

ELTON DA SILVA LEITE

**MODELAGEM TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE COLHEITA
FLORESTAL MECANIZADA DE TORAS CURTAS**

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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

ELTON DA SILVA LEITE

**MODELAGEM TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE COLHEITA
FLORESTAL MECANIZADA DE TORAS CURTAS**

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: 30 de março de 2012.

Marcio Lopes da Silva

Elizabeth N. da S. O. de Paula

Mauri Martins Teixeira

Fábio Lúcio Santos

Haroldo Carlos Fernandes
(Orientador)

À minha família!

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em minha caminhada.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela realização do Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), pela oportunidade de contribuir com a pesquisa operacional; em especial, aos amigos Ilvânio Luís Guedes, Edvaldes José do Amaral, Ezio, Gláucio, ao técnico Walteli Souza Guerra e demais funcionários, operadores e mecânicos.

Ao professor Haroldo Carlos Fernandes, pela orientação, pela oportunidade, pela compreensão, pela confiança e pelo apoio, e a quem seguirei como exemplo de pessoa.

Aos professores coorientadores Hélio Garcia Leite e Luciano José Minette, pelas contribuições, pelas sugestões e, principalmente, pelo ensinamento transmitido; aos professores, Mauri Martins Teixeira, Elizabeth Neire da Silva Oliveira de Paula, Fábio Lúcio Santos, Marcio Lopes da Silva, Amaury Paulo de Souza e Domingos Sárvio Magalhães Valente, pelas contribuições, pelas sugestões, pela colaboração e pelos ensinamentos.

Às secretárias da Pós-Graduação, Rosária, Rafaela e demais funcionários do DEA sempre prontos a ajudar.

Aos meus pais, Osório e Anedina; aos meus irmãos, Evaldo e Erivelto; e aos demais parentes, Ana Júlia, Noely, Natália, tio Arcênio, Taís, dentre outros, pela estrutura, dedicação e força de sempre.

Aos “coniventes” da mecanização Flávio, Élcio (Ialá), Marcelo (baiano), Daniel (pavãozinho do RU), Marconi e demais, pelo estímulo, sempre.

Aos amigos, Natalie, Gustavo, Efigênio, Giu, Diana, Ricardo, Eduardo (pandora) e demais, pelos momentos, comemorações e festejos.

Aos demais que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho!

BIOGRAFIA

ELTON DA SILVA LEITE, filho de Osório Carreiro Leite e Anedina da Silva Leite, nasceu em Brasília, Distrito Federal, em 25 de julho de 1980.

Em 2000, trabalhou no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

De 2003 a 2007, graduou-se em Engenharia Florestal, pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Em 2008, iniciou-se o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado, pelo Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2010, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Em março de 2010, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, área de concentração de Mecanização Agrícola.

Em março de 2011, submeteu-se ao exame de qualificação e, em março de 2012, submeteu-se à defesa de tese, para obtenção do título *Doctor Scientiae*.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT	xviii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
MODELAGEM TÉCNICA DE UM SISTEMA DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA DE TORAS CURTAS	5
Resumo	5
Abstract	6
1 Introdução.....	7
2 Material e métodos	10
2.1 Localização das áreas de pesquisa	10
2.2 Unidade de amostragem.....	13
2.3 Determinação da declividade das unidades amostrais.....	13
2.4 Determinação do volume das unidades amostrais	13
2.5 Coleta de dados.....	14
2.6 Cronograma das atividades	15
2.7 Características técnicas das máquinas analisadas	15
2.7.1 <i>Harvester</i>	15
2.7.2 <i>Forwarder</i>	16
2.8 Sistema de colheita.....	17
2.8.1 Sequência de trabalho do <i>harvester</i>	18
2.8.2 Sequência de trabalho do <i>forwarder</i>	18
2.9 Descrição técnica das atividades	21
2.9.1 <i>Harvester</i>	21
2.9.2 <i>Forwarder</i>	22
2.10 Velocidades de trabalho.....	23
2.11 Disponibilidade mecânica	23
2.12 Eficiência operacional	24
2.13 Produtividade operacional.....	24
2.14 Pré-requisitos operacionais.....	25
2.15 Fatores analisados.....	27

	Página
3 Resultados e discussão	28
3.1 <i>Harvester</i>	29
3.1.1 Estudo de tempo efetivo de operação.....	29
3.1.2 Produtividade das máquinas	32
3.1.2.1 Aclive	32
3.1.2.2 Declive	34
3.1.3 Influência das variáveis na produtividade.....	37
3.2 <i>Forwarder</i>	41
3.2.1 Estudo de tempo efetivo de operação.....	41
3.2.1.1 Deslocamento	43
3.2.1.2 Carregamento	46
3.2.1.3 Descarregamento.....	47
3.2.1.4 Limpeza	47
3.2.2 Produtividade	48
3.2.2.1 Aclive	48
3.2.2.2 Declive	50
3.2.3 Influência das variáveis na produtividade.....	52
4 Conclusões.....	55
5 Recomendações.....	56
6 Referências bibliográficas.....	56
 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA DE TORAS CURTAS.....	 60
Resumo	60
Abstract	61
1 Introdução.....	62
2 Material e métodos	63
2.1 Custo de maquinário.....	64
2.1.1 Custos fixos	64
2.1.1.1 Depreciação.....	64
2.1.1.2 Juros, seguros e impostos	66
2.1.1.3 Abrigo	67
2.1.1.4 Taxa de administração.....	68

	Página
2.1.2 Custos variáveis.....	68
2.1.2.1 Combustível.....	69
2.1.2.2 Lubrificantes.....	69
2.1.2.3 Óleo hidráulico.....	70
2.1.2.4 Pneus e, ou, esteiras.....	70
2.1.2.5 Manutenção e reparos.....	71
2.1.2.6 Mão de obra.....	71
2.1.2.7 Transporte de pessoal.....	72
2.1.2.8 Transporte de maquinários.....	72
2.2 Análise de sensibilidade.....	73
2.3 Produtividade.....	73
2.4 Custo de produção.....	73
2.5 Taxa interna de retorno (TIR).....	74
2.6 Ponto de equilíbrio (PE).....	76
3 Resultados e discussão.....	76
3.1 <i>Harvester</i>	76
3.1.1 Custos operacionais.....	76
3.1.2 Análise de sensibilidade.....	81
3.1.2.1 Valor de aquisição.....	82
3.1.2.2 Manutenção e reparos.....	82
3.1.2.3 Preço do combustível.....	83
3.1.2.4 Depreciação.....	83
3.1.2.5 Vida útil econômica.....	83
3.1.2.6 Taxa de juros.....	83
3.1.2.7 Análise geral.....	83
3.1.3 Custos de produção.....	84
3.1.4 Taxa interna de retorno (TIR).....	87
3.1.5 Ponto de equilíbrio (PE).....	88
3.1.5.1 Método I: número de horas trabalhadas.....	88
3.1.5.2 Método II: produtividade mínima da máquina.....	89
3.2 <i>Forwarder</i>	90
3.2.1 Custos operacionais.....	90
3.2.2 Análise de sensibilidade.....	94
3.2.2.1 Valor de aquisição.....	95
3.2.2.2 Manutenção e reparos.....	95
3.2.2.3 Preço do combustível.....	96

	Página
3.2.2.4 Depreciação	96
3.2.2.5 Vida útil econômica	96
3.2.2.6 Taxa de juros	96
3.2.2.7 Análise geral	96
3.2.3 Custos de produção	97
3.2.4 Taxa interna de retorno (TIR)	99
3.2.5 Ponto de equilíbrio (PE)	100
3.2.5.1 Método II: produtividade mínima da máquina	100
4 Conclusões	102
5 Referências bibliográficas	103
APÊNDICES	105
APÊNDICE A	106
APÊNDICE B	108

LISTA DE TABELAS

Páginas

Artigo 1

1	Análise descritiva das unidades experimentais, em função do volume de madeira sem casca por árvore e a declividade em graus.....	29
2	Amostragem das unidades experimentais, em função das faixas de declividade e do volume por árvore.....	29
3	Tempo efetivo médio de operação do <i>harvester</i>	30
4	Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do <i>harvester</i> operando em aclive	34
5	Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do <i>harvester</i> operando em declive	36
6	Valores médios dos tempos das atividades do ciclo operacional do <i>forwarder</i> no sentido de extração em declive e em aclive, para o percurso de 150 m	42
7	Modelos dos tempos das atividades de deslocamento do <i>forwarder</i> , em função do sentido de deslocamento	44
8	Modelagem das atividades de carregamento do ciclo operacional, delineado pelo sentido de extração do transportador <i>forwarder</i>	46
9	Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do <i>forwarder</i> operando em aclive	50
10	Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do <i>harvester</i> operando em declive	51

Artigo 2

1	Redução de custos obtida com a diminuição em 10 % dos componentes de custo mais relevantes	84
2	Custo de produção em US\$ m ⁻³ de madeira colhido pelo <i>harvester</i> , em função da declividade do terreno e do volume por árvore.....	89
3	Acumulação de redução de custos obtida com a diminuição em 10 % dos componentes de custo mais relevantes	97

	Página
4	Custo de produção em US\$ m ⁻³ do <i>forwarder</i> , em função da declividade do terreno e distância de extração..... 101

Apêndice A

1A	Formulário de coleta de dados do <i>harvester</i> 106
2	Formulário de coleta de dados do <i>forwarder</i> 107

Apêndice B

1B	Valores utilizados no cálculo do custo operacional do <i>forwarder</i> 108
2B	Valores utilizados no cálculo do custo operacional do <i>harvester</i> 109

LISTA DE FIGURAS

	Página
Artigo 1	
1	Localização da área de pesquisa (Gonzaga, MG)..... 11
2	Localização da área de pesquisa (Coroaci, MG)..... 11
3	Mapa em faixas de declividade, em graus, das áreas plantadas do projeto Darcy, Gonzaga, MG 12
4	Mapa em faixas de declividade (em graus) das áreas plantadas do projeto Matuzalém, Coroací, MG 12
5	<i>Harvester</i> da marca John Deere, modelo 1270D, operando no corte de eucalipto na declividade de 33° 16
6	<i>Forwarder</i> da marca John Deere, modelo 1710D..... 17
7	Sequência operacional do <i>harvester</i> em cada unidade experimental 19
8	Sequência operacional do <i>forwarder</i> em cada unidade experimental 20
9	Operação de construção das rampas para acessibilidade das máquinas analisadas 25
10	Trator agrícola Massey Fergusson 297 acionando o guincho da marca TMO (a) e em engate do cabo de aço para auxiliar no deslocamento do <i>harvester</i> (b) 26
11	Tempos médios para derrubada e processamento das unidades amostrais, em função da declividade e do volume por árvore pelo <i>harvester</i> 31
12	Tendência de comportamento dos valores da produtividade do <i>harvester</i> no sentido de corte em active, em função da declividade e do volume por árvore..... 32
13	Produtividade do <i>harvester</i> ($m^3 h^{-1}$) de madeira sem casca no sentido de operação em active, em função da declividade do terreno e do volume por árvore, segundo modelo proposto 33

	Página	
14	Relação da produtividade observada do <i>harvester</i> com a produtividade estimada pelo modelo operando em declive. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para declive (b).	34
15	Tendência de comportamento dos valores da produtividade do <i>harvester</i> no sentido de corte em declive, em função da declividade e do volume por árvore.....	35
16	Produtividade do <i>harvester</i> , em porcentagem, em função da declividade e do volume por árvore, em relação ao sentido de operação, em aclive (a) e em declive (b).....	35
17	Relação da produtividade observada do <i>harvester</i> com a produtividade estimada pelo modelo operando em aclive. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para aclive (b)	37
18	Produtividade do <i>harvester</i> , em porcentagem, em função da declividade e do volume por árvore, em relação ao sentido de operação, em aclive (a) e em declive (b).....	38
19	Composição porcentual do tempo total do ciclo operacional do <i>forwarder</i> na direção de extração em declive (a) e aclive (b), para a distância de 150 m.....	41
20	Velocidade média para os deslocamentos sem e com carga do <i>forwarder</i>	44
21	Tempos, em segundos, de deslocamento com carga considerando em função da declividade do terreno e da distância de deslocamento, na direção de extração em aclive (a) e em declive (b), pelo <i>forwarder</i>	45
22	Tempos, em segundos, de deslocamento sem carga, considerando em função da declividade do terreno e da distância, na direção de extração em aclive (a) e em declive (b), pelo <i>forwarder</i>	45
23	Tempo requerido, em segundos, na operação de carregamento, em função da declividade e do volume por árvore, na direção de extração em aclive (a) e em declive (b), pelo transportador <i>forwarder</i>	47

	Página
24 Tendência de comportamento dos valores da produtividade do <i>forwarder</i> no sentido de transporte de madeira em declive, em função da declividade do terreno e da distância de extração ...	48
25 Produtividade do <i>forwarder</i> , em $m^3 h^{-1}$, no sentido de extração em aclave, em função da declividade do terreno e da distância de deslocamento.....	49
26 Relação da produtividade observada do <i>forwarder</i> com a produtividade estimada pelo modelo operando em na extração em aclave. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para a extração em aclave.	50
27 Tendência de comportamento dos valores da produtividade do <i>forwarder</i> no sentido de transporte de madeira em declive, em função da declividade do terreno e da distância de extração. ..	51
28 Produtividade do transportador <i>forwarder</i> , $m^3 h^{-1}$, no sentido de extração de madeira em declive.....	51
29 Relação da produtividade observada do <i>forwarder</i> com a produtividade estimada pelo modelo operando em declive. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para declive (b)	52
30 Produtividade do <i>forwarder</i> , em porcentagem, em função da declividade e do volume por árvore, em relação ao sentido de operação, em aclave (a) e em declive (b).....	53
31 Queda de produtividade do <i>forwarder</i> operando em aclave, em comparação ao declive	54

Artigo 2

1 Método gráfico para determinar a taxa interna de retorno (TIR).....	75
2 Componentes do custo operacional do <i>harvester</i> John Deere, modelo 1270D, em dólares por hora efetiva trabalhada ($US\$h^{-1}$) e porcentagem (%)	77
3 Custos fixos, variáveis e totais por hora efetiva de trabalho do <i>harvester</i> durante a vida útil, em anos.....	78
4 Custo dos métodos de depreciação do <i>harvester</i>	79

	Página
5 Custos médios calculados pelos métodos de depreciação durante a vida útil do <i>harvester</i>	80
6 Custo de manutenção e reparos durante a vida útil do <i>harvester</i>	81
7 Diagrama de Spiderplot das principais variáveis dos custos operacionais do <i>harvester</i> , com variação dos seis principais componentes do custo	82
8 Custo de produção do <i>harvester</i> , US\$ m ⁻³ , em relação ao sentido de operação em aclave, em função da declividade do terreno e do volume por árvore	85
9 Custo de produção do <i>harvester</i> , US\$ m ⁻³ , em relação ao sentido de operação em declive, em função da declividade do terreno e do volume por árvore	86
10 Representação do custo, da receita bruta e da receita líquida, em dólar, pela vida útil. (a) operação em aclave; e (b) operação em declive	87
11 Taxa interna de retorno, em função do tempo de substituição do <i>harvester</i> , em anos, no sentido de operação em aclave (a) e em declive (b).....	88
12 Componentes do custo operacional do <i>forwarder</i> John Deere, modelo 1710D, em dólares por hora efetiva trabalhada (US\$h-1) e em porcentagem (%).....	90
13 Custos fixos, variáveis e totais por hora efetiva de trabalho do <i>harvester</i> durante a vida útil, em anos.....	91
14 Custos médios obtidos pelos métodos de depreciação do <i>forwarder</i>	92
15 Custos médios obtidos pelos métodos de depreciação, durante a vida útil do <i>forwarder</i>	93
16 Custo de manutenção e reparos durante a vida útil do <i>forwarder</i>	94
17 Diagrama de Spiderplot das principais variáveis dos custos operacionais do <i>forwarder</i> , com variação das seis principais componentes do custo.	95
18 Custo de produção do <i>forwarder</i> , US\$ m ⁻³ , em relação ao sentido de operação em aclave.....	97

	Página	
19	Custo de produção do <i>forwarder</i> , US\$ m ⁻³ , em relação ao sentido de operação em declive.....	98
20	Representação do custo, da receita bruta e da receita líquida, em dólar, pela vida útil do colhedor <i>forwarder</i> , na operação em aclave (a) e na operação em declive (b).	99
21	Taxa interna de retorno, em função do tempo de substituição do <i>forwarder</i> , em anos, no sentido de operação em aclave (a) e em declive (b).....	100

RESUMO

LEITE, Elton da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2012. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas.** Orientador: Haroldo Carlos Fernandes. Coorientadores: Luciano José Minette e Hélio Garcia Leite.

O presente trabalho teve por objetivo efetuar a avaliação do sistema de colheita mecanizada de toras curtas, apresentado em dois capítulos. O primeiro objetivou-se efetuar a modelagem técnica da produtividade e o segundo avaliar economicamente o trator colhedor *harvester* John Deere, modelo 1270D para derrubada e processamento das árvores e o trator *forwarder* John Deere, modelo 1710D, para extração das toras. O trabalho foi executado no estado de Minas Gerais, realizado no período de janeiro de 2010 a maio de 2011. As áreas de florestas plantadas foram de clones híbridos de eucalipto, com 6,0 a 9,5 anos de idade. Cada unidade experimental foi composta por quatro linhas, com 25 árvores em cada. Foram demarcadas unidades experimentais relacionadas aos fatores de declividade do terreno e da produção de madeira da floresta, determinadas por 190 unidades amostrais, variando de 0,132 a 0,423 m³ por árvore sem casca e declividade de até 36°, com traçamento em toras de 6 m de comprimento. Foi utilizado o estudo dos tempos e movimentos para avaliar o processo produtivo e determinar as modelagens da produtividade. Os custos foram divididos em fixos e variáveis. A análise de sensibilidade consistiu a variação ($\pm 20\%$) das seis variáveis mais relevantes e plotadas no diagrama de *spiderplot*. Foi realizada a modelagem dos custos de produção e obtidas as taxas internas de retorno e dos pontos de equilíbrio das máquinas. Os resultados demonstraram um custo operacional para o *harvester* de US\$ 145,36 h⁻¹ e para o *forwarder* de US\$ 125,24 h⁻¹, sendo 80% dos custos representados pelos itens de manutenção e reparos, o custo de combustível e a depreciação. A análise de sensibilidade mostrou que uma economia real de 10% em cada um dos itens de maior expressão, obtém-se uma redução no custo operacional de 16% no sistema de colheita. O *harvester*, operando no sentido de alicate, apresentou maior produtividade na derrubada e no processamento de árvores, sendo, em média, 6,25% maior

que operando em declive. O *forwarder*, operando no deslocamento carregado em declive, proporcionou maior capacidade de extração de madeira, sendo, em média, 20% maior que em aclave. O uso da modelagem permitiu determinar os desempenhos e os custos operacionais nas atividades de colheita e extração de madeira de toras curtas em declividades do terreno de até 36°.

ABSTRACT

LEITE, Elton da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March of 2012. **Technical and economic modeling of a cut-to-length mechanized system forest.** Adviser: Haroldo Carlos Fernandes. Co-advisers: Luciano José Minette and Hélio Garcia Leite.

This study aimed to model a system of cut-to-length mechanized timber harvesting, presented in two chapters. The first objective was to make the technical modeling of productivity and second evaluate economically the return of harvester John Deere tractor, model 1270D for overthrows and trees processing and tractor *forwarder* John Deere, model 1710D, for logs extraction. The work was executed in the state of Minas Gerais, conducted from January 2010 to May 2011. The areas of planted forests were of hybrid clones of eucalyptus, with 6.0 to 9.5 years. Each experimental unit consisted of four rows with 25 trees each. Experimental units related to factors such as the slope of the terrain and the production of wood from the forest were demarcated, determined by 190 units sampling, ranging from 0.132 to 0.423 m³ per tree without bark and slope up to 36 °, with bucking into logs of 6 m length. Time and motion study were used to evaluate the production process and determine productivity modeling. Costs were divided into fixed and variable. The sensitivity analysis consisted of the variation ($\pm 20\%$) of the six most important variables and plotted on the diagram *spiderplot*. Modeling of production costs were performed and obtained internal return rates and machines equilibrium points. Results showed an operating cost for the harvester US \$ 145.36 h⁻¹ and for the *forwarder* US \$ 125.24 h⁻¹, 80% of the costs represented by items of maintenance and repairs, cost of fuel and depreciation. A sensitivity analysis showed that with a real economy of 10% in each of the items with the highest expression, it is obtained a reduction of 16% in operating cost of the harvesting system. The harvester, working towards ascent, showed higher productivity in overthrows and trees processing, being on average 6.25% higher than operating on a slope. The *forwarder*, operating in the displacement loaded downhill has proportioned a greater capacity to extract timber, being on average 20% higher than uphill.

The use of modeling allowed determining the performance and operating costs in the activities of harvesting and logging of cut-to-length timber in slope up to 36°.

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil vem ganhando muito espaço no mercado internacional, em virtude das condições favoráveis ao desenvolvimento das principais cadeias produtivas de florestas plantadas, gerando mais renda, maior arrecadação de tributos e aumento de empregos.

Grandes multinacionais migraram para a América do Sul para estabelecerem vastas plantações de eucalipto, gerando grandes projetos (SPINELLI *et al.*, 2009). Em 2010, segundo a ABRAF (2011), a área plantada de florestas de eucalipto, para fins comerciais no Brasil, foi de 4,75 milhões de hectares.

A área florestal tem contribuído para o aumento de renda do país, ficando acima da meta estipulada pelo Banco Central. O valor bruto da produção florestal (VBPF), estimado em 2010, para o setor de florestas plantadas, correspondeu a R\$ 51,8 bilhões, valor 20,7% superior em relação ao observado em 2009. O setor gerou 4,7 milhões de postos de empregos, representando 23,6% acima do registrado em 2009 (ABRAF, 2011).

Os avanços tecnológicos em melhoramento genético, em manejo, em mecanização da colheita e em transporte florestal, proporcionaram ganhos significativos na produtividade e nos processos operacionais de reflorestamento (YONEZAWA, 2010).

As boas condições de solo, o clima e o relevo favorável tornaram o Brasil competitivo às culturas florestais proporcionando maior produtividade das máquinas colhedoras de madeira.

A mecanização florestal teve início na década de 70, resultando em aumento do rendimento e redução dos custos de produção na colheita de madeira tornando-o competitivo e lucrativo, como propicia o mercado global.

Embora as máquinas florestais sejam produtivas, elas estão exposta às diversas variáveis, exigindo maiores conhecimentos na decisão do planejamento das operações, estando sujeitas aos fatores ambientais, que podem até restringir seu uso, como: densidade do talhão; topografia do terreno; tipo de solo; volume por árvore; distância de extração entre outros.

Os custos de colheita podem chegar a mais de 50% do custo total da madeira e podem ser reduzidos com uso de máquinas específicas e ensaios em nível de campo, com o intuito de alcançar a realidade da produtividade e dos custos de produção, obtido a partir de estudos detalhados de tempos e movimentos do mecanismo colheita.

A colheita mecanizada é um processo contínuo de melhorias das condições de trabalho, da redução do custo final da madeira posto na fábrica e da necessidade, de regular o fornecimento e redução nos índices de acidentes de trabalho.

Dependendo do grau de detalhamento do estudo e das dimensões da rede viária, grande quantidade de dados é gerada, tornando-se complexa a sua organização e análise. O uso de aplicativos que possibilitem organizar, armazenar, transferir e manipular esses dados são ferramentas úteis na gerência de estradas (EMMERT, 2010).

O uso *softwares* de programação pode criar ferramentas de planejamento e gerenciamento bem avançadas, como, por exemplo, o planejamento das operações florestais, com princípio da otimização das áreas a serem colhidas com a malha viária, usada para o transporte, utilizando princípios do Sistema de Informações Geográficas (SIG), visando evitar falhas operacionais.

A colheita florestal em áreas acidentadas ou em condições topográficas desfavoráveis, exige um alto nível de planejamento e detalhamento (LIMA; LEITE, 2008). Simões e Fenner (2010), afirmam que a realização de estudos sobre as variáveis que influenciam a produtividade das operações florestais tornaram-se imperativas, visando a minimização dos custos e a otimização operacional.

Para intervir no sistema produtivo e adotar estratégias de racionalização, é necessário que se conheça, detalhadamente, todo o processo, pois só assim será possível atuar nos pontos deficientes (MINETTE *et al.*, 2008).

Fenner (2006) define o planejamento da produção florestal como

[...] organização estrutural das atividades de produção de madeira (e outros bens e benefícios oriundos da floresta) através de técnicas analíticas, com o objetivo de se indicar opções de manejo que contribuam da melhor forma para atender os objetivos do empreendimento e da coletividade.

Não obstante, é necessário conhecer o comportamento-limite de operação das máquinas de colheita, relacionando os fatores da declividade do terreno e os volumes de madeira por árvore, que podem interferir diretamente nas condições operacionais.

Assim, o sucesso de qualquer empreendimento florestal passa, necessariamente, por um adequado e rigoroso planejamento da colheita florestal, com o objetivo de aumentar a produtividade e, conseqüentemente, a produção. Por isso, deve-se, antes de iniciar as atividades de colheita, elaborar um planejamento criterioso por área, compilando-se todas as informações críticas, de modo a atender aos objetivos propostos no planejamento.

Este estudo está apresentado em dois capítulos. O primeiro objetivou-se efetuar a modelagem técnica da produtividade e o segundo avaliar economicamente um sistema de colheita mecanizada de toras curtas, utilizando o trator florestal *harvester* para derrubada e processamento das árvores e o trator florestal *forwarder* para extração das toras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. *Anuário estatístico: ano base 2010/ABRAF*. Brasília, DF, 2011. 130 p.

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S.; REZENDE, A. V.; ENCINAS, J. M. I. Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gerência de pavimentos em estradas florestais. *Ciência Florestal*, Santa Maria, RS, v. 20, n. 1, p. 81-94, 2010.

FENNER, M. I. *O fator tributário no planejamento estratégico para povoaamentos de **Pinus taeda***. 2006. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. Mecanização. In: MACHADO, C. C. (Org.). *Colheita florestal*. 2. ed., Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 43-65.

MINETTE, L. J.; SILVA, E. N.; MIRANDA, G. M.; SOUZA, A. P.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica da operação de extração de *Eucalyptus* spp. utilizando o trator autocarregável e o trator florestal transportador “forwarder” na região sul da Bahia. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v. 16, n. 3, p. 312-317, 2008.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do forwarder na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 40, n. 4, p. 711-720, 2010.

SPINELLI, R.; WARDB, S. M.; OWENDEC, P.M. A harvest and transport cost model for *Eucalyptus* spp. fast-growing short rotation plantations. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, 2009.

YONEZAWA, J. T. A evolução da colheita mecanizada. *Revista Opiniões*, jun.- ago. 2010. p. 41.

MODELAGEM TÉCNICA DE UM SISTEMA DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA DE TORAS CURTAS

Resumo: Objetivou-se com o presente trabalho modelar matematicamente a interdependência das tendências de produtividade em operação com o trator colhedor *harvester* e com o trator transportador autocarregável *forwarder*, em relação aos fatores das variáveis de declividade do terreno, do volume de madeira das árvores e da distância de extração, variando a direção da operação de colheita em aclive e declive. As áreas de florestas plantadas foram de clones híbridos de eucalipto, tendo como caracterização do plantio o espaçamento de 3,00 m entre plantas por 3,33 m entre filas, com 6,0 a 9,5 anos de idade. Cada unidade experimental foi composta por quatro linhas, com 25 árvores em cada linha. Foram demarcadas unidades experimentais relacionadas aos fatores de declividade do terreno e da produção de madeira da floresta, determinadas 190 unidades amostrais, variando de 0,132 a 0,423 m³ por árvore sem casca e declividade de até 36°, com traçamento em toras de 6 m de comprimento. Foi utilizado o estudo dos tempos e movimentos para avaliar o processo produtivo e modelar a produtividade no período de 24 horas. As análises foram processadas utilizando o *software* R. Os resultados demonstraram maiores tempos gastos nas operações com o colhedor *harvester* John Deere, modelo 1270D, quando a declividade do terreno foi aumentada e o volume por árvore diminuído, expressando na queda da produtividade; obtendo-se uma produtividade de 42,13 m³ h⁻¹ em aclive e 31,62 m³ h⁻¹ em declive, para declividade do terreno de 10° e floresta com volume sem casca de 0,274 m³ arv⁻¹, apresentando maiores produtividades na operação no sentido de aclive. Deslocamentos menores de extração e menores declividade do terreno aumentou o tempo de operação do *forwarder* John Deere, modelo 1710D, diminuindo sua produtividade. A queda de produtividade para a operação em aclive foi de 20%, quando comparada com a extração em declive, na qual proporcionou maior capacidade de extração de madeira. A modelagem permitiu determinar os desempenhos operacionais nas atividades de colheita e extração de madeira e permitiu a operação de colheita mecanizada de toras curtas em declividades do terreno de até 36°.

Palavras-chave: *harvester*, *forwarder*, corte; extração; ciclo operacional; produtividade.

TECHNICAL MODELING OF A CUT-TO-LENGTH MECHANIZED TIMBER HARVESTING SYSTEM

Abstract: This paper aimed to mathematically model the interdependence of productivity trends in operation with the tractor harvester and with tractor carrier self loading *forwarder*, in relation to variable factors of terrain slope, trees wood volume and distance extraction, varying the direction of the harvesting operation uphill and downhill. The areas of planted forests were of eucalyptus hybrid clones were planted eucalyptus, characterized by plant spacing of 3.00 m by 3.33 m between plants rows, with 6.0 to 9.5 years. Each experimental unit consisted of four rows with 25 trees in each row. Experimental units were demarcated related to factors of slope of the terrain and the production of wood from forest, some 190 sampling units, ranging from 0.132 to 0.423 m³ per tree without bark and slope up to 36 °, with bucking into logs of 6 m length. The study of time and motion was used to evaluate the production process and model productivity within 24 hours period. Analyses were processed using the software R. Results showed more time spent on operations with harvester John Deere, model 1270D, when the terrain slope was increased and decreased volume per tree, expressing the productivity decrease, resulting in a yield of 42,13 m³ h⁻¹ uphill and 31,62 m³ h⁻¹ in slope to the terrain slope of 10 ° and forest with a volume without bark of 0,274 m³ arv⁻¹, with higher yields in the operation in uphill. Smaller extraction displacements and lower slope of the land increased the operating time of the *forwarder* John Deere, model 1710D, reducing their productivity. The productivity decrease for the operation uphill was 20% when compared with slope extraction, which gave a greater capacity for logging. Modeling allowed the determination of operating performance in the activities of harvesting and extraction of timber and allowed the operation of mechanical harvesting of cut-to-length in land slope up to the 36°.

Keywords: harvester, forwarder, cutting, extracting, the operational cycle productivity.

1 Introdução

A colheita florestal é uma das atividades que demanda maior importância econômica no custo final de produção da madeira, sendo que sua produtividade operacional varia em função da declividade do terreno, do volume de madeira por árvore, entre outros fatores.

A maior demanda por madeira comercial de eucalipto, a escassez e o preço da mão de obra têm contribuído para o incremento da mecanização, uma vez que além de agilizar o processo de extração de madeira vem minimizar os custos, permitindo melhor gestão das operações (SPINELLI, 2009).

As máquinas colhedoras são basicamente utilizadas em dois sistemas de colheita mecanizada: o de toras curtas (*cut-to-length*) e o de toras longas (*tree-length*). Os métodos de colheita mecanizada de madeira de toras curtas tornaram-se amplamente utilizados em muitos países, como Suécia (98%), Irlanda (95%) e Finlândia (91%), em comparação com o método semimecanizado (KARJALAINEN *et al.*, 2001).

A utilização de máquinas de alta tecnologia, como o *harvester*, aumentou consideravelmente o rendimento operacional da colheita, a segurança no trabalho e tornou os custos da operação entre os mais competitivos do mundo, em virtude da máquina ser 880% mais produtiva que uma motosserra (MAGALHÃES; KATZ, 2010).

As empresas do setor florestal brasileiro vêm adotando medidas para melhor adequar o manejo da cultura florestal, de forma a promover condições de mecanização e redução dos custos, como: florestas homogêneas de alta produtividade; fustes retilíneos; galhos finos; desrama natural; fácil descascamento; e plantios em linhas perpendiculares em curva de nível.

As empresas do maciço florestal têm modernizando seu processo de mecanização, por meio da importação de máquinas especializadas para colheita de madeira, necessitando de informações precisas sobre em quais situações as máquinas têm sua capacidade produtiva maximizada, considerando os aspectos técnicos e econômicos (BURLA, 2008).

Após a aquisição dessas máquinas surge a necessidade de um planejamento técnico exclusivo para atender, principalmente, as condições florestais brasileiras.

A precisão na adequação ótima dos recursos está fundamentada no processo de pesquisa científica aliada ao planejamento operacional das máquinas na colheita da madeira. O planejamento, de um modo geral, visa otimizar os recursos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, devendo, para isto, atingir conhecimentos específicos sobre todas as variáveis que influenciam no processo de colheita.

Um dos principais passos do planejamento é delinear qual será o sistema de colheita que será empregado na área. De modo geral, estes sistemas devem estar sempre relacionados aos tipos de máquinas que serão usadas, tamanho e volume das árvores e intensidade das operações de colheita (AKAY *et al.*, 2004). Atualmente, pode-se dizer que o principal sistema de colheita florestal utilizado no Brasil é o de toras curtas.

No Brasil, o método de colheita de toras curtas vem sendo utilizado em crescente escala, sendo ele o mais difundido, em decorrência do aumento da produtividade e da redução dos custos de produção, tornando os processos de trabalho na área florestal mais lucrativo.

O sistema de toras curtas caracteriza-se pela realização de todos os processos se complementarem no próprio local onde a árvore foi derrubada e emprega-se o *harvesters* e os *forwarder*, para produção de toras que medem por volta de 6 m, no máximo.

O colhedor *harvester* é um trator florestal definido como automotriz constituído de uma máquina base automotriz com rodado de pneus BPAF (baixa pressão e alta flutuação), esteiras metálicas ou mistos (pneus com esteiras), com uma lança hidráulica para alcance das árvores e um cabeçote que pode executar, simultaneamente, as operações de derrubada, desgalhamento, descascamento, traçamento e embandeiramento da madeira.

O transportador *forwarder* é uma máquina definido como um trator florestal automotriz com uma caixa de carga para depósito de madeira, uma lança hidráulica (grua) e garra para o autocarregamento, projetada para o processo de extração de madeira do interior da floresta para as margens das

estradas ficando dispostas em pilhas de madeira prontas para efetuar o transporte.

O desempenho dessas máquinas é afetado por diversas variáveis operacionais e por condições da floresta, do relevo e do clima, sendo que as melhores condições operacionais aumentam a produtividade, e os custos de produção, conseqüentemente, diminuem. Assim, o aumento da declividade do terreno, o aumento da distância de extração e a diminuição do volume de madeira por árvore reduzem a produtividade das máquinas de colheita.

Os volumes médios de madeira das árvores e as distâncias de extração são fatores cruciais nas operações que afetam o direcionamento, de forma clara, das operações de corte e extração de madeira (JIROUŠEK *et al.*, 2007).

Lima e Leite (2008) afirmaram que a declividade do terreno é uma das variáveis operacionais mais importantes, podendo tornar inviável o tráfego de máquinas no interior da floresta, uma vez que a estabilidade e a segurança ficam comprometidas.

Dentre as diversas ferramentas administrativas mundialmente difundidas para avaliar o processo produtivo, o estudo dos tempos e movimentos obtiveram maior consagração, sendo bastante utilizado no âmbito das empresas florestais (FERREIRA, 2011).

O estudo dos tempos e movimentos é uma técnica que determina o tempo consumido em cada um dos elementos do ciclo de trabalho, permitindo a organização do trabalho, com o objetivo de otimizar o sistema operacional, tendo o mínimo de tempos improdutivo; obtendo a produtividade e o custo por unidade produzida em relação aos fatores relevantes na colheita; e, em combinações com medidas ergonômicas, estabelecendo o esforço humano requerido em cada uma das atividades executadas (SEIXAS *et al.*, 2004).

A análise técnica é uma ferramenta usada para quantificar as produtividades das máquinas em determinadas condições de operação, identificando os pontos críticos.

De modo geral, é necessária e urgente a procura de técnicas que tornem a colheita e o transporte da madeira mais racional, visando o maior aproveitamento do material lenhoso (JACOVINE *et al.*, 2001).

A modelagem técnica, correção das características específicas das operações a um modelo determinístico de produção, tornou-se uma ferramenta capaz de auxiliar na tomada de decisão para que se possa definir o momento correto de avançar a mecanização da colheita florestal em novas áreas, como as encostas dos terrenos. No entanto, ainda não há modelos de simulação disponíveis que consigam prever a real produtividade das máquinas, em função das variações que as plantações estão inseridas.

Em razão dos problemas expostos e considerando a tendência de maior utilização do sistema de colheita de toras curtas, o objetivo do presente trabalho foi modelar matematicamente a interdependência das tendências de produtividade em operação com o trator colhedor *harvester* e com o trator florestal transportador autocarregável *forwarder*, em relação aos fatores das variáveis de declividade do terreno, do volume de madeira das árvores e da distância de extração, variando a direção da operação de colheita em aclave e declive.

2 Material e métodos

2.1 Localização das áreas de pesquisa

A área do presente trabalho encontra-se localizada no Estado de Minas Gerais, na região do Rio Doce, especificamente nos municípios de Gonzaga, MG, tendo como referência as coordenadas UTM 767.000m W e 7.921.000m S, zona 23 sul, datum SAD-1969 e no município de Coroaci, MG, tendo como referência as coordenadas UTM 778.500m W e 7.939.000m S, zona 23 sul, datum SAD-1969 (Figuras 1 e 2). Nas Figuras 3 e 4 encontram-se as áreas experimentais em mapas em faixas de declividades.

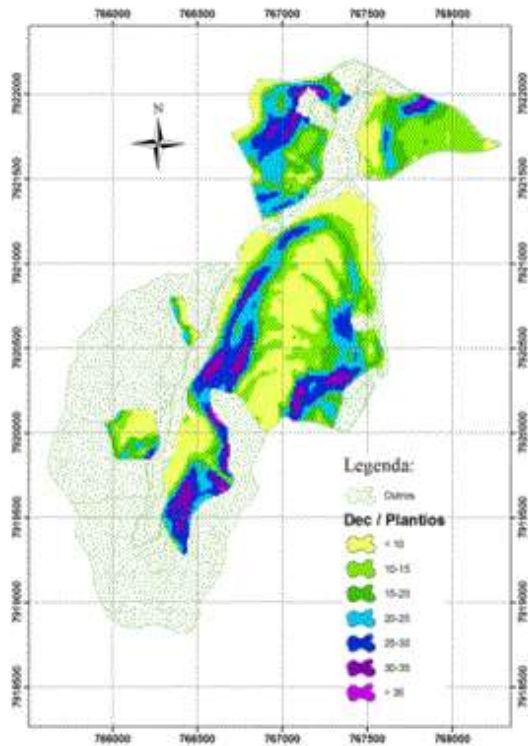
As áreas plantadas de florestas são constituídas de variedades de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, tendo como característica genética a alta produtividade em regime de primeira rotação, com espaçamento de 3,00 m entre plantas por 3,33 m entre filas, com 6,0 a 9,5 anos de idade. Na região de estudo predomina o solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo.



Figura 1 – Localização da área de pesquisa (Gonzaga, MG).

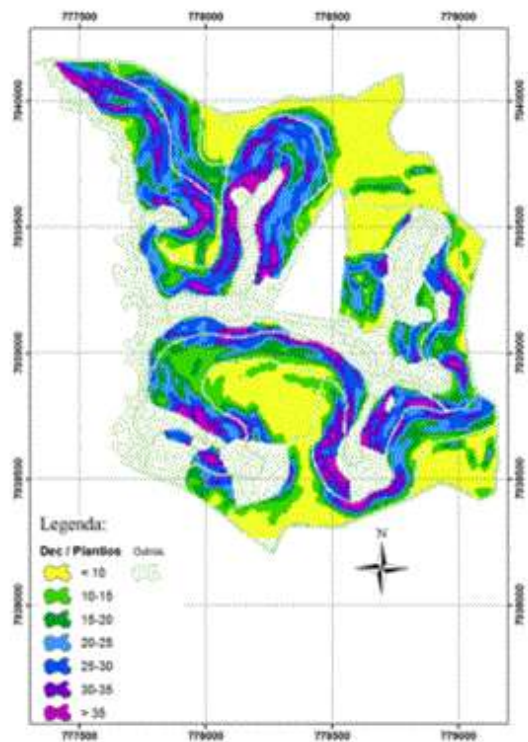


Figura 2 – Localização da área de pesquisa (Coroaci, MG).



Outros = áreas de preservação, rios, estradas, aceiros; Dec/Plantios = faixa de declividades dos plantios de eucalipto.

Figura 3 – Mapa de declividade (em graus) das áreas plantadas do projeto Darcy, Gonzaga, MG.



Dec/Plantios = faixa de declividades dos plantios de eucalipto; e outros = áreas de preservação, rios, estradas e aceiros.

Figura 4 – Mapa de declividade (em graus) das áreas plantadas do projeto Matuzalém, Coroaí, MG.

O clima do local do experimento é caracterizado como tropical, com clima quente com chuvas de verão, tendo uma precipitação média anual de 1.350 mm, com temperatura média anual de 25,2 °C e umidade relativa média do ar anual de 65,2% (CARNEIRO *et al.*, 2003).

Dois meses antes de iniciar os trabalhos foi realizada uma operação de limpeza da área (corte do sub-bosque), por meio de uma roçada, dentro de cada unidade amostral, com intuito de homogeneização e eliminação das variações, principalmente, o campo visual dos operadores.

2.2 Unidade de amostragem

Foram demarcadas unidades experimentais relacionadas aos fatores de declividade do terreno e da produção de madeira da floresta. Cada unidade experimental foi composta por quatro linhas com 25 árvores em cada, totalizando 100 indivíduos e 975 m² de área. As parcelas foram demarcadas com o auxílio de uma equipe responsável pelo inventário, para o efeito do volume de madeira por árvore. Para identificar os limites da unidade amostral utilizou-se um *spray* de coloração luminosa vermelho, para facilitar a visualização dos operadores das máquinas no interior da floresta.

2.3 Determinação da declividade das unidades amostrais

Para a determinação dos índices de declividade utilizou-se um clinômetro da marca Haglôf Sweden, para aferir a inclinação do terreno em graus, do início ao fim das parcelas.

2.4 Determinação do volume das unidades amostrais

Foi realizado o inventário de todas as unidades amostrais (experimentais), sendo medidos os diâmetros a 1,3 m de altura (DAP) em todas as árvores; e determinando o volume médio por árvore da parcela e o volume total individualizado por unidade amostral.

Desse modo, procurou-se estimar o comportamento operacional das máquinas envolvidas no processo da colheita de eucalipto, variando o grau

de declividade e o volume de madeira das árvores, permitindo que se pudessem quantificar principalmente os índices de produtividade e as dificuldades encontradas na operação avaliada.

2.5 Coleta de dados

Foi empregada a amostragem sistemática, sendo o número de ciclos operacionais estimados com a utilização da metodologia utilizada por Barnes (1968), com o intuito de definir o número de observações necessárias para proporcionar um erro de amostragem admissível máximo de 5%, a 95% de probabilidade, por meio da equação 1.

$$n \geq \frac{tCV}{E^2} \quad \text{eq. 1}$$

em que

n = número mínimo de ciclos necessários;

t = valor de t, para o nível de probabilidade desejado e (n-1) graus de liberdade;

CV = coeficiente de variação, (%); e

E = erro de amostragem admissível a 95% de probabilidade.

Conhecendo-se o número de observações, definiu-se a quantidade de unidades amostrais a serem exploradas em cada direção de corte e extração (nas direções de alicive e declive), que proporcionassem o número mínimo de observações a serem coletadas. A partir desse ponto, foram utilizadas observações acima do estimado para melhores ajustes dos modelos que fidedignamente representassem os dados ajustados, explicando com maior precisão os procedimentos estudados.

Durante a coleta de dados foram realizados acompanhamentos em campo, registrando-se os tempos gastos nas jornadas das atividades operacionais das máquinas, com a utilização do método de estudo contínuo, conforme metodologia adotada para o estudo de tempos e movimentos, utilizada em trabalhos semelhantes por Barnes (1968), Valverde (1995), Moreira (2000), Lopes, *et al.* (2009) e Oliveira (2009), Paula (2011).

2.6 Cronograma das atividades

Os trabalhos em campo do módulo de colheita mecanizado foram executados durante os meses de janeiro de 2010 a maio de 2011. As operações foram realizadas durante um período de cinco meses, abrangendo os meses de março a maio de 2010 e de 2011; os demais períodos foram destinados ao planejamento, à determinação e à identificação das unidades amostrais.

2.7 Características técnicas das máquinas analisadas

O estudo compreendeu a utilização do módulo de colheita florestal mecanizada, constituído pelo trator de corte florestal *harvester*, para as operações de derrubada e processamento, e do trator transportador florestal *forwarder*, para extração da madeira do interior do talhão para as margens das estradas.

2.7.1 *Harvester*

O *harvester* empregado no trabalho foi o da marca John Deere, modelo 1270D, com motor John Deere 6081 e potência de 215 hp (160 kW), transmissão hidrostática, cabeçote *harvester* da marca John Deere, modelo 270, com capacidade de corte de 4 até 62 cm de diâmetro (Figura 5) (JOHN DEERE, 2012). Foram utilizados pneus traseiros lastrados, com 50% de água em seu interior. A máquina apresentava-se no início do experimento com 16 mil horas de uso.

O rodado é constituído de pneus BPAF (baixa pressão e alta flutuação), com três eixos motrizes com chassi articulado e apresenta esteiras metálicas unindo os pares dianteiros. Esta máquina possui velocidade de trabalho à frente e à ré de até 8 km h⁻¹ e máxima de 23 km h⁻¹, para deslocamento utilizado apenas em estradas e sem carga.

A sua lança é hidráulica, com comprimento de 10 m, e com um cabeçote de corte e processamento na extremidade final para alcance das árvores.



Figura 5 – *Harvester* marca John Deere, modelo 1270D, operando no corte de eucalipto na declividade de 33°.

O cabeçote apresenta-se dotado de braços acumuladores (prensos), com objetivo de agarrar, “conectar” e desgalar as árvores; e o sistema de corte é composto por uma motosserra de sabre hidráulico. Após o corte, os rolos têm a função de tracionar o fuste e descascar os toretes. No início do estudo o cabeçote apresentava quatro mil horas de utilização

Todo o acionamento dos mecanismos é realizado pelo operador na cabine articulada com nivelamento de 21° angular para os sentidos em aclave ou em declive, por meio do acionamento de um *joystick* e uma variedade de botões localizados no painel.

2.7.2 Forwarder

O *forwarder* utilizado foi o da marca John Deere, modelo 1710D, motor John Deere 6081 diesel, com potência de 215 hp (160,3 kW), razão transmissão hidrostática, capacidade de carga de 17 t, uma garra Hultdins, modelo 360S, com capacidade de 0,36 m² de área, ligado a lança hidráulica, com comandos acionados por *joystick* e uma variedade de botões localizados no painel (Figura 6).



Figura 6 – *Forwarder* marca John Deere, modelo 1710D.

O *forwarder* autocarregável é constituído basicamente de um trator florestal com cabina de comando, caixa de carga, lança hidráulica (grua) e garra. A caixa de carga possui quatro pares de furos para acomodação da madeira, comprimento de 5,56 m e largura de 2,95 m. A sua garra é formada por rotator, coluna, braço, lança telescópica, para carregamento e descarregamento de madeira por meio da garra, tendo alcance máximo de 8,5 m, capaz de operar com até 1.185 kg nessas condições.

O rodado é constituído de pneus BPAF (baixa pressão e alta flutuação), com quatro eixos motrizes, com chassi articulado. Apresenta esteiras metálicas unindo os pares dianteiros e traseiros. Possui a velocidade de trabalho à frente e à ré de até 8 km h⁻¹ e máxima de 23 km h⁻¹ para deslocamento, utilizada apenas em estradas e sem carga.

2.8 Sistema de colheita

Empregou-se o sistema de colheita de toras curtas (*cut-to-length*), com traçamento no tamanho em torno de 6 m. Foram avaliadas as atividades no período de três turnos diários operacionais, com 8 horas em cada. No período diurno, o programa de operação teve a prioridade para as operações

em unidades amostrais de maiores declividades, acima de 30°, pois, em operações no período noturno, testes anteriores demonstraram alto índice de periculosidade, em função do fato de haver menor visibilidade por parte dos operadores, causada pelas más condições em ausência de luz natural.

As linhas de plantio eram direcionadas perpendiculares às curvas de nível “morro acima”.

2.8.1 Sequência de trabalho do *harvester*

O *harvester* executou a operação de corte em uma faixa de corte de quatro linhas, sendo a sequência na operação constituída pelo posicionamento de seu cabeçote na árvore; pela realização da derrubada, pelo direcionamento da queda da árvore e pelo processamento de desgalha; e pelo descascamento e traçamento do fuste em toras. As toras foram posicionadas à esquerda e perpendicular ao sentido de deslocamento da máquina, formando os feixes para serem extraídos pelo *forwarder* (Figura 7).

2.8.2 Sequência de trabalho do *forwarder*

A sequência de operação de trabalho de extração da madeira executada pelo *forwarder* foi constituída pelo seu deslocamento da estrada até a unidade amostral; realização do autocarregamento das toras processadas; posterior deslocamento da carga até as margens das estradas; e o descarregamento. No final desse processo, as árvores foram acomodadas em pilhas (Figura 8).

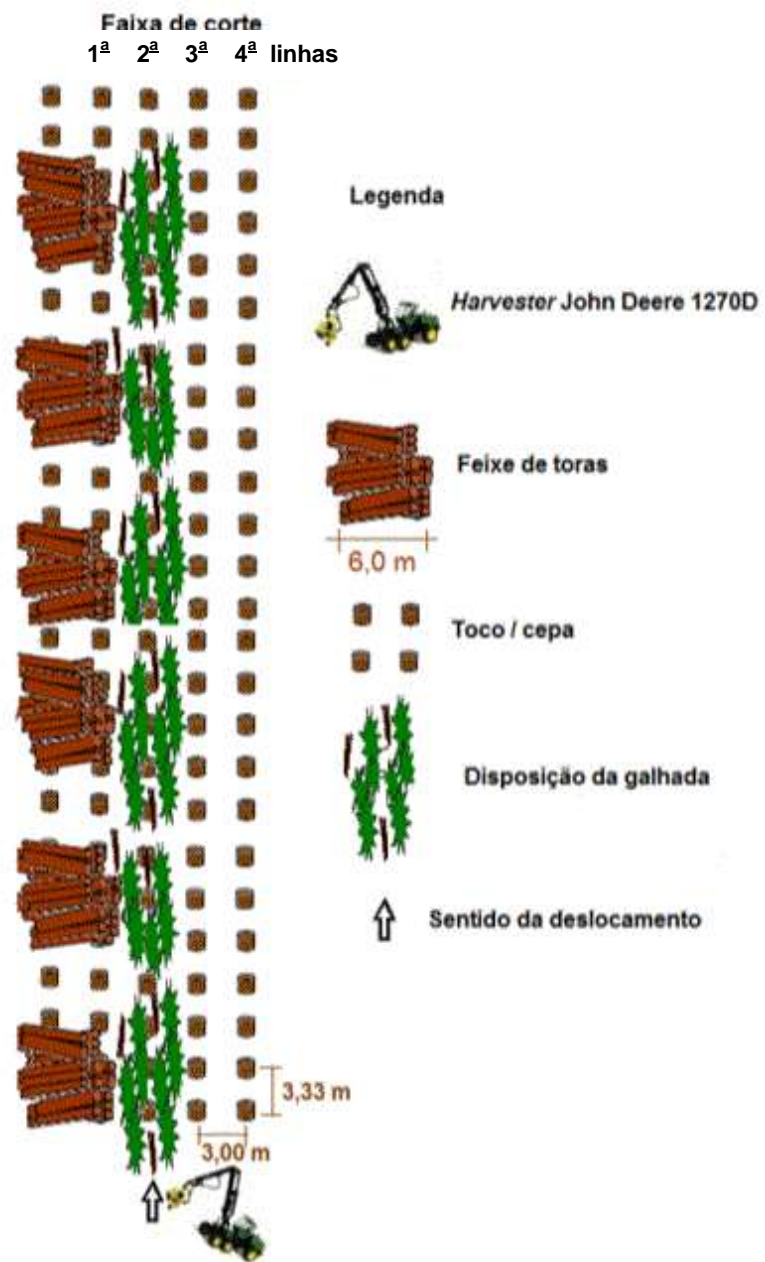


Figura 7 – Sequência operacional do *harvester* em cada unidade experimental.

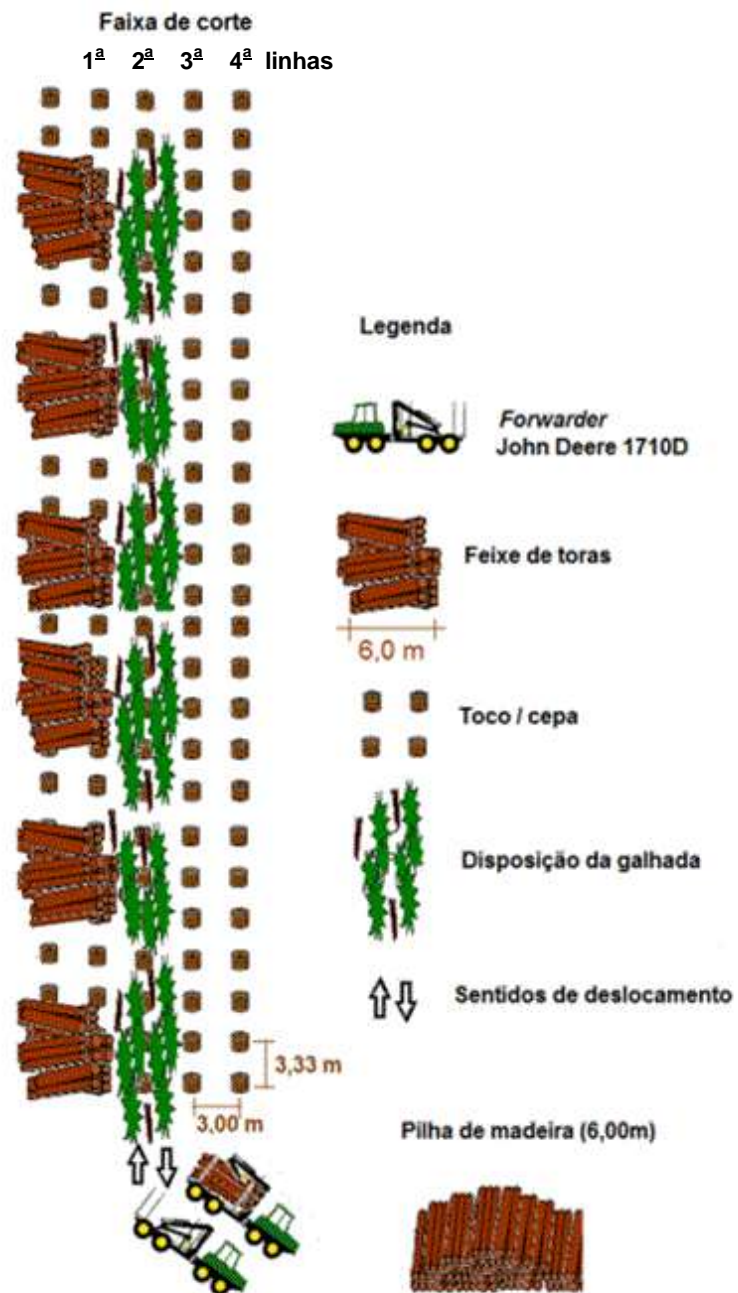


Figura 8 – Sequência operacional do *forwarder* em cada unidade experimental.

2.9 Descrição técnica das atividades

Para coleta dos dados, foi feita a divisão dos movimentos executados durante as realizações das operações. Foram utilizados formulários para registrar todas as ocorrências durante a jornada de trabalho (horas disponíveis; horas trabalhadas; tempo parado, entre outros) e a caracterização do local de trabalho (inclinação do terreno; volume médio de madeira por árvore na parcela; número da parcela; condições climáticas; e condições operacionais). Os formulários utilizados foram divididos de acordo com o tipo de máquina em operação (Apêndice A).

Os tempos gastos foram cronometrados com o auxílio de três cronômetros digitais sexagesimal da marca Oregon Scientific, tendo precisão de 0,01 s, utilizando-se um para medir o tempo de operação do *harvester* e dois para o tempo de operação do *forwarder*.

2.9.1 *Harvester*

As operações iniciaram-se com o posicionamento do *harvester* à frente e à esquerda da parcela a ser colhida. O operador posicionou o cabeçote ao pé da árvore, com as facas e rolos abertos. No momento em que o cabeçote tocava o solo e a árvore a ser colhida, acionava-se o fechamento das facas e dos rolos do cabeçote comprimindo a árvore. Dava-se então o comando para efetuar o corte de derrubada, tombando a árvore à direita da máquina. Posteriormente, procederam-se o descascamento, desgalhamento e traçamento de cada árvore individualmente, sendo as toras dispostas em feixes. As operações foram finalizadas após o retorno da máquina ao início da parcela, com todas as árvores da parcela já processadas.

O *harvester* operou em uma faixa de corte com quatro linhas, sempre se deslocando sobre a segunda linha. A derrubada da faixa de corte realizou-se primeiramente pela 2ª linha, seguida pelas 1ª, 3ª e 4ª linhas, respectivamente.

As galhadas, com folhas e cascas das árvores, foram depositadas no sentido de deslocamento da máquina sobre a entrelinha da 2ª linha.

Foi registrado, operacionalmente, o tempo contínuo na operação e o retorno da máquina ao início da parcela, em dois sentidos de deslocamento, dividindo-os em duas direções de trabalho distintas, sendo: aclave, referente ao sentido de deslocamento do corte das árvores na parcela, sendo realizado no sentido morro acima (subindo); e declive, referente ao corte das árvores na parcela realizado no sentido morro abaixo (descendo).

2.9.2 Forwarder

A operação do *forwarder* iniciou-se com o posicionamento da máquina ao lado do local de formação das pilhas de madeira à margem da estrada onde iriam ser depositadas as toras, seguindo para a parcela e iniciando o autocarregamento até completar a carga. Em seguida, a máquina deslocou-se em direção à margem da estrada para o descarregamento, formando as pilhas de madeira em locais determinados no microplanejamento da colheita florestal.

A extração restringiu-se à madeira de cada parcela, mesmo quando a última carga não foi completa. Nesse caso, media-se a quantidade de madeira alojada no interior do compartimento de carga.

Foram coletados os tempos a partir do momento em que se iniciaram as operações nas unidades experimentais até o seu término, para as atividades de carregamento, descarregamento e deslocamento com e sem carga e limpeza, de acordo com a direção de deslocamento (aclave e declive) pelo *forwarder*, sendo:

- a atividade de carregamento refere-se ao tempo decorrido para recolher a madeira na unidade experimental e o autocarregamento até acomodação das toras no interior da caixa de carga da máquina;

- a atividade de descarregamento compreende o período em que se retira a madeira acomodada na caixa de carga até o posicionamento da pilha à margem da estrada;

- o deslocamento sem carga iniciou-se com o *forwarder* vazio e terminou com o início do autocarregamento;

- o deslocamento com carga iniciou com o *forwarder* carregado e terminou com o início do autodescarregamento;

- a operação de limpeza refere-se ao tempo decorrido para retirada de obstáculos e resíduos no local de formação das pilhas;
- as interrupções são referentes às pausas técnicas e pessoais;
- o sentido declive refere-se à extração da madeira realizada em direção morro abaixo (descendo), ou seja, a parcela encontra-se na altitude superior da estrada, realizando o deslocamento vazio em aclave; e
- o sentido aclave refere-se à extração da madeira realizada em direção morro cima (subindo), ou seja, a parcela encontra-se na altitude inferior da estrada, realizando o deslocamento vazio em declive.

2.10 Velocidades de trabalho

Para determinação das velocidades do sistema de extração da madeira de dentro da área colhida, computou-se a distância (percurso) da máquina em metros e o tempo em segundos, obtendo-se a velocidade. O percurso foi obtido com o auxílio de um distanciômetro da marca Bushnell, modelo Yardage Pro 600, tendo como referência a cabine da máquina, determinando as distâncias das viagens com carga e sem carga.

2.11 Disponibilidade mecânica

A disponibilidade mecânica refere-se à porcentagem do tempo de trabalho programado, em que a máquina está mecanicamente apta a realizar trabalho produtivo, desconsiderando-se, portanto, o tempo em que está em manutenção, determinada pela equação 2.

$$DM = \frac{(H - TPM)}{H} 100 \quad \text{eq. 2}$$

em que

DM = grau de disponibilidade mecânica (%);

TPM = tempo de permanência em manutenção (h); e

H = horas totais (h).

2.12 Eficiência operacional

Eficiência operacional é a porcentagem do tempo efetivamente trabalhado em relação ao tempo total programado para o trabalho, sendo calculada pela equação 3.

$$EO = \frac{He}{(He + Hp)} 100 \quad \text{eq. 3}$$

em que

EO = eficiência operacional (%);
He = horas efetivas de trabalho (h); e
Hp = horas paradas (h).

2.1.3 Produtividade operacional

A determinação da produtividade operacional das máquinas analisadas nesta pesquisa foi obtida mediante os dados do inventário realizado em cada unidade amostral, em que se obteve o valor de volume de madeira da unidade experimental. Com o acompanhamento das atividades de campo, obteve-se o tempo efetivamente trabalhado em cada unidade amostral. A produtividade das máquinas foi determinada em metros cúbicos de madeira sem casca por horas efetivamente trabalhadas ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), com o uso da equação 4.

$$P = \frac{Vol}{He} \quad \text{eq. 4}$$

em que

P = produtividade ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);
Vol = volume da unidade amostral (m^3); e
He = horas efetivas de trabalho (h).

A transformação do volume de madeira com casca (cc) para volume de madeira sem casca (sc) foi efetuada com base na porcentagem dos

dados médios dos clones testados, considerando uma redução de 13% do volume.

2.14 Pré-requisitos operacionais

No decorrer das operações das máquinas foram utilizados seis operadores, três para o *harvester* e três para o *forwarder*, distribuídos nos três turnos das operações. Os operadores foram devidamente treinados e com experiência de mais de dois anos de operação com as máquinas.

Sempre que necessário, com a finalidade de melhorar a acessibilidade das máquinas nas unidades experimentais, foram construídas rampas com o auxílio de uma retroescavadeira (Figura 9).



Figura 9 – Operação de construção das rampas para acessibilidade das máquinas analisadas.

Nas unidades amostrais com declividades acima de 25°, foi utilizado um trator agrícola de pneus, marca Massey Ferguson, modelo 297, motor diesel, marca Perkins, modelo 1006-6, com seis cilindros, potência nominal de 120 cv (79,47 kW), que acionava com a utilização da tomada de potência (TDP) um guincho da marca TMO modelo G, com capacidade para

guinchamento de 33 toneladas, com cabo de aço de 5/8" 6 x 25 ou 6 x 19, resistência à tração entre 1.770-2.160 N mm⁻¹, carga mínima de ruptura 18.700 Kgf (183,38 kN), usado para auxiliar no avanço das máquinas dentro das unidades experimentais (Figura 10).



Figura 10 – Trator agrícola Massey Ferguson 297 acionando o guincho da marca TMO (a) e em engate do cabo de aço para auxiliar no deslocamento do *harvester* (b).

O engate do cabo do guincho foi realizado pela traseira do *harvester*, para os deslocamentos em sentido de declive; e pela dianteira, para o deslocamento em aclave. Já, para o *forwarder* foi realizado o engate do cabo auxiliar pela caixa de carga, à qual as operações de extração foram em aclave e em declive.

Determinou-se a potência máxima requerida do cabo de aço, conforme a equação 5.

$$Pr = Fm Vm \quad \text{eq. 5}$$

em que

Pr = potência de tração requerida (kW);

Fm = força de tração média na barra de tração (kN); e

Vm = velocidade média de deslocamento (m s⁻¹).

2.15 Fatores analisados

Os dados foram inicialmente submetidos à análise exploratória, utilizando a metodologia de modelos aditivos generalizados. Os modelos aditivos generalizados, mais conhecidos como GAMs, do inglês *Generalized Additive Models*, são uma extensão dos modelos lineares generalizados, nos quais cada variável independente analisada não entra no modelo com o seu valor, mas, sim, adotando uma função não paramétrica de forma não especificada, que é estimada a partir de curvas de suavização; o modelo aditivo consiste da soma dessas funções. Sendo assim, não é necessário assumir uma relação linear e, ou, aditiva entre a variável dependente e a variável independente em estudo (HASTIE; TIBSHIRANI, 1990). A trajetória suavizada proporciona a visualização da forma das relações entre as variáveis estudadas.

Após as análises exploratórias foram realizados ajustes de modelos de superfície de resposta selecionando os de segunda ordem, quadrático (equação 6), relacionado à produtividade do *harvester* e o modelo linear simples (equação 7), para quantificarem o comportamento das atividades do ciclo operacional, comprovando ser precisos e de fácil aplicação.

$$f(x, \beta) \cong \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 Y + \beta_4 Y^2 + e \quad \text{eq. 6}$$

$$f(x, \beta) = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + e \quad \text{eq. 7}$$

em que

β = parâmetros a serem estimados;

X = conjunto de variáveis preditoras; e

e = o componente não explicado pelo modelo, sendo denominado como erro ou resíduo (BOX; DRAPER, 2007).

O modelo ajustado proporcionou a construção de gráficos de contorno, em que as variáveis preditoras são representadas nos eixos cartesianos e os valores de produtividade das máquinas são representados por linhas de níveis na região interna do gráfico. O gráfico possui coloração em tons de

cinza; quanto mais claro é o local no gráfico, maior é a grandeza da variável resposta.

A identificação e a exclusão de observações discrepantes (*outliers*) nos dados foram feitas antes do ajuste, com o auxílio de gráficos de dispersão e após o ajuste com inspeção de gráficos de resíduos e com o auxílio do teste de Bonferroni, para detecção de *outliers* em modelos lineares (WEISBERG, 2005).

Para verificar o atendimento do pressuposto de normalidade dos erros do modelo ajustado foi feito o teste Shapiro-Wilk (ROYSTON, 1982) e para verificar o atendimento dos demais pressupostos básicos de regressão linear (resíduos independentes; identicamente distribuídos; média zero; e variância constante σ^2) foi feita a análise gráfica dos resíduos.

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada utilizando as seguintes estatísticas:

- a) erro padrão residual e porcentual.
- b) coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado; e
- c) análise gráfica: produtividade do *harvester* observado *versus* estimado, com inclusão de uma linha com angulação de 45°: quando mais próximos os pontos estiverem dessa linha melhor é o ajuste.

As análises foram processadas utilizando o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

3 Resultados e discussão

A partir dos dados da avaliação das 190 unidades experimentais onde se variou a declividade do terreno em até 36° e o volume por árvore de madeira sem casca, variando de 0,1320 a 0,4255 m³ arv⁻¹, foi obtido o volume total da madeira colhido, para o estande médio de 1.033 árvores por hectare. Na Tabela 1 está relacionada a estatística descritiva dos valores de volume por árvore e declividade do terreno. Já, na Tabela 2 pode-se constatar o comportamento das unidades amostrais em relação às faixas de declividades.

Tabela 1 – Análise descritiva das unidades experimentais, em função do volume de madeira sem casca por árvore e a declividade em graus

Análise Descritiva	Volume por Árvore (m³ sc)	Declividade (°)
Média	0,274	18,13
Mínimo	0,132	0,00
Máximo	0,426	36,00
Erro padrão	0,004	0,59
Mediana	0,275	18,63
Moda	0,345	22,00
Desvio padrão	0,050	8,13
Variância	0,003	66,03
CV*	18,285	44,82

*CV = coeficiente de variação.

Tabela 2 – Amostragem das unidades experimentais, em função das faixas de declividade e do volume por árvore

Quantidade das Unidades Amostrais	Faixa de Declividade (°)	Volume por Árvore (m³ sc)		
		Média	Mínimo	Máximo
29	0,0 a 9,99	0,288	0,206	0,359
35	10,00 a 14,99	0,282	0,209	0,366
34	15,00 a 19,99	0,246	0,164	0,372
50	20,00 a 24,99	0,262	0,161	0,388
22	25,00 a 29,99	0,279	0,132	0,407
20	30,00 a 36,00	0,325	0,191	0,426

A potência de tração requerida para permitir a adequação do sistema de guincho, para auxiliar na tração das máquinas, deve-se apresentar na faixa de 47,16 kW (64,12 cv), constatado pela maior velocidade atingida nas operações com uso do guincho.

As modelagens dos aspectos técnicos das máquinas em análise encontram-se compiladas nos tópicos a seguir; e individualizadas por máquina.

3.1 Harvester

3.1.1 Estudo de tempo efetivo de operação

Por meio do estudo do tempo efetivo de operação foi possível determinar e avaliar o tempo gasto na derrubada e no processamento das árvo-

res, variando a declividade e o volume por árvore. Os resultados foram demonstrados em tempo (hora, minutos e segundos) para cada unidade experimental (Tabela 3). O *harvester* executou as atividades de corte, descasque, desganhamento e seccionamento das árvores, com 6,0 m de comprimento e diâmetro mínimo de 0,04 m.

Tabela 3 – Tempo efetivo médio de operação do *harvester*

Declividade (°)	Volume por Árvore (m ³ arv ⁻¹)	Tempo	
		Declive	Active
0 a 12	0,150	0:40:27	0:43:34
	0,200	0:47:25	0:46:80
	0,250	0:54:70	0:52:10
	0,300	1:02:30	0:54:52
	0,350	1:05:36	1:01:25
	0,400	1:11:21	1:05:49
12 a 24	0,150	0:41:50	0:46:11
	0,200	0:48:18	0:48:24
	0,250	0:59:12	0:58:50
	0,300	1:05:35	0:57:10
	0,350	1:19:59	1:06:26
	0,400	1:23:59	1:12:11
24 a 36	0,150	0:47:52	0:53:25
	0,200	1:01:19	0:59:17
	0,250	1:09:14	1:03:58
	0,300	1:22:49	1:12:42
	0,350	1:33:21	1:16:20
	0,400	1:48:51	1:24:31

A análise dos tempos do *harvester* encontra-se apresentada na Figura 11. Pode-se observar uma tendência de maiores tempos gastos nas operações com o colhedor *harvester* quando se aumentou a declividade do terreno e aumentou o volume por árvore, sendo que na direção de operação em declive gastou-se mais tempo por área para o corte das árvores, reduzindo a produtividade da máquina. Nesse caso, isto se deve ao fato da influência do campo visual e do desconforto biomecânico do operador, em virtude do ângulo do acento e da visibilidade da operação, que são influenciados principalmente nas maiores declividades (maior que 25°), causando desconforto na operação e, conseqüentemente, uma menor produtividade.

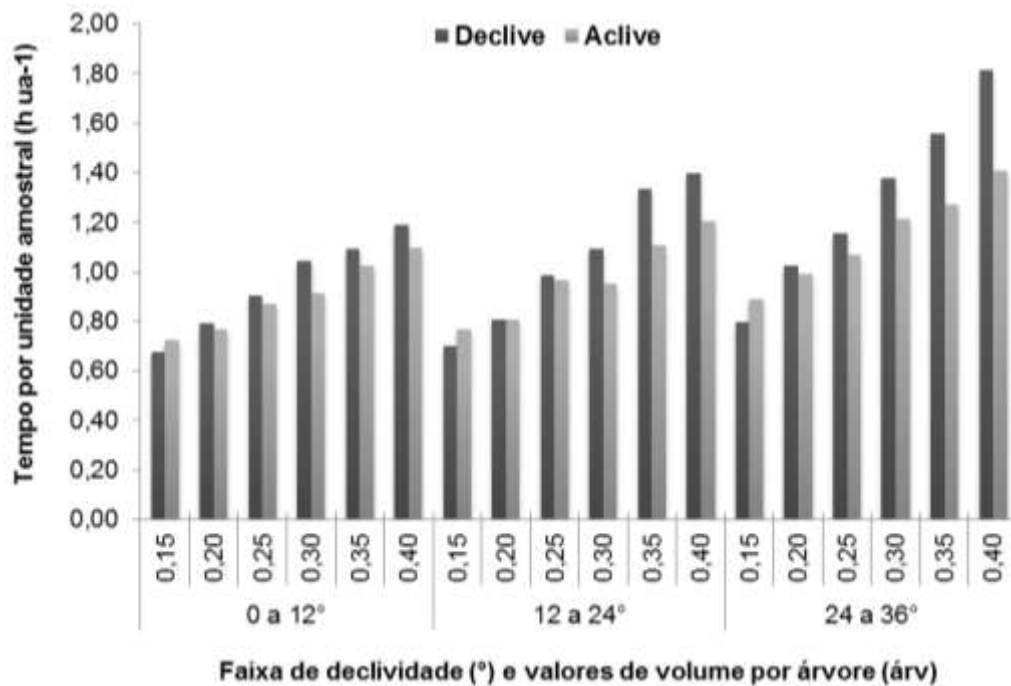


Figura 11 – Tempos médios para derrubada e processamento das unidades amostrais, em função da declividade e do volume por árvore pelo *harvester*.

Além dos notórios efeitos, os resultados indicam que, operando em colheita com inclinações acima de 28°, ocorre um maior aumento no tempo de operação. Isto foi em virtude da redução da estabilidade da máquina, maior atenção por parte do operador na realização das operações.

O tempo de engate do cabo para maiores declividade (acima de 28°) foi, em média, de 223 segundos, para as operações em active, sendo que, para as operações em declive, foi, em média, de 96 segundos. Esta diferença de tempo se deu em virtude da necessidade que o ajudante tinha na operação em active de arrastar o cabo da margem da estrada, onde se posicionava o trator com o guincho rebocador, passando pelo interior da parcela até fixar o cabo na dianteira do *harvester*. Entretanto, para o corte em declive, a máquina se posicionava próxima à estrada, não tendo que percorrer a parcela para fixar o cabo; neste caso, o engate era rápido e realizado pela parte traseira da máquina colhedora.

3.1.2 Produtividade das máquinas

3.1.2.1 Aclive

Na Figura 12 estão o comportamento dos dados e a análise exploratória da produtividade (95% dos dados entre as linhas tracejadas), em função da declividade e da distância de extração, para o direcionamento de corte em aclive.

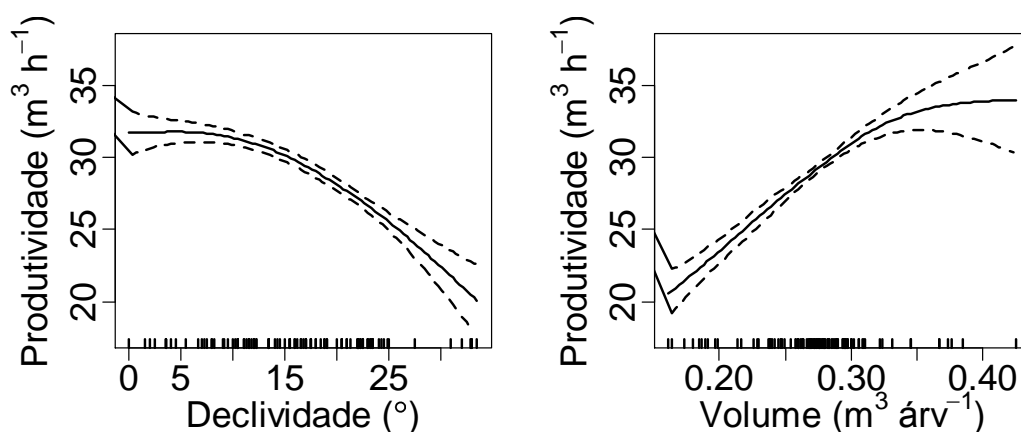


Figura 12 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do *harvester* no sentido de corte em aclive, em função da declividade e do volume por árvore.

Verifica-se na Figura 12 o comportamento da produtividade aumenta com a diminuição da declividade do terreno e com o aumento do volume por árvore.

Na Figura 13 estão compilados os resultados da modelagem da produtividade, em metros cúbicos, de madeira sem casca por árvore, para a direção de corte em aclive. Os dados demonstram que a produtividade é influenciada pela declividade do terreno e, principalmente, pela distância de extração.

Na Figura 13 verificam-se maiores produtividades ($m^3 h^{-1}$) nas menores declividades e com maiores volumes por árvore e verifica-se que o aumento da declividade do terreno e a diminuição do volume por árvore traduz na queda da produtividade, com as interações das variáveis. O comportamento da produtividade evidenciou as suas curvas características, em

função do volume por árvore e da declividade do terreno. De modo geral, para o volume por árvore, o modelo de produtividade do corte em aclive é apresentado pela equação 8.

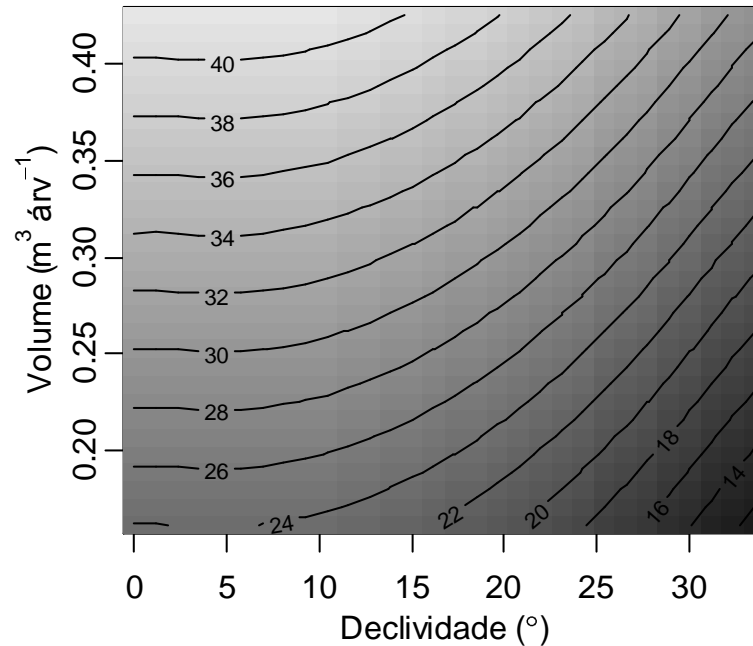


Figura 13 – Produtividade do *harvester* ($m^3 h^{-1}$) de madeira sem casca no sentido de operação em aclive, em função da declividade do terreno e do volume por árvore, segundo modelo proposto.

$$Pha = 0,062 - 0,015d^{2***} + 0,420d^* - 103,6v^2 + 143,3v^{***} - 0,970dv \text{ eq. 8}$$

$$r^2 \text{ ajustado} = 0,8166$$

$$p\text{-valor: } < 2,2e-16$$

em que

Pha = produtividade do *harvester* em aclive ($m^3 h^{-1}$);

d = declividade ($^\circ$); e

v = volume por árvore (m).

Na Tabela 4 observa-se a significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do colhedor *harvester* operando na direção de aclive. Figura 14 verifica-se a produtividade observada e estimada e o histograma dos resíduos.

Verifica-se que inclinações do terreno até 15° , em média, não influenciam na produtividade do *harvester*, evidenciando que, para essas declividades, a variável de grande impacto é o volume por árvore, pois árvores de

maiores volumes proporcionam maior metragem colhida por unidade de tempo.

Tabela 4 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *harvester* operando em aclive

Parâmetros	Estimativa	Erro Padrão	t Calculado	p-Valor
Intercepto	0,062	4,315	0,014	0,9886
d^2	-0,015	3,497	-4,362	0,0000***
d	0,420	0,212	1,195	0,0497*
v^2	-103,600	65,960	-1,571	0,1191
v	143,300	29,145	4,821	0,0000***
$d \times v$	-0,970	0,803	-1,207	0,2300

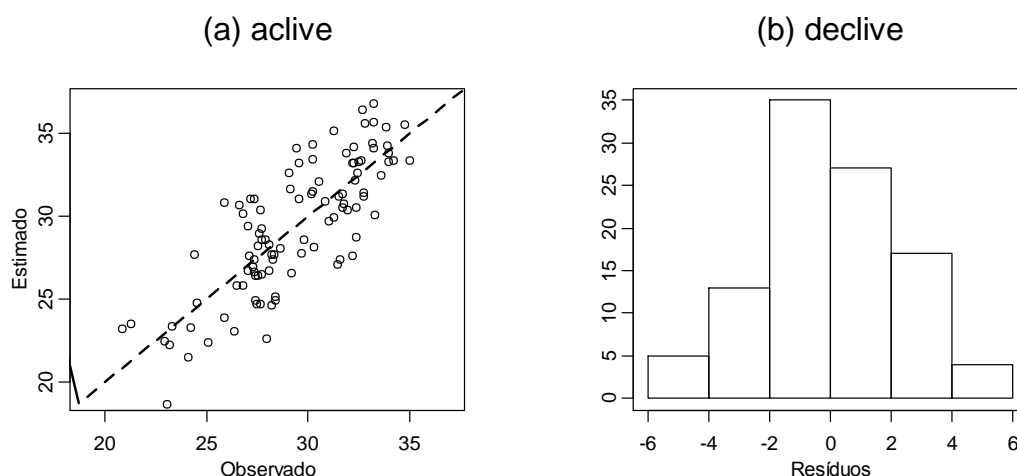


Figura 14 – Relação da produtividade observada do *harvester* com a produtividade estimada pelo modelo operando em declive. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para declive (b).

3.1.2.2 Declive

Observam-se, na Figura 15, as tendências dos dados de produtividade do *harvester*, em função da declividade e do volume por árvore, evidenciando o comportamento dos dados e a análise exploratória da produtividade, em função da declividade e do volume por árvore para o direcionamento de corte em declive.

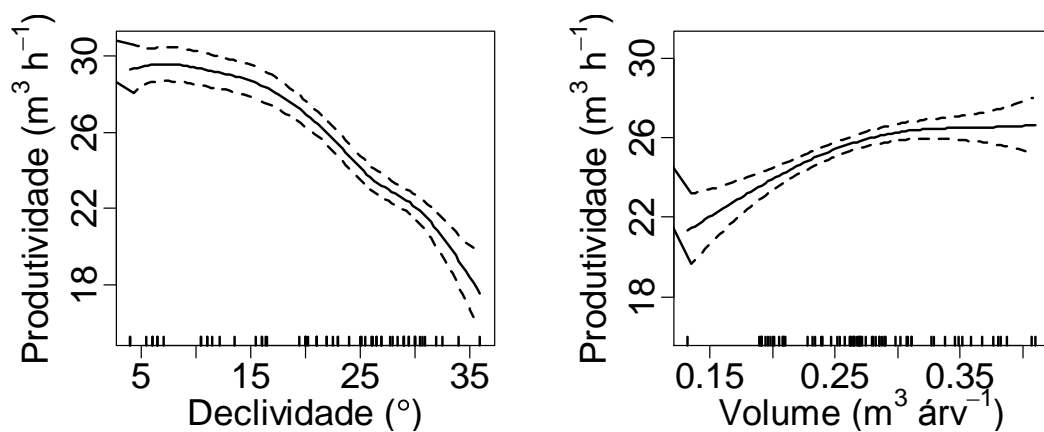


Figura 15 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do *harvester* no sentido de corte em declive, em função da declividade e do volume por árvore.

Na Figura 16 observa-se o resultado da modelagem da produtividade, em metros cúbicos, de madeira sem casca por árvore, do *harvester* na direção de corte em declive, em função grau da declividade do terreno e do volume por árvore, em metros cúbicos, por árvore. A produtividade na colheita de eucalipto entre as variáveis encontra-se estimada pela equação 9.

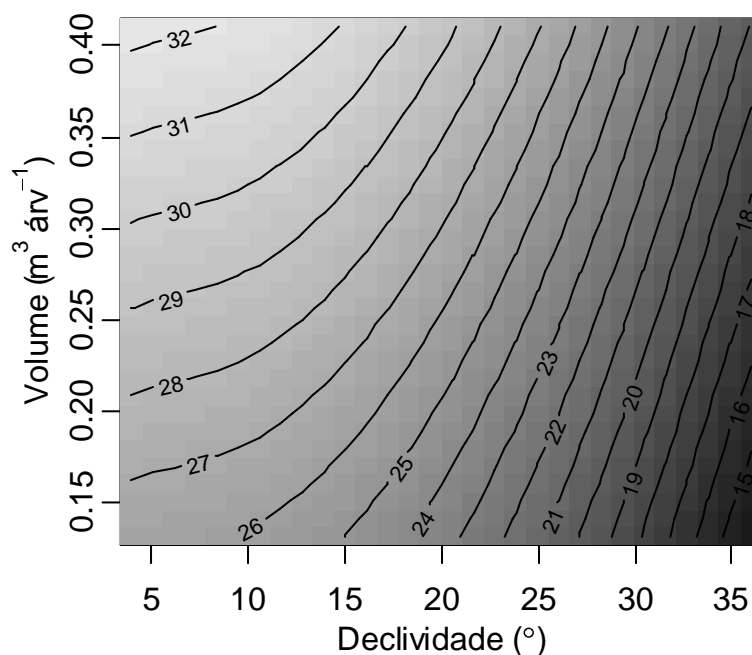


Figura 16 – Produtividade do *harvester* (m³ h⁻¹) de madeira sem casca no sentido de operação em declive, em função da declividade do terreno e do volume por árvore.

Na Figura 16 observa-se que a produtividade, em metros cúbicos, de madeira processada por hora, reduziu com o aumento da declividade do terreno e acréscimo com o aumento do volume por árvore. O comportamento da produtividade evidenciou as curvas características dessa relação, volume por árvore e o grau de declividade do terreno. Em relação à variável de declividade ocorreu diluição da produtividade mais acentuada a partir dos 10° do aclive, comprovando que até esse valor a declividade não interferiu na produtividade da máquina. Entretanto, o modelo de operação mostrou ser mais sensível a variável de declividade.

$$Phd = 12,78^* - 0,013d^{2***} + 0,187d - 140,6v^{2**} + 100,7^{***}v - 0,160dv \quad \text{eq. 9}$$

$$r^2 \text{ ajustado} = 0,8624$$

$$p\text{-valor: } < 2,2e^{-16}$$

em que

Phd = produtividade do *harvester* em declive ($m^3 h^{-1}$);

d = declividade (°); e

v = volume por árvore (m).

Na Tabela 5 observa-se a significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do colhedor operando na direção de declive. Na Figura 17 verifica-se a produtividade observada e estimada e o histograma dos resíduos.

Tabela 5 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *harvester* operando em declive

Parâmetros	Estimativa	Erro Padrão	t Calculado	p-Valor
Intercepto	12,780	5,065	2,523	0,014*
d ²	-0,013	0,0029	-4,501	0,000***
d	0,187	0,209	0,895	0,375
v ²	-140,600	48,320	-2,909	0,005**
v	100,700	27,020	3,727	0,000***
d×v	-0,160	0,560	-0,285	0,776

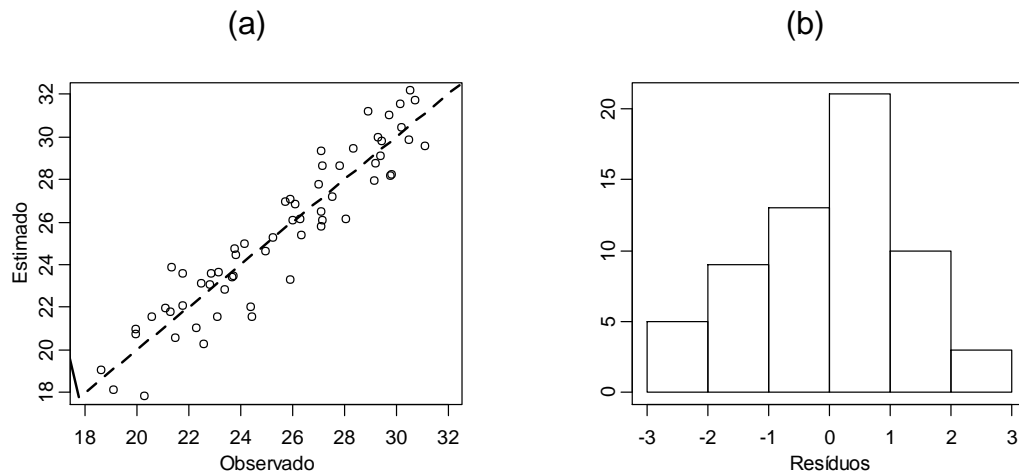


Figura 17 – Relação da produtividade observada do *harvester* com a produtividade estimada pelo modelo operando em *active*. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para *active*(b).

3.1.3 Influência das variáveis na produtividade

Pela Figura 18 pode-se observar que à medida que a declividade aumentou e o volume de madeira por árvore diminuiu, a produtividade do colhedor *harvester* caiu substancialmente. De outro modo, quando a declividade diminuiu e o volume de madeira por árvore aumentou, a produtividade do *harvester* aumentou significativamente, em virtude da maior estabilidade do conjunto máquina-operador e das melhores condições da floresta. Na Figura 18 visualiza-se a interferência das variáveis de declividades do terreno e dos volumes de madeira por árvore na produtividade do *harvester*, influenciando no sentido do seu deslocamento de colheita.

Na Figura 18(a) estão compiladas as influências das variáveis na operação em *active*. Observa-se também que o volume por árvore obteve maior influência na produtividade, e que sua representatividade foi de 58% e a declividade de 48%.

Na Figura 18(b) verifica-se que a declividade foi a variável com maior influência na produtividade. Verifica-se, também, uma representatividade de 68% e de 32% no volume por árvore para as atividades de corte e de processamento do *harvester* na operação de declive.

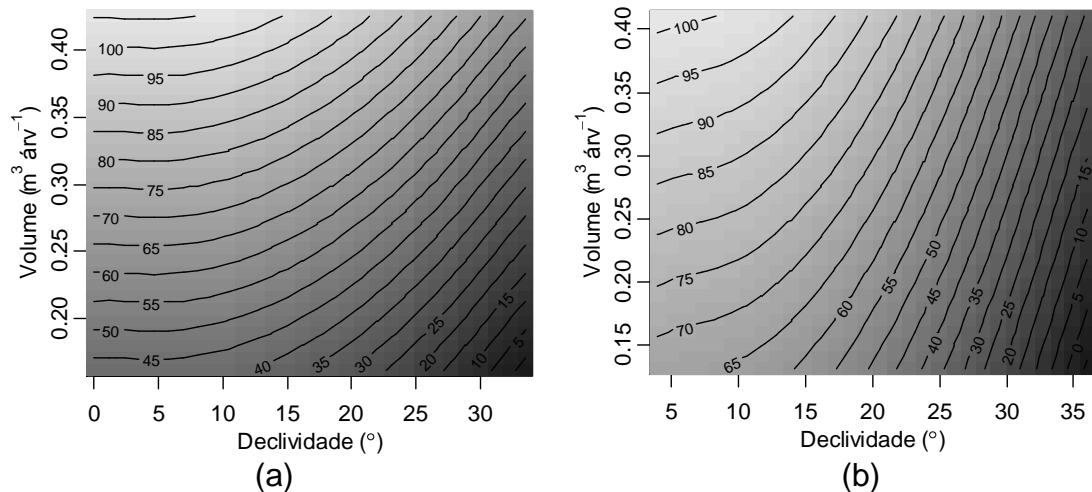


Figura 18 – Produtividade do *harvester*, em porcentagem, em função da declividade e do volume por árvore, em relação ao sentido de operação, em active (a) e em declive (b).

Durante a realização das operações pode-se notar que um dos principais fatores que influenciaram para estes resultados discrepantes, em função do sentido de colheita, foi o fator do campo visual do operador, pois, no sentido de colheita em active, a visão geral do operador foi melhorada substancialmente, obtendo uma visão clara das operações, sem necessidade de adotar posturas incorretas de trabalho, proporcionando, desta forma, um maior controle operacional das atividades. Nas operações realizadas no sentido de corte em declive, o campo visual dos operadores foi prejudicado e, em algumas vezes, adotavam-se posturas ergonomicamente incorretas, influenciando na produtividade do trator colhedor *harvester*.

A queda na produtividade na operação do *harvester* foi de 8,26% quando operava em declividades de até 36% e volume por árvore médio de $0,3 m^3 \text{ árv}^{-1}$. O aumento da declividade e do volume por árvore explica, na queda de produtividade, quando o *harvester* realizou cortes em declive, em comparação ao active.

Nas unidades amostrais, representadas com declividades acentuadas (maior que 26°), a máquina provocou a formação de depressões no solo, formando sulcos, em virtude do cisalhamento da interação pneu-solo; ou seja, pela maior razão de redução de percurso quando opera em active, mesmo quando a tração foi auxiliada pelo guincho; e em declive ocorreram

deslizamentos da máquina com a superfície do solo. As depressões ocorridas no solo foram devido às oscilações de maiores velocidades da máquina em relação ao guincho.

Martins *et al.* (2009), trabalhando com o mesmo tipo de colhedor, John Deere, modelo 1270D, em uma floresta de eucalipto, com um volume médio de madeira sem casca de $0,32 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$ e declividade do terreno de 25 % ($11,25^\circ$), obtiveram produtividade média de $30,71 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de madeira colhida. Os resultados demonstram uma similaridade com os deste trabalho, em que foi obtida produtividade média em aclive de $34,04 \text{ m}^3 \text{ sc h}^{-1}$, para o sentido de colheita; e em declive de $30,49 \text{ m}^3 \text{ sc h}^{-1}$.

Lopes *et al.* (2007), avaliando a operação de colheita de uma floresta de pinus com o uso do colhedor da marca Caterpillar, modelo CAT 320 *Short Tail*, com rodados de esteiras metálicas, em um terreno com declividade média de 6,8% ($3,06^\circ$) e volume médio de madeira da ordem de $0,42 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$, obtiveram produtividade média de $32,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sendo que nesta pesquisa com o uso de *harvester* John Deere, modelo 1270D, foi obtida produtividade de $42,13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, em aclive, e $31,62 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, em declive. Essa diferença de maior produtividade em aclive está relacionada com as características na operação, traduzindo em melhores condições biomecânicas e do campo visual do operador.

Em trabalho de colheita de uma floresta de eucalipto, Paula (2011) encontrou uma produtividade média de 18,57 e $19,88 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de madeira sem casca para os *harvesters* Komatsu, modelos PC200 e PC 228, operando em florestas com volumes médio de madeira por árvore de 0,177 e 0,220, respectivamente e declividade máxima de até 6,5%. Confrontando os resultados obtidos com os deste trabalho, demonstraram uma maior produtividade, sendo de 26,59 e $24,50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ sem casca para a colheita no sentido de aclive e declive, respectivamente. As diferenças ocorreram em função das diferentes características das máquinas, uma vez que o *harvester* John Deere, modelo 1270D, demonstra ser mais ágil nas operações. Isto se deve, principalmente, à maior potência da máquina, à locomoção por pneus, a cabine com nivelamento, refletindo diretamente em ganhos operacionais.

Em trabalho conduzido por Burla (2008), avaliando a colhedora *harvester*, John Deere, modelo 1270D, na colheita de eucalipto, obteve um

modelo que estima as produtividades em função do volume por árvore e declividade, encontrando produtividade média de $28 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ sem casca, valores similares aos resultados encontrados neste trabalho.

Já, na avaliação realizada por Jiroušek *et al.* (2007), estudando a colheita de eucaliptos na Irlanda, avaliaram diversas colhedoras florestais em condições de $0,1$ a $1,0 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$, em declividade máxima de 17° , que, por meio de modelagem de dados, obtiveram a produtividade de $24,50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para volume de $0,25 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$, e nesse estudo encontrou-se produtividade maior para as condições brasileiras. Este fato pode ter ocorrido em virtude dos fatores de experiência dos operadores, do tipo de máquina e, ou, em virtude do material genético, da facilidade no descascamento, dos galhos de menores dimensões e do espaçamento da floresta, reduzindo o tempo operacional.

Bjorn (1994), estudando a colheita de pinus com o *harvester* Rottne SMV, modelo *Rapid* EGS, em Alberta, Canadá, obteve $7,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com o volume médio de árvore de $0,12 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$ e produtividade de $12,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para árvores com volume médio de $0,19 \text{ m}^3$ e $22,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para árvores com volume médio de $0,34 \text{ m}^3$, deixando caracterizado que à medida que se aumenta o volume de madeira por árvores consequentemente há um aumento na produtividade. Os resultados encontrados no presente trabalho revelaram produtividade média ao dobro da encontrada pelo autor, em virtude da máquina usada pelo autor ser de potência inferior (138 kW), cabeçote menos eficiente e condições ergonômicas inferiores.

Avaliando a colheita florestal de pinus, com o uso do colhedor *harvester* John Deere, modelo 1270D, operando em turno de 24 horas, em diversas regiões do norte da Rússia, com volume médio de madeira de $0,31 \text{ m}^3 \text{ árv}^{-1}$, Gerasimov *et al.* (2011) obtiveram o comportamento do modelo da produtividade em função do volume de madeira por árvore sendo: ($P = 69,638 * V^{0,595}$), que em comparação com a avaliação aqui realizada obtiveram produtividades semelhantes. Entretanto, deve-se salientar, principalmente, que a máquina não desempenhou a operação de descascamento do fuste da árvore como foi realizado nessa pesquisa.

3.2 Forwarder

3.2.1 Estudo de tempo efetivo de operação

Na Figura 19 está compilada a constituição porcentual média dos elementos do ciclo operacional do *forwarder*, em função da direção de extração de madeira em declive e aclave, para uma distância média de 150 m entre o local da colheita e a margem da estrada.

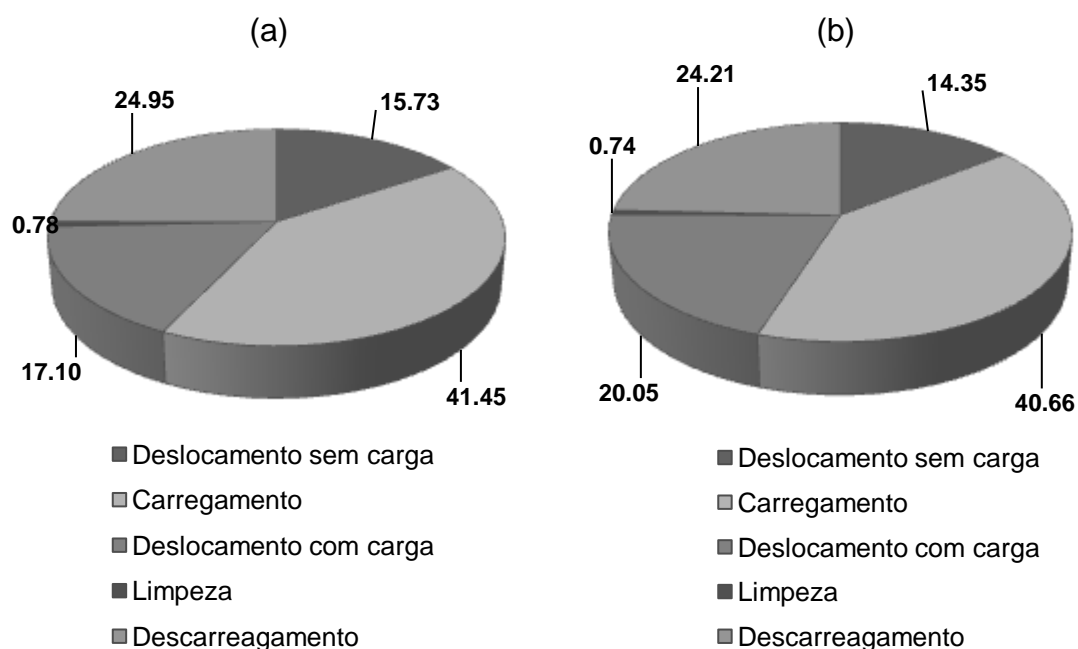


Figura 19 – Composição porcentual do tempo total do ciclo operacional do *forwarder* na direção de extração em declive (a) e aclave (b), para a distância de 150 m.

Os valores computados correspondem a um total de 398 ciclos operacionais; destes 247 ciclos na operação em declive e 151 em aclave. O ciclo operacional total médio do *forwarder* foi de 27,96 e 28,16 minutos, para as direções em declive e aclave, respectivamente, para extração a uma distância de 150 m (Figura 19). A variação da distância de extração de 150 m para 300 m acarretou um aumento de 33% do tempo de operação da máquina, evidenciando a necessidade de planejar melhor o ponto ótimo correspondente a distância média de extração com relação ao custo da malha viária.

Pela Figura 19, verificam-se que os valores percentuais dos tempos das operações foram semelhantes. Observa-se diferença no deslocamento com carga; isso se deve ao fato de a declividade reduzir a velocidade média de locomoção da máquina, como está compilado na Tabela 6. A atividade que obteve maior representatividade foi o carregamento da máquina, seguido do descarregamento; juntos, corresponderam, em média, a 66% do tempo total do ciclo operacional do *forwarder*.

Tabela 6 – Valores médios dos tempos das atividades do ciclo operacional do *forwarder* no sentido de extração em declive e em aclave, para o percurso de 150 m

Atividade do Ciclo Operacional	Declive		Aclave	
	Velocidade (m s ⁻¹)	Tempo (s)	Velocidade (m s ⁻¹)	Tempo (s)
Deslocamento sem carga	0,593	253,15	0,640	234,38
Carregamento	-	667,03	-	664,23
Deslocamento com carga	0,545	275,22	0,458	327,56
Limpeza	-	12,48	-	12,13
Descarregamento	-	401,48	-	395,49
Total	-	1.609,36	-	1633,78

A diferença da velocidade ocorreu em virtude da razão de redução de percurso (patinagem), quando o transportador operava em aclave; para o deslocamento com carga o avanço foi ainda menor, em virtude do peso da máquina somada ao peso de madeira em sua caixa de carga.

O tempo médio do engate do cabo, para permitir o avanço do *forwarder* nas unidades experimentais de maiores declividade (acima de 28°), foi de 204 segundos na extração em declive. Testes preliminares mostraram a dificuldade de extrair madeira nas condições com o deslocamento com carga em aclave, chegando à patinagem de 100%. Neste contexto, optou-se por não operar nessas condições.

O volume médio de madeira sem casca acondicionadas na caixa de carga do *forwarder* foi, em média, de 13,42 m³ e variou de acordo com a declividade.

As velocidades do *forwarder* encontradas neste trabalho são consideradas baixas quando comparadas com as obtidas no trabalho de Bantel

(2006). Isso é explicado pela maior declividade do terreno deste trabalho, pois o autor avaliou o *forwarder* Valmet 890.2 apenas em locais planos, encontrando $2,45 \text{ m s}^{-1}$ ($8,82 \text{ km h}^{-1}$) e $2,31 \text{ m s}^{-1}$ ($8,31 \text{ km h}^{-1}$) para os deslocamentos sem carga e com carga. Os tempos do ciclo operacional do *forwarder* obtidos pelo autor totalizaram 29,16 minutos; destes, 9,37% (176,4 s) no deslocamento sem carga; 43,02 % (810,0 s) no carregamento; 8,03% (151,2 s) no deslocamento com carga; 39,58% (745,2 s) no descarregamento, na extração de madeira de eucalipto de 6 m no espaçamento $3,00 \text{ m} \times 2,00 \text{ m}$, com volume por árvore de $0,19 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$ e distância média de 150 m.

Minette *et al.* (2004) avaliaram o *forwarder* da marca Timberjack, modelo 1210B, na extração de madeira de eucalipto em uma distância média de 132 m, sendo o corte realizado pela *slingshot*, com toras de 6 m de comprimento. Os autores encontraram a seguinte porcentagem do ciclo operacional: 7,38% no deslocamento sem carga; 53,28% no carregamento; 5,96% no deslocamento com carga; e 28,33% no descarregamento, completando o ciclo operacional em 16,00 minutos. O tempo menor do ciclo operacional deveu-se, principalmente, pelo *forwarder* utilizado pelos autores apresentar menor capacidade de transporte, tornando o ciclo operacional mais curto, pois a maior parte do tempo a máquina encontra-se carregando ou descarregando.

Os resultados encontrados demonstram que a distância de extração e a declividade do terreno afeta significativamente a produtividade do *forwarder*, variando o tempo para extração de madeira.

3.2.1.1 Deslocamento

Os tempos de deslocamentos sem carga (vazio) e com carga (carregado) do transportador *forwarder* estabelecem uma relação significativa, em que os tempos são diretamente influenciados pelas distâncias de extração de madeira (Figura 20).

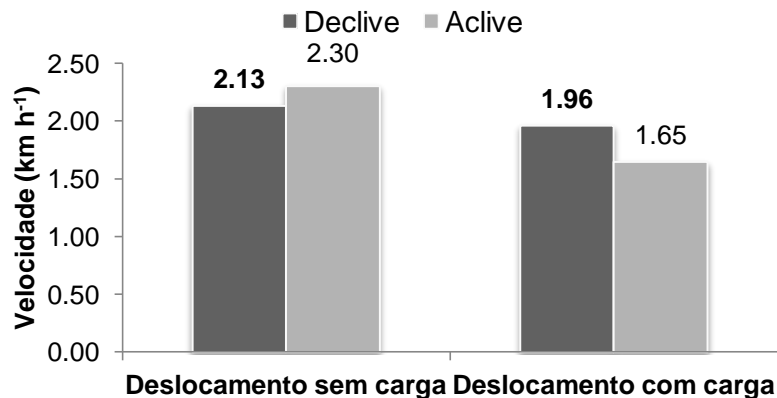


Figura 20 – Velocidade média para os deslocamentos sem e com carga do *forwarder*.

Na Tabela 7, encontra-se compilado o comportamento de tempos da extração de madeira pelo *forwarder* em aclive e declive, divididos em deslocamento sem e com carga, em função da distância e da declividade do percurso, com a modelagem sendo visualizada graficamente pelas Figuras 19 e 20. Os sinais positivos do coeficiente das variáveis dos modelos indicam aumento no tempo de viagem vazio, ocasionando redução da produtividade.

Tabela 7 – Modelos dos tempos das atividades de deslocamento do *forwarder*, em função do sentido de deslocamento

Deslocamento	Direção	Modelos	r ²
Com carga	Aclive	$T_{cca} = -35,178^{***} + 5,974^{***} d + 1,316^{***} L$	0,850
	Declive	$T_{ccd} = -9,345^* + 0,611^{***} d + 1,751^{***} L$	0,903
Sem carga	Aclive	$T_{sca} = -9,886^{***} + 0,671^{***} d + 1,588^{***} L$	0,968
	Declive	$T_{scd} = -6,040 - 1,457^{***} d - 1,457^{***} L$	0,974

d = declividade; e L = deslocamento.

Na Figura 21 (a), o tempo do deslocamento em aclive com carga foi mais sensível ao grau de declividade, apresentando maior ímpeto em seu tempo, sendo que a substituição do sentido de trabalho implicará em menos tempo para executar a mesma operação de extração, principalmente nas maiores declividade. Este fato ocorreu em virtude da redução de velocidade acarretar em maior tempo gasto para percorrer a distância, reduzindo a produtividade do transportador.

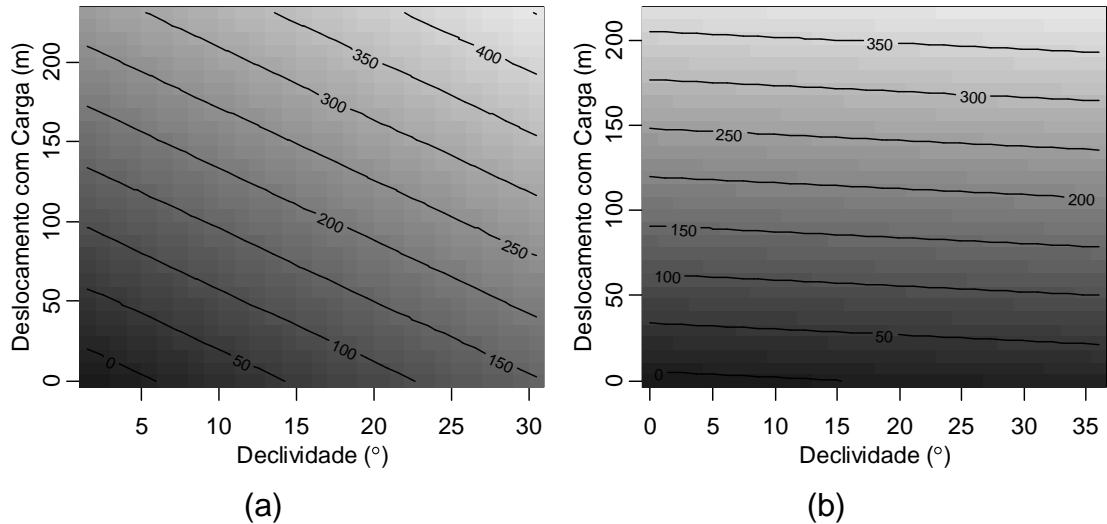


Figura 21 – Tempos, em segundos, de deslocamento com carga, em função da declividade do terreno e da distância de deslocamento, na direção de extração em active (a) e em declive (b), pelo *forwarder*.

Observou-se que o aumento da distância de extração e da declividade do terreno implica aumento do tempo de extração de madeira, reduzindo a produtividade do *forwarder*. Entretanto, para o deslocamento com carga em declive a variável de declividade teve pouco efeito no tempo gasto na operação (linhas horizontais), verificado pela Figura 22.

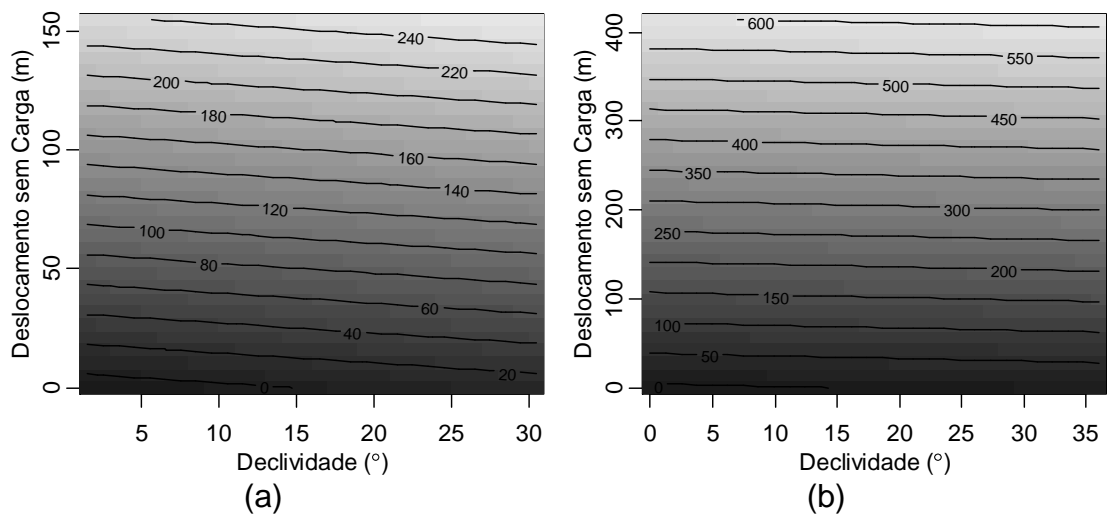


Figura 22 – Tempos, em segundos, de deslocamento sem carga, em função da declividade do terreno e da distância, na direção de extração em active (a) e em declive (b), pelo *forwarder*.

3.2.1.2 Carregamento

A análise de regressão efetuada entre as variáveis de declividade e volume por árvore e o respectivo tempo de carregamento do autocarregável é apresentada pelo Tabela 8.

Tabela 8 – Modelagem das atividades de carregamento do ciclo operacional, delimitado pelo sentido de extração do transportador *forwarder*

Atividade	Direção	Modelos	r ²
Carregamento	Aclive	$T_{cara} = 606,467^{***} + 20,998d^{***} - 820,690^{**} v$	0,842
	Declive	$T_{card} = 449,903^{***} + 14831^{***} d - 159,198^{*} v$	0,834

v = volume por árvore; e d = declividade.

Por meio da Figura 23 pode-se verificar o comportamento dos dados do tempo da atividade de deslocamento sem carga em função da declividade do terreno e do deslocamento.

Com os resultados obtidos, fica demonstrado que as menores produtividades encontradas ocorreram em função de que maiores inclinações do terreno alteram a constituição dos feixes das toras formados pelo *harvester*, tendo ocorrido deslizamentos ocasionais e prejudicado sua produtividade. A lança hidráulica apresentou dificuldades na operação de carregamento na medida em que aumentou a declividade, interferindo na agilidade da grua. Estes fatos contribuíram para o aumento do tempo dos ciclos de produção do *forwarder*.

Observou-se que a atividade de carregamento foi influenciada pela declividade do terreno, fato que é explicado pela dificuldade em realizar o giro da lança hidráulica para acomodar as toras na caixa de carga.

A disposição que se encontravam os feixes de toras nas maiores declividades implicou, por vezes, em deslizamentos das toras, formando feixes desuniformes, dificultando o carregamento, aumentando o número de garradas para completar a carga, que, conseqüentemente, aumentou o tempo gasto na operação.

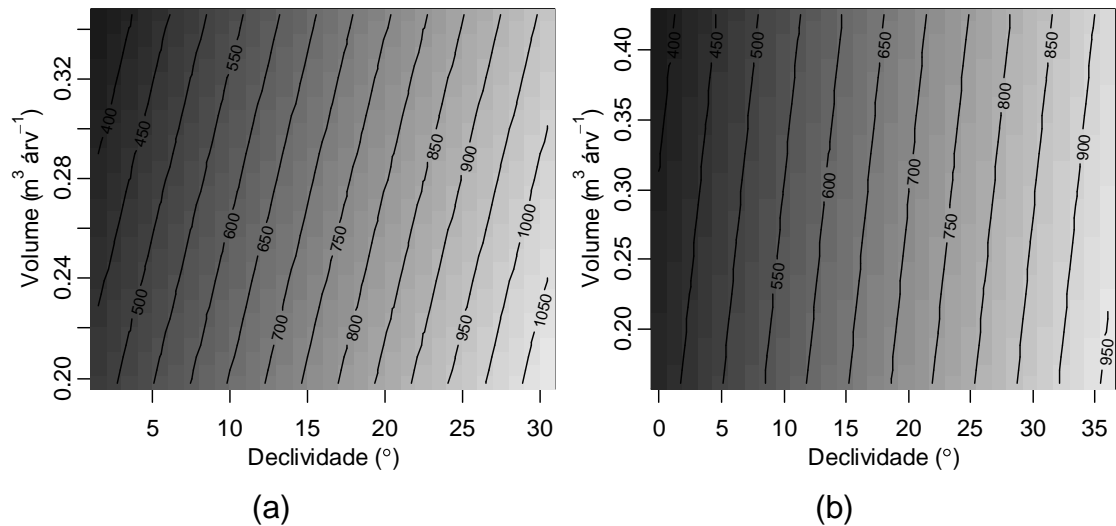


Figura 23 – Tempo requerido, em segundos, na operação de carregamento, em função da declividade e do volume por árvore, na direção de extração em active (a) e em declive (b), pelo transportador *forwarder*.

3.2.1.3 Descarregamento

A análise de regressão efetuada entre os tempos de descarregamento não foi significativa, não ocorrendo correspondências funcionais entre as direções de extração, a declividade e o volume por árvore. Esse aspecto foi diagnosticado pela não significância da análise de regressão, com aplicação dos testes 't' e 'F', não apresentando um modelo significativo que retratasse o comportamento.

Isso ocorreu em virtude do fato de que volumes menores da carga completa tornaram a lança hidráulica mais ágil no descarregamento da caixa de carga. Assim, considerou-se o tempo médio do ciclo operacional de 272 e 279 segundos, respectivamente, na extração em active e em declive para o descarregamento das toras.

3.2.1.4 Limpeza

Com relação ao tempo de limpeza dos locais de formação dos feixes não foi identificada nenhuma relação entre as variáveis, não ocorrendo interferência significativa por meio da análise de regressão. Os respectivos tempos da atividade de limpeza foram, em média, de 12 segundos por ciclo operacional.

3.2.2 Produtividade

As produtividades de extração de madeira, em metros cúbicos, de madeira sem casca, por hora efetivamente trabalhada pelo transportador *forwarder*, encontram-se divididas, em função da sua direção, aclave e declive, de modo geral, compilados nos tópicos abaixo.

A distância de extração e a declividade apresentaram relação com a produtividade. Entretanto, para a variável volume por árvore não foi identificada relação entre a produtividade, pois no estudo de tempos e movimentos apenas o carregamento foi influenciado pelo volume por árvore.

3.2.2.1 Aclave

Na Figura 24 os resultados obtidos pela extração de madeira pelo *forwarder* são visualizados juntamente com a análise exploratória. Observa-se que a produtividade de extração da madeira pelo *forwarder* estabeleceu uma relação com a declividade do terreno e com a da distância de extração de madeira.

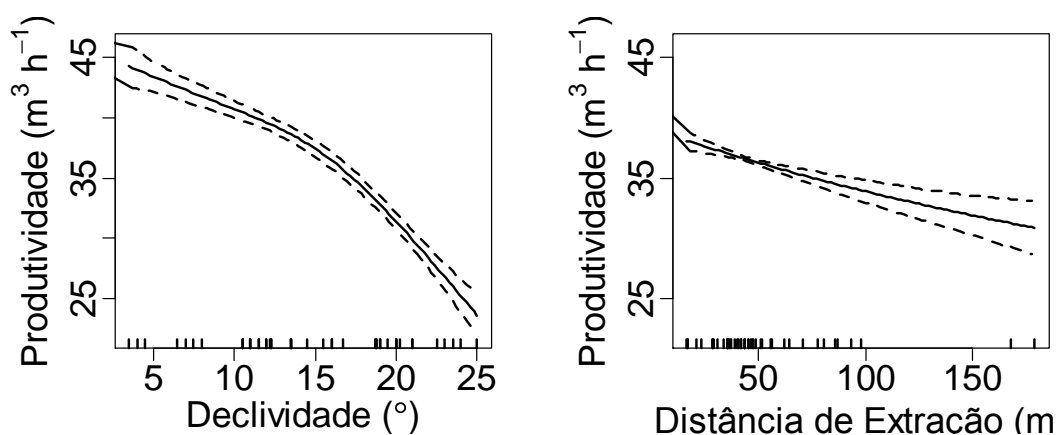


Figura 24 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do *forwarder* no sentido de transporte da madeira em aclave, em função da declividade do terreno e da distância de extração.

Na Figura 25 estão compilados os resultados da modelagem da capacidade de extração de madeira pelo transportador *forwarder* na direção de escoamento, no sentido de aclave, em função da declividade do terreno, em graus, e da distância de extração, em metros, verificado pela equação 10 e

comprovada a precisão do modelo. Pelo Tabela 9 observa-se a significância dos parâmetros da modelagem da produtividade da operação de extração de madeira na direção de declive do percurso.

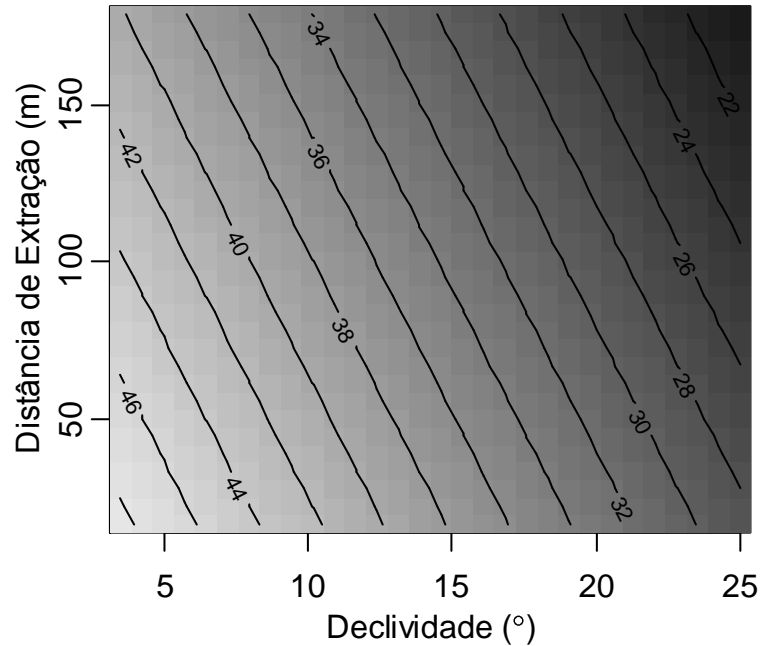


Figura 25 – Produtividade do *forwarder*, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, no sentido de extração em acive, em função da declividade do terreno e da distância de deslocamento.

$$Pfa = 52,478^{***} - 0,923^{***} d - 0,051^{***} L \quad \text{eq. 10}$$

$$r^2 \text{ ajustado} = 0,8927$$

$$p\text{-valor} < 2,2e^{-16}$$

em que

Pfa = produtividade do *forwarder* em acive ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

d = declividade (°); e

L = deslocamento (m).

Na Figura 26 evidencia-se o ajuste do modelo, observando o ajuste dos dados e a normalidade.

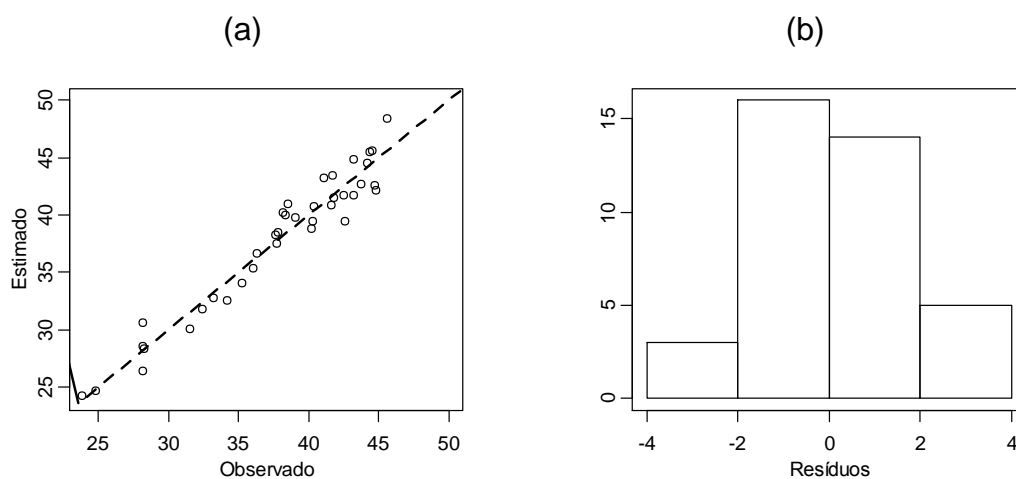


Figura 26 – Relação da produtividade observada do *forwarder* com a produtividade estimada pelo modelo operando em na extração em acive. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para a extração em acive.

Tabela 9 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *forwarder* operando em acive

Parâmetros	Estimativa	Erro padrão	t calculado	p-valor
Intercepto	52,478	0,903	58,080	***
d	-0,923	0,060	-15,270	***
L	-0,051	0,010	-4,900	***

3.2.2.2 Declive

Os resultados obtidos pela extração de madeira pelo *forwarder* são visualizados juntamente com a análise exploratória na Figura 27. Observa-se que a produtividade estabeleceu uma relação com a declividade e da distância de extração.

Neste contexto, na Figura 28 estão compilados os resultados da modelagem da produtividade de extração de madeira, em $m^3 h^{-1}$, do *forwarder* na direção de extração em declive, em função da declividade do terreno, em graus, e da distância de extração, em metros, comprovado pela equação 11. A significância dos parâmetros da modelagem da produtividade da operação de extração de madeira na direção em declive, tendo confiabilidade dos parâmetros da modelagem da produtividade, está compilada na Tabela 10.

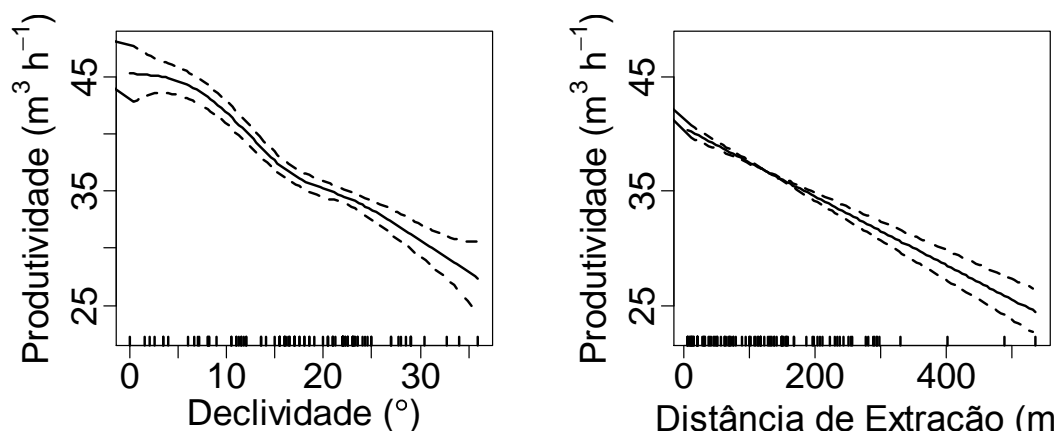


Figura 27 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do *forwarder* no sentido de transporte de madeira em declive, em função da declividade do terreno e da distância de extração.

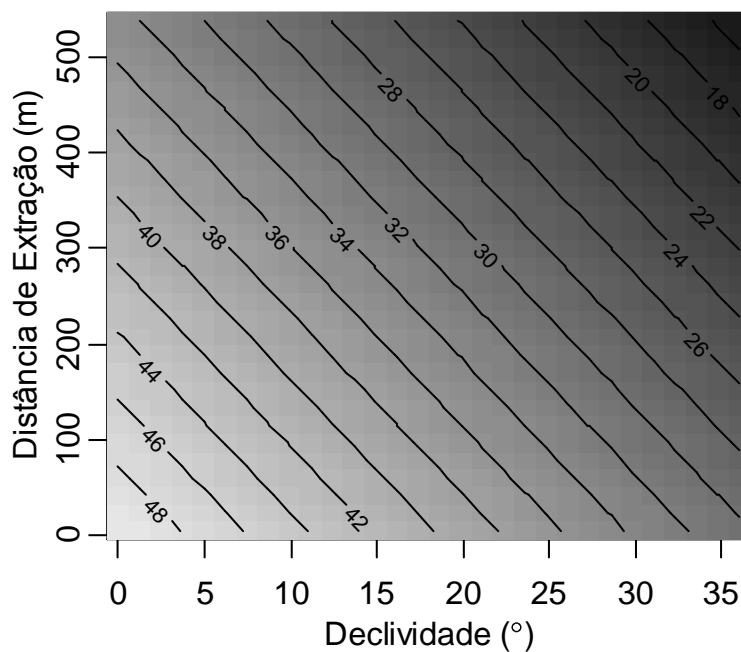


Figura 28 – Produtividade do transportador *forwarder*, $m^3 h^{-1}$, no sentido de extração de madeira em declive.

Tabela 10 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *harvester* operando em declive

Parâmetros	Estimativa	Erro Padrão	t Calculado	p-Valor
Intercepto	50,111	0,679	73,770	***
d	-0,543	0,032	-16,990	***
L	-0,029	0,002	-12,620	***

$$Pfd = 50,111^{***} - 0,543^{***} d - 0,029^{***} L \quad \text{eq. 11}$$

r^2 ajustado = 0,8201
 p-valor: $< 2,2e^{-16}$

em que

Pfd = produtividade do *forwarder* em declive ($m^3 h^{-1}$);

d = declividade ($^\circ$); e

L = deslocamento (m).

Na Figura 25, observa-se que capacidade de extração de madeira do *forwarder* diminuiu com o aumento da declividade do terreno e aumento da distância de extração, evidenciando as curvas e o respectivo comportamento. No ciclo operacional ocorreu aumento nos tempos de deslocamentos e no carregamento, reduzindo a produtividade da máquina. Na Figura 29 constata o ajustamento do modelo.

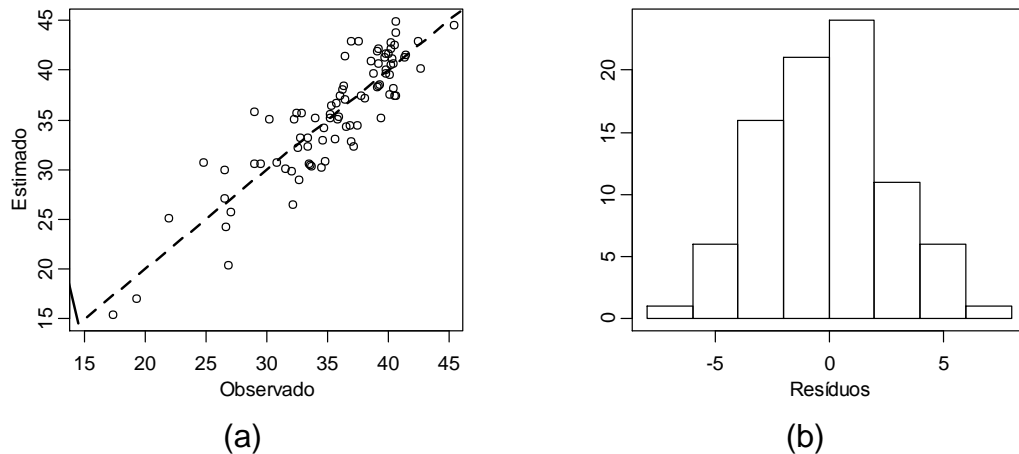


Figura 29 – Relação da produtividade observada do *forwarder* com a produtividade estimada pelo modelo operando em declive. Linha tracejada possui inclinação de 45° (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para declive (b).

3.2.3 Influência das variáveis na produtividade

Pela Figura 30, pode-se constatar que à medida que a declividade do terreno aumentou, a distância de extração também aumentou, e a produtividade do *forwarder* caiu substancialmente. Maiores declividades dificulta-

ram a operação e maiores distâncias de extração aumentaram o tempo gasto; um aumento do percurso de 150 para 300 m aumentou o tempo do ciclo operacional em 17%.

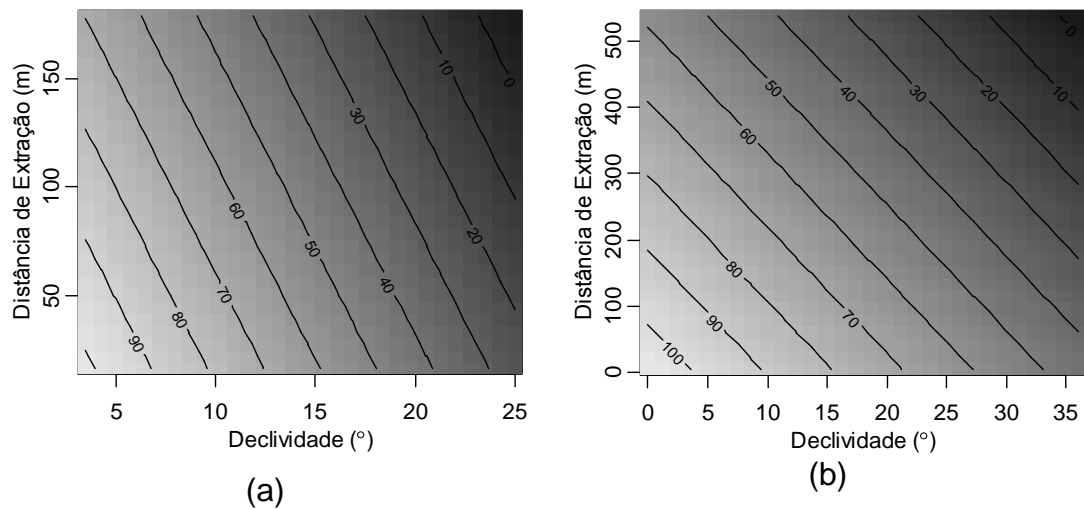


Figura 30 – Produtividade do *forwarder*, em porcentagem, em função da declividade e da distância de extração, em relação ao sentido de operação, em active (a) e em declive (b).

Na Figura 30 visualiza-se a interferência das variáveis de declividades do terreno e da distância de extração na produtividade do transportador, que foi influenciado pela direção de extração em active e em declive.

Pela Figura 30 (a) verifica-se pela direção de extração em active, que a variável de declividade obteve maior impacto na produtividade do *forwarder*, observando-se que sua influência foi de 75% e a variável distância de extração foi de 25%.

Entretanto, observa-se que, para a colheita no sentido do declive, a declividade explicou o comportamento da produtividade em 55%; de outro modo, constatou-se que para a variável distância de extração seu impacto foi de 45%, como pode ser visto na Figura 30(b).

Pode-se notar durante a realização das operações que um dos principais fatores que influenciaram os resultados de maior produtividade de extração de madeira pelo *forwarder* foi a facilidade da máquina em deslocar-se morro abaixo (declive), quando se encontrava carregada. Outro ponto refere-se à diminuição da produtividade de extração em virtude do tráfego com velocidades reduzidas nas declividades elevadas, por causa da instabilidade e do risco de tombamentos.

Observou-se queda na produtividade quando o *forwarder* operava na extração de madeira em aclave, em comparação ao declive, em função da declividade e considerando uma distância média de extração de 150 m (Figura 31).

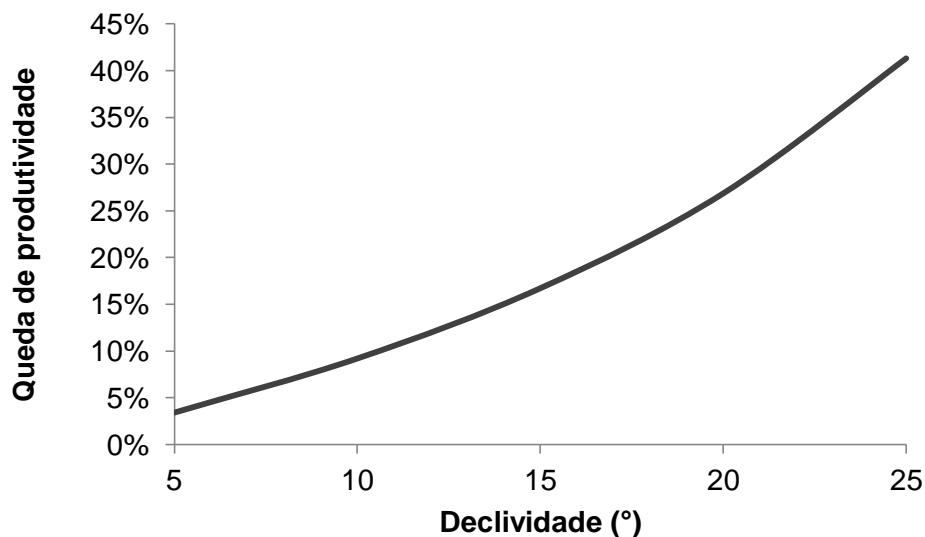


Figura 31 – Queda de produtividade do *forwarder* operando em aclave, em comparação ao declive.

Na Figura 31, o aumento da declividade traduz na queda de produtividade quando o *forwarder* extraiu madeira em aclave, em comparação ao declive. Esse decréscimo na produtividade pode chegar a 41,30% para a declividade de 25° e uma distância de deslocamento de 150 m.

Nas unidades amostrais representadas com declividades mais acentuadas, o *forwarder* também contribuiu para a formação de depressões na superfície do solo, formando sulcos em virtude do cisalhamento da interação pneu-solo. Este resultado foi intensificado pela extração de madeira em aclave.

Os resultados encontrados são similares aos obtidos por Makkonen (1989), nos quais foi avaliada a produtividade de um *forwarder* Timberjack, modelo 230A, encontrando uma produtividade de extração de madeira de 24 m³ h⁻¹, para uma distância de 360 m, e 31,6 m³ h⁻¹, para uma distância de 170 m, representando queda de 24% na produtividade, comprovando que a distância de extração influencia na produtividade dessas máquinas. Os resultados aqui encontrados foram superiores aos encontrados por este

autor, em função de ter sido utilizado um *forwarder* de menor potência, com características inferiores, como a grua de menor área e caixa com menor capacidade de armazenagem, entre outros.

Na Irlanda, Jiroušek *et al.* (2007), avaliando a produtividade de extração de madeira de três classes de *forwarder* em condições de 0,1 a 1,0 m³ de madeira árvore⁻¹ e com uma distância de extração variando de 80 a 1.400 metros, revelaram a modelagem da produtividade, em função da distância de extração da madeira, como ($Y = 0.5193x^{(24.9181/x)}$) e do volume médio da carga transportada, como ($Y = 8.1466 e^{0.0943x}$), para *forwarder* com potência do motor superior a 120 kW. Esses valores são menores que os encontrados neste trabalho, em virtude, principalmente, das características peculiares da máquina, principalmente pelas dimensões da caixa de carga da máquina, do alcance da grua e da área de garra.

Minette *et al.* (2004), avaliando o *forwarder* da marca Timberjack, modelo 1210B, na extração de madeira de eucalipto, encontraram as produtividades de 35,47 e 40,15 m³ h⁻¹, para distâncias de 122 e 129 m, sendo o corte realizado pelo *feller-buncher* e pelo *slingshot*, com toras de 6 m de comprimento.

4 Conclusões

- A modelagem quantificou a influência da declividade do terreno, da distância de deslocamento e do volume de madeira por árvore na produtividade das máquinas.

- O *harvester* apresentou maior produtividade na derrubada e no processamento de árvores, operando no sentido de aclave, sendo, em média, 6,25% maior que em declive.

- O *forwarder* proporcionou maior capacidade de extração de madeira, operando no deslocamento carregado em declive, sendo, em média, 20% maior que em aclave.

- No ciclo operacional do *forwarder*, 2/3 do tempo foi consumido na atividade de carregamento e descarregamento e 1/3 na atividade de deslocamento.

5 Recomendações

- Recomenda-se a adaptação de um sistema de guincho com velocidades similares da máquina nas faces dianteira e traseira, para permitir intensificar o corte mecanizado nas áreas consideradas restritivas ao tracionamento, em virtude da patinagem dos rodados motrizes. O uso de outra máquina para realizar o processo de tração elevaria os custos de produção, tornando a operação inviável.

- Também é importante a realização de estudos para verificar se o aumento da potência da lança hidráulica melhora a sua agilidade nas atividades de carregamento e descarregamento de madeira pelo *forwarder*, contribuindo para maximizar o ciclo de produção e aumentar a sua produtividade.

- Sugere-se a adição de lastro nas máquinas para melhorar a distribuição de peso por eixo, facilitar a tração e melhorar a trafegabilidade da máquina em áreas de maiores declives.

- Recomenda-se a operação em declividades acima de 30° apenas durante o período diurno, em virtude da maior visibilidade, pois todo o sistema é dependente das oscilações do microrrelevo.

6 Referências bibliográficas

AKAY, A. E.; ERDA, O.; SESSIONS, J. Determining productivity of mechanized harvesting machines. *Journal of Applied Sciences*, v. 4, n.1, p. 100-105, 2004.

BANTEL, C. A. *Análise de extração de madeira de eucalipto com forwarder em floresta de primeira e segunda rotação*. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2006.

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

BJORN, A. *Cut-to-length and tree-length harvesting systems in Central Alberta: A comparison*. FERIC, 1994. 23 p. (Technical Report TR-108).

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*. 2. ed., Wiley, Colorado, 2007.

BURLA, E. R. *Avaliação técnica e econômica do harvester na colheita e processamento de madeira em diferentes condições de declividade e produtividade florestal*. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

CARNEIRO, L. C.; RIBEIRO, A.; MARTINEZ, C. A.; LEITE, F. P. *Coeficiente de desacoplamento em plantios jovens de eucalipto*. São José dos Campos, SP: INPE, 2003. 6 p.

FERREIRA, L. S. *Estudo de tempos e movimentos na operação de adubação de plantio na empresa Eucatex S.A., Botucatu, São Paulo*. 2011. 28 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

GERASIMOV, Y.; SENKIN, V.; VAATAINEN, K. Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the northern European part of Russia. *Eur. J. Forest. Res.*, p. 1-8. 2011. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/m452062127908225>>. Acesso em: 25 jan. 2012.

HASTIE, T. J.; TIBSHIRANI, R. J. *Generalized additive models*. London: Chapman and Hall, 1990. 352 p.

JACOVINE, L. A. G. *et al.* Avaliação da perda de madeira em cinco subsistemas de colheita florestal. *Revista Árvore*, v. 25, n. 4, p. 463-470, 2001.

JIROUŠEK, R.; KLVAČ, R.; SKOUPÝ, A. Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science*, v. 53, n. 10, p. 476-482, 2007.

JOHN DEERE. *Informações técnicas das máquinas de colheita florestal*. 2012. Disponível em: <http://www.deere.com/pt_BR/forestry/products/>. Acesso em: 10 jan. 2012.

KARJALAINEN, T.; ZIMMER, B.; BERG, S.; WELLING, J.; SCHWAIGER, H.; FINÉR, L.; CORTIJO, P. *Energy, carbon and other material flows in the Life Cycle Assessment of forestry and forest products*. Achievements of the Working Group 1 of the COST Action E9. Finlândia: European Forest Institute, 2001. 68 p.

LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. Mecanização In: MACHADO, C. C. (Org.). *Colheita florestal*. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 43-65.

LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SILVEIRA, J. C. M.; RINALDI, P. C. N. Avaliação técnica e econômica de um “skidder” operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. *Ciênc. Agrotec.*, Lavras, MG, v. 33, n. 6, p. 1621-1626, 2009.

LOPES, E. S.; CRUZINIANI, E.; DIAS, A. N.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do corte de madeira de pinus com cabeçote *harvester* em diferentes condições operacionais. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, 2007.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S. O setor florestal brasileiro. In: MACHADO, C. C. (Org.). *Colheita florestal*. 2. ed., Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 15-42.

MACHADO, C. C.; BIRRO, M. H. B.; MINETTI, L. J.; SOUZA, A. P.; LIUTH, S. L.; Simulação e análise da produtividade de *forwarders* de diferentes capacidades de carga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 4., Campinas, SP. *Anais...* Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 276-283.

MAGALHÃES, P. A. D.; KATZ, I. Estudo da viabilidade econômica da mecanização do processo de colheita florestal com *harvester* em uma indústria madeireira. *Tékhné Lógos*, Botucatu, SP, v. 2, n. 1, p. 72- 91. 2010.

MAKKONEN, I. *Evaluation of Timberjack 230 8-Ton Forwarder*. Forestry Engineering Research Institute of Canada, 1989. 8 p. (Technical Note TN-140).

MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um *harvester* trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, SP, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.

MINETTE, L. J.; MOREIRA, F. M. T.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C.; SILVA, K. R. Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2004.

MOREIRA, F. M. T. *Análise técnica e econômica de subsistemas de colheita de madeira de eucalipto em terceira rotação*. 2000. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

OLIVEIRA, R. J. *Avaliação econômica da utilização de cabos aéreos na colheita florestal em regiões montanhosas*. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2008.

PAULA, E. N. S. O. *Avaliação técnica, de custos e ambiental de dois modelos de harvester na colheita florestal*. 2011. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. 2012. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 1^o jan. 2012.

ROYSTON, P. An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. *Applied Statistics*, v. 31, p. 115-124, 1982.

SEIXAS, F. Extração florestal. In: MACHADO, C. C. (Org.). *Colheita florestal*. 2. ed., Viçosa, MG: UFV, 2008, p. 97-142.

SEIXAS, F.; BARBOSA, R. F.; RUMMER, R. Tecnologia protege saúde do operador. *Madeira*, São Paulo, SP, v. 14, n. 82, p. 68-73, 2004.

SILVA, J. R.; FENNER, P. T. Desempenho de trator florestal transportador autocarregável ("Forwarder"). *Silva Lusitana*, v. 17, n. 1, p. 97-108, 2009.

SPINELLI, R.; WARDB, S. M.; OWENDEC, P. M. A harvest and transport cost model for Eucalyptus spp. fast-growing short rotation plantations. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, 2009.

VALVERDE, S.R. *Análise técnica e econômica do subsistema de colheita de árvores inteiras em povoamentos de eucalipto*. 1995. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

WEISBERG, S. *Applied linear regression*. 3. ed., Wiley, Colorado, 2005.

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA DE TORAS CURTAS

Resumo: Objetivou-se com o trabalho avaliar economicamente a colheita florestal mecanizada no sistema de toras curtas, módulo constituído pelos tratores florestais *harvester* e *forwarder*, fundamentados nas análises de custo operacional, na análise de sensibilidade, no custo de produção, na taxa interna de retorno e no ponto de equilíbrio. Os custos foram divididos em fixos e variáveis, obtendo os custos de depreciação, os juros, os seguros, os impostos, o abrigo, as taxa de administração, o combustível, os lubrificantes, o óleo hidráulico, os pneus e, ou, as esteiras, a manutenção e os reparos, a mão de obra, o transporte de pessoal e o transporte de maquinário. Por meio da análise de sensibilidade determinou-se a variação (20% para mais e para menos) das seis variáveis mais relevantes e plotados no diagrama de *Spiderplot*. Foram determinadas as equações dos custos de produção, das taxas internas de retorno e dos pontos de equilíbrio das máquinas *harvester* John Deere, modelo 1270D e *forwarder* John Deere, modelo 1710D, em função da declividade do terreno, do volume de madeira por árvore e da distância de extração. Os resultados demonstraram um custo operacional do *harvester* de US\$ 145,36 h⁻¹, com eficiência operacional da máquina de 80%. O custo de manutenção e os reparos foram da ordem de 39,66%; o custo de combustível com 20,03%; e a depreciação com 15,31%, respectivamente do total. A análise de sensibilidade mostrou que uma economia real de 10% em cada um dos itens de maior expressão, obtém uma redução no custo operacional de 17%. Observou-se que o custo de produção apresentou redução na medida em que diminuiu a declividade do terreno e aumentou o volume por árvore. O *harvester* teve que operar 3.800 horas ano⁻¹ para o sentido de operação em aclave e 4.527 horas ano⁻¹ no sentido de declive, para viabilizar o seu uso. O custo operacional do *forwarder* foi de US\$ 125,24 h⁻¹, com eficiência operacional da máquina de 85%. O custo de manutenção e os reparos foram da ordem de 50,17%; o custo de combustível foi de 18,81%; e da depreciação de 12,67%, respectivamente do total. A análise de sensibilidade mostrou que uma economia real de 10% em cada um dos itens de maior expressão, obteve-se redução no custo operacional de 15%. O custo de produção se diminui, à medida que diminui a declividade e reduz a distância de extração. O *forwarder* tem que operar 5.038 horas ano⁻¹ para o sentido de operação em aclave e 2.417 horas ano⁻¹ para a operação em declive para sua viabilidade. Em áreas de até 35° de declividade, volume por árvores variando entre 0,14 a 0,42 m³ arv⁻¹ e custo máximo de US\$ 4,90 m³, o *harvester* opera em 73% em aclave e 42% em declive. O *forwarder* opera em 44% em aclave e 81% em declive das áreas na extração de madeira a um custo máximo de US\$ 3,80 m³, em deslocamentos de até 400 m de distância e em declividades do terreno de até 35°.

Palavras-chave: *harvester*; *forwarder*; custo; produção; análise de sensibilidade; TIR; ponto de equilíbrio.

ECONOMICAL EVALUATION OF A SHORT LOG MECHANIZED FOREST CUT-TO-LENGTH SYSTEM

Abstract: This work aimed to evaluate economically the mechanical harvesting operations in cut-to-length system, module consisting of tractors harvester and forwarder, based on the analysis of operating costs in sensitivity analysis, production cost, internal return rate and the breakeven point. Costs were divided into fixed and variable, obtaining the depreciation costs, interest, insurance, taxes, under the administration fee, fuel, lubricants, hydraulic oil, tires and or mats, maintenance and repairs, labor, transport staff and transport machinery. Through sensitivity analysis it was determined the variation (20% plus or minus) of the six most important variables and plotted in the diagram Spiderplot. Equations were in production costs, internal rates of return and the equilibrium points of the machine harvester John Deere, model 1270D forwarder and John Deere, model 1710D, depending on the terrain slope, the volume of wood per tree and distance extraction. The results showed an operating cost of harvester U.S. \$ 145,36 h⁻¹, with the machine operating efficiency of 80%. The cost of maintenance and repairs were estimated at 39.66%, the cost of fuel with 20.03%, and depreciation with 15.31% respectively of the total. A sensitivity analysis showed that a real economy 10% in each of the items with the highest expression, obtains a reduction in operating cost of 17%. It was observed that the production cost was reduced in that decreased slope of the terrain and increased the volume per tree. The harvester had to operate 3800 hours year⁻¹ for the uphill direction of operation and 4.527 hours year⁻¹ in the direction of slope, to enable its use. The operational cost of the forwarder was U.S. \$ 125.24 h⁻¹, with the machine operating efficiency of 85%. The cost of maintenance and repairs were estimated at 50.17%, the fuel cost was 18.81% and the depreciation of 12.67%, respectively of the total. A sensitivity analysis showed that a real economy 10% in each of the items with the highest expression, we obtained a reduction in operating cost of 15%. The production cost is decreased, as the slope decreases and decreases the distance of extraction. The forwarder has to operate 5.038 hours year⁻¹ for the uphill direction of operation and 2.417 hours year⁻¹ for the operation downhill to its viability. In areas of up to 35 ° slope, volume of trees ranging from 0.14 to 0.42 m³ arv⁻¹ and maximum cost of US\$ 4.90 m³, the harvester operated at 73% and 42% in slope downhill. The forwarder operated on 44% uphill and 81% in slope areas in logging to a maximum cost of US\$ 3.80 m³, in shifts of up to 400 m away and the ground slopes up to 35 °.

Keywords: harvester, forwarder, cost, production, sensitivity analysis, TIR, breakeven point.

1. Introdução

A análise dos custos de um sistema de colheita florestal pode ser realizada por diversas metodologias de cálculo. Os custos variam de uma literatura para outra, de empresa para empresa, de acordo com a situação que elas atuam e do sistema utilizado na colheita.

Com o aumento da demanda de madeira para atender a produção de celulose e a fabricação de painéis, a evolução da mecanização da colheita florestal no Brasil intensificou-se muito, desencadeando um processo contínuo de avaliação dos rendimentos operacionais e dos custos (SIMÕES, 2008).

A utilização de máquinas com alta tecnologia na colheita florestal, como o *harvester*, aumentou o rendimento operacional, a segurança no trabalho e colocou os custos operacionais entre os mais competitivos do mundo (MAGALHÃES; KATZ, 2010).

Atualmente, existem diversas metodologias para o cálculo econômico-financeiro das máquinas de colheita florestal. Diante do exposto, a determinação de um padrão de cálculo que melhor aproxima os custos operacionais nas condições brasileiras torna-se essencial para determinação de seus componentes e para efeito de comparação entre máquinas ou sítios de operação.

O estudo que tem por objetivo determinar o grau de variação dos indicadores de cálculo financeiro, diante de alterações nas variáveis mais relevantes de um projeto, denomina-se análise de sensibilidade (OLIVEIRA, 2009).

A análise de sensibilidade tornou-se uma etapa muito importante na tomada de decisão. De modo geral, a análise de sensibilidade é utilizada para: 1) tomar melhores decisões; 2) decidir quais dados estimados devem ser refinados antes de se tomar uma decisão; e 3) concentrar-se nos elementos críticos durante a implementação (ESCHENBACH, 1992).

A análise de sensibilidade é apresentada por meio do uso de um gráfico (diagrama *Spiderplot*), o qual permite analisar as seguintes situações: limites de cada variável independente; a influência no resultado final para cada mudança unitária da variável independente; e a existência de uma

relação (linear ou não) entre a variável independente e a variável dependente (resultado final) (SILVA, 2004).

Outro ponto importante na viabilidade do uso de máquinas na colheita florestal é identificar o retorno que será obtido no investimento, que pode ser alcançado pela taxa interna de retorno (TIR). A TIR é expressa de forma percentual, sendo um dos critérios econômicos mais utilizados para medir a eficiência dos investimentos.

O ponto de equilíbrio (PE) ou de nivelamento é o número de horas que a máquina deve trabalhar por ano, a fim de justificar sua aquisição. O PE é um indicador da flexibilidade da operação. Em outras palavras, é o ponto em que as receitas se igualam aos custos (SILVA *et al.*, 2008).

As máquinas florestais apresentam o ponto de mínimo do processo produtivo para viabilizar seu uso, determinando o limite operacional. Os limites estão associados à declividade elevada do terreno e às árvores de menores volumes ou às suprimidas entre outras, influenciando na queda de produção na colheita. Essas alterações elevam os custos de produção, determinando o seu ponto de equilíbrio.

O presente trabalho objetivou avaliar economicamente a colheita florestal mecanizada no sistema de toras curtas, módulo constituído pelos tratores florestais *harvester* e *forwarder*, fundamentados nas análises de custo operacional, na análise de sensibilidade, no custo de produção, na taxa interna de retorno e no ponto de equilíbrio, determinando os alvos potenciais capazes de reduzir os custos operacionais e de produção.

2 Material e métodos

Com o intuito de efetuar a análise econômico-financeira da atividade de colheita florestal com 6 metros de comprimento usando o *harvester* (John Deere 1270D) para o corte e *forwarder* (John Deere 1710D) para a extração de madeira.

O custo total obtido foi o somatório do custo fixo e do custo variável (equação 1). Os custos fixos e as variáveis foram expressos em dólares por hora efetiva de trabalho (US\$ h⁻¹), utilizando a taxa de câmbio, Dólar (R\$

1,802), Euro (R\$ 2,290) e Libra (R\$ 2,772), cotação comercial em média de compra e da venda em 11 de janeiro de 2012.

$$CT = CF + CV \quad \text{eq. 1}$$

em que

CT = custos totais;

CF = custos fixos; e

CV = custos variáveis.

2.1 Custo de maquinário

2.1.1 Custos fixos

Os custos fixos são a soma de todos os fatores físicos de produção, não sendo influenciado o nível de horas de operação ou a produção das máquinas, e ocorrem mesmo quando a máquina não estiver em operação. Os custos fixos são determinados pela equação 2.

$$CF = D + JS + A + T \quad \text{eq. 2}$$

em que

D = depreciação;

JS = juros, seguros e impostos;

A = abrigo; e

T = taxas administrativas.

2.1.1.1 Depreciação

O custo de depreciação é o custo decorrente do desgaste ou da obsolescência natural da máquina ao longo do tempo no processo produtivo. Para as máquinas florestais, essa perda de valor é mensurada periodicamente pela contabilidade até que esse ativo tenha valor reduzido a um valor residual de 10% do valor inicial da máquina.

O custo da depreciação foi determinado por meio dos métodos linear, exponencial, soma dos dígitos, soma inversa dos dígitos e fundo de renovação *sinking fund*, propostos por Freitas *et al.* (2007), descritos pelas equações 3 a 7. Assim, é possível compará-los com os custos reais de depreciação da vida útil das máquinas.

- Método linear

$$Dl = \left(\frac{Va - Vr}{NHe} \right) \quad \text{eq. 3}$$

em que

DI = depreciação linear (US\$ h⁻¹);
 Va = valor de aquisição da máquina (US\$);
 Vr = valor residual (US\$);
 He = horas efetivas de uso anual (h); e
 N = vida útil (anos).

- Método exponencial

$$Vn = Va(1-t)^n \Rightarrow t = \left(1 - \sqrt[n]{\frac{Vr}{Va}} \right) \quad \text{eq. 4}$$

em que

Vn = valor do ativo no período “n” (US\$);
 Va = valor de aquisição da máquina (US\$);
 Vr = valor residual (US\$);
 N = vida útil (anos);
 n = ano em consideração; e
 t = taxa de depreciação.

- Método soma dos dígitos

$$Ds = \left(\frac{nd}{SD} (Va - Vr) \right) \quad \text{eq. 5}$$

em que

Ds = depreciação soma dos dígitos (US\$ h⁻¹);
 Va = valor de aquisição da máquina (US\$);
 Vr = valor residual (US\$);

nd = ano decrescente da vida útil (n;...; 4; 3; 2; 1); e
SD = soma dos dígitos (1+2+3+4+...+n).

- Método soma inversa dos dígitos

$$Di = \left(\frac{nv}{SD} (Va - Vr) \right) \quad \text{eq. 6}$$

em que

Vn = valor do ativo no período “n” (US\$);
Va = valor de aquisição da máquina (US\$);
Vr = valor residual (US\$);
nv = ano de vida útil (1; 2; 3; 4;...; n); e
SD = soma dos dígitos (1+2+3+4+...+n).

- Método fundo de renovação *sinking fund*

$$Vn = \frac{[R(1+i)^n - 1]}{i} \Rightarrow R = \left(\frac{(Va - Vr)}{\frac{(1+i)^n - 1}{i}} \right)$$

eq. 7

em que

Vn = depreciação fundo de renovação “*sinking fund*” (US\$ h⁻¹);
Va = valor de aquisição da máquina (US\$);
Vr = valor residual (US\$);
R = parcela de depreciação anual;
i = taxa de juros; e
n = ano que deseja calcular.

2.1.1.2 Juros, seguros e impostos

Os juros, seguros e impostos foram calculados sobre o valor de cada máquina, aplicando-se ao investimento médio anual (IMA) (CANTO, 2009) (equação 8), uma taxa de juros correspondente em que seria aplicado o

capital. Nesta pesquisa, utilizou-se uma taxa real de juros de 12% a.a. Os seguros são os custos justificados por parte da empresa para ser ressarcida em caso de acidentes, pois essas máquinas operam em constantes perigos. Para determinar o custo de juros, seguros e impostos foram utilizadas as equações 8 e 9.

$$JS = \frac{(IMA \ i)}{He} \quad \text{eq. 8}$$

em que

JS = custo de juros, seguros e impostos (US\$ h⁻¹);

IMA = investimento médio anual (US\$);

i = taxa de juros mais seguros anuais simples (%); e

He = horas efetivas de uso anual.

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

em que

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

Vr = valor residual da máquina (%); e

N = vida útil estimada (anos).

2.1.1.3 Abrigo

O valor do abrigo é calculado e pago em função do local de armazenamento, vigias e estrutura requerida pela máquina florestal (equação 10), tendo sido considerado um fator de ajuste (FA) de 0,75% do valor inicial da máquina (SIMÕES e FENNER, 2010).

$$A = \frac{(Va \ FA)}{He} \quad \text{eq. 10}$$

em que

A = custo de abrigo (US\$);

Va = valor de aquisição (US\$);

FA = fator de ajuste; e

He = horas efetivas de uso anual.

2.1.1.4 Taxas de administração

Em função dos encargos administrativos foi considerado um percentual do valor inicial da máquina, associado aos trabalhos de escritório e à supervisão das operações em campo, de acordo com o preconizado pela American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 2001) e Simões e Fenner (2010). Dessa forma, o fator de ajuste (FAd) foi de 1,0%, determinado pela equação 11.

$$T = \frac{Va \cdot FAd}{He} \quad \text{eq. 11}$$

em que

T = taxas de administração (US\$ h⁻¹);

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

FAd = fator de ajuste (0,01); e

He = horas efetivas de uso anual.

2.1.2 Custos variáveis

São os custos que variam, proporcionalmente, com a quantidade produzida ou com o uso da máquina. Os custos variáveis foram determinados pela equação 12.

$$CV = C + Gl + Oh + Pe + MR + MO + TP + TM \quad \text{eq. 12}$$

em que

C = custos de combustível;

Gl = custos de lubrificantes;

Oh = custos de óleo hidráulico;

Pe = custos de pneus;

MR = custos de manutenção e reparos;

MO = custos de mão de obra;

TP = custos de transporte de pessoal; e
TM = custos de transporte de maquinário.

2.1.2.1 Combustível

Refere-se ao custo de consumo de combustível das máquinas (BURLA, 2008; SILVA, 2008; CANTO, 2009; OLIVEIRA, 2009). O consumo de combustível é calculado em função da potência do motor, do fator de carga, da altitude, da temperatura, do tipo de combustível, etc. (FERNANDES; LEITE 2001). Foi considerado o consumo médio de combustível obtido pelos dados históricos da máquina durante a sua vida útil, em função do tempo de operação e da declividade, sendo expresso pela equação 13.

$$C = P u c \quad \text{eq. 13}$$

em que

C = custo de combustível (óleo diesel) (US\$ h⁻¹);

Pu = preço do litro de combustível (US\$ L⁻¹); e

c = consumo de combustível (L h⁻¹).

2.1.2.2 Lubrificantes

Esse custo é referente ao consumo de óleos e graxas e foi calculado com base no porcentual de combustível gasto pela máquina (equação 14) (SILVA, 2008), em que foi considerado o consumo médio de lubrificantes e graxas. Os custos foram obtidos durante a vida útil das máquinas e foi fornecido pela empresa onde se realizou o trabalho.

$$I = I L G C \quad \text{eq. 14}$$

em que

I = custo de lubrificantes (US\$ h⁻¹);

ILG = índice de custos com lubrificantes (20%); e

C = custos com combustíveis (US\$).

2.1.2.3 Óleo hidráulico

Esse custo foi calculado com base no percentual de combustível da máquina (SILVA, 2008; OLIVEIRA, 2009). Foi considerado o consumo de combustível da vida útil da máquina e obtido junto à empresa (*harvester* 20% e *forwarder* 50%) (equação 15).

$$Oh = I C \quad \text{eq. 15}$$

em que

Oh = custo com óleo hidráulico (US\$ h⁻¹);

I = índice de consumo por máquina (L h⁻¹); e

C = custo do combustível (US\$ L⁻¹).

2.1.2.4 Pneus e ou, esteiras

É o custo referente aos rodados da máquina, podendo ser de pneus e, ou, esteiras. O valor desse custo pode ser influenciado em função da topografia do terreno, do ambiente de trabalho da máquina, do alinhamento, da manutenção dos rodados e do uso de protetores físicos para os pneus (MOREIRA, 2000), foi calculado pela equação 16. Os dados da vida útil do pneus foram obtidos a partir de dados históricos da empresa.

$$Pe = \frac{Npe Vpe}{Hpe} \quad \text{eq. 16}$$

em que

Pe = custo de pneus e, ou, esteiras (US\$ h⁻¹);

Npe = número de pneus por máquina e, ou, esteiras;

Vpe = valor de um pneu e, ou, esteira da máquina (US\$ unid⁻¹); e

Hpe = vida útil do pneu e, ou, esteira (h unid⁻¹).

2.1.2.5 Manutenção e reparos

Correspondem aos custos destinados às manutenções e aos reparos das máquinas durante sua vida útil, como mão de obra e encargos sociais,

além de peças de reposição e outros materiais, conforme a metodologia citada por Simões e Fenner (2010), expresso pela equação 17.

$$MR = \frac{\left[Va \cdot FR_1 \left(\frac{h + He}{1000} \right)^{FR_2} \right] - \left[Va \cdot FR_1 \left(\frac{h}{1000} \right)^{FR_2} \right]}{He} \quad \text{eq. 17}$$

em que

MR = custos de manutenção e reparos (US\$ h⁻¹);

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

FR₁ = fator de reparo 1 (0,003);

h = horas de uso acumulada, até o início do ano em análise (h);

FR₂ = fator de reparo 2 (2,0); e

He = horas efetivas de uso no ano de análise (h).

2.1.2.6 Mão de obra

Refere-se ao custo total dos operadores, como o salário mensal, o 13^o salário, as férias, os benefícios, os encargos sociais, os seguros, os cuidados médicos e a alimentação (BURLA, 2008). Esse custo foi obtido a partir dos dados da empresa onde se realizou o trabalho, em valores mensais divididos pela quantidade de horas trabalhadas por mês, demonstrado pela equação 18.

$$MO = \left(\frac{Sop \cdot ES \cdot M}{He} \right) \quad \text{eq. 18}$$

em que

MO = custo de mão de obra (US\$ h⁻¹);

Sop = salários mensais dos operadores (US\$);

ES = taxa de encargos sociais (1,74);

M = meses no ano (12); e

He = horas efetivas de uso anual da máquina (h).

2.1.2.7 Transporte de pessoal

É o custo do deslocamento de pessoal até o local das operações. Esse custo foi obtido a partir de contratos da empresa durante a vida útil da máquina, no qual o custo é de US\$ 0,38 km⁻¹ e a média de deslocamento diário de 333 km durante os três turnos de operação, sendo representado em quantidade de horas efetivamente trabalhadas, apurado na equação 19. Este valor é diretamente influenciado pela distância dos projetos a serem colhidos.

$$TP = \left(\frac{dd \cdot ck \cdot da}{He \cdot Ne} \right) \quad \text{eq. 19}$$

em que:

TP = custo de transporte de pessoal (US\$ h⁻¹);

dd = média de deslocamento diários (km dia⁻¹);

ck = custo por quilômetro (US\$ km⁻¹);

da = dias trabalhados no ano;

He = horas efetivas de uso anual da máquina (h); e

Ne = número de operadores por veículo de transporte (18).

2.1.2.8 Transporte de maquinários

É o custo gerado com o transporte das máquinas (TM) entre projetos; quanto menor a distância entre projetos e melhor o padrão das estradas menor será este custo, como pode ser visualizado pela equação 20.

$$TM = ITM \cdot TP \quad \text{eq. 20}$$

em que

TM = custo de transporte de maquinários (US\$ h⁻¹);

ITM = índice de transporte de máquinas (75 %); e

TP = custo de transporte de pessoal (US\$).

2.2 Análise de sensibilidade

Para determinação dos valores mínimos, médios e máximos das variáveis mais relevantes do módulo de colheita, adotado pelo *harvester* e pelo *forwarder*, foi considerada uma variação de 40% (20% para mais e para menos) nos valores dos principais componentes do custo operacional, trabalhando durante os três turnos em um período de 24 horas operacionais diárias, com o intuito de representar sua realidade. A partir desses dados, plotou-se graficamente as curvas das variáveis no plano (x, y).

2.3 Produtividade

Na determinação do custo de produção, considerou-se apenas a porção do tempo total, durante o qual a máquina foi programada para executar um trabalho produtivo, ou seja, o tempo efetivamente no trabalho (LOPES, 2009).

Foram utilizados os dados de produtividade obtidos no Capítulo 1 para a análise dos custos de operação, das taxas internas de retorno e dos pontos de equilíbrio das máquinas *harvester* e *forwarder*, em função da declividade do terreno, do volume de madeira por árvore e da distância de extração.

2.4 Custos de produção

O custo de produção das máquinas foi determinado pela divisão dos custos operacionais (US\$ h⁻¹) em relação à produtividade (m³ h⁻¹), seguindo as funções de cada módulo de colheita, sendo o valor do custo dado em US\$ m⁻³, determinado pela equação 21.

$$CP = \frac{CT}{P} \quad \text{eq. 21}$$

em que

CP = custo de produção (US\$ m⁻³);

CT = custo operacional total (US\$ h⁻¹); e

P = produtividade (m³ h⁻¹).

Foram avaliados diversos modelos de superfície de resposta, relacionando o custo de produção do *harvester* com a declividade e o volume por árvore. Para o *forwarder* foram utilizados modelos para quantificarem o comportamento dos custos de produção, em função da declividade, da distância de extração. Foram utilizados os modelos mais simples e que representaram melhor as condições de campo.

O gráfico está na coloração em tons de cinza; quanto mais claro é o local no gráfico, maior é a grandeza da variável resposta.

A identificação e a exclusão de observações discrepantes (*outliers*) nos dados foram feitas antes do ajuste, com o auxílio de gráficos de dispersão e após o ajuste com inspeção de gráficos de resíduos e com o auxílio do teste de Bonferroni, para detecção de *outliers* em modelos lineares (WEISBERG, 2005).

Para verificar o atendimento do pressuposto de normalidade dos erros do modelo ajustado foi feito o teste Shapiro-Wilk (ROYSTON, 1982) e para verificar o atendimento dos demais pressupostos básicos de regressão linear (resíduos independentes, identicamente distribuídos, média zero e variância constante σ^2) foi feita análise gráfica dos resíduos.

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada utilizando as análises estatísticas, como: erro padrão residual e porcentual; e o coeficiente de determinação ajustado.

As análises foram processadas utilizando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

2.5 Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de retorno que iguala o valor presente líquido (VPL) do fluxo de caixa a zero. Ela representa a real rentabilidade do investimento, e por essa razão é considerada a taxa interna do empreendimento. Conforme Silva *et al.* (2005), ela é obtida com o uso da equação 22, expressa de forma porcentual.

$$\sum_{j=0}^n R_j(1+TIR)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+TIR)^{-j} = 0 \quad \text{eq. 22}$$

em que

TIR = taxa interna de retorno;

R_j = receitas do período de tempo j considerado;

C_j = custos do período de tempo j considerado; e

n = duração do projeto em anos ou em número de períodos de tempo.

A TIR também pode ser obtida graficamente. Traçando-se o comportamento em um gráfico, em que a taxa de juros em porcentagem constitui o eixo x (abscissa) e o VPL o eixo y (ordenada), pode-se estimar a TIR escolhendo-se duas taxas quaisquer, calcula-se o VPL, plotam-se os dados em um gráfico e unem-se os pontos com uma reta (Figura 1). No local onde a reta cortar o eixo x ter-se-á o valor aproximado da TIR (SILVA *et al.*, 2005).

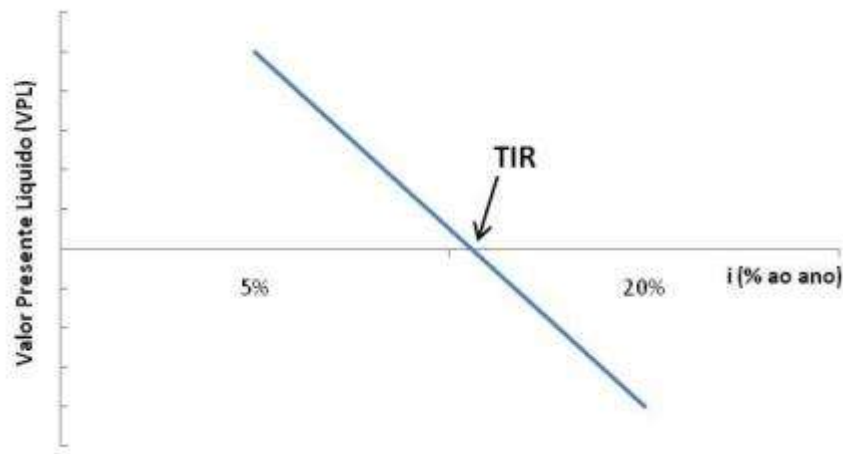


Figura 1 – Método gráfico para determinar a taxa interna de retorno (TIR).

Foi calculada a rentabilidade das máquinas para operação em horas efetivas de uso anual de 4711,68, vida útil econômica de cinco anos, declividade do terreno de 10° e volume de madeira por árvore de $0,274 \text{ m}^3 \text{ arv}^{-1}$, em média, simulando a um custo de produção de US\$ $4,90 \text{ m}^{-3}$ de madeira sem casca e de US\$ $3,80 \text{ m}^3$ para a extração da madeira com o transportador *forwarder*.

2.6 Ponto de equilíbrio (PE)

A análise do ponto de equilíbrio (PE) constituiu-se de dois métodos. O primeiro método é em relação ao número de horas anuais trabalhadas, que viabilizam a compra da máquina, indicando o período mínimo de operação efetiva. O segundo é o valor mínimo do custo de produção das máquinas, condicionada às variações nas declividades do terreno e nos volumes de madeira por árvore, considerando um custo médio de US\$ 5,00 m⁻³ de madeira colhida sem casca. Quanto mais baixo for o valor mais flexível é o investimento, demonstrando até que ponto a indústria pode operar abaixo da sua capacidade operacional sem colocar o empreendimento em risco.

Utilizando a equação 23 foi determinado o número de horas efetivas de operação de uma máquina em que as receitas cobrem os custos.

$$H = \frac{CFa}{PU - CV} \quad \text{eq. 23}$$

em que

H = horas trabalhadas por ano (h ano⁻¹);

CFa = custo fixo anual (US\$ ano⁻¹);

PU = preço médio da hora trabalhada (US\$ h⁻¹); e

CV = custo variável (US\$ h⁻¹).

3 Resultados e discussão

3.1 *Harvester*

3.1.1 Custos operacionais

O custo operacional do *harvester* John Deere, modelo 1270D, foi de US\$ 145,36 por hora efetivamente trabalhada, adotando uma taxa real de juros de 12% a.a., eficiência operacional da máquina de 80%, trabalhando em três turnos de 8 horas cada, com o dólar no valor de R\$ 1,802, e com custos operacionais reais de US\$ 33,92 h⁻¹ (23,34%) de custos fixos e US\$ 111,44 h⁻¹ (76,66%) de custos variáveis. Os valores dos componentes dos custos podem ser observados na Figura 2. Os valores utilizados foram adequados aos dos custos praticados no setor florestal, uma vez que sua

fonte foi gerada a partir de uma série histórica de dados mais completa da empresa. Os dados dos cálculos do custo operacional do *harvester* por hora são visualizados no Apêndice B.

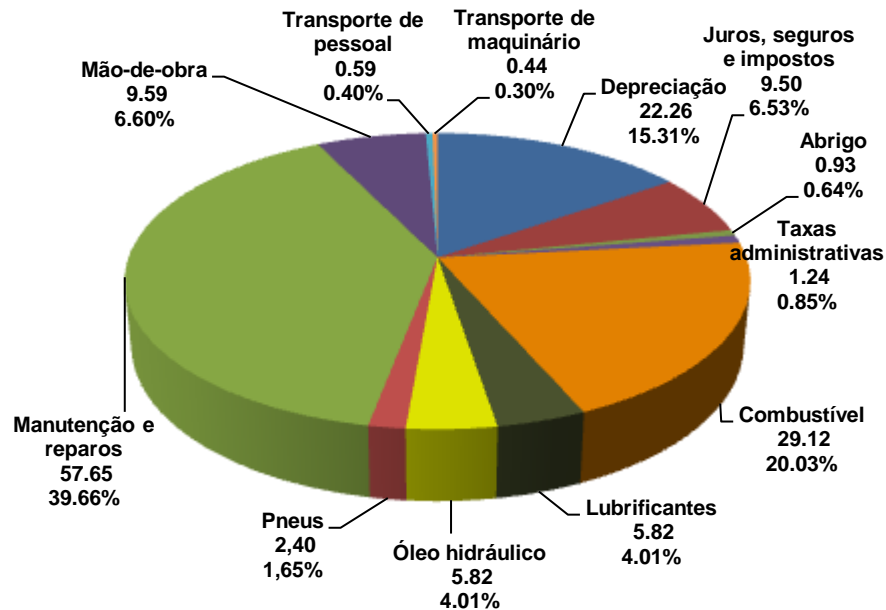


Figura 2 – Componentes do custo operacional do *harvester* John Deere, modelo 1270D, em dólares por hora efetiva trabalhada (US\$h⁻¹) e porcentagem (%).

O custo de manutenção e os reparos foram da ordem de 39,66% tendo, assim, maior representatividade. Em seguida, destacou-se o custo de combustível com 20,03% e a depreciação com 15,31%, respectivamente.

Os resultados foram similares aos encontrados por Burla (2008), US\$ 130,29 por hora efetiva trabalhada, testando o *harvester* John Deere, modelo 1270D, sendo US\$ 23,53 h⁻¹ (18 %) de custos fixos e US\$106,76 h⁻¹ (82 %) de custos variáveis. A diferença dos custos fixos com os encontrados na presente pesquisa foi porque o autor considerou apenas os custos de depreciação e juros, não contabilizando os custos de seguros, impostos, abrigo e taxas administrativas.

Os resultados deste trabalho diferem dos encontrados por Martins *et al.* (2009), em que obtiveram um custo operacional na ordem de US\$ 113,28 h⁻¹. O mesmo caso ocorreu com Lopes *et al.* (2007), em que foi avaliado o *harvester* composto por uma escavadeira hidráulica, com rodados de esteiras, marca Caterpillar, modelo CAT 320 Short Tail e cabeçote da

marca LogMax. Os autores obtiveram os custos operacionais de US\$ 115,72 h⁻¹. Os custos fixos corresponderam a 21,9% e os custos variáveis, incluindo os custos com manutenção e reparos, foram de 62,7%.

Com o auxílio da metodologia, foram obtidos modelos que confirmaram uma tendência de queda nos custos fixos e um acréscimo nos custos variáveis ao longo da vida útil do *harvester*, determinando o comportamento dos custos totais por hora efetiva trabalhada, compilado na Figura 3.

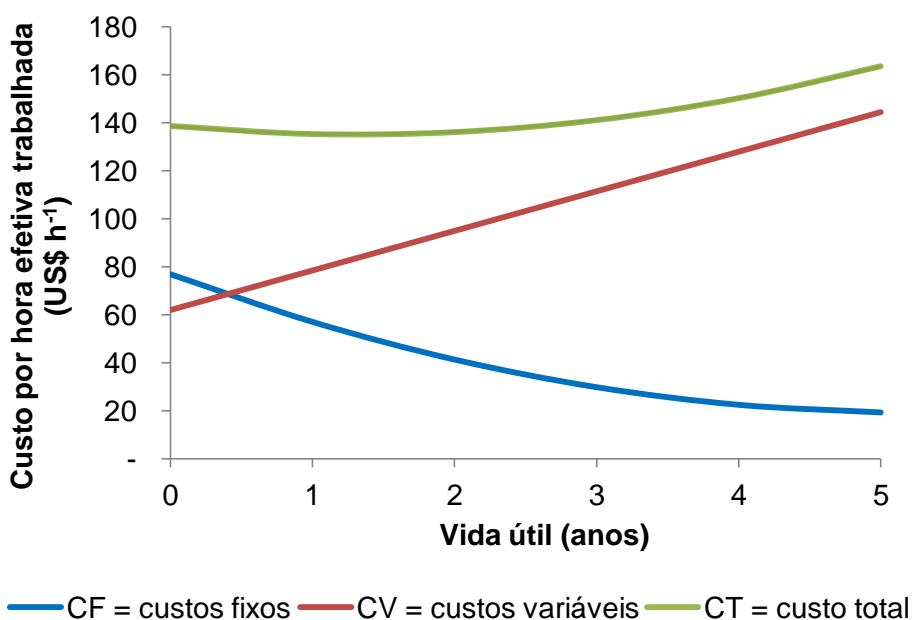


Figura 3 – Custos fixos, variáveis e totais por hora efetiva de trabalho do *harvester* durante a vida útil, em anos.

$$CF = 2,082 \times A^2 - 21,905 \times A + 76,738 \quad \text{eq. 24}$$

$$r^2 = 0,999$$

$$CV = 16,473 \times A + 62,019 \quad \text{eq. 25}$$

$$r^2 = 1$$

$$CT = 2,082 \times A^2 - 5,433 \times A + 138,758 \quad \text{eq. 26}$$

$$r^2 = 0,999$$

em que

CF = custos fixos (US\$ h⁻¹);

CV = custos variáveis (US\$ h⁻¹);

CT = custos totais (US\$ h⁻¹); e
A = vida útil econômica (anos).

A maior parte dos custos fixos representa o custo de depreciação da máquina, que representou 65,62% dos custos fixos. Na determinação da depreciação foram utilizados os métodos citados por Freitas *et al.* (2007). Visualiza-se na Figura 4 que os valores médios dos métodos de depreciação na diferem.

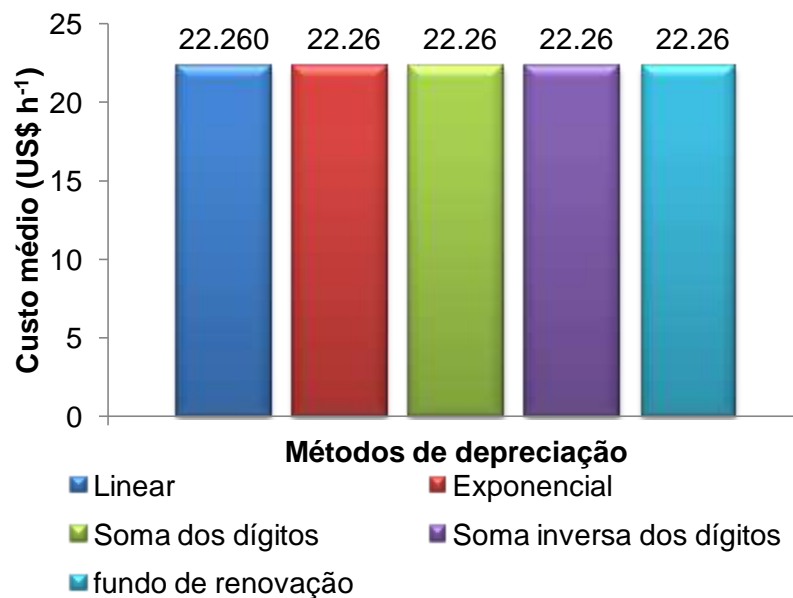


Figura 4 – Custo dos métodos de depreciação do *harvester*.

O método exponencial foi o que mais se aproximou do comportamento real da empresa dos custos de depreciação estimados durante a vida útil, seguido pela soma inversa dos dígitos; os comportamentos dos demais apresentaram uma situação irreal, constatado na Figura 5. Esse comportamento é confirmado Freitas *et al.* (2007), que avaliaram o comportamento da depreciação no transporte florestal.

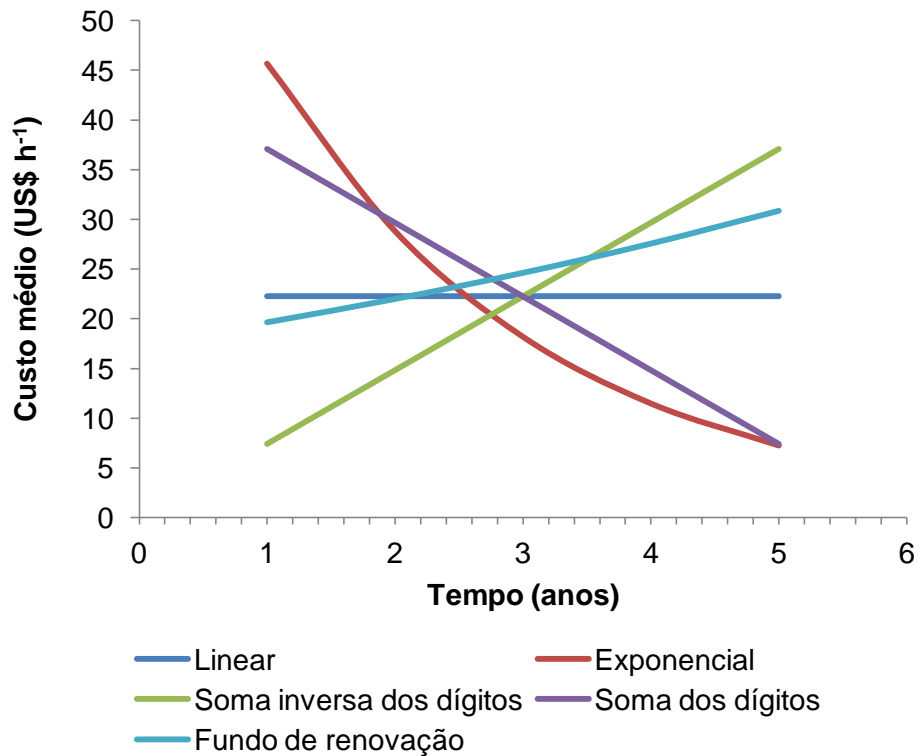


Figura 5 – Custos médios dos métodos de depreciação durante a vida útil do *harvester*.

Os elementos mais expressivos nos custos variáveis foram a manutenção e os reparos, o combustível e a mão de obra dos custos totais. Juntos, eles são responsáveis por mais de 50% dos custos variáveis totais. O custo de manutenção aumenta à medida que aumenta o tempo de uso da máquina. Esse custo representou no primeiro ano US\$ 24,71 h⁻¹ e no quinto ano US\$ 90,60 h⁻¹, aumento de 366,7% em apenas cinco anos (Figura 6).

O aumento do custo de manutenção (Figura 6) advém em função do uso da máquina, no qual as peças que a compõem vão se desgastando e passam a ter uma necessidade maior de manutenção e reparos.

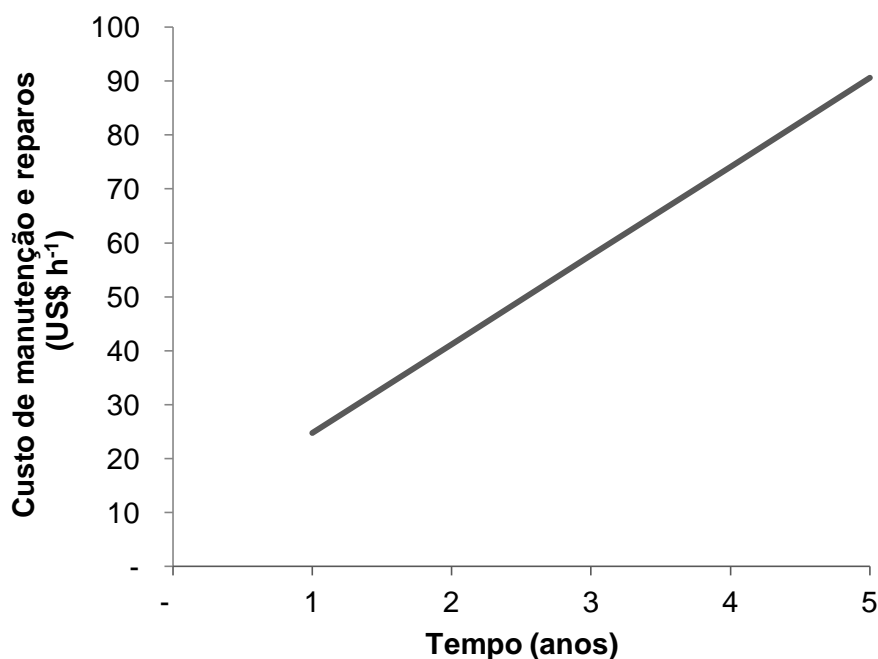


Figura 6 – Custo de manutenção e reparos durante a vida útil do *harvester*.

3.1.2 Análise de sensibilidade

As variáveis que mais influenciaram os custos de produção do trator colhedor *harvester*, em percentuais, foram: valor de aquisição, manutenção e reparos, preço do combustível, vida útil econômica, depreciação e taxa de juros, sendo que pequenas reduções geram grandes retornos econômicos.

Na Figura 7, podem-se visualizar no diagrama de *Spiderplot* as seis principais variáveis do custo operacional do *harvester*. As equações que apresentam maior ângulo de inclinação em relação ao eixo x acabam tendo maior influência na representatividade no custo operacional. Quando o ângulo é positivo implica em aumento do custo operacional, quando tende a negativo implica em sua diminuição.

Pela observação da Figura 7, nota-se que a variável de maior impacto no custo operacional foi o valor da máquina, seguido da manutenção e dos reparos, do preço do combustível, da vida útil econômica, da depreciação e, por fim, da taxa de juros.

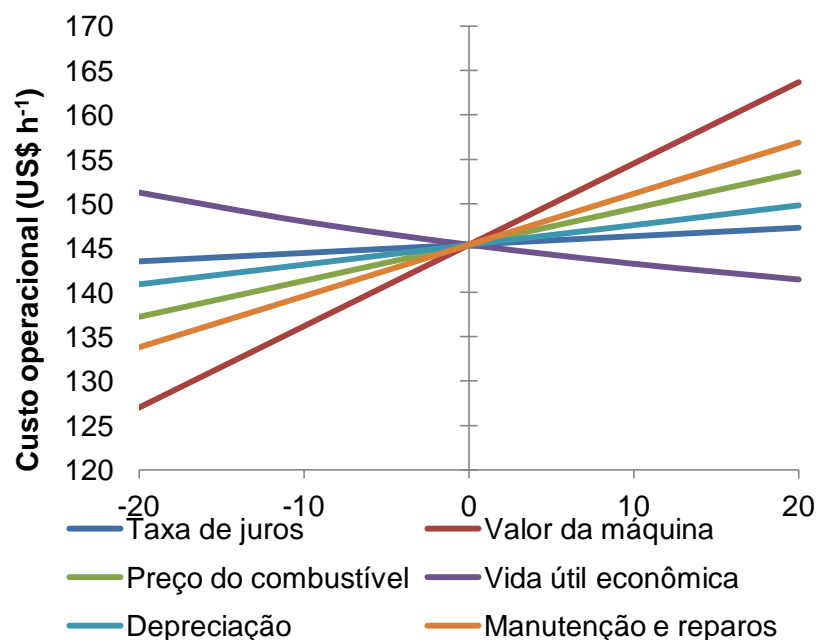


Figura 7 – Diagrama de *Spiderplot* das principais variáveis dos custos operacionais do *harvester*, com variação dos seis principais componentes do custo.

3.1.2.1 Valor de aquisição

Em decorrência das máquinas florestais serem totalmente automatizadas e de tecnologias importadas, torna seu custo elevado, encarecendo os custos de operação. A cada 1% no acréscimo no valor de aquisição ocorreu um aumento US\$ 0,92 h⁻¹ no custo operacional do *harvester*.

3.1.2.2 Manutenção e reparos

Os custos com manutenção, de grande representatividade no custo total, influencia consideravelmente o custo de produção, com uma variação de mais ou menos 20%. Com base nos resultados obtidos, observou-se que um aumento na ordem de 1% aumenta US\$ 0,58 h⁻¹ no custo de produção do *harvester*. Uma maneira de diminuir estes custos seria prever a vida útil de cada peça, e trocá-las antes que viessem a demonstrar os defeitos; isto faria com que pudessem ser feitas manutenções conjuntas, otimizando o tempo e o pessoal responsável pela manutenção sem perda de tempos.

3.1.2.3 Preço do combustível

Os custos com combustível estão ligados diretamente com a quantidade de horas trabalhadas e uma alteração neste custo interfere gradativamente no custo operacional das máquinas. A tendência de aumento no custo das máquinas com aumento do consumo de combustível. A cada aumento de 1% no custo de combustível aumentou US\$ 0,41 h⁻¹ no valor do custo operacional.

3.1.2.4 Depreciação

A depreciação tem importante participação nos custos de uma máquina; qualquer alteração nos valores intervém diretamente na diferença do seu custo operacional. Nota-se que a cada 1% no acréscimo da depreciação aumenta US\$ 0,22 h⁻¹ para o *harvester*.

3.1.2.5 Vida útil econômica

O aumento de 1% representou uma queda no custo de US\$ 0,22 h⁻¹ do *harvester*. Nota-se uma tendência de redução no custo com aumento da variável, determinando ângulo negativo da reta.

3.1.2.6 Taxa de juros

Os custos com taxa de juros, com sua representatividade no custo total, influencia consideravelmente o custo de produção, sendo a sexta variável de maior impacto, com sua variação em torno de 20%. Com base nos resultados obtidos observou-se que um aumento na ordem de 1% aumentou US\$ 0,09 h⁻¹ no custo de operacional do *harvester*.

3.1.2.7 Análise geral

Com base nos resultados obtidos para os componentes de custo, simulando uma situação em que a empresa consiga uma economia real de

10% em cada um dos itens de maior expressão e um aumento de 10% na vida útil, ela poderá obter uma redução no custo operacional de 17% (Tabela 1).

Tabela 1 – Redução de custos obtida com a diminuição em 10 % dos componentes de custo mais relevantes

Máquina	Vm	MR	PC	Vue	D	TJ	Diferença (%)
<i>Harvester</i>	9,16*	5,76*	4,08*	2,62*	2,22*	0,95*	17

* Valores em US\$ h⁻¹.

Vm = valor da máquina; MR = manutenção e reparos; PC = preço de combustível; Vue = vida útil econômica; D = depreciação; e TJ = taxa de juros.

Esses valores da análise de sensibilidade diferem dos encontrados por Paula (2011), para o *harvester*, Komatsu PC200 e PC 228, que encontrou redução no custo de 7% caso consiga economizar 10% nos custos dos itens de combustível, de manutenção e reparos e de depreciação, representando uma economia de US\$ 7,85 h⁻¹, em média. Nessa pesquisa, esse valor foi de US\$ 12,06 h⁻¹.

3.1.3 Custos de produção

A determinação do custo de produção, em dólar, por metros cúbicos de madeira cortada e processada, em relação ao sentido de deslocamento, foi obtida pelas equações 27 e 28, em que se tem a representação do modelo de custo de produção na direção de corte, em aclive e em declive. Observa-se que o custo de produção do *harvester* está expresso em função da declividade do terreno e do volume de madeira por árvore operando em uma jornada de 24 horas diárias. Na Figura 14 está apresentado o resultado da modelagem dos custos de produção na operação de aclive e na Figura 15 na operação de declive.

$$CPha = 11,7 + 0,00306 \times d^{2***} + 0,03592 \times d + 66,56 \times v^{2***} - 44,48 \times v^{***} - 0,2545 \times d \times v \quad \text{eq. 27}$$

r² ajustado = 0,8461

p-valor: < 2,2e-16

$$CPhd = 9,24 + 0,00349 \times d^2 - 0,03493 \times d + 44,26 \times v^2 - 27,52 \times v - 0,07297 \times d \times v \quad \text{eq. 28}$$

r^2 ajustado = 0,8664
 p-valor: < 2,2e-16

em que:

- CPha = custo de produção do *harvester* em aclave (US\$ m⁻³);
- CPhd = custo de produção do *harvester* em declive (US\$ m⁻³);
- d = declividade do terreno (°); e
- v = volume por árvore (m³ árvore⁻¹).

Nas Figuras 8 e 9 observa-se que o custo de produção apresenta um aumento, na medida em que se aumenta a declividade do terreno e com a redução do volume por árvore. Os resultados demonstram, em média, que para as mesmas condições, os custos de produção em aclave são menores do que os custos em declive, em virtude dos prejuízos de menor produtividade da máquina, causada, principalmente, pela redução da capacidade do campo de visão do operador e das árvores de menores volumes de madeira.

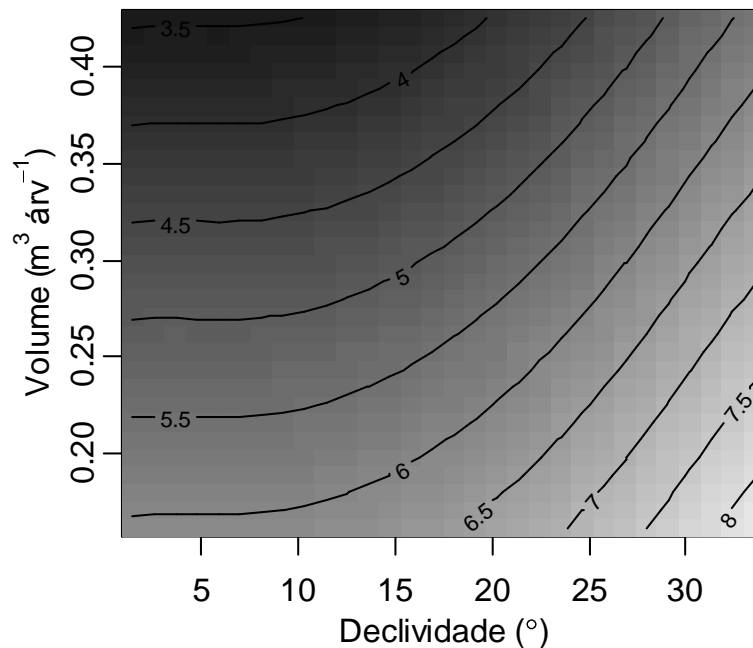


Figura 8 – Custo de produção do *harvester*, US\$ m⁻³, em relação ao sentido de operação em aclave, em função da declividade do terreno e do volume por árvore.

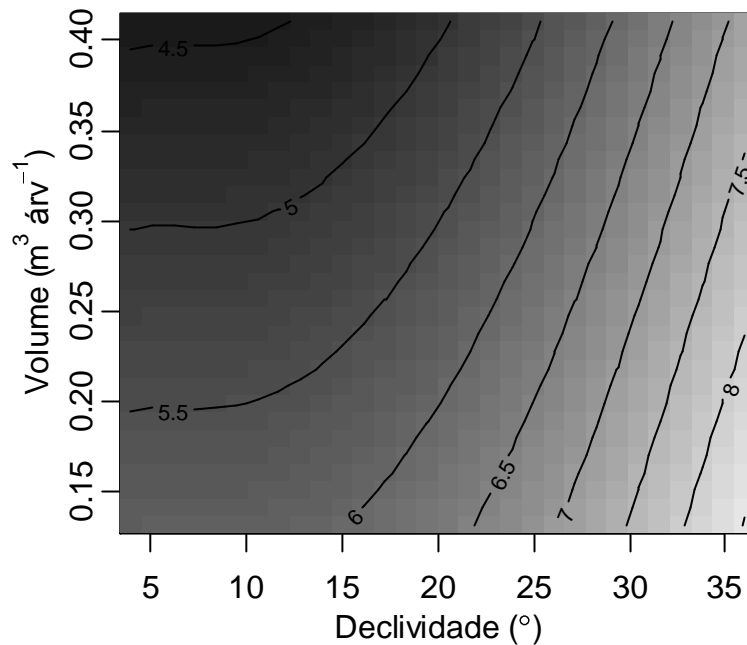


Figura 9 – Custo de produção do *harvester*, US\$ m⁻³, em relação ao sentido de operação em declive, em função da declividade do terreno e do volume por árvore.

Considerando-se a situação real em que o trabalho foi realizado, a máquina operando 4.712 horas anuais, possui uma produtividade média de 30,64 m³ h⁻¹, corta e processa um total de 144.375,68 m³ de madeira por ano. Apesar de aparentemente apresentar um valor pouco significativo, a diferença unitária, por metros cúbicos processados, pode representar uma economia considerável, principalmente quando está aliada a um conjunto de máquinas.

Os resultados são similares aos encontrados por Jiroušek *et al.* (2007), na operação de colheita de uma floresta de eucaliptos na Irlanda, avaliando colhedoras florestais, com volume por árvore de 0,27 m³, que obtiveram um custo de produção de € 4,53 m⁻³ (US\$ 5,76 m⁻³), com uma produtividade de 25,77 m³ h⁻¹ e um custo de produção de € 116,83 m⁻³ (US\$ 148,47 h⁻¹).

A mesma conjuntura foi observada na avaliação realizada por Burla (2008), que, por meio de modelagem de dados, obteve um custo operacional de US\$ 130,29 h⁻¹ e um custo de produção de US\$ 4,50 m⁻³ para uma floresta com volume individual de eucalipto de 0,27 m³, em 12% de declividade, para o *harvester* John Deere, modelo 1270.

Os custos de produção encontrados foram superiores aos encontrados por Paula (2011), para o *harvester*, com rodados de esteiras, da marca

Komatsu, modelos PC 200 e PC 228, na ordem de R\$ 8,45 (US\$ 4,80) e R\$ 8,49 (US\$ 4,83) por m³, respectivamente, operando em florestas de eucalipto com volumes médio de madeira por árvore de 0,177 e 0,220, respectivamente, e com declividade máxima de até 6,5%.

A mesma situação ocorreu quando os resultados deste trabalho foram comparados com os de Lopes *et al.* (2007), que avaliaram o *harvester* da marca Caterpillar, modelo CAT 320 *Short Tail*, com rodados de esteiras, que obtiveram um custo operacional de US\$ 115,72 h⁻¹ e um custo de produção de US\$ 3,67 m⁻³, para uma floresta de pinus com volume individual de 0,50 m³, em 3,5% de declividade do terreno.

3.1.4 Taxa interna de retorno (TIR)

Na Figura 10 constata-se os comportamentos do custo, da receita bruta e da receita líquida, em relação aos sentidos de operação aclone e declive, valores expressos em dólares pela vida útil.

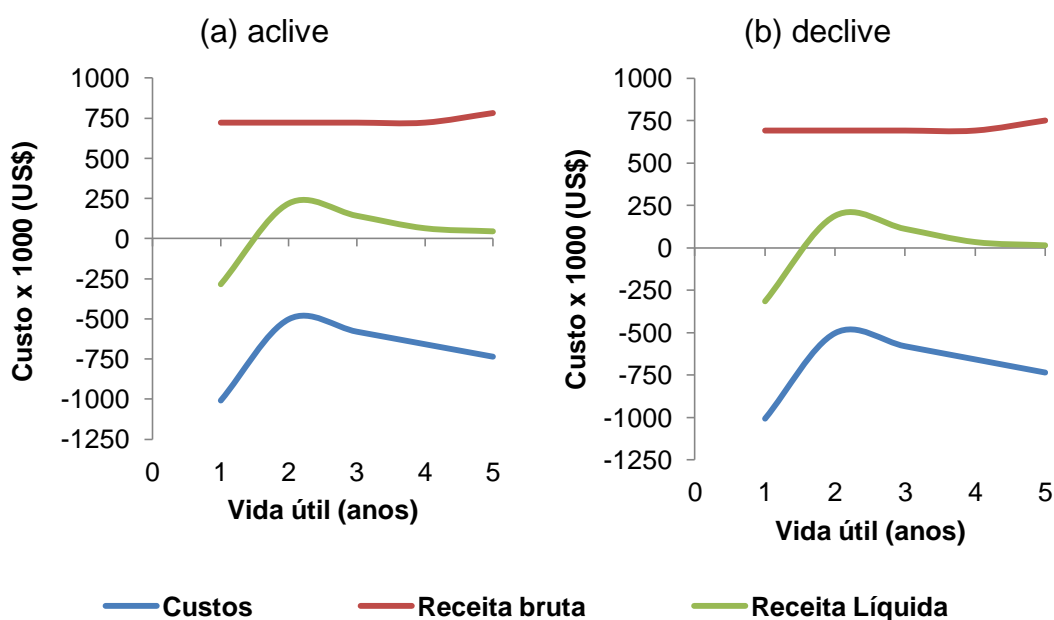


Figura 10 – Representação do custo, da receita bruta e da receita líquida, em dólar, pela vida útil. (a) operação em aclone; e (b) operação em declive.

Na Figura 11 estão compilados os comportamentos da TIR, em função dos sentidos de operação. Nota-se que a operação de declive apresentou um retorno médio inferior que no sentido de aclone. O resultado

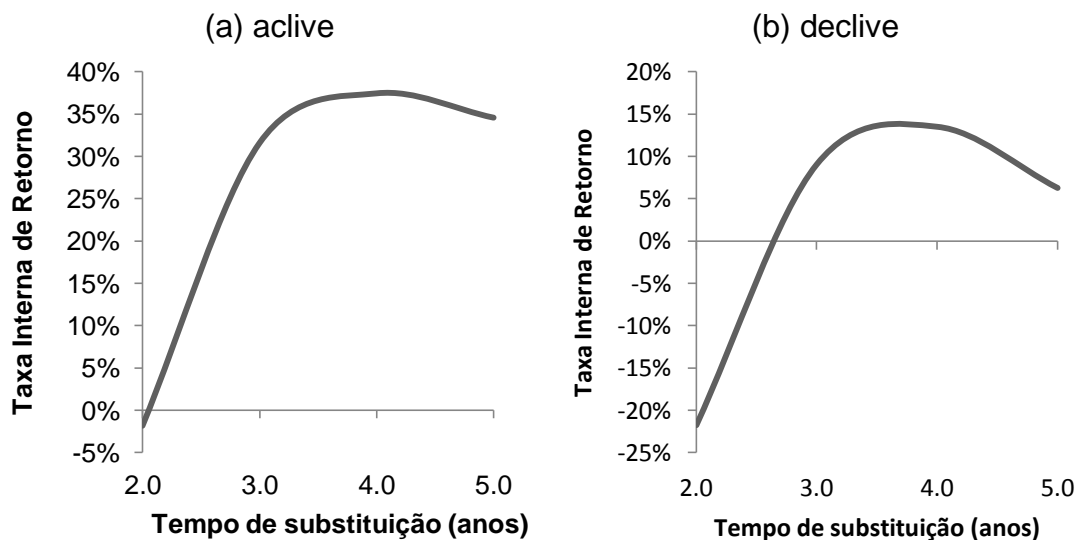


Figura 11 – Taxa interna de retorno, em função do tempo de substituição do *harvester*, em anos, no sentido de operação em active (a) e em declive (b).

apresentou a rentabilidade na derrubada e no processamento da madeira de 34,56% no sentido de operação em active e 6,26% para o sentido em declive. Se comparar a uma taxa real de 12% evidencia que apenas o sentido de active tem viabilidade. Isto é explicado pela diminuição na produtividade, de $31,33 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, no sentido de operação em active, para $29,95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no sentido em declive.

O comportamento das curvas da TIR confirma que a substituição do *harvester* irá atingir seu ponto máximo de retorno em declive pouco antes do sentido em active; isso ocorre em função da maior eficiência da máquina estar no sentido de active, demonstrando a máquina ser produtiva até o tempo maior que na direção declive e, assim, contribuindo para maior rentabilidade operacional.

3.1.5 Ponto de equilíbrio (PE)

3.1.5.1 Método I: número de horas trabalhadas

De acordo com os resultados encontrados, verificou-se que o ponto em que igualam as receitas e os custos foi de 3.800 horas ano⁻¹ para o sentido de operação em active e 4.527 horas ano⁻¹ para a operação em

declive, ou seja, a viabilidade de compra da máquina está condicionada a uma operação efetiva igual ou maior que as horas acima trabalhadas, considerando estáveis as condições de produtividades e de custos operacionais.

3.1.5.2 Método II: produtividade mínima da máquina

Nas condições em que o padrão médio do custo de produção do *harvester* deve ser de US\$ 4,90 m³, só se justifica o corte e o processamento da madeira em aclive caso o custo de produção não ultrapasse o valor de US\$ 6,65 m⁻³. Em declive, o custo de produção não deve exceder o valor de US\$ 5,29 m⁻³.

Na Tabela 2 podem ser verificados os custos de produção da máquina, em função do efeito na viabilidade da operação, considerando o volume por árvore variando de 0,14 a 0,42 e a declividade de até 35°.

Tabela 2 – Custo de produção de madeira em US\$ m⁻³ colhido pelo *harvester*, em função da declividade do terreno e do volume por árvore

Declividade (°)	Volume por Árvore (m ³ arv ⁻¹)								
	0,42	0,38	0,34	0,3	0,26	0,22	0,18	0,14	
Active	0	3,464	3,675	3,950	4,310	4,795	5,470	6,461	8,034
	5	3,490	3,686	3,941	4,276	4,723	5,338	6,225	7,595
	10	3,581	3,769	4,015	4,337	4,767	5,356	6,198	7,479
	15	3,748	3,934	4,179	4,502	4,935	5,528	6,374	7,658
	20	4,013	4,204	4,458	4,797	5,253	5,884	6,790	8,177
	25	4,417	4,620	4,897	5,271	5,783	6,500	7,548	9,187
	30	5,039	5,268	5,589	6,033	<u>6,653</u>	7,543	8,885	11,080
	35	6,048	6,327	6,734	7,317	8,161	9,422	11,435	15,040
Declive	0	4,802	4,728	4,725	4,792	4,935	5,168	5,516	6,026
	5	4,759	4,682	4,674	4,734	4,868	5,089	5,421	5,904
	10	4,818	4,734	4,721	4,777	4,909	5,128	5,458	5,941
	15	4,988	4,892	4,873	4,928	5,062	5,289	5,634	6,142
	20	<u>5,292</u>	5,179	5,152	5,207	5,351	5,598	5,978	6,544
	25	5,781	5,640	5,601	5,659	5,822	6,108	6,553	7,227
	30	6,558	6,367	6,308	6,374	6,572	6,927	7,494	8,373
	35	7,840	7,557	7,462	7,541	7,806	8,298	9,106	10,414

Dados sublinhados referem-se ao custo máximo de produção a ser pago.

Na Tabela 2, observa-se que a produtividade da máquina está limitada principalmente pelo volume por árvore ser reduzido e pela declividade do terreno proeminente, comprovando que os resultados indicados em vermelho restringem a operação, em função de se tornarem economicamente inviáveis.

Em áreas de até 35° de declividade, o volume por árvore variando entre 0,14 a 0,42 m³ arv⁻¹ e a um custo máximo de US\$ 4,90 m³, o *harvester* operou em 73%, em aclave, e 42%, em declive.

3.2 Forwarder

3.2.1 Custos operacionais

O custo operacional do *forwarder* John Deere, modelo 1710D, foi de US\$125,24 por hora efetivamente trabalhada, adotando-se uma taxa real de juros de 12% a.a., eficiência operacional da máquina de 85%, trabalhando por um período de 24 horas diárias, com o dólar no valor de R\$ 1,802. Desse total, foram: US\$ 26,15 h⁻¹ (20,88%) de custos fixos e US\$ 99,09 h⁻¹ (79,12%) de custos variáveis. Os valores dos componentes dos custos podem ser visualizados na Figura 12. Os dados para os cálculos do custo operacional do *forwarder* estão reunidos no Apêndice B.

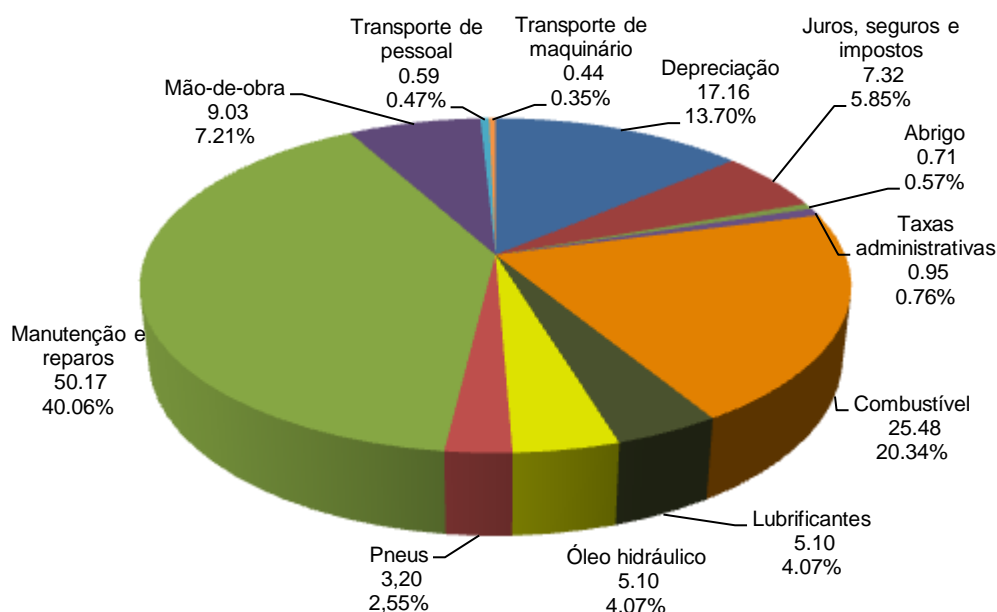


Figura 12 – Componentes do custo operacional do *forwarder* John Deere, modelo 1710D, em dólares por hora efetiva trabalhada (US\$h⁻¹) e em porcentagem (%).

O custo de manutenção e os de reparos foram da ordem de 40,06%, tendo, assim, maior representatividade; em seguida, o custo de combustível com 20,34% e a depreciação com 13,70%, respectivamente.

Esses resultados diferem dos encontrados por Simões e Fenner (2010), que avaliaram o *forwarder* da marca Valmet, modelo 890.2/6WD. Os autores obtiveram o custo operacional de US\$ 92,47 h⁻¹ trabalhada e uma distribuição de 35,83% para os custos fixos e 64,17% para os custos variáveis.

A mesma situação ocorre quando se comparam os resultados desta pesquisa com os de Burla (2008), em que foi avaliado o *forwarder* da marca Timberjack, modelo 1210B, e encontraram um custo da ordem de US\$ 60,70 h⁻¹. Essas diferenças estão relacionadas ao maior porte da máquina aqui avaliada.

Na Figura 13 estão compilados o comportamento dos custos do *forwarder*, obtendo as equações 29, 30 e 31 do comportamento dos custos fixos, variáveis e totais no decorrer de sua vida útil da máquina.

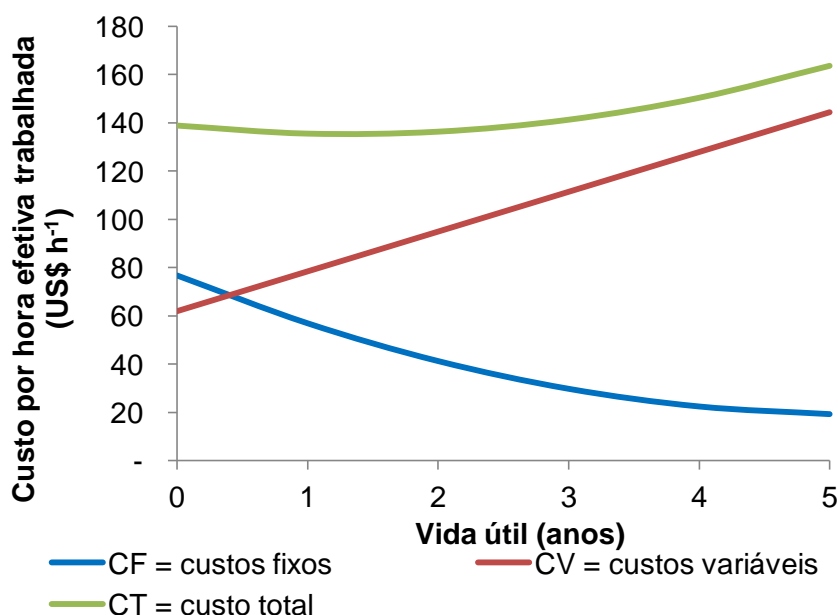


Figura 13 – Custos fixos, variáveis e totais por hora efetiva de trabalho do *harvester* durante a vida útil, em anos.

A maior parte dos custos fixos representa o custo de depreciação da máquina, que representou 65,62% dos custos fixos. Visualiza-se na Figura 14 que os valores médios dos métodos de depreciação não diferem.

$$CF = 2,0818 \times A^2 - 21,9054 \times A + 76,7382 \quad \text{eq. 29}$$

$$r^2 = 0,999$$

$$CV = 16,473 \times A + 62,0193 \quad \text{eq. 30}$$

$$r^2 = 1$$

$$CT = 2,0818 \times A^2 - 5,4328 \times A + 138,76 \quad \text{eq. 31}$$

$$r^2 = 0,999$$

em que

CF = custos fixos (US\$ h⁻¹);

CV = custos variáveis (US\$ h⁻¹);

CT = custos totais (US\$ h⁻¹); e

A = vida útil econômica (anos).

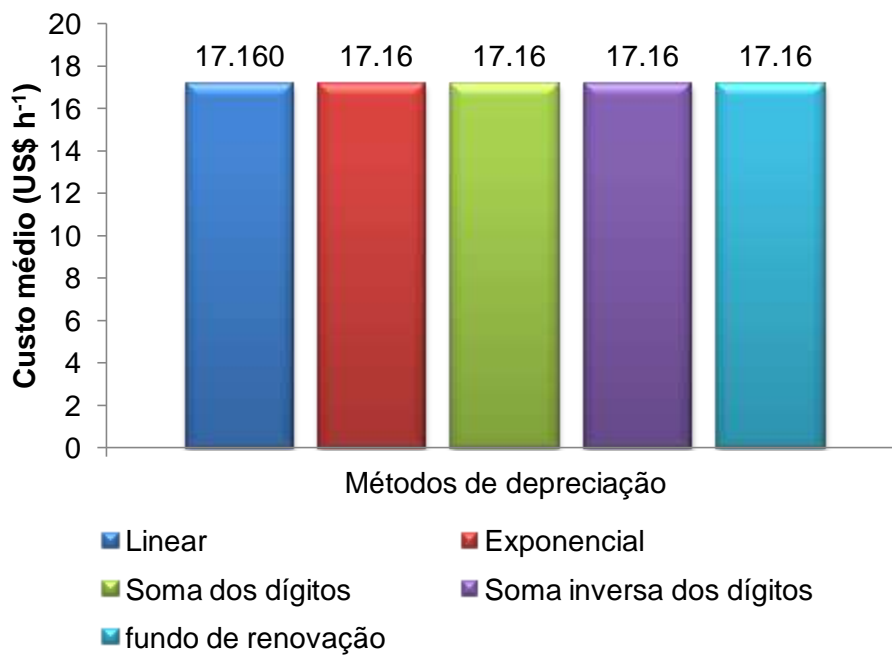


Figura 14 – Custos médios obtidos pelos métodos de depreciação do *forwarder*.

O método exponencial foi o que mais se aproximou do comportamento real dos custos de depreciação estimados durante a vida útil, seguido pela soma inversa dos dígitos; já os demais métodos apresentam uma situação irreal, apresentado pela Figura 15.

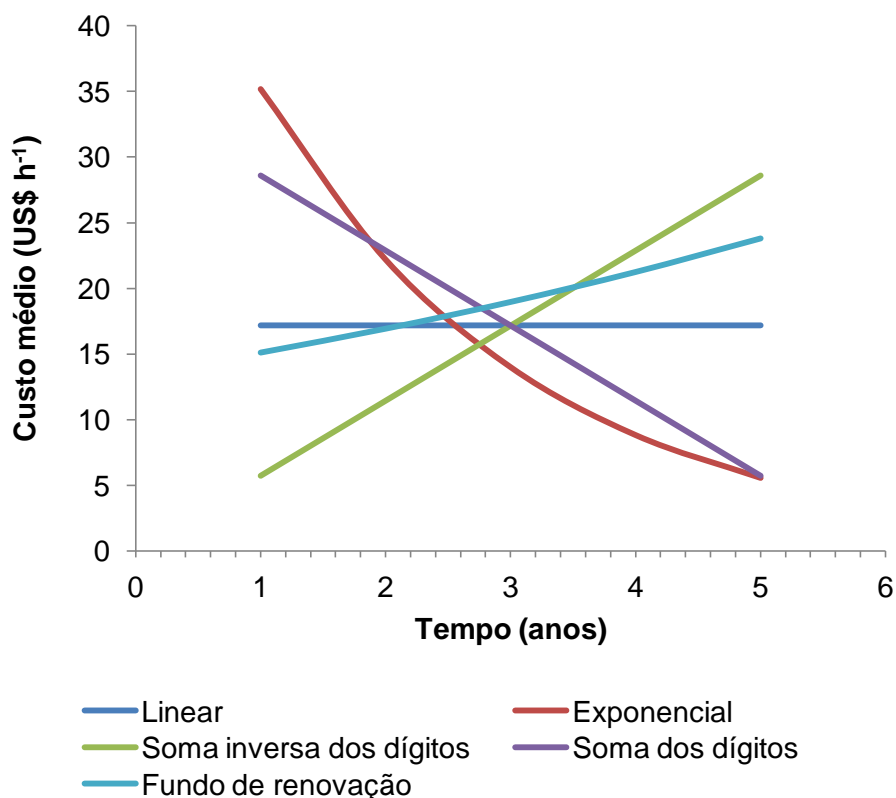


Figura 15 – Custos médios obtidos pelos métodos de depreciação, durante a vida útil do *forwarder*.

Os elementos mais expressivos nos custos variáveis foram o combustível, com US\$ 25,48 h⁻¹; e a manutenção e os reparos, com US\$ 50,17 h⁻¹ dos custos totais. Juntos, eles são responsáveis por 55,86% dos custos variáveis totais. O custo de manutenção aumentou na medida em que aumentou o tempo de uso da máquina. No primeiro ano, esse custo representou US\$ 66,28 h⁻¹ e no quinto ano US\$ 137,96 h⁻¹, representando um aumento de mais de 100% (Figura 16). Assim, necessariamente, o planejamento das máquinas deve estabelecer o tempo ideal de substituição, evitando gastos desnecessários, uma vez que máquinas com elevados números de horas trabalhadas têm maior necessidade de manutenção e reparos, em função do desgaste e da fadiga que suas peças.

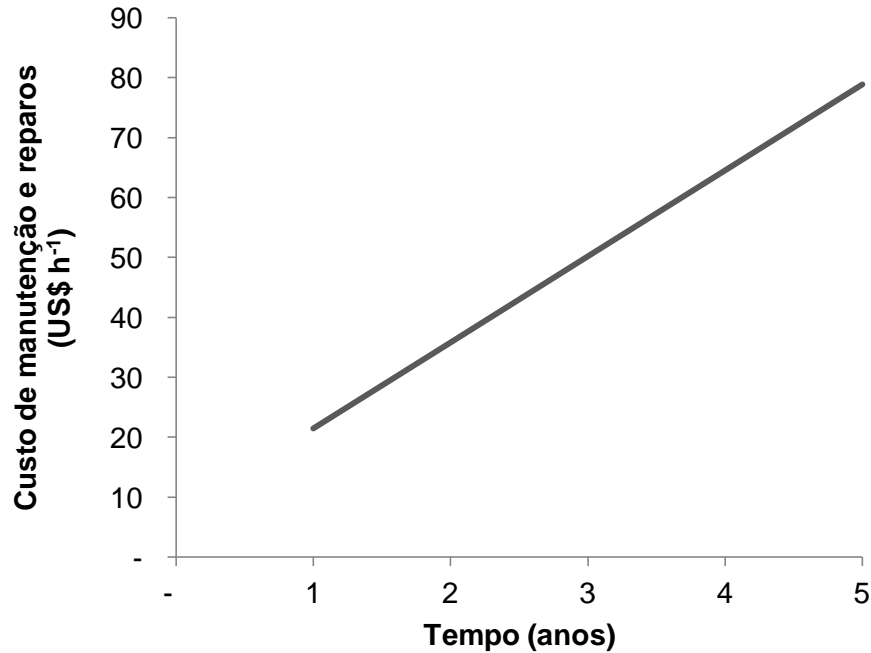


Figura 16 – Custo de manutenção e reparos durante a vida útil do *forwarder*.

3.2.2 Análise de sensibilidade

Para a análise de sensibilidade foi considerada uma variação de 40% (20% para mais e para menos) nos seis valores principais componentes do custo operacional. Na Figura 17 compilou-se o diagrama de *Spiderplot* das seis principais variáveis do custo operacional do *harvester*.

Na extração de madeira por cabos aéreos, Oliveira (2009) encontrou que as variáveis mais influentes no custo operacional foram a depreciação, o salário e os encargos, representando uma economia de 6,3% no custo, caso consiga economizar 10% das variáveis. No presente estudo, as duas principais variáveis foram o valor da máquina e a manutenção e os reparos, com redução no custo de 8,7% se forem economizados 10% das variáveis. Por essas diferenças, observa-se a importância da análise de sensibilidade na determinação das variáveis mais relevantes, que podem ser alteradas em função da máquina, do sistema de colheita, das condições operacionais e ambientais.

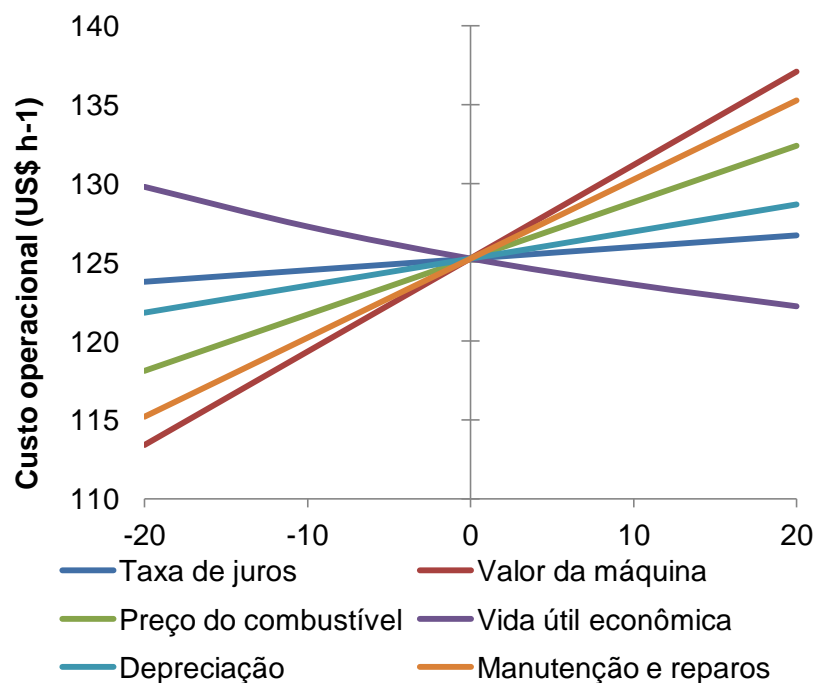


Figura 17 – Diagrama de *Spiderplot* das principais variáveis dos custos operacionais do *forwarder*, com variação das seis principais componentes do custo.

Na Figura 17, nota-se que a variável de maior impacto no custo operacional é o valor de aquisição da máquina, seguido da manutenção e dos reparos, do preço do combustível, da vida útil econômica, da depreciação e, por fim, da taxa de juros. Os resultados são explicados pelas maiores inclinações das equações.

3.2.2.1 Valor de aquisição

A cada 1% de acréscimo no valor de aquisição aumentou US\$ 0,59 h⁻¹ no custo operacional do transportador. Esse impacto é explicado pela alta tecnologia avançada embarcada e pelo custo de importação da máquina.

3.2.2.2 Manutenção e reparos

Os resultados da influência de manutenção e dos reparos comprova que um aumento na ordem de 1% aumentou US\$ 0,50 h⁻¹ no custo de produção da máquina.

3.2.2.3 Preço do combustível

Essa variável é influenciada pela quantidade de horas trabalhadas. Observou-se uma tendência de aumento no custo das máquinas com aumento do combustível, que a cada aumento de 1% no custo de combustível aumentou US\$ 0,36 h⁻¹ no valor do custo operacional.

3.2.2.4 Depreciação

Nota-se na variável de depreciação que a cada 1% no acréscimo da depreciação aumentou US\$ 0,17 h⁻¹ para o *harvester*.

3.2.2.5 Vida útil econômica

O custo operacional variando inicialmente apenas a vida útil econômica, logo, o aumento de 1% representa uma queda no custo de US\$ 0,16 h⁻¹ do *forwarder*. Nota-se uma tendência de redução no custo com aumento da variável, determinando o ângulo negativo da reta.

3.2.2.6 Taxa de juros

Observou-se que um aumento na ordem de 1% da taxa de juros aumenta US\$ 0,07 h⁻¹ no custo de operacional do *forwarder*.

3.2.2.7 Análise geral

Com base nos resultados obtidos para os componentes de custo, simulando uma situação em que a empresa consiga uma economia real de 10% em cada um dos itens de maior expressão e um aumento de 10% na vida útil, a empresa poderá obter uma redução no custo operacional de 15% (Tabela 3).

Tabela 3 – Acumulação de redução de custos obtida com a diminuição em 10 % dos componentes de custo mais relevantes

Máquina	Vm	MR	PC	Vue	D	TJ	Diferença (%)
Forwarder	5,92	3,57	2,03	0,74	1,72	5,02	15

Vm = valor da máquina; MR = manutenção e reparos; PC = preço de combustível; Vue = vida útil econômica; D = depreciação; e TJ = taxa de juros

3.2.3 Custos de produção

Os custos de produção encontram-se compilados pelas equações 35 e 36 para o transporte de madeira, em função da distância de extração e da declividade do terreno. Nas Figuras 18 e 19 estão compilados os resultados das modelagens da produtividade do *forwarder*.

$$CPfa = 1,9144^{***} + 0,8113^{***} \times d + 0,00833^{***} \times L \quad \text{eq. 32}$$

r^2 ajustado = 0,8636
p-valor: < 2,2e-16

$$CPfd = 2,1586^{***} + 0,0512^{***} \times d + 0,00324^{***} \times L \quad \text{eq. 33}$$

r^2 ajustado = 0,7865
p-valor: < 2,2e-16

em que

CPfa = custo de produção do *forwarder* em aclave (US\$ m⁻³);

CPfd = custo de produção do *forwarder* em declive (US\$ m⁻³);

d = declividade (°); e

L = distância de extração (m).

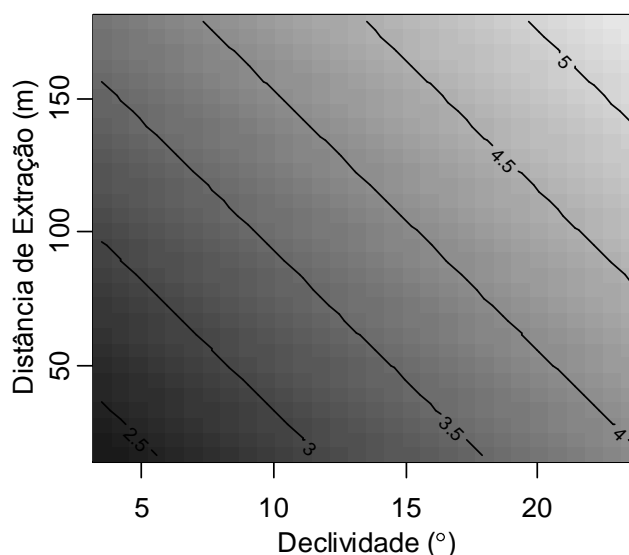


Figura 18 – Custo de produção do *forwarder*, US\$ m⁻³, em relação ao sentido de operação em aclave.

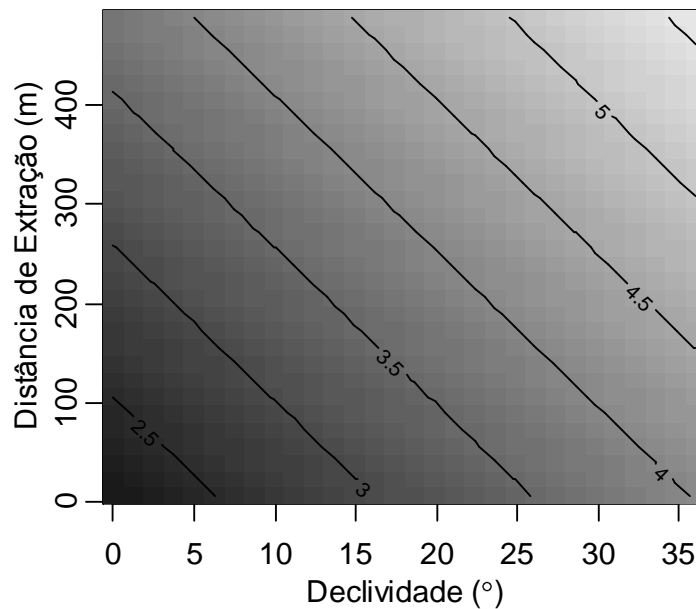


Figura 19 – Custo de produção do *forwarder*, US\$ m⁻³, em relação ao sentido de operação em declive.

Nas Figuras 18 e 19 observa-se que o custo de produção apresenta um aumento na medida em que aumenta a declividade e com o aumento da distância de extração. Pelos resultados encontrados verifica-se que a extração de madeira em declive é mais produtiva que quando realizada em aclave. O fato está relacionado principalmente pela dificuldade do deslocamento da máquina em extrair madeira morro acima, uma vez que a interação rodado-solo fica prejudicada e o consumo de combustível ser maior, em função da necessidade de maior potência para romper o efeito gravidade do aclave.

O *forwarder* extrai 190.056 m³ de madeira, operando 4.712 horas anuais, com uma produtividade média de 37,96 m³ h⁻¹. Apesar de aparentemente apresentar um valor pouco significativo, a diferença unitária, por metros cúbicos transportados, pode representar uma economia considerável, principalmente quando está aliada a um conjunto de máquinas na mesma operação.

Os custos de produção determinados na presente pesquisa foram superiores aos encontrados por Minette *et al.* (2004), em que avaliaram o *forwarder* da marca Timberjack, modelo 1210B, na extração de madeira de eucalipto, e encontraram o custo operacional de US\$ 60,70 h⁻¹ e o custo de

produção de US\$ 1,74 m⁻³, sendo o corte feito pelo *feller-buncher* e o processamento pelo *slingshot*, com toras de 6 m de comprimento. Os valores de custo operacional são muito inferiores aos aqui encontrados, o que acarretou na redução do custo de produção, possivelmente em função dos autores terem trabalhado com um menor índice de declividade do terreno e diferentes máquinas.

A avaliação realizada por Simões e Fenner (2008) se aproxima com os dados obtidos no presente trabalho, uma vez que os autores, por meio de modelagem de dados, obtiveram um custo de produção de US\$ 2,90 m⁻³ e uma produtividade de 40 m³ h⁻¹, operando o *forwarder* da marca Valmet, modelo 890.2/6WD, em florestas de eucalipto.

3.2.4 Taxa interna de retorno (TIR)

O comportamento do custo, da receita bruta e da receita líquida, em relação aos sentidos de operação, está compilado na Figura 20, expresso em dólares pela vida útil.

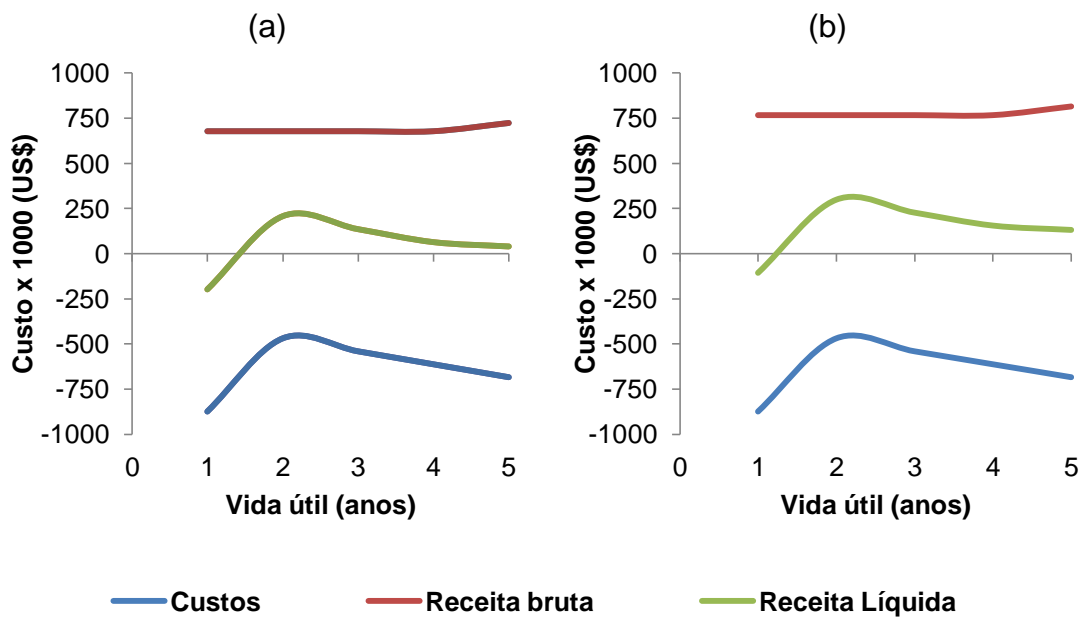


Figura 20 – Representação do custo, da receita bruta e da receita líquida, em dólar, pela vida útil do colhedor *forwarder*, na operação em active (a) e na operação em declive (b).

Na Figura 21 estão apresentados os comportamentos da TIR, em função dos sentidos de operação. Nota-se que a operação de aclive não é rentável aos cinco anos, entretanto, aos quatro anos evidencia uma taxa de retorno de 13%. O resultado em declive apresentou alta rentabilidade na extração de madeira, com uma taxa de retorno de 122,86%, mostrando ser eficiente até os cinco anos de operação. Essa grande diferença é explicada pela produtividade na extração, que passa de 35,60 m³ h⁻¹, no sentido de operação em aclive, para 40,33 m³ h⁻¹, no sentido em declive.

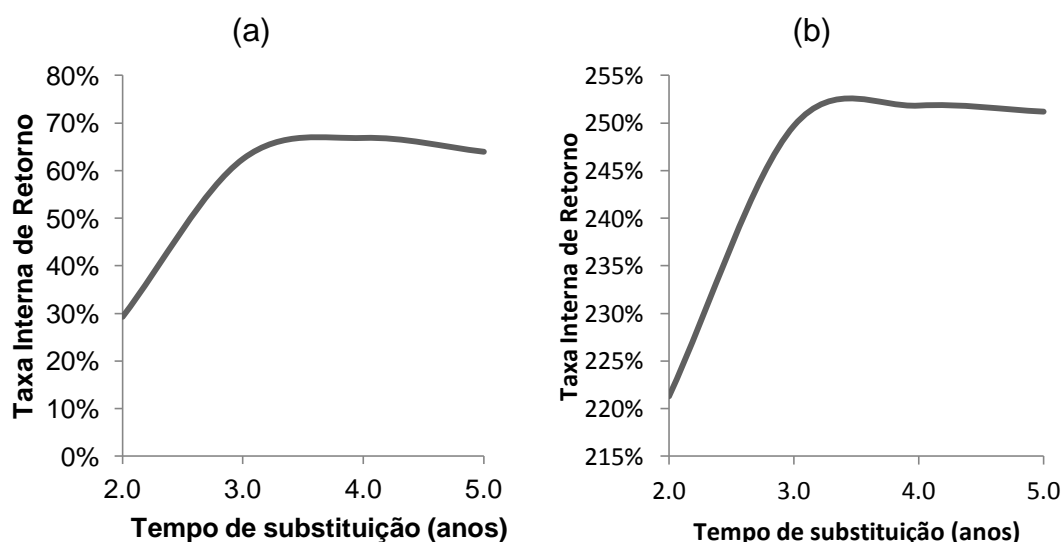


Figura 21 – Taxa interna de retorno, em função do tempo de substituição do *forwarder*, em anos, no sentido de operação em aclive (a) e em declive (b).

3.2.5 Ponto de equilíbrio (PE)

Os resultados mostraram que o ponto em que se igualam as receitas e os custos foi de 5.038 horas ano⁻¹, para o sentido de operação em aclive, e 2.417 horas ano⁻¹, para a operação em declive; ou seja, a viabilidade de compra da máquina está condicionada a uma operação em declive, evitando operar nas condições de extração em aclive, uma vez que gera maior custo e menor benefício.

3.2.5.1 Método II: produtividade mínima da máquina

Nas condições em que o padrão médio do custo de produção do *forwarder* deve ser de US\$ 3,50 m⁻³, só se justifica a extração de madeira

em aclive caso o custo de produção não ultrapassar o valor de US\$ 4,48 m⁻³. Em declive, o *forwarder* pode operar particularmente em grande parte das condições de inclinação do terreno e da distância de extração, atingindo seu custo máximo de US\$ 4,49 m⁻³ na extração de madeira, considerando uma distância de extração de até 400 m e a declividade do terreno de até 35°, o efeito na viabilidade da operação é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Custo de produção em US\$ m⁻³ do *forwarder*, em função da declividade do terreno e distância de extração

Declividade (°)	Volume por árvore (m ³ arv ⁻¹)								
	50	100	150	200	250	300	350	400	
Active	0	2,508	2,644	2,794	2,962	3,153	3,369	3,617	3,904
	5	2,764	2,929	3,115	3,325	3,567	3,846	4,173	4,560
	10	3,077	3,283	3,518	3,790	4,107	<u>4,481</u>	4,931	5,482
	15	3,471	3,735	4,042	4,405	4,839	5,368	6,026	6,869
	20	3,980	4,331	4,750	5,258	5,889	6,691	7,746	9,197
	25	4,664	5,153	5,758	6,522	7,521	8,881	10,841	13,911
	30	5,632	6,361	7,308	8,585	10,404	13,200	18,052	28,542
	35	7,107	8,309	10,001	12,558	16,872	25,702	53,915	#####
Declive	0	2,574	2,653	2,737	2,826	2,922	3,024	3,134	3,252
	5	2,726	2,815	2,910	3,011	3,120	3,237	3,363	3,499
	10	2,897	2,998	3,105	3,221	3,346	3,481	3,627	3,786
	15	3,091	3,206	3,330	3,463	3,608	3,765	3,937	4,124
	20	3,313	3,445	3,589	3,744	3,914	4,100	4,304	4,529
	25	3,570	3,724	3,891	4,075	4,277	<u>4,499</u>	4,747	5,023
	30	3,869	4,050	4,250	4,470	4,714	4,986	5,291	5,636
	35	4,223	4,440	4,681	4,949	5,250	5,590	5,977	6,421

Dados sublinhados referem-se ao custo máximo de produção a ser pago.

Na Tabela 4, verifica-se que o uso da máquina está limitado principalmente pelo grau de aclive, o qual tem um fator limitante maior que a operação no sentido de declive do terreno, comprovando que os resultados indicados em vermelho restringem a operação nos dois sentidos.

O *forwarder* operou em 44%, em aclive, e 81%, em declive, das áreas na extração de madeira a um custo médio de produção de US\$ 3,80 m³, com deslocamentos de até 400 m de distância e declividade do terreno de até 35°.

4 Conclusões

- O custo operacional do sistema de colheita de toras curtas, constituído pelos tratores florestais, foi de 270 dólares por hora efetiva trabalhada, sendo 145 dólares destinados à operação do *harvester* e 125 para o *forwarder*.

- O *harvester* apresentou menor custo de produção na derrubada e no processamento de árvores quando opera no sentido de aclave.

- O *forwarder* proporcionou menor custo de produção para extrair madeira na operação com o deslocamento carregado em declive.

- O valor da máquina, da manutenção e dos reparos e o preço do combustível foram as variáveis mais influentes no custo operacional na colheita mecanizada. A redução de 10% em seus valores amortizou 12% no custo do *harvester* e *forwarder*.

- O aumento da declividade do terreno, aumento da distância de deslocamento e a diminuição do volume de madeira por árvore elevaram os custos de produção das máquinas de colheita florestal.

- A substituição do módulo de colheita deve ser realizada aos quatro anos de operação, obtendo a maior taxa interna de retorno.

- O ponto de equilíbrio do tempo de operação do trator *harvester* foi de 3.800 horas anuais, em aclave, e de 4.527 horas anuais, em declive, com uma receita bruta de US\$ 4,90 m⁻³, em condições médias de declividade do terreno de 10° e do volume por árvore de 0,274 m³ arv⁻¹.

- O ponto de equilíbrio do tempo de operação do trator do *forwarder* foi de 5.038 horas anuais, para extração de madeira em aclave, e 2.977 horas anuais, em declive; a uma receita bruta de US\$ 3,80 m³ as receitas igualaram os custos, em condições médias de declividade do terreno de 10° e percurso e de 150 m de distância.

5 Referências bibliográficas

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. *ASAE standards 2001: machinery, equipment and buildings: operating costs*. Iowa: Ames, 2001. p. 164-226.

BURLA, E. R. *Avaliação técnica e econômica do harvester na colheita e processamento de madeira em diferentes condições de declividade e produtividade florestal*. 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

CANTO, J. L. *Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia*. 2009. 127 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

ESCHENBACH, T. G. Spiderplots versus Tornado diagrams for sensitivity analysis. *Interfaces*, n. 6, p. 40, 1992.

FERNANDES, H. C.; LEITE, A. M. P. Proposta de uma metodologia para ensaio de máquinas colhedoras de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 5., 2001, Porto Seguro, BA. *Anais...* Viçosa, MG: SIF/UFV, 2001. p. 227-239.

FREITAS, C. L.; SILVA, M. L.; MACHADO, C. C. Influência do cálculo de depreciação no imposto de renda e no fluxo de caixa de uma atividade de transporte florestal. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 257-264, 2007.

JIROUŠEK, R.; KLVAČ, R.; SKOUPÝ, A. Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science*, v. 53, n. 10, p. 476-482, 2007.

LOPES, E. S.; CRUZINIANI, E.; DIAS, A. N.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do corte de madeira de pinus com cabeçote *harvester* em diferentes condições operacionais. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, 2007.

LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SILVEIRA, J. C. M.; RINALDI, P. C. N. Avaliação técnica e econômica de um “skidder” operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, MG, v. 33, n. 6, p. 1621-1626, 2009.

MAGALHÃES, P. A. D.; KATZ, I. Estudo da viabilidade econômica da mecanização do processo de colheita florestal com *harvester* em uma indústria madeireira. *Tékhné Lógos*, Botucatu, SP, v. 2, n. 1, out. 2010. p. 72-91.

MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, SP, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.

MINETTE, L. J.; MOREIRA, F. M. T.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C.; SILVA, K. R. Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2004.

MOREIRA, F. M. T. *Análise técnica e econômica de subsistemas de colheita de madeira de eucalipto em terceira rotação*. 2000. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

OLIVEIRA, R. J. *Avaliação técnica e econômica de cabos aéreos na colheita de pinus no município de Cerro Azul-PR*. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

PAULA, E. N. S. O. *Avaliação técnica, de custos e ambiental de dois modelos de harvester na colheita florestal*. 2011. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2012. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 1^o jan 2012.

ROYSTON, P. An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. *Applied Statistics*, v. 31, p. 115-124, 1982.

SILVA, E. N. *Avaliação técnica e econômica do corte de pinus com harvester*. 2008. 60 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. *Economia florestal*. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 178 p.

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

SILVA, R. M., Considerações sobre análise de sensibilidade em análise de decisão. *Relatório de Iniciação Científica*. Brasília, DF: CNPq, 2004. 44 p.

SIMÕES, D. *Avaliação econômica de dois sistemas de colheita florestal mecanizada de eucalipto*. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2008.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do *forwarder* na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 40, n. 4, p. 711-720, 2010.

WEISBERG, S. *Applied linear regression*. 3. ed., Wiley, Colorado, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE B

Tabela 1B – Valores utilizados no cálculo do custo operacional do *forwarder*

Itens	Valores
Va = valor de aquisição da máquina (US\$)	477.242,50
Vr = valor de residual, 10% Va (US\$)	47.724,75
N = vida útil econômica (anos)	5
H = horas trabalhadas no ano ($h \text{ ano}^{-1}$)	5.889,60
h = horas trabalhadas por dia ($h \text{ dia}^{-1}$)	24
D = dias trabalhados por ano ($d \text{ ano}^{-1}$)	312
E.O = eficiência operacional (%)	85
He = horas efetivas de uso anual ($h \text{ ano}^{-1}$)	5.006,16
dm = dias trabalhados por mês ($d \text{ mês}^{-1}$)	26
i = taxa de juros anuais (% a.a.)	12
Pu = preço do combustível (US\$ L ⁻¹)	1,82
c = consumo de combustível por hora efetiva (L h ⁻¹)	14
ILG = índice de custos com lubrificantes e graxas (%)	20
I = índice de consumo de óleo hidráulico (%)	20
Ne = número de pneus por máquina	8
P = preço do pneu (US\$ unid ⁻¹)	4.994,45
Hpe = vida útil do pneu, em horas efetivas ($h \text{ unid}^{-1}$)	12.500
Ne = número de pneus	8
Sop = salário mensais dos operadores (US\$ mês ⁻¹)	721,42
No = número de operadores por máquina	3
ES = taxa de encargos sociais (% sobre o salário)	174
dd = média de deslocamento diários ($km \text{ dia}^{-1}$)	140
ck = custo por quilômetro (US\$ km ⁻¹)	0,38
Ne = número de operadores por veículo de transporte	18
ITM = índice de transporte de maquinário (%)	75

Tabela 2B – Valores utilizados no cálculo do custo operacional do *harvester*

Itens	Valores
Va = valor de aquisição da máquina (US\$)	582.685,90
Vr = valor de residual, 10% Va (US\$)	58.268,59
N = vida útil econômica (anos)	5
H = horas trabalhadas no ano (h ano^{-1})	5.889,60
h = horas trabalhadas por dia (h dia^{-1})	24
D = dias trabalhados por ano (d ano^{-1})	312
E.O = eficiência operacional (%)	80
He = horas efetivas de uso anual (h ano^{-1})	4.711,68
dm = dias trabalhados por mês (d mês^{-1})	26
i = taxa de juros anuais (% a.a.)	12
Pu = preço do combustível (US\$ L ⁻¹)	1,82
c = consumo de combustível por hora efetiva (L h ⁻¹)	16
ILG = índice de custos com lubrificantes e graxas (%)	20
I = índice de consumo de óleo hidráulico (%)	20
Ne = número de pneus por máquina	8
P = preço do pneu (US\$ unid ⁻¹)	4.994,45
Hpe = vida útil do pneu, em horas efetivas (h unid^{-1})	12.500
Ne = número de pneus	6
Sop = salário mensais dos operadores (US\$ mês ⁻¹)	721,42
No = número de operadores por máquina	3
ES = taxa de encargos sociais (% sobre o salário)	174
dd = média de deslocamento diários (km dia^{-1})	140
ck = custo por quilômetro (US\$ km ⁻¹)	0,38
Ne = número de operadores por veículo de transporte	18
ITM = índice de transporte de maquinário (%)	75