensor e de comunicação do sensor. O visor gráfico foi programado previamente para exibir os valores de consumo instantâneo e o consumo em determinado período, ambos em litros por hora.

## **2.6. Determinação do volume individual das árvores**

O volume individual das árvores (VMI) foi determinado por meio dos sensores de diâmetro e comprimento existentes no cabeçote do *harvester*. Posteriormente o VMI era calculado pelo sistema operacional *MaxiXplorer*.

O sensor de comprimento ficava posicionado nos rolos alimentadores do cabeçote. O valor era mensurado com base na circunferência e rotação dos rolos. O sensor de diâmetro ficava posicionado nas facas desganhadoras do cabeçote, sendo o diâmetro medido de acordo com ângulo de inclinação das facas.

Com o objetivo de verificar a precisão dos sensores, antes da execução da pesquisa, foi realizado o corte e processamento de quinze árvores pelo *harvester* e conseqüentemente mensurado o volume de cada árvore. Posteriormente foi medido manualmente, por meio de trena, o diâmetro e comprimento das toras. Em seguida foi calculado o volume das árvores conforme a metodologia proposta por Husch et al. (2003).

## **2.7. Seleção da rotação do motor**

Durante a coleta de dados o *forwarder* foi operado nas rotações do motor de 1.550; 1.475 e 1.400 rpm. Os valores eram obtidos por meio Sistema de Controle e Informação da máquina denominado de *MaxiXplorer*, com sistema operacional *Windows* e disco rígido SSD (Figura 3). Os valores de rotação eram ajustados nas configurações do sistema operacional por meio de um teclado multimídia e mouse. Os valores de rotação eram mostrados instantaneamente na parte superior e central do monitor da máquina.



**Figura 3.** Sistema operacional *MaxiXplorer* do *forwarder*.

## 2.8. Seleção da pressão da bomba hidráulica

A bomba hidráulica do *forwarder* foi ajustada para as pressões de 240; 235 e 230 bar. Os valores eram obtidos regulando a bomba hidráulica manualmente por meio do uso de ferramentas. Os valores de pressão do circuito hidráulico eram exibidos instantaneamente no monitor da máquina por meio do sistema operacional *MaxiXplorer*. Foi considerado que 1 bar é igual a 100.000 Pascal, dessa forma as pressões de 240; 235 e 230 bar, equivalem, respectivamente, a 24.000.000; 23.500.000; e 23.000.000 Pa.

## 2.9. Parâmetros técnicos

### 2.9.1. Estudo de tempos e movimentos

O estudo de tempos e movimentos foi realizado por do meio do método de tempo contínuo. Foi feito a análise da operação da máquina em campo, sendo o tempo gasto com cada atividade mensurado por meio de um cronômetro digital da marca Vollo, modelo VL 1809.

Foi executado um estudo preliminar com o objetivo de determinar o número mínimo de observações necessárias para proporcionar um erro de amostragem admissível máximo de 5%, sendo utilizada a Equação 1, conforme metodologia proposta por Barnes (1968).

$$N' = \left[ \frac{40 \cdot N}{\sum X} \sqrt{\frac{\sum X^2 - (\sum X)^2 / N}{N - 1}} \right]^2 \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

$N'$  = número de observações necessárias;

$N$  = número de observações utilizadas no estudo preliminar; e

$X$  = valor de cada observação.

O ciclo operacional do *forwarder* foi subdividido nas operações de deslocamento vazio, carregamento, deslocamento carregado e descarregamento.

Deslocamento vazio compreendia a movimentação da máquina dentro do talhão com a caixa de carga vazia. A operação iniciava quando a máquina começava a ser deslocada da margem da estrada em direção ao interior do talhão e era finalizada quando a máquina era estacionada ao lado do primeiro feixe de madeira a ser carregado.

O carregamento começava no momento em que o operador retirava a grua de dentro da caixa de carga vazia e deslocava a mesma em direção ao primeiro feixe de madeira a ser carregado. Essa operação era finalizada quando a caixa de carga estava totalmente completa e a grua posicionada sobre a madeira.

Deslocamento carregado iniciava com o deslocamento da máquina do interior do talhão, com a caixa de carga completa, em direção a margem da estrada, sendo finalizado quando o operador posicionava e parava a máquina ao lado da pilha de madeira.

O descarregamento era a última operação do ciclo operacional. Iniciava quando o operador movimentava a grua que estava sobre a madeira e era finalizado quando o último feixe de madeira era descarregado, estando a grua dentro da caixa de carga vazia.

### 2.9.2. Produtividade

Foi determinada em metros cúbicos de madeira por hora trabalhada (Equação 2).

$$P = \frac{Vol}{T} \quad \text{Eq. 2}$$

em que:

$P$  = produtividade ( $m^3 h^{-1}$ );

$Vol$  = volume por carga ( $m^3$ ); e

$T$  = tempo por carga (h)

O volume por carga do *forwarder* foi obtido por meio do quociente entre o volume total presente no talhão e o número de cargas feitas pela máquina no referido talhão. Em média foram realizadas 13 cargas por tratamento. O tempo gasto por carga realizada pelo *forwarder* foi medido por um cronômetro digital da marca Vollo, modelo VL 1809.

### 2.9.3. Consumo horário de combustível

Foi calculado de acordo com a Equação 3.

$$Ch = \frac{Voc}{T} \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

$Ch$  = consumo horário de combustível ( $L h^{-1}$ );

$Voc$  = volume gasto por carga (L); e

$T$  = tempo gasto por carga (h)

O consumo horário da máquina foi determinado simultaneamente com o rendimento operacional, mediante isso foi utilizado o mesmo número de parcelas para os dois parâmetros.

### 2.9.4. Demanda de combustível

A quantidade de combustível gasta por metro cúbico de madeira extraída foi determinada conforme a Equação 4.

$$Dec = \frac{Ch}{P} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

$Dec$  = demanda de combustível ( $L m^{-3}$ );

$Ch$  = consumo horário de combustível ( $L h^{-1}$ ); e

$P$  = produtividade ( $m^3 h^{-1}$ )

## 2.10. Parâmetros econômicos

### 2.10.1. Custo operacional

Foi determinado mediante o somatório dos custos fixos e variáveis (Equação 5). Algumas variáveis necessárias para o cálculo foram fornecidas pela empresa e outras obtidas por meio de avaliações em campo. O consumo horário de combustível foi a única variável alterada nos nove tratamentos estudados, sendo as demais mantidas fixas. Tal medida tinha objetivo de verificar o efeito isolado do consumo horário de combustível sobre o custo operacional. Utilizou-se uma taxa de câmbio de 1 US\$ = R\$ 3,915, cotado no dia 29/03/2019

$$CO = Cf + Cv \quad \text{Eq. 5}$$

em que:

CO = custo operacional (US\$ h<sup>-1</sup>);

Cf = custo fixo (US\$ h<sup>-1</sup>); e

Cv = custo variável (US\$ h<sup>-1</sup>)

#### 2.10.1.1. Custo fixo

Esse dispêndio foi calculado por meio do somatório dos custos de depreciação, juros, seguro, segurança, pessoal administrativo, salário de operadores e pessoal de manutenção (Equação 6).

$$Cf = CD + CJ + CS + CSG + CPA + CSO + CPM \quad \text{Eq. 6}$$

em que:

Cf = custo fixo (US\$ h<sup>-1</sup>);

CD = custo com depreciação (US\$ h<sup>-1</sup>);

CJ = custo com juros (US\$ h<sup>-1</sup>);

CS = custo com seguro (US\$ h<sup>-1</sup>);

CSG = custo com segurança (US\$ h<sup>-1</sup>);

CPA = custo com pessoal administrativo (US\$ h<sup>-1</sup>); e

CSO = custo com salário do operador (US\$ h<sup>-1</sup>); e

CPM = custo com pessoal de manutenção (US\$ h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.1. Custo com depreciação

Foi determinado pelo método linear, conforme a Equação 7 (SILVA et al., 2014).

$$CD = \frac{Va - Vr}{H.N} \quad \text{Eq. 7}$$

em que:

CD = custo com depreciação (US\$ h<sup>-1</sup>);

Va = valor de aquisição da máquina (US\$);

Vr = valor de revenda da máquina (US\$);

N = vida útil esperada (anos); e

H = horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>);

#### 2.10.1.1.2. Custo com juros

O pagamento pelo uso do capital investido foi calculado por meio da Equação 8.

$$CJ = \frac{\left(\frac{Va + Vr}{2}\right) \cdot i}{N.H} \quad \text{Eq. 9}$$

em que:

CJ = custo com juros (US\$ h<sup>-1</sup>);

Va = valor de aquisição da máquina (US\$);

Vr = valor de revenda da máquina (US\$);

i = taxa de juros anual (decimal);

N = vida útil esperada (anos); e

H = horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.3. Custo com seguro

As despesas com seguro da máquina foi determinado em conformidade com a Equação 9.

$$CS = \frac{Vs}{H} \quad \text{Eq. 9}$$

em que:

CS = custo com seguro (US\$ h<sup>-1</sup>);

Vs = valor do seguro (US\$ ano<sup>-1</sup>); e

H = horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.4. Custo com segurança

No período entre 00h00min e 06h00min era feita a vigilância das máquinas em campo por uma empresa terceirizada, sendo esse custo calculado conforme a Equação 10.

$$CSG = \frac{Vgs}{NM.H} \quad \text{Eq. 10}$$

em que:

CSG = custo com segurança (US\$ h<sup>-1</sup>);

Vgs = valor gasto com segurança (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NM = número de máquinas monitoradas;

H = horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.5. Custo com pessoal administrativo

O custo com pessoal de escritório foi definido com base na Equação 11.

$$CPA = \frac{(SS + STO + STD + Es)}{NM.H} \quad \text{Eq. 11}$$

em que:

CPA = custo com pessoal administrativo (US\$ h<sup>-1</sup>);

SS = salário do supervisor (US\$ ano<sup>-1</sup>);

STO = salário do técnico operacional (US\$ ano<sup>-1</sup>);

STD = salário do técnico de desenvolvimento (US\$ ano<sup>-1</sup>);

Es = encargos sociais (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NM = número de máquinas monitoradas; e

H = horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.6. Custo com salário de operador

O custo obtido em decorrência do pagamento de salários dos operadores da máquina, mais encargos sociais e benefícios, foi estimado por meio da Equação 12.

$$CSO = \frac{(SOP \cdot NOP + Es)}{H} \quad \text{Eq. 12}$$

em que:

CSO = custo com salário de operador (US\$ h<sup>-1</sup>);

SOP = salário do operador (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NOP = número de operadores por máquina;

Es = encargos sociais (US\$ ano<sup>-1</sup>); e

H = horas efetivas de uso anual (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.1.7. Custo com pessoal de manutenção

As manutenções corretivas e preventivas eram executadas por uma empresa terceirizada. O custo com pessoal de manutenção preventiva e corretiva foi calculado por meio da Equação 13.

$$CPM = \frac{SPM}{NM \cdot H} \quad \text{Eq. 13}$$

em que:

CPM = custo com pessoal de manutenção (US\$ h<sup>-1</sup>);

SPM = Salário do pessoal de manutenção (US\$ ano<sup>-1</sup>);

NM = número de máquinas atendidas; e

H = horas efetivas de uso anual por máquina (h ano<sup>-1</sup>).

H = horas efetivas de uso anual por máquina (h ano<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2. Custo variável

Compreendeu ao somatório dos custos com combustível, óleo hidráulico, óleo lubrificante, graxa, peças de reposição e abertura de módulo (Equação 14).

$$CMR = Cc + Coh + Cl + Cg + Coc + Cpr + Coa \quad \text{Eq. 14}$$

em que:

$C_v$  = custo variável (US\$ h<sup>-1</sup>);

$C_c$  = custo com combustível (US\$ h<sup>-1</sup>);

$C_{oh}$  = custo com óleo hidráulico (US\$ h<sup>-1</sup>);

$C_l$  = custo com óleo lubrificante (US\$ h<sup>-1</sup>);

$C_g$  = custo com graxa (US\$ h<sup>-1</sup>);

$C_{oc}$  = Custo com óleo de corrente (US\$ h<sup>-1</sup>);

$C_{pr}$  = custo peças de reposição (US\$ h<sup>-1</sup>); e

$C_{oa}$  = custo com organização da área do módulo (US\$ h<sup>-1</sup>).

#### **2.10.1.2.1. Custo com combustível**

Foi estimado por meio da multiplicação entre a quantidade consumida por hora e preço do diesel, conforme Equação 15. A quantidade consumida foi mensurada por um fluxômetro como explicado no item 1.5.

$$C_c = P_c \cdot C_h \quad \text{Eq. 15}$$

em que:

$C_c$  = custo com combustível (US\$ h<sup>-1</sup>);

$P_c$  = preço do combustível (US\$ L<sup>-1</sup>); e

$C_h$  = consumo horário (L h<sup>-1</sup>).

#### **2.10.1.2.2. Custo com óleo hidráulico**

Esse dispêndio foi calculado de acordo com a Equação 16.

$$C_{oh} = P_{oh} \cdot C_{doh} \quad \text{Eq. 16}$$

em que:

$C_{oh}$  = custo com óleo hidráulico (US\$ h<sup>-1</sup>);

$P_{oh}$  = preço do óleo hidráulico (US\$ L<sup>-1</sup>); e

$C_{doh}$  = consumo com óleo hidráulico (L h<sup>-1</sup>).

#### **2.10.1.2.3. Custo com óleo lubrificante**

Foi mensurado por meio da Equação 17.

$$C_l = P_l \cdot C_{lu} \quad \text{Eq. 17}$$

em que:

Cl = custo com óleo lubrificante (US\$ h<sup>-1</sup>);  
Pl = preço do óleo lubrificante (US\$ L<sup>-1</sup>); e  
Clu = consumo com óleo lubrificante (Lh<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.4. Custo com graxa

Foi determinado de acordo com a Equação 18.

$$Cg = Pg.Cgr \quad \text{Eq. 18}$$

em que:

Cg = custo com graxa (US\$ h<sup>-1</sup>);  
Pl = preço do graxa (US\$ kg<sup>-1</sup>); e  
Cgr = consumo com graxa (kg h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.5. Custo com óleo de corrente

Foi mensurado por meio da Equação 19.

$$Coc = Poc.Cocr \quad \text{Eq. 19}$$

em que:

Coc = custo com óleo de corrente (US\$ h<sup>-1</sup>);  
Poc = preço do óleo de corrente (US\$ L<sup>-1</sup>); e  
Cocr = consumo com óleo de corrente (L h<sup>-1</sup>).

#### 2.10.1.2.6. Custo com peças de reposição

O custo com peças de reposição colocadas na máquina durante a manutenção preventiva e corretiva foi calculado por meio da Equação 20. Tal custo inclui todos os tipos de peças da máquina, como por exemplo, filtros, mangueiras hidráulicas, sabre, pneus e dentre outros.

$$Cpr = \sum_{r=1}^n \frac{Vp}{Vu} \quad \text{Eq. 20}$$

em que:

Cpr = custo com peças de reposição (US\$ h<sup>-1</sup>);  
Vp = valor da peça de reposição (US\$);  
Vu = vida útil esperada da peça de reposição (h); e  
n = número de peças de reposição.

### 2.10.1.2.7. Custo com organização da área do módulo

O custo com a organização da área, onde era colocada a estrutura do módulo, foi calculado por meio da Equação 21. As operações de organização incluíam a derrubada de árvores, terraplanagem e limpeza da área.

$$C_{oa} = \frac{V_{po} \cdot Na}{NM \cdot H} \quad \text{Eq. 21}$$

em que:

$C_{oa}$  = custo com organização da área (US\$ h<sup>-1</sup>);

$V_{po}$  = valor por área organizada (US\$ área<sup>-1</sup>);

$Na$  = quantidade de áreas organizadas (áreas ano<sup>-1</sup>);

$NM$  = número de máquinas atendidas; e

$H$  = horas efetivas de uso anual por máquina (h ano<sup>-1</sup>).

### 2.10.2. Custo de produção

Foi determinado de acordo com a Equação 22.

$$C_p = \frac{CO}{P} \quad \text{Eq. 22}$$

em que:

$C_p$  = custo de produção (US\$ m<sup>-3</sup>);

$CO$  = custo operacional (US\$ h<sup>-1</sup>); e

$P$  = produtividade (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

### 2.11. Emissão de gases poluentes

Foi determinada a quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2eq</sub>) e metano (CH<sub>4eq</sub>) equivalente emitido pelo *forwarder* durante a colheita de madeira, de acordo com a Equação 23.

$$QE = FA \cdot Pcc \cdot Ch \cdot P \quad \text{Eq. 23}$$

em que:

$QE$  = quantidade de gás emitido (kg h<sup>-1</sup>);

$FA$  = fator de emissão (Kg TJ<sup>-1</sup>);

$Ch$  = Consumo horário (Kg h<sup>-1</sup>);

$Pcc$  = Poder calorífico (TJ kg<sup>-1</sup>); e

$P$  = Produtividade (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

Foi estabelecido um fator de emissão específico para cada tipo de gás, conforme determinado pela *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006).

## **2.12. Parâmetros ergonômicos**

### **2.12.1. Avaliação da exposição a vibrações de corpo inteiro**

Foram mensurados os valores de vibração de corpo inteiro conforme as recomendações técnicas estabelecidas pela Norma de Higiene Ocupacional 09 (FUNDACENTRO, 2013) e pela Diretiva da Comunidade Europeia 2002/44/EC. As medições dos níveis de vibração foram efetuadas com um acelerômetro do tipo triaxial, da marca 01dB, modelo Vib 008. O aparelho foi fixado no assento do operador e posicionado de acordo com as três direções do sistema de coordenadas ortogonais (x, y e z). Foram mensurados os valores de aceleração em todos os tratamentos estudados e também em cada operação que compõem o ciclo operacional do *forwarder*. Para contabilizar os valores de aceleração por operação, o horário do sistema de vídeo foi ajustado em relação ao horário do acelerômetro. As medições foram realizadas de forma a representar todas as atividades desempenhadas pelo operador. Em média as medições corresponderam, por tratamento, a 30% do tempo da jornada de trabalho. Os dados foram processados por meio do software dBMaestro 5.5.

### **2.12.2. Índice TOR (Taxa de Ocupação Real) – TOMCAR (Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas)**

O potencial da operação com máquinas florestais em ocasionar distúrbios como fadiga, desconforto, dificuldades e lesões foi quantificado por meio do índice TOR (Taxa de Ocupação Real) – TOMCAR (Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas), de acordo com a metodologia proposta por Couto (2012). O índice só foi mensurado nas diferentes rotações do motor, não contemplando as distintas vazões ou pressão da bomba hidráulica.

Inicialmente foi realizada a análise e descrição da operação. Posteriormente foi determinada a TOR, que pode ser entendida como a porcentagem da jornada de

trabalho em que o trabalhador efetivamente estava executando alguma tarefa, sendo calculado por meio da Equação 24.

$$TOR = 100\% - PPR - PABE - PPIH - PPC \quad \text{Eq. 24}$$

em que:

TOR = taxa de ocupação real (%);

PPR = Porcentagem de repouso por pausas regulares (%);

PABE = Porcentagem de tempo com atividades de baixa exigência (%);

PPIH = Porcentagem de pausas irregulares habituais (%);

PPC = Porcentagem de pausas curtíssimas (%);

Para determinar a PPR foi quantificado o tempo gasto com pausas para atender as necessidades pessoais dos operadores e ginástica laboral. A PPR foi calculada por meio do quociente entre o somatório do tempo gasto com pausas regulares e a duração da jornada de trabalho.

Com relação à PABE foi mensurado o tempo gasto com a inspeção da máquina no início da jornada de trabalho, troca de material de corte e limpeza e organização da máquina ao final da jornada de trabalho. Posteriormente o somatório desses valores foi dividido pelo tempo de duração da jornada de trabalho.

Para contabilizar o tempo gasto com pausas curtíssimas durante a execução do trabalho foi instalado um sistema de vídeo na cabine do operador. O sistema de vídeo era composto por quatro câmeras de vídeo, um monitor de sete polegadas e um Gravador de Vídeo Digital Móvel (MVDR). Uma câmera foi direcionada para o joystick esquerdo, outra para o joystick direito, uma para a cabeça do operador e a última para frente da máquina como o objetivo de visualizar a operação que a máquina estava executando.

Foram gravados vídeos de 45 ciclos operacionais do *forwarder*. Posteriormente foi analisado se existiam pausas curtíssimas entre os ciclos ou dentro do ciclo. Só foi considerado como pausas curtíssimas, intervalos com no mínimo três segundos. A PPC foi calculada conforme a Equação 25.

$$PPC = \frac{TPEC + TPC}{TT} \quad \text{Eq. 25}$$

em que:

PPC = Porcentagem de pausas curtíssimas (%);

TPEC = tempo de pausas entre os ciclos;

TPC = tempo de pausa no ciclo; e

TT = tempo total.

A TOMCAR foi determinado por meio da Equação 26.

$$TOMCAR = 95\% - FR - FF - FEE \quad \text{Eq. 26}$$

em que:

TOMCAR = Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (%);

FR = Fator Repetitividade (%);

FF= Fator Força (%); e

FEE = Fator Esforço Estático (%).

Os fatores Repetitividade, Força e Esforço Estático foram determinados de acordo com fluxogramas e tabelas estabelecidos por Couto (2012). Na Tabela 2 constam todos os componentes, e as respectivas funções, acionados pelos operadores de *forwarder* durante a extração da madeira.

**Tabela 2.** Comandos do *forwarder* 895 e as respectivas funções.

Componente	Função
Cúpula direita - Joystick	Levantar e abaixar a grua e giro do rotator
Cúpula direita - Botão do Joystick	Abrir e fechar a garra
Cúpula direita - botão 1	Movimento em ângulo à esquerda ou à direita da máquina
Cúpula esquerda - Joystick	Prolongamento, contração e giro da grua
Cúpula esquerda - botões 5 e 8	Levantar e abaixar a grade frontal da caixa de carga
Pedal do acelerador	Deslocamento da máquina

No início, meio e fim da jornada de trabalho os operadores eram submetidos a responder um questionário bipolar, com o objetivo de identificar a ocorrência ou ausência de fadiga ocasionada pela operação. O questionário foi elaborado em concordância com Couto (2012), no qual os operadores pontuavam sua percepção quanto a seu estado pessoal em relação a quatorze itens. Valores próximos de um,

indicavam inexistência de qualquer incômodo ou dor, já valores vicinais a sete apontavam incômodo ou dor de alta intensidade.

### **2.13. Análise dos dados**

O experimento foi realizado em um esquema fatorial 3x3, sendo três pressões da bomba hidráulica e três rotações do motor, totalizando 12 tratamentos, em um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 13 repetições por tratamento.

Os dados referentes ao rendimento operacional, consumo horário de combustível, demanda de combustível, emissão de dióxido de carbono e metano, custo operacional e de produção e aceleração resultante de exposição normalizada foram analisados, dentro de cada volume, por meio de metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram selecionados baseados na significância dos coeficientes de regressão, utilizando o teste “t” e adotando o nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação e no comportamento do fenômeno em estudo.

Os valores de aceleração resultante de exposição normalizada obtidos em cada operação executada nos três volumes estudados foram analisados por meio de Análise de Variância e quando significativos comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

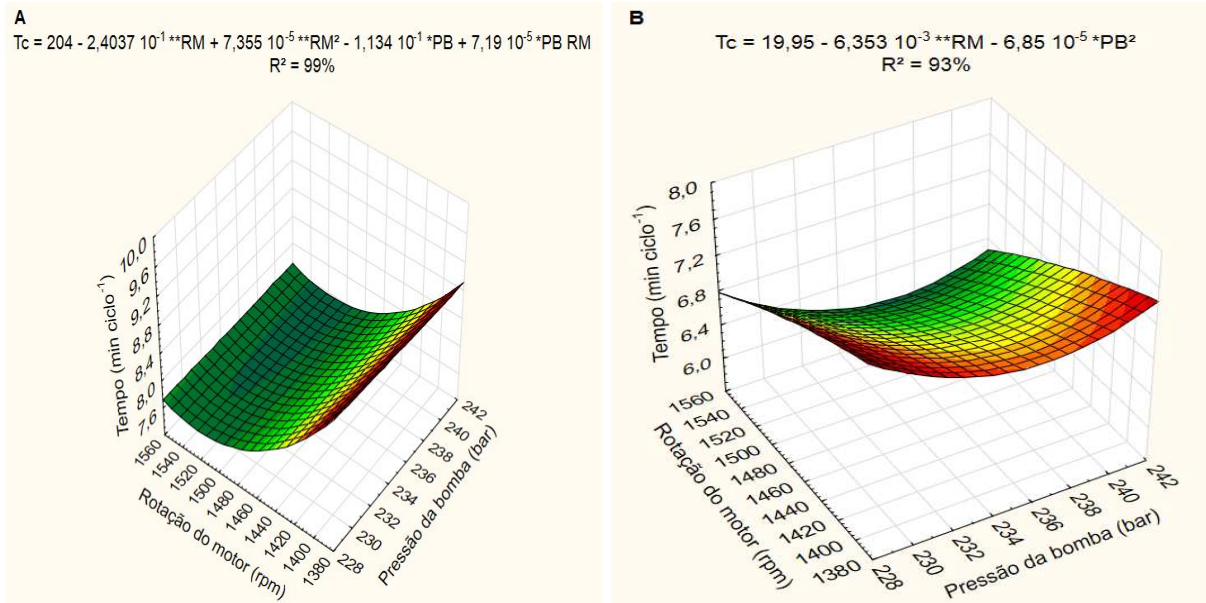
Todos os procedimentos estatísticos foram executados pelo programa computacional STATISTICA® 12.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Parâmetros técnicos**

Nos três volumes pesquisados, e para uma distância média de extração de 100 metros, a pressão da bomba hidráulica e a rotação do motor não apresentaram efeito significativo sobre o tempo da operação deslocamento vazio. Resultado esperado em relação à pressão da bomba, devido à transferência de movimento do motor até as rodas motrizes ser realizado por mecanismos de contato direto. A não influencia da rotação do motor se deve as boas condições operacionais, principalmente em relação à declividade do terreno e a não presença de obstáculos nos ramais do talhão. O tempo médio da operação foi de 1,30; 1,07; e 1,25 minutos por ciclo, nos volumes de 0,10; 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente.

O tempo médio da operação carregamento, no volume de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, foi de 8,23 minutos por ciclo, sendo que a pressão da bomba hidráulica e a rotação do motor não influenciaram de forma significativa no valor. Nos volumes de 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> houve efeito significativo, de ambas as variáveis independentes, sobre o tempo da operação. Na Figura 4 é possível observar os modelos ajustados e o comportamento do tempo por ciclo da operação carregamento em função da pressão da bomba hidráulica e rotação do motor. O efeito significativo das variáveis, nos maiores volumes estudados, se deve ao aumento do peso da madeira, que conseqüentemente aumentou a potência necessária para movimentar a garra com as toras.



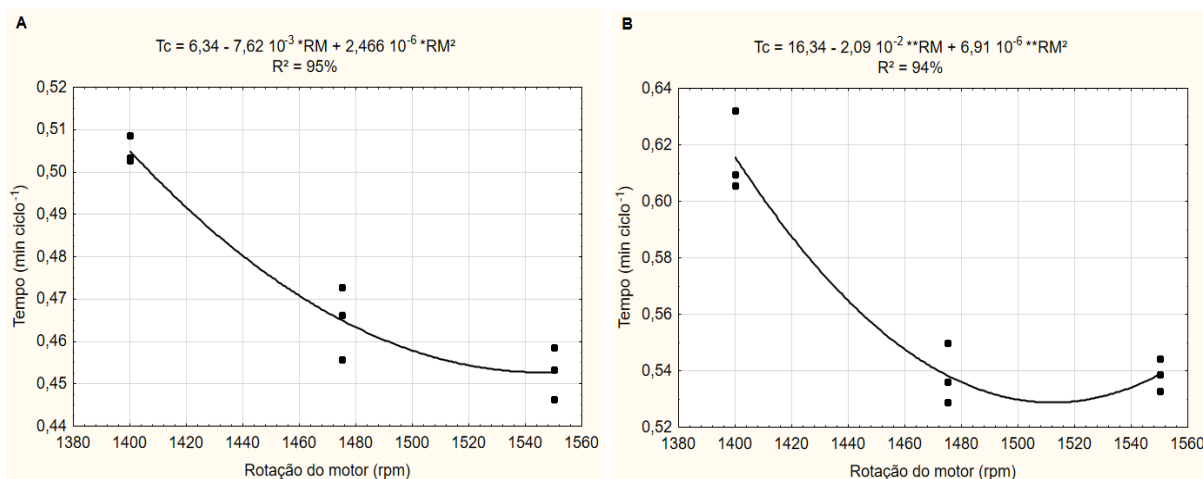
**Figura 4.** Superfície de resposta e Equação ajustada do tempo por ciclo ( $T_c$ ) da operação carregamento em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

No volume de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}$ , mantendo fixa a pressão na bomba em 240 bar e alterando a rotação do motor para 1.550; 1.475; e 1.400 rpm, obteve-se um tempo médio, da operação carregamento, de 7,66; 7,71 e 8,58 minutos por ciclo, respectivamente. Os valores nas maiores rotações são similares, sendo observado o mesmo comportamento nas demais pressões da bomba. Mantendo fixo a rotação do motor em 1.550 rpm e alterando a pressão da bomba para 240; 235; e 230 bar tem-se um aumento de 0,04 minutos por ciclo no tempo da operação, valor este relativamente pequeno.

No volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  o menor valor de tempo da operação carregamento, 6,16 minutos por ciclo<sup>-1</sup>, foi observado na pressão da bomba de 240 bar e rotação do motor em 1.550 rpm. Mantendo fixa a rotação do motor e reduzindo em 5 bar a pressão da bomba tem-se um acréscimo de 0,16 minutos por ciclo. Caso contrário, mantendo fixa a pressão da bomba e diminuindo em 75 rpm a rotação do motor tem-se um incremento de 0,47 minutos por ciclo.

No volume de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  não houve influência significativa da pressão da bomba e rotação do motor sobre o tempo da operação deslocamento carregado, sendo o tempo médio da operação igual a 0,58 minutos por ciclo. Em todos os

volumes pesquisados a pressão da bomba não influenciou de maneira significativa, contudo, nos volumes de 0,14 e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, a rotação do motor influenciou de forma significativa e quadrática no tempo da operação. A partir da Figura 5 é possível visualizar os modelos ajustados e o comportamento do tempo por ciclo da operação deslocamento carregado em função da rotação do motor nos volumes de 0,14 e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. No volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> o maior tempo, 0,51 minutos por ciclo, foi observado na rotação do motor de 1.400 rpm, nas demais rotações, 1.475; e 1550 rpm, os valores foram de 0,45; e 0,47 minutos por ciclo, respectivamente. No volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, o maior valor, 0,62 minutos por ciclo, foi obtido na rotação do motor de 1.400 rpm, nas demais rotações do motor o valor médio foi de 0,55 minutos por ciclo.

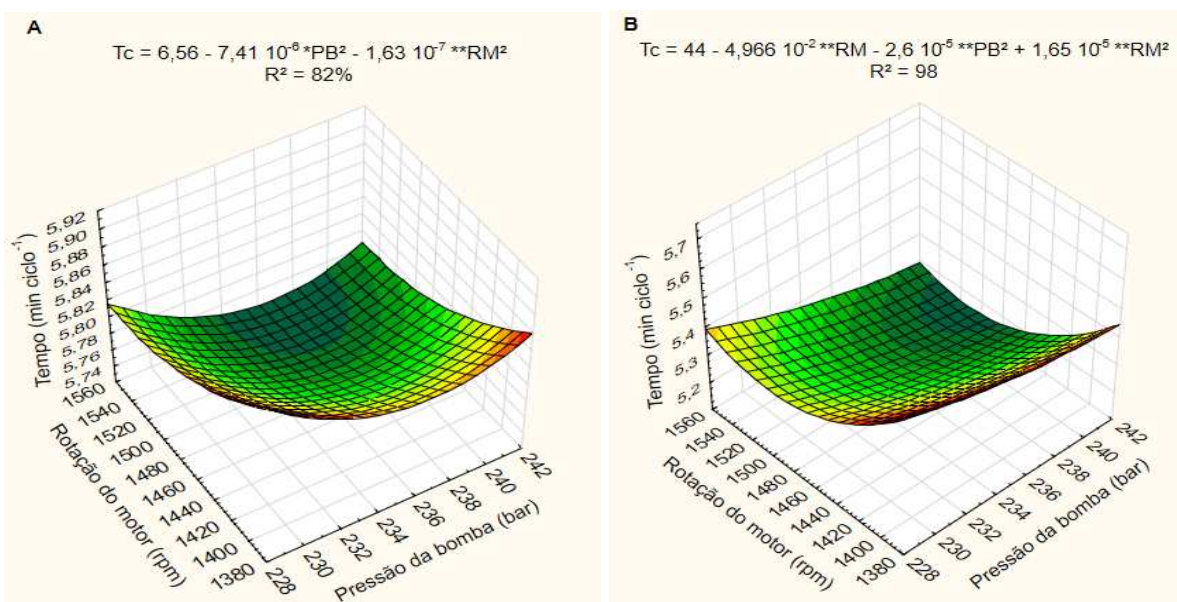


**Figura 5.** Equação ajustada do tempo por ciclo (Tc) da operação deslocamento carregado em função da rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

O aumento do volume da madeira diminuiu os espaços vazios e aumentou o peso na caixa de carga da máquina, promovendo assim o aumento da força de tração necessária para promover o deslocamento o trator florestal. Dessa forma, o decréscimo da rotação do motor provocou a redução da velocidade de deslocamento da máquina nos volumes de 0,14 e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, principalmente quando a máquina operava na rotação do motor de 1.400 rpm. Na pesquisa desenvolvida por Ramos et al. (2016) verificou-se que o regime de rotação do motor não influenciou no rendimento operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar quando a mesma operava com velocidade de deslocamento de até 4 km h<sup>-1</sup>, no

entanto em maiores velocidades de deslocamento, 5,5 km h<sup>-1</sup>, a produtividade é influenciada de forma significativa com a redução da rotação do motor. Tais resultados demonstram que em condições operacionais menos árduas o regime de rotação do motor não afeta a velocidade de deslocamento.

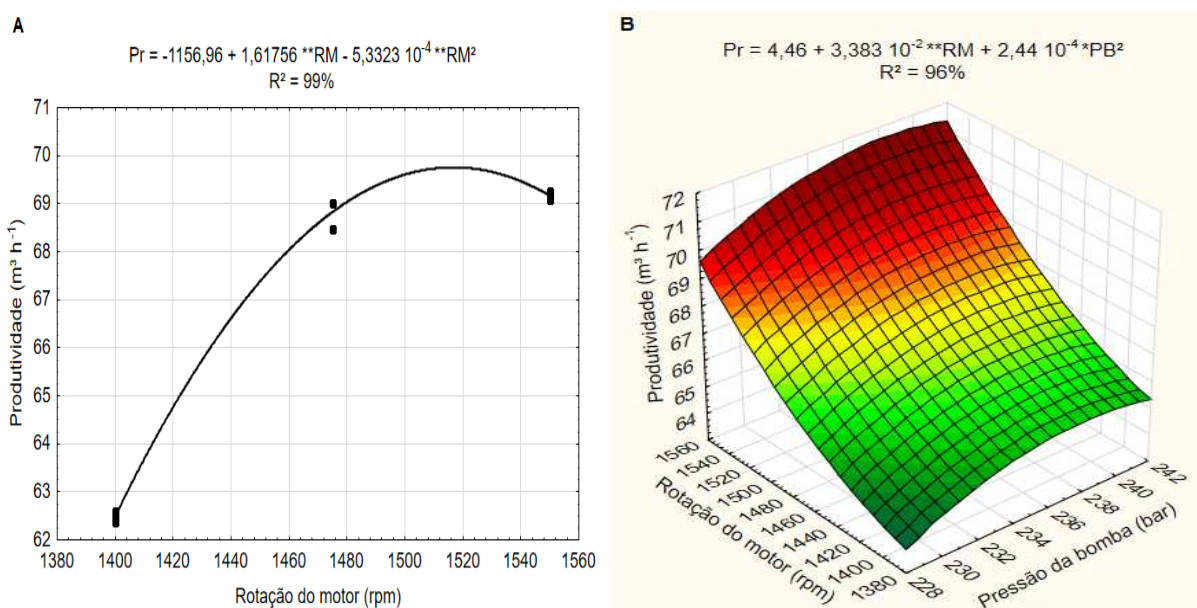
No volume de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> não houve influência significativa da pressão da bomba e rotação do motor sobre o tempo da operação descarregamento, sendo o tempo médio da operação igual a 5,84 minutos por ciclo. Contudo, nos demais volumes, ocorreu efeito significativo, quadrático e negativo de ambas as variáveis. Na Figura 6 constam os modelos ajustados e o comportamento do tempo por ciclo da operação descarregamento em função da pressão da bomba e rotação do motor nos volumes de 0,14; 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. No volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> os menores valores, 5,74; e 5,78 minutos por ciclo, foram observados quando a máquina trabalhava com vazão da bomba em 240 bar e rotação do motor em 1.550 e 1.475 rpm, respectivamente. Resultado similar foi obtido no volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, o qual os menores tempos da operação, 5,17 e 5,15 minutos por ciclo, foram obtidos quando a máquina trabalhava com vazão da bomba em 240 bar e rotação do motor em 1.550 e 1.475 rpm, respectivamente.



**Figura 6.** Superfície de resposta e Equação ajustada do tempo por ciclo (Tc) da operação descarregamento em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

A influência da pressão da bomba e rotação do motor sobre o tempo da operação descarregamento, nos maiores volumes pesquisado, se deve ao aumento do peso dos feixes de madeira, que conseqüentemente demandavam mais potência da máquina para serem retirados da caixa carga.

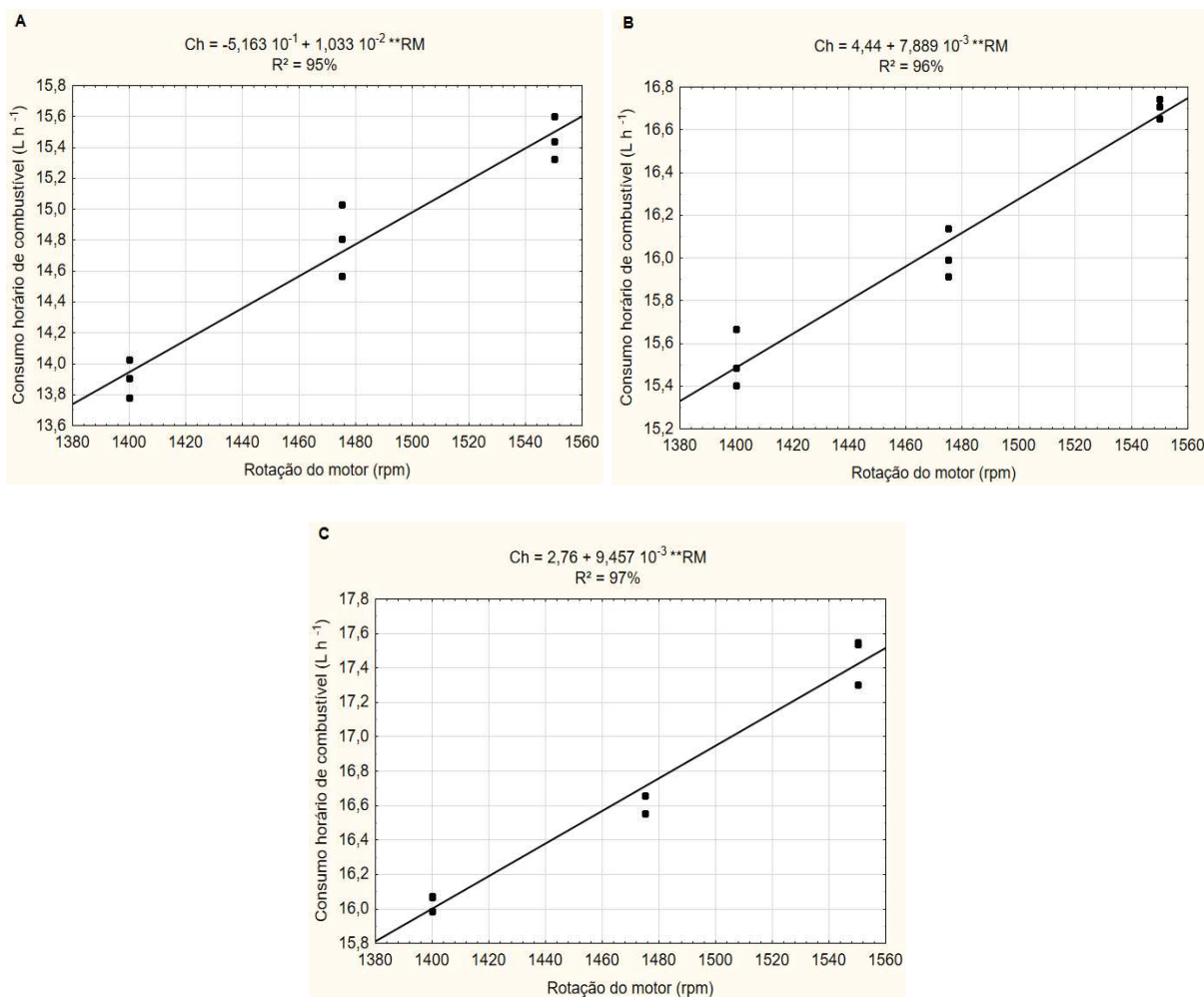
No volume de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> o rendimento operacional do *forwarder* foi de 64,05 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, sendo que a pressão da bomba e a rotação do motor não provocaram efeito significativo sobre a variável. A pressão da bomba só apresentou efeito significativo e quadrático sobre a produtividade no volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. Já a rotação do motor apresentou efeito significativo, quadrático e positivo sobre a produtividade no volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> e efeito significativo, linear e positivo sobre a variável no volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>. O modelo ajustado e o comportamento da produtividade do *forwarder* em função da rotação do motor, no volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, estão apresentados na Figura 7A. Já o modelo ajustado e o comportamento da produtividade em função da pressão da bomba e da rotação do motor, no volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, estão apresentados na Figura 7B.



**Figura 7.** Equação ajustada e comportamento da produtividade (Pr) em função da rotação do motor (RM), (7A). Superfície de resposta e Equação ajustada da produtividade em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor (7B). Onde: A = volume médio individual de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

No volume de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , o rendimento operacional do *forwarder* foi de  $69,17$ ; e  $68,83 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , nas rotações do motor de  $1.550$  e  $1.475 \text{ rpm}$ , respectivamente, valores estes próximos. Na rotação do motor de  $1.400 \text{ rpm}$ , o rendimento operacional decresceu para  $62,49 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Já no volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , mantendo fixa a pressão da bomba e alterando de forma decrescente a rotação do motor, nos níveis estudados, tem-se uma redução média na produtividade de  $2,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Caso contrário, mantendo fixa a rotação do motor e alternado de forma decrescente a pressão da bomba, nos níveis estudados, tem-se um decréscimo de  $0,58 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  na produtividade. Tais resultados demonstram que a utilização de determinada pressão da bomba e rotação do motor depende do volume médio da madeira. Já conforme Spinelli et al. (2018) a redução do regime de rotação do motor não afeta de forma negativa a produtividade de picadores de madeira, independentemente das condições operacionais. Resultados distintos também foram encontrados na pesquisa desenvolvida por Santos et al. (2018), na qual o regime de rotação do motor não provocou impactos negativos no rendimento operacional de *harvester*. Conforme Prinz et al. (2018) impactos no rendimento operacional, devido a alterações nas configurações das máquinas florestais, ocorrem de formas diferentes nos diversos tipos e modelos de máquinas.

A pressão da bomba hidráulica não influenciou de forma significativa sobre o consumo horário de combustível em nenhum dos volumes estudados, caso contrário ocorreu com a rotação do motor que influenciou de maneira significativa, linear e positiva o consumo horário de combustível nos três volumes pesquisados. As Equações ajustadas e o comportamento do consumo horário de combustível em função da rotação do motor podem ser visualizados na Figura 8. A redução da rotação do motor, nos níveis estudados, provoca o decréscimo de  $0,77$ ;  $0,59$ ; e  $0,71 \text{ L h}^{-1}$  no consumo horário de combustível nos volumes de  $0,10$ ;  $0,14$ ; e  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , respectivamente.

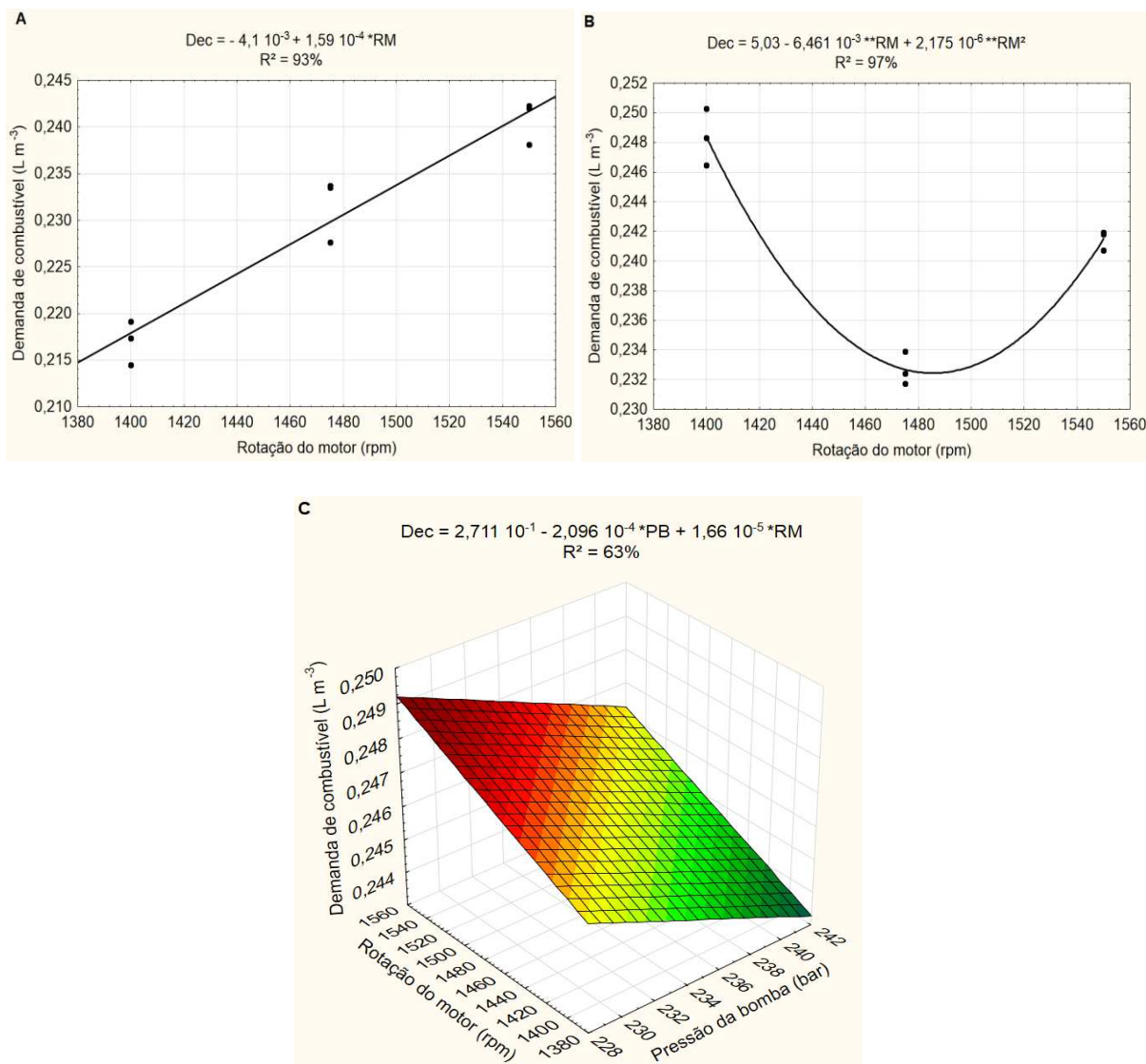


**Figura 8.** Equação ajustada do consumo horário de combustível (ch) em função da rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

O consumo horário de combustível diminuiu de forma expressiva com a redução da rotação do motor, em razão do menor número de combustões nas menores rotações do motor. Resultados semelhantes foram encontrados por Prinz et al. (2018) ao avaliarem *harvester*, Spinelli et al. (2018) ao pesquisarem sobre picadores de madeira, Ramos et al. (2016) ao estudarem colhedora de cana-de-açúcar e Man et al. (2016) ao pesquisarem sobre motores diesel. Tais resultados demonstraram a necessidade de treinamento dos operadores de máquinas florestais, no que se refere à utilização de marchas e acelerações em função das condições operacionais. De acordo com Ackerman et al. (2014) o consumo horário de combustível de máquinas é influenciado diretamente pelo nível de treinamento do

operador, sendo fundamental a adoção de medidas mitigadoras visando a redução do consumo.

A pressão da bomba influenciou de maneira significativa e linear na demanda de combustível no volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , nos demais volumes não houve interferência significativa. Nos volumes de  $0,10$  e  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  a rotação do motor apresentou efeito significativo e linear sobre a variável dependente, já no volume intermediário o efeito foi significativo e quadrático. Nas Figuras 9A e 9B é possível visualizar, para os volumes de  $0,10$  e  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , respectivamente, os modelos ajustados e o comportamento da demanda de combustível em função da rotação do motor. Já na Figura 9C é apresentado o modelo ajustado e o comportamento da demanda de combustível em função da pressão da bomba hidráulica e da rotação do motor.



**Figura 9.** Comportamento e Equação ajustada da demanda de combustível (Dec) em função da rotação do motor (RM), (9A; 9B). Superfície de resposta e Equação ajustada da demanda de combustível em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor (9C). Onde: A = volume médio individual de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

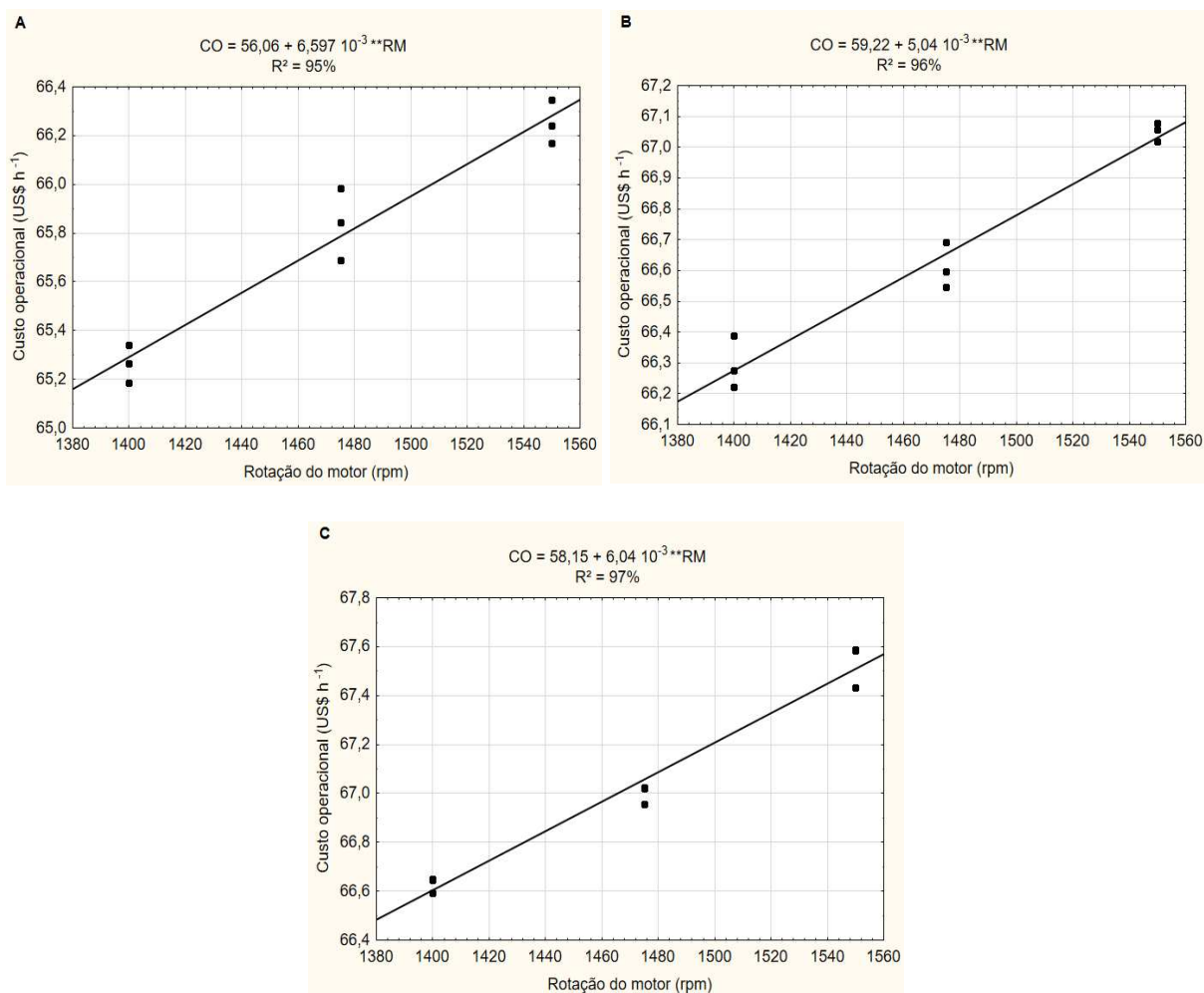
No volume de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> o menor valor de demanda de combustível, 0,218 L m<sup>-3</sup>, foi obtido na rotação do motor de 1.400 rpm. No volume médio, o valor mínimo, 0,234 L m<sup>-3</sup>, foi atingido na rotação do motor de 1.475 rpm. No volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> o menor valor da demanda de combustível, 0,244 L m<sup>-3</sup>, foi obtido quando o *forwarder* trabalhava com pressão da bomba em 240 bar e rotação do motor em 1.400 rpm. Tais resultados demonstram que em povoamentos florestais com volume baixo e médio, o regime de rotação do motor apresenta efeito dominante sobre o consumo horário de combustível e baixo efeito sobre a

produtividade do *forwarder*. Já em povoamentos florestais de alto volume o regime de rotação do motor apresenta efeito dominante sobre o consumo horário de combustível e também sobre a produtividade, dessa forma a rotação do motor que apresenta a menor demanda de combustível, afeta de forma expressiva o rendimento operacional, não sendo recomendada sua utilização, pois a máquina deixa de extrair cerca de 36 m<sup>3</sup> de madeira por turno de trabalho, quando comparado com a rotação do motor de 1.550 rpm.

O ajuste simples do regime rotacional do motor permite reduzir o consumo de combustível sem qualquer perda de produtividade ou qualidade do produto, desde que as condições operacionais não exijam a máxima potência da máquina. Dessa forma é necessário o desenvolvimento e introdução de sensores eletrônicos nas máquinas que determinem o volume da madeira e ajustem a pressão da bomba hidráulica e a rotação do motor em função do volume do povoamento florestal. Pesquisas recentes demonstraram que a instalação de dispositivos avançados de detecção de carga em carros modernos pode oferecer benefícios de economia de combustível, estimados em aproximadamente 2% (WANG et al., 2016).

### **3.2. Parâmetros econômicos**

A pressão da bomba não influenciou de forma significativa sobre o custo operacional em nenhum dos volumes estudados. A rotação do motor influenciou de forma significativa, linear e positiva sobre custo operacional em todos os volumes estudados. As Equações ajustadas e o comportamento do custo operacional em função da rotação do motor estão apresentados na Figura 10. Os menores valores de custo operacional, 65,30; 66,28; e 66,61 US\$ h<sup>-1</sup>, nos volumes de 0,10; 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente, foram obtidos na rotação do motor de 1.400 rpm.

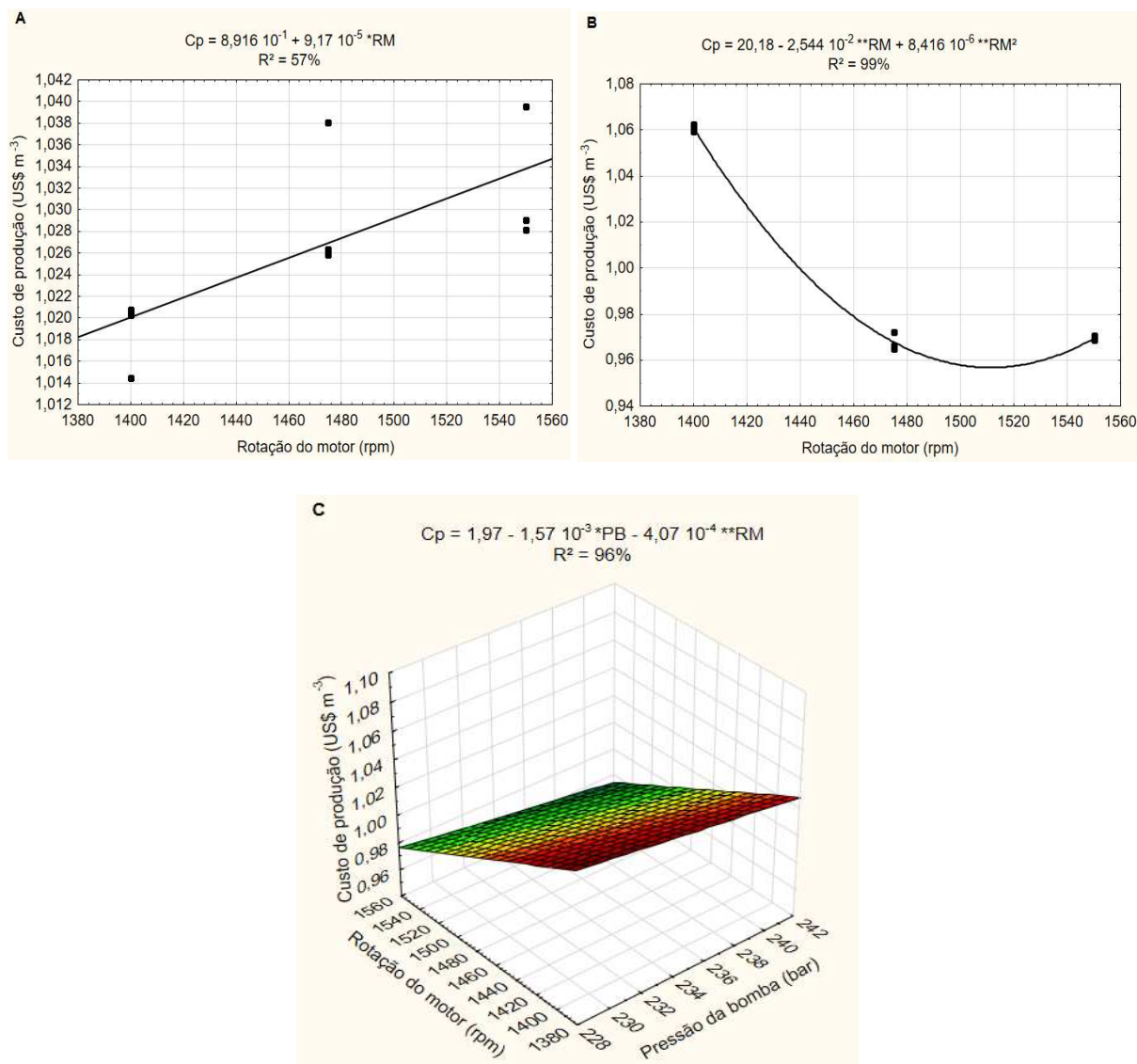


**Figura 10.** Comportamento e Equação ajustada do custo operacional (CO) em função da rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

A rotação do motor provocou impacto negativo sobre o custo operacional, pois o aumento da variável, nos níveis estudados, acarretou o acréscimo US\$ 0,49; 0,38; 0,45 h<sup>-1</sup> no custo operacional, nos volumes de 0,10; 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Tal situação ocorreu em razão do aumento do consumo horário de combustível, de acordo com Prada et al. (2015) máquinas com motores mais potentes, implicam em maior consumo de combustível e, portanto, aumentam os custos. Dessa forma a redução da rotação do motor ocasionou efeito positivo sobre o custo final da madeira, pois conforme Silva et al. (2014) a otimização dos dispêndios que compõem o custo operacional da máquina resulta em uma economia de 7% no custo final da madeira.

Santos et al. (2016) avaliaram um *forwarder* da marca John Deere, modelo 1710D e determinaram um custo operacional igual a US\$ 147,80 h<sup>-1</sup>, valor superior aos encontrados na presente pesquisa, em razão das diferenças entre as máquinas estudadas, empresas e condições operacionais. Já Carmo et al. (2015) analisaram as operações de extração de madeira com *forwarder* e estabeleceram um custo operacional igual a US\$ 70,93 h<sup>-1</sup>, valor similar ao da atual pesquisa.

A pressão da bomba só apresentou efeito significativo sobre o custo de produção no volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, já a rotação do motor apresentou efeito significativo e linear sobre a variável nos volumes de 0,10 e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> e efeito significativo e quadrático sobre a variável dependente no volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> (Figura 11). No volume de 0,10 o menor custo de produção, US\$ 1,02 m<sup>-3</sup>, foi obtido na rotação do motor de 1.400 rpm. Já no volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> o menor custo, US\$ 0,97 m<sup>-3</sup>, foi obtido na rotação do motor de 1.475 rpm. No que se refere ao volume de 0,29 m<sup>3</sup> avr<sup>-1</sup> o menor custo de produção, US\$ 0,96 m<sup>-3</sup>, foi verificado quando a máquina estava configurada pra trabalhar com pressão da bomba em 240 bar e rotação do motor em 1550 rpm.



**Figura 11.** Comportamento e Equação ajustada do custo de produção ( $C_p$ ) em função da rotação do motor (RM), (11A; 11B). Superfície de resposta e Equação ajustada do custo de produção em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor, (11C). Onde: A = volume médio individual de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

A redução da rotação do motor apresenta efeito positivo sobre o custo operacional, no entanto, a depender do volume da madeira, também apresenta efeito negativo sobre o rendimento operacional da máquina. Dessa forma o custo de produção é o parâmetro mais eficiente para identificar a melhor combinação de trabalho da máquina.

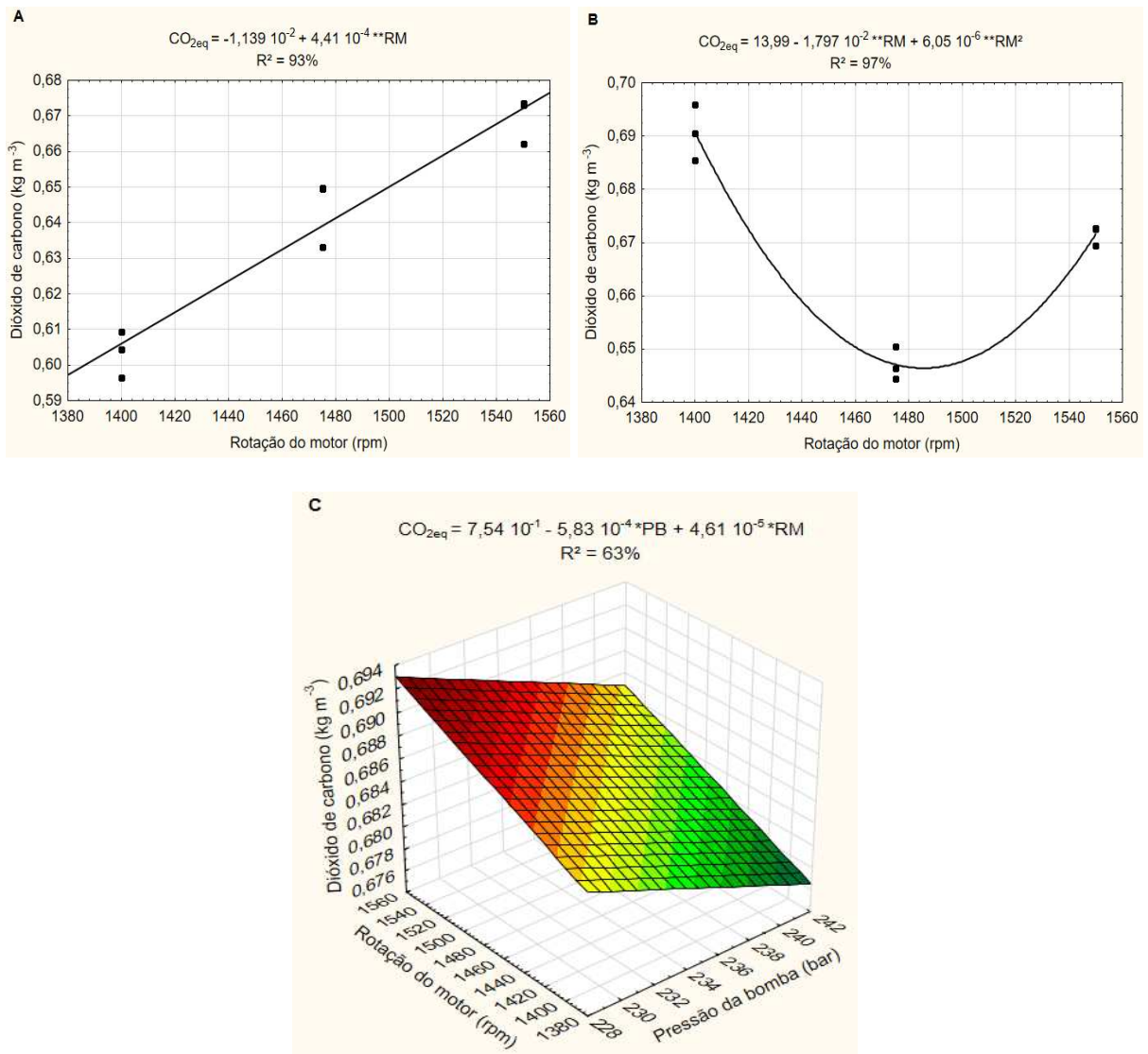
Ghaffariyan et al. (2017) ao avaliarem o custo de extração de madeira com *forwarder* na Alemanha, determinaram um valor igual a  $\text{US\$ } 3 \text{ m}^{-3}$ , valor superior aos apresentados na atual pesquisa, porque o rendimento operacional da máquina foi

2,9 vezes menor quando comparado com o rendimento operacional médio da máquina da atual pesquisa.

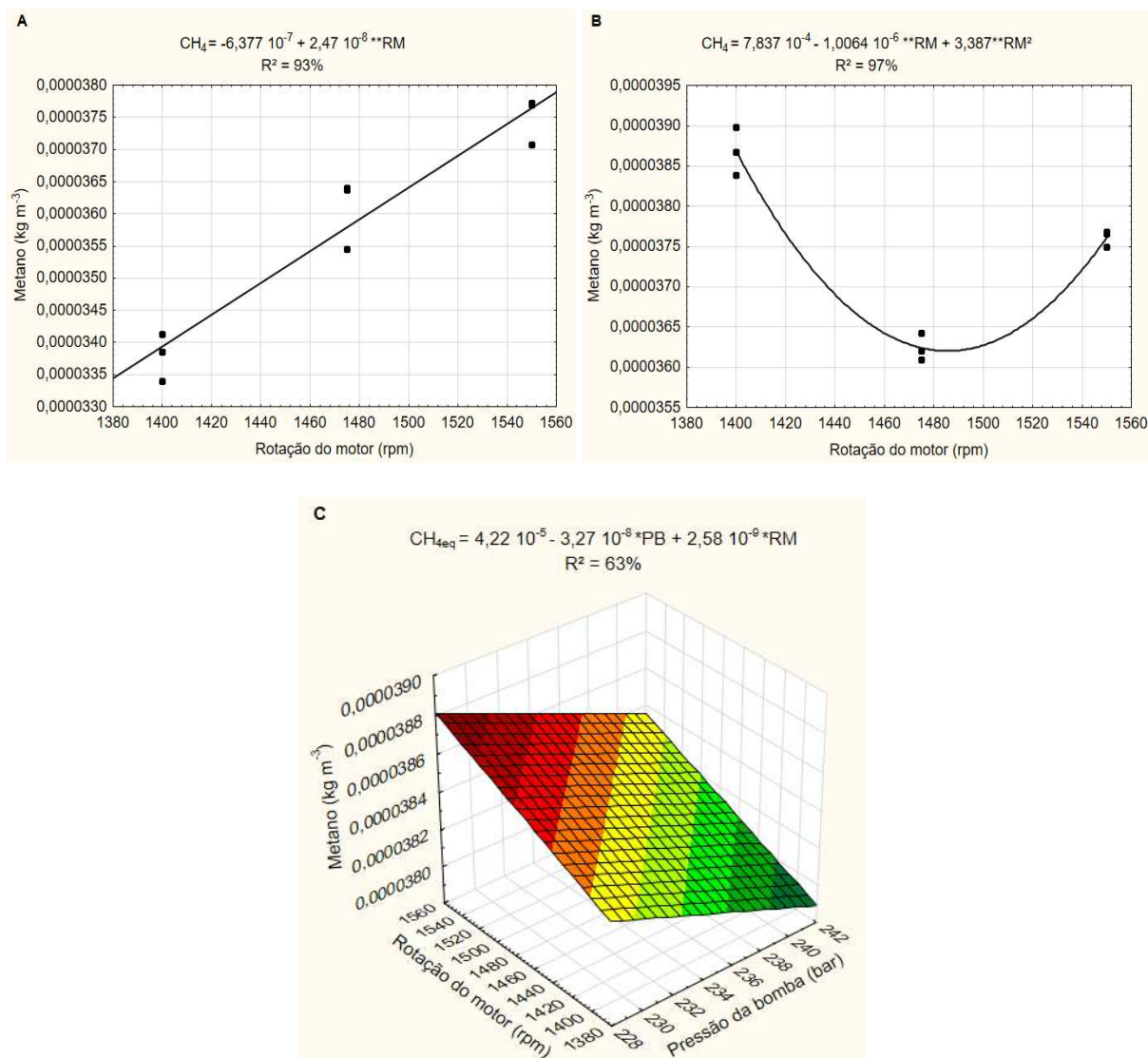
Santos et al. (2016) avaliaram o *forwarder* John Deere, modelo 1710D e calcularam um custo de produção de US\$ 4,58 m<sup>-3</sup>. A superioridade do valor, quando comparado ao da atual pesquisa, se deve ao alto custo operacional e baixa produtividade do *forwarder* 1710D.

### **3.3. Emissão de gases poluentes**

O comportamento e os modelos ajustados da quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2eq</sub>) e metano (CH<sub>4eq</sub>) emitidos em função da rotação do motor estão apresentados nas Figuras 12 e 13, respectivamente. Os modelos ajustados e comportamento da quantidade de dióxido de carbono e metano emitidos em função da pressão da bomba e rotação do motor estão apresentados nas Figuras 10C e 11C, respectivamente. A pressão da bomba influenciou de forma significativa e linear sobre a quantidade de CO<sub>2eq</sub> e CH<sub>4eq</sub> no volume de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, nos demais volumes não houve efeito significativo. A rotação do motor influenciou de forma significativa e linear na quantidade de CO<sub>2eq</sub> e CH<sub>4eq</sub> nos volumes de 0,10 e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, no volume de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> o efeito foi significativo e quadrático para ambos os gases.



**Figura 12.** Comportamento e Equação ajustada da quantidade de dióxido de carbono ( $CO_{2eq}$ ) em função da rotação do motor (RM), (11A e 11B). Superfície de resposta e Equação ajustada da quantidade de dióxido de carbono em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor, (11C). Onde; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.



**Figura 13.** Comportamento e Equação ajustada da quantidade de metano ( $\text{CH}_{4\text{eq}}$ ) em função da rotação do motor (RM), (12A, 12B). Superfície de resposta e Equação ajustada da quantidade de metano em função da pressão da bomba (PB) e rotação do motor, (12C). Onde: A = volume médio individual de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; B = volume médio individual de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; C = volume médio individual de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ ; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

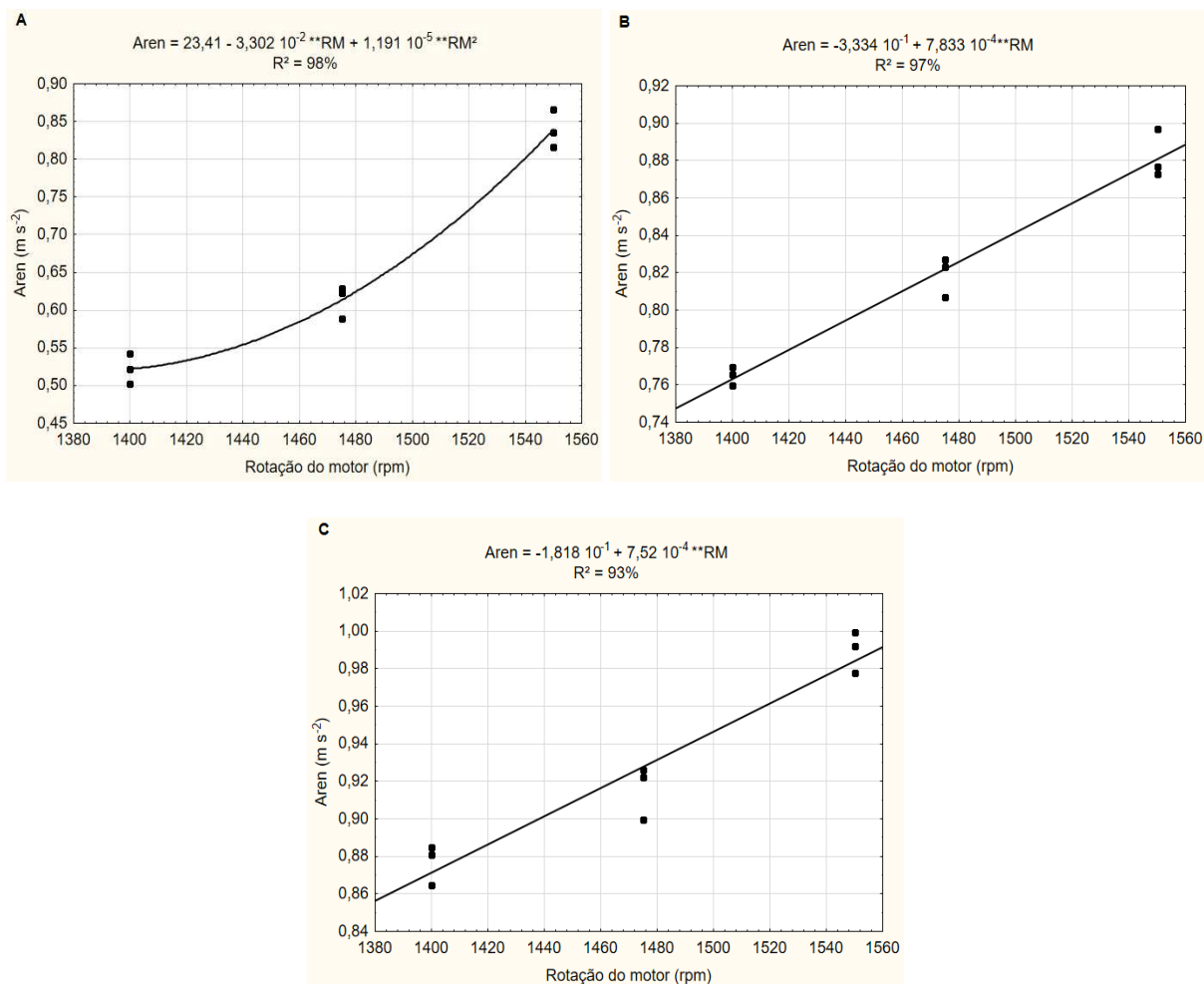
No volume de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  as menores quantidades de dióxido de carbono,  $0,608 \text{ kg m}^{-3}$ , e metano,  $3,39 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ , foram obtidos na rotação do motor de 1.400 rpm. No volume médio, os menores valores de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ,  $0,646 \text{ kg m}^{-3}$ , e  $\text{CH}_{4\text{eq}}$ ,  $3,61 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ , foram alcançados na rotação do motor de 1475 rpm. Já no volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  a menor quantidade de dióxido de carbono,  $0,679 \text{ kg m}^{-3}$ , e metano,  $3,80 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ , foram obtidos quando a máquina estava trabalhando com pressão na bomba em 240 bar e rotação no motor de 1.400 rpm.

Na pesquisa desenvolvida por Dias et al. (2007) o *forwarder* emitiu cerca de 2,43 kg CO<sub>2eq</sub> m<sup>-3</sup> de madeira extraída. Já Klvac e Skoupy (2009) ao avaliarem os *forwarders* Timberjack 1810, Timberjack 810B, Valmet 860 e Logset 504F determinaram uma emissão média de 0,28 kg CO<sub>2eq</sub> m<sup>-3</sup>. A discrepância entre os resultados expostos e os obtidos na atual pesquisa, se deve as diferenças entre os valores de rendimento operacional e consumo horário de combustível das máquinas.

De acordo com Spinelli (2018) redução da rotação do motor de picadores de madeira provocaram a redução da emissão de dióxido de carbono. Man et al. (2016) ao avaliarem um motor estacionário Isuzu 4HF1, verificaram que as emissões de gases diminuem com a redução da rotação do motor. No entanto, cabe destacar que, a escolha de determinada rotação do motor depende das condições operacionais, principalmente do volume da madeira. Ajustes imprecisos da pressão da bomba e rotação do motor provocam aumento da emissão de dióxido de carbono e metano para atmosfera.

#### **3.4. Parâmetros ergonômicos**

Os modelos ajustados e comportamento da aceleração resultante de exposição normalizada (Aren) em função da rotação do motor nos três volumes estudados estão apresentados na Figura 14. Não houve efeito significativo da pressão da bomba sobre os valores de Aren em nenhum dos volumes pesquisados. A rotação do motor influenciou de forma significativa, quadrática e positiva sobre os valores de Aren no volume de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, nos demais volumes o efeito foi significativo, linear e positivo. Conforme a Norma de Higiene Ocupacional 09 (NHO09) e ISO 2631-1:1997 (ISO, 1997) os valores de aceleração resultante de exposição normalizada não excederam, em todos os cenários estudados, o valor limite para a jornada de trabalho de 8 horas diárias.



**Figura 14.** Comportamento e Equação ajustada da aceleração resultante de exposição normalizada (Aren) em função da rotação do motor (RM). Onde: A = volume médio individual de 0,10 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; B = volume médio individual de 0,14 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; C = volume médio individual de 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>; \*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

Nos volumes de 0,10; 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> os maiores valores de Aren foram de 0,84; 0,88; e 0,98 m s<sup>-2</sup>, respectivamente. Tais valores foram obtidos na rotação do motor de 1.550 rpm. Nos volumes baixo e médio os valores estão acima do nível de ação, sendo necessário, no mínimo, à adoção de medidas preventivas. Já no maior volume estudado os valores de aceleração estão na região de incerteza, sendo necessária a adoção de medidas preventivas e corretivas visando à redução da exposição diária aos níveis de aceleração.

A partir dos resultados, percebeu-se que, apesar de toda a tecnologia empregada no assento do *forwarder*, os operadores estão expostos a níveis relativamente altos de vibração de corpo inteiro, sendo primordial a adoção de medidas mitigadoras, podendo ser adotada a redução da rotação do motor, aumento

das pausas regulares durante a jornada de trabalho ou a troca do sistema de suspensão da máquina que é do tipo bogie para o sistema do tipo pendular. Segundo Ismoilov et al. (2015) os sistemas de suspensão bogie são as mais eficientes para máquinas florestais, podendo reduzir em até 50% os níveis de vibração.

Marzano et al. (2017) ao avaliarem diferentes *forwarders* observaram um valor médio de aceleração resultante de exposição normalizada foi de  $0,70 \text{ m s}^{-2}$ , valor inferior ao da atual pesquisa, em detrimento das diferenças das condições operacionais e máquinas utilizadas nas pesquisas. De acordo com Rehn et al. (2005) os valores de vibração em *forwarder* são influenciados pelos distintos modelos das máquinas e operadores.

O Volume Médio Individual da madeira influenciou de forma significativa nos valores de aceleração nas operações de carregamento e deslocamento carregado, nas demais operações não houve efeito significativo (Tabela 3). Os valores de Aren também sofreram efeito significativo das operações executadas pela máquina.

**Tabela 3.** Valores, por operação, de aceleração resultante de exposição normalizada (Aren) nos volumes pesquisados.

VMi	Deslocamento vazio	Carregamento	Deslocamento carregado	Descarregamento
0,10	0,45 Aa	0,34 Cb	0,39 Aab	0,26 Ac
0,14	0,51 Aa	0,45 Bab	0,40 Abc	0,33 Ac
0,29	0,50 Aa	0,55 Aa	0,35 Bb	0,35 Ab

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 99% de probabilidade.

O valor de Aren da operação carregamento, no volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , foi estatisticamente superior aos demais do mesmo volume. O resultado se justifica porque durante o carregamento as toras eram soltas na caixa de carga, sendo que toras mais pesadas provocavam maiores impactos sobre a caixa de carga e conseqüentemente maiores valores de aceleração eram transmitidos aos operadores. O valor de Aren da operação deslocamento carregado, no volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , foi estatisticamente inferior ao demais do mesmo volume, possivelmente, a madeira mais pesada funcionou como lastro, proporcionando assim mais estabilidade a máquina.

No volume de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  os maiores valores de aceleração resultante foram observados nas operações de deslocamento vazio e carregado. Já nos

volumes de 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup> os valores de Aren das operações deslocamento vazio e carregamento foram estaticamente superiores aos demais. Na pesquisa desenvolvida por Rehn et al. (2005) os valores de aceleração das operações deslocamento vazio, deslocamento carregado, carregamento e descarregamento, foram de 1,69; 1,10; 0,55; e 0,41 m s<sup>-2</sup>, respectivamente. Resultados distintos aos da atual pesquisa em razão das diferenças de tipo e característica do solo, máquina, operador, velocidade de deslocamento, distância de extração e volume da madeira.

Na Tabela 4 é possível visualizar os valores da Taxa de Ocupação Real (TOR) e da Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR) nos três volumes estudados. Não houve diferenças expressivas entre os valores nos três volumes estudados, assim como dos entre os valores das distintas combinações de rotação do motor e vazão da bomba hidráulica. Durante a execução da pesquisa não foram observadas Pausas Irregulares Habituais, Pausas Curtíssimas e Fator força.

**Tabela 4.** Taxa de Ocupação Real (TOR) e Taxa de Ocupação Máxima Considerando Atividades Repetitivas (TOMCAR) em todos os volumes pesquisados.

Tipo de pausa	VMI (m <sup>3</sup> árvore <sup>-1</sup> )		
	0,10	0,14	0,29
PPR (%)	7,29	7,50	8,13
PABE (%)	3,13	3,54	3,13
PPIH (%)	0,00	0,00	0,00
PPC (%)	0,00	0,00	0,00
Mecanismo de regulação (%)	5,00	5,00	5,00
TOR (%)	84,58	83,96	83,75
FR (%)	2,00	2,00	2,00
FF (%)	0,00	0,00	0,00
FEE (%)	21,00	20,00	20,00
TOMCAR (%)	72,00	73,00	73,00

Em que: PPR = Porcentagem de repouso por pausas regulares (%); PABE = Porcentagem de tempo com atividades de baixa exigência (%); PPIH = Porcentagem de pausas irregulares habituais (%); PPC = Porcentagem de pausas curtíssimas (%); FR = fator repetitividade; FF = fator força; e FEE = fator esforço estático.

A TOMCAR foi 12,58; 10,96; 10,75% menor quando comparada a TOR nos volumes de 0,10; 0,14; e 0,29 m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>, respectivamente. Nesse caso, a operação

de extração de madeira com *forwarder* se caracteriza como de risco ergonômico, podendo causar desconforto, fadiga e lesões nos operadores. Mediante isso, é necessário o aumento das pausas durante a jornada de trabalho, de forma que reduza a TOR e aumente a TOMCAR. Conforme Gerasimov e Sokolov (2014), os operadores de máquinas florestais estão susceptíveis a lesões no pescoço, braços e coluna cervical, causados pela intensidade excessiva no trabalho, ficarem muito tempo em posições fixas ergonomicamente incorretas e devido a execução de movimentos repetitivos de ciclo curto. Além disso, Østensvik et al. (2008) afirmaram que a maior prevalência de desconforto e dor nos operadores de máquinas florestais pode estar relacionada a fatores organizacionais.

Os resultados obtidos por meio do questionário Bipolar, não identificou nenhum desconforto aos operadores causados em razão da redução da pressão da bomba e rotação do motor. No entanto os operadores relataram que quando a máquina estava configurada para operar na rotação do motor de 1.550 rpm, independente da pressão da bomba, ficava mais potente e agressiva, tornando os movimentos de lança e pinça mais difíceis de serem controlados. Tais relatos demonstram que os operadores não estavam habituados com tal rotação, sendo que a mesma pode proporcionar um efeito negativo ou positivo sobre a ergonomia e produtividade do operador em longo prazo.

Na Tabela 5 constam os movimentos executados pelo operador, durante a jornada de trabalho, nos três volumes estudados, assim como nas diversas combinações de pressão da bomba e rotação do motor. Verificou-se que no menor volume estudado, os movimentos eram repetidos por uma maior quantidade de vezes, devido à necessidade do maior número de feixes para completar a caixa de carga da máquina. No que se refere às combinações de pressão da bomba e rotação do motor, os movimentos se tornaram mais repetitivos à medida que o rendimento operacional da máquina aumentava.

**Tabela 5.** Número de vezes, por turno, que o operador acionava os comandos da máquina em todos os cenários pesquisados.

Volume Médio Individual de 0,10 m³ arv <sup>-1</sup>							
Pressão da bomba (bar)	Rotação do motor (rpm)	Comando					
		Pedal do acelerador	Botão1 da cúpula direita	Joystick esquerdo	Joystick direito	Botões 5 e 8 da cúpula esquerda	Botão do Joystick direito
240	1550	858,11	1291,39	4660,07	4854,20	46,89	2491,81
240	1475	856,07	1288,31	4648,95	4842,62	46,78	2485,86
240	1400	855,23	1287,06	4644,43	4837,91	46,73	2483,45
235	1550	848,12	1276,35	4605,80	4797,67	46,35	2462,79
235	1475	844,16	1270,39	4584,30	4775,27	46,13	2451,29
235	1400	851,34	1281,19	4623,27	4815,87	46,52	2472,13
230	1550	856,52	1289,00	4651,43	4845,20	46,80	2487,19
230	1475	851,80	1281,89	4625,80	4818,50	46,55	2473,49
230	1400	851,97	1282,14	4626,69	4819,43	46,56	2473,96
Volume Médio Individual de 0,14 m³ arv <sup>-1</sup>							
Pressão da bomba (bar)	Rotação do motor (rpm)	Comando					
		Pedal do acelerador	Botão1 da cúpula direita	Joystick esquerdo	Joystick direito	Botões 5 e 8 da cúpula esquerda	Botão do Joystick direito
240	1550	825,06	1309,03	4144,94	4324,54	50,31	2222,14
240	1475	823,04	1305,82	4134,77	4313,93	50,19	2216,69
240	1400	746,61	1184,56	3750,80	3913,32	45,52	2010,83
235	1550	823,94	1307,25	4139,31	4318,66	50,24	2219,12
235	1475	823,17	1306,03	4135,43	4314,62	50,19	2217,04
235	1400	743,90	1180,26	3737,18	3899,11	45,36	2003,53
230	1550	825,94	1310,42	4149,34	4329,13	50,36	2224,50
230	1475	816,58	1295,57	4102,31	4280,07	49,79	2199,28
230	1400	745,47	1182,76	3745,10	3907,38	45,46	2007,78
Volume Médio Individual de 0,29 m³ arv <sup>-1</sup>							
Pressão da bomba (bar)	Rotação do motor (rpm)	Comando					
		Pedal do acelerador	Botão1 da cúpula direita	Joystick esquerdo	Joystick direito	Botões 5 e 8 da cúpula esquerda	Botão do Joystick direito
240	1550	735,80	1252,41	3425,85	3577,13	51,45	1838,99
240	1475	710,02	1208,52	3305,80	3451,78	49,65	1774,55
240	1400	683,87	1164,02	3184,07	3324,67	47,82	1709,20
235	1550	739,41	1258,55	3442,65	3594,67	51,71	1848,01
235	1475	703,26	1197,01	3274,33	3418,91	49,18	1757,65
235	1400	683,04	1162,59	3180,18	3320,60	47,76	1707,11
230	1550	726,47	1236,52	3382,39	3531,74	50,80	1815,66
230	1475	690,89	1175,96	3216,74	3358,79	48,31	1726,74
230	1400	676,46	1151,40	3149,57	3288,65	47,31	1690,68

O joystick direito foi o comando mais acionado pelo operador em todos os cenários estudados. O mesmo tinha a função de acionar o cilindro hidráulico que possibilitava levantar e abaixar (movimento vertical) a grua e também acionar o rotator hidráulico que promovia o movimento rotacional da pinça. O segundo componente mais acionado foi o joystick esquerdo, que era utilizado para acionar o cilindro hidráulico que promovia o prolongamento e contração da grua e também o mecanismo que promovia o movimento rotacional da grua. Ambos os joysticks eram acionados por meios das mãos dos operadores, exigindo movimentos verticais e horizontais dos punhos. A partir dos resultados constata-se que a operação com *forwarder* se caracteriza como repetitiva, com movimentos de mãos, punhos e dedos

simultâneos, no entanto leves. Tais resultados corroboram com os encontrados na pesquisa desenvolvida por Silva et al. (2013), na qual 90% dos trabalhadores consideravam a operação como repetitiva.

#### 4. Conclusões

No volume de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , a pressão da bomba hidráulica não influenciou de forma significativa as variáveis dependentes estudadas. No volume de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , houve influencia significativa sobre o tempo das operações carregamento e descarregamento. Já no maior volume pesquisado, houve influencia significativa nos valores das operações carregamento e descarregamento, na produtividade, demanda de combustível, custo de produção, dióxido de carbono e metano.

No volume de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  a rotação do motor influenciou de forma expressiva nos valores do consumo horário de combustível, demanda de combustível, custo operacional, custo de produção, dióxido de carbono e metano. Nos volume de  $0,14$  e  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , houve influencia significativa sobre o sobre o tempo por ciclo das operações carregamento, deslocamento carregado, descarregamento, a sobre a produtividade, consumo horário de combustível, demanda de combustível, custo operacional, custo de produção, dióxido de carbono, metano e aceleração resultante de exposição normalizada.

Em povoamento florestal com Volume Médio Individual de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  para obter os melhores resultados do ponto de vista técnico, econômico, ambiental e ergonômico é necessário configurar o *forwarder* para operar com pressão da bomba em 230 bar e rotação do motor de 1.400 rpm.

Da perspectiva técnica, econômica, ambiental e ergonômico é recomendável operar o *forwarder*, em povoamentos com volume de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$ , com pressão da bomba em 230 bar e rotação do motor de 1.475 rpm.

Em povoamentos florestais com volume de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ árvore}^{-1}$  é recomendável configurar o *forwarder* para operar com pressão da bomba em 240 bar e rotação do motor em 1.550 rpm, dessa forma serão obtidos os melhores resultados do ponto de vista técnico, econômico, ambiental e ergonômico.

A operação com *forwarder* se caracteriza como causadora de doenças ocupacionais, podendo ocasionar fadiga, cansaço físico e mental, produtividade comprometida e dores no braço, punho e mãos do lado esquerdo e direito nos operadores. Contudo a redução da pressão da bomba e rotação do motor não intensifica a ocorrência de doenças ocupacionais nos operadores de *forwarder*.

## 5. Referências bibliográficas

ACKERMAN, P.; BELBO, H.; ELIASSON, L. JONG, A.; LAZDINS, A.; LYONS, J. The cost model for calculation of forest operations costs. **International Journal of Forest Engineering**, Uppsala, Vol. 25, N. 1, p. 75 – 81, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2014.903711>.

BARNES, R.M. **Motion and time study: design and measurement of work**. 6 ed. New York: John Willey & Sons, 1968. 799 p.

CARMO, F. C. A.; FIEDLER, N. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Otimização do uso do trator florestal forwarder em função da produtividade, custos e capacidade de carga. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 39, n. 3, p. 561 - 566, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000300017>.

COUTO, H. A. **Índice TOR-TOM: 25 aplicações práticas na análise ergonômica, na avaliação de risco ergonômico, na prescrição de ações corretivas e no gerenciamento da produtividade segura**. 2 ed. Belo horizonte: ERGO editora, 2012.

DIAS, A. C.; ARROJA, L.; CAPELA, I. Carbon dioxide emissions from forest operations in Portuguese eucalypt and maritime pine stands. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 22, P. 422 – 432, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02827580701582692>.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration)**. Official Journal of the European Communities, L177/13, 2002.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. **NHO 09: Norma de Higiene Ocupacional: Avaliação da exposição ocupacional a vibrações de corpo inteiro**. São Paulo, 2013. 65p.

GERASIMOV, Y.; SOKOLOV, A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia. **Applied Ergonomics**, v. 45, n. 2, p. 318-338, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>.

GHAFFARIYAN, M. R.; BROWN, M.; ACUMA, M.; SESSIONS, J.; GALLAGHER, T.; KÜHMAIER, M.; SPINELLI, R.; VISSER, R.; DEVLIN, G.; ELIASSON, L.; LAITILA, J.; LAINA, R.; WIDE, M. I.; EGNELL, G. An international review of the most productive and cost effective forest biomass recovery technologies and supply chains. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 145 – 158, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.014>.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration**. 4.ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 443p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Mobile Combustion. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf). Acesso em: 04 de setembro de 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARDIZATION. **ISO 2631-1**: mechanical vibration and shock: evaluation exposure to whole-body vibration: part 1, general requirements. Geneva, 1997. 32 p.

ISMOILOV, A.; SELLGREN, U.; ANDERSSON, K.; LÖFGREM, B. A comparison of novel chassis suspended machines for sustainable forestry. **Journal of Terramechanics**, v. 58, p. 59-68, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.01.002>

KLIVAC, R.; SKOUPY, A. Characteristic fuel consumption and exhaust emissions in fully mechanized logging operations. *Journal of Forest Research*, v. 14, p. 328 – 334, 2009. DOI: 10.1007/s10310-009-0143-7.

KÖPPEN, W. **Climatologia com un studio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura econômica, 1948. 478 p.

LASCHI, A.; MARCHI, E.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Forest operations in coppice: Environmental assessment of two different logging methods. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 493–503, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.041>

MAN, X. J.; CHEUNG, C. S.; NING, Z.; WEI, L.; HUANG. Influence of engine load and speed on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with diesel fuel blended with waste cooking oil biodiesel. **Fuel**, v. 180, p. 41 – 49, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.007>.

MARZANO, L. L. C.; PAULO, A. P.; MINETTE, L. J. Proposal for an ergonomic conformity index for evaluation of harvester and forwarders. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 4, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000400001>.

ØSTENSVIK, T.; VEIERSTED, K. B.; CUCHET, E.; NILSEN, P.; HANSE, J. J.; CARLZON, C.; WINKEL, J. A search for risk factors of upper extremity disorders among forest machine operators: A comparison between France and Norway. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 38, p. 1017–1027, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.016>.

PRADA, M.; ALONSO, C. M.; GARCÍA, S. S.; CANGA, E. Analysis of three forest chippers: productivity, costs and GHG emissions in Northern Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 238 – 244, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.066>.

PRINZ, R.; SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; ROUTA, J.; ASIKAINEN, A. Modifying the settings of CTL timber harvesting machines to reduce fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 208 – 217, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.210>.

RAMOS, C. R.; LANÇAS, K. P.; LYRA, G. A.; SANDI, J. Fuel consumption of a sugarcane harvester in different operational settings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 6, p. 588-592, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n6p588-592>.

REHN, B.; LUNDSTRÖM, R.; NILSSON, L.; LILJELIND, I.; JÄRVHOLM. Variation in exposure to whole-body vibration for operators of forwarder vehicles - aspects on measurement strategies and prevention. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 35, p. 831-842, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.03.001>.

SANTOS, L. N.; FERNANDES, H. C.; SILVA, M. L.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, A. P. Avaliação de custos da operação de extração da madeira com forwarder. **Cerne**, Lavras – MG, v. 22, n. 1, p. 27-34, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201622012076>.

SANTOS, D. W. F. N.; FERNANDES, H. C.; VALENTE, D. S. M.; LEITE, E. S. Desempenho técnico, econômico e ambiental do harvester em distintas rotações do motor. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 118, p. 319-326, jun. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n118.17>.

SILVA, E. N.; MACHADO, C. C.; FIEDLER, N. C.; FERNANDES, H. C.; PAULA, M. O.; CARMO, F. C.; MOREIRA, G. R.; COELHO, F. E. Avaliação de custos de dois modelos de harvester no corte de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 741-748, jul.-set., 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-509820142403021>.

SILVA, E. P.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; MARÇAL, M. A.; SANCHES, A. L. P. Fatores organizacionais e psicossociais associados ao risco de LER/DORT em operadores de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.5, p.889-895, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000500011>.

SILVA, M. L.; MIRANDA, G. M.; CORDEIRO, S. A. Custos. In: MACHADO, C. C. (Editor). **Colheita florestal**. 2 ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 231-260.

SPINELLI, R.; MOURA, A. C. A.; SILVA, P. M. Decreasing the diesel fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of industrial in-field chipping operations. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2174-2181, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.196>.

SOUZA, S. O.; VALE, C. C.; NASCIMENTO, F. H. Bacia do rio Peruípe (BA): ensaio de classificação morfométrica por meio de daods SRTM. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 14, n. 47, p. 208-2221, 2013.

WANG, Y.; HU, H.; ZHANG, L.; ZHANG, N.; SUN X. Real-time vehicle energy management system based on optimised distribution of electrical load power. **Applied Sciences**, v. 6, n. 258, 2016. DOI: doi:10.3390/app6100285.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; WANG, J.; YU, C. Cost, energy, use and GHG emissions for forest biomass harvesting operations. **Energy**, v. 114, p. 1053-1062, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.086>.