

Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de “harvesters” na colheita florestal

Quantification and determination of influency factors over harvesters productivity

Marcelo Bramucci
Fernando Seixas

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo analisar e quantificar a influência das diferentes variáveis sobre a capacidade de produção de “harvesters”, na colheita de madeira, e desenvolver modelos matemáticos que permitissem a predição da produtividade esperada para essa máquina em determinadas condições de trabalho. Para tanto, foram coletados dados referentes a 4,2 milhões de m³ de madeira de eucalipto, colhidos em primeira rotação, e 200 mil horas de trabalho realizado por 68 “harvesters”, totalizando mais de 14 mil linhas de dados. O volume individual médio das árvores foi a variável que, isoladamente, melhor explicou a capacidade produtiva dos “harvesters”, seguida do DAP médio, da altura média e do volume de madeira por hectare. Através de regressões lineares múltiplas foram obtidos modelos mais precisos para cada sistema de trabalho, com coeficientes de determinação superiores a 0,75.

PALAVRAS-CHAVE: Mecanização florestal, Colheita florestal, Planejamento, Produtividade

ABSTRACT: This work aimed, based on forestry industry data bank, to analyze the influence of different variables over harvester production and to obtain mathematic models to predict the expected productivity on different work conditions. This study analyzed data referent of 4.2 millions m³ of eucalypt wood, harvested on first rotation, and 200 thousand hours of work done by 68 harvesters, totalizing more than 14 thousand data lines. Average individual volume was the variable that, isolated, better explain harvester productivity, followed by mean DBH, mean height and volume of wood per hectare. More precise models were obtained for different work systems (i.e. with or without wood debarking), with determination coefficient higher than 0.75, by multiple linear regression.

KEYWORDS: Forestry mechanization, Planning, Productivity

INTRODUÇÃO

O processo de mecanização das operações de colheita de madeira, intensificado no início da década de 90, vem se mostrando irreversível no Brasil, principalmente em função da redução da dependência de mão de obra, melhoria das condições de trabalho, redução do custo final da madeira posto fá-

brica e da necessidade, por parte das indústrias, de um fornecimento regular e em quantidades cada vez maiores de madeira. Considerando-se que as operações de colheita e transporte da madeira chegam a responder por até 50% do custo final da madeira posto fábrica (Equipe Técnica da Duratex, 1999a; Wadouski, 1997), qualquer redução no custo destas atividades é importante, no sentido de

umentar a competitividade das empresas florestais tanto no mercado interno como no externo.

A utilização de sistemas mecanizados para colheita de madeira é afetada por diversas variáveis que interferem na capacidade operacional dos equipamentos e, conseqüentemente, no custo final da madeira. As estimativas de produtividade e custo baseadas em dados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, ou obtidas em trabalhos realizados em outros países (Ewing e Lirette, 1999; Gingras, 1992; Hunt, 1992; Plamondon, 1993; Richardson e Gingras, 1995), devem ser vistas com ressalvas, uma vez que refletem dados obtidos em condições totalmente diversas, no que diz respeito ao sistema silvicultural, clima e formação profissional do operador, ficando clara a necessidade da realização de estudos específicos para as condições brasileiras.

No Brasil, existem ainda poucos dados a respeito da real influência destas variáveis e da capacidade produtiva que se pode esperar das máquinas de colheita em determinadas condições de trabalho.

Estudando a utilização de processadores mecânicos na operação de desgalhamento e toragem de eucalipto, Santos e Machado (1995) observaram que a capacidade produtiva desta máquina crescia à medida em que aumentava o volume por árvore até atingir um ponto máximo, com um volume por árvore de 0,34 m³, decrescendo após esse valor.

Santos et al. (1995) avaliaram o transporte primário de madeira com “forwarder” e concluíram que o tempo de carregamento foi a única atividade afetada pelo aumento no volume por árvore, com conseqüente aumento da produtividade. Uma equação de regressão foi desenvolvida para estimar a produtividade do “forwarder” a partir das variáveis “distância média de extração” e “volume por árvore”, apre-

sentando um coeficiente de determinação de 94%.

Trabalhos do FERIC (“Forest Research Institute of Canada”) sobre o desempenho de “harvesters” e processadores concluíram que o fator mais significativo afetando a produtividade, para ambas as máquinas, foi o volume médio por árvore. O desempenho dos “harvesters” também foi influenciado pela razão entre o número de árvores não comerciais por ha e o número de árvores comerciais por ha, além dos anos de experiência do operador. Quanto ao “forwarder”, as variáveis de influência eram a distância de transporte, experiência do operador, capacidade da grua, volume das toras e tamanho das pilhas (Richardson e Makkonen, 1994).

No caso de sistemas de árvores inteiras, o volume de madeira por hectare foi a principal variável de influência na operação de corte de árvores com “feller-buncher”, apresentando também um melhor desempenho em talhões com espaçamento um pouco maior, 3,0 x 2,0 m contra 3,0 x 1,5 m (Valverde et al., 1996b). A produtividade do “skidder” foi mais bem estimada através de uma equação onde foram incluídas as variáveis “volume/ha” e “distância de arraste” (Valverde et al., 1996a).

O objetivo deste trabalho foi, a partir dos dados obtidos junto a empresas florestais que utilizam “harvesters” no corte e processamento de madeira, verificar quais as principais variáveis técnicas que interferem na capacidade produtiva dessas máquinas e elaborar funções matemáticas que permitam prever, de acordo com as diferentes condições de trabalho, a produtividade para o corte e processamento da madeira por meio de “harvesters”. Tais equações permitirão um planejamento mais preciso da atividade de colheita mecanizada de madeira, resultando em um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram obtidas, a partir dos bancos de dados de quatro empresas florestais, informações referentes à colheita e processamento de 4.200.000m³ de madeira, aproximadamente 30% de toda madeira de eucalipto consumida no país durante o ano de 2000, em 200.000 horas de trabalho realizado por 68 "harvesters" de diferentes marcas e modelos, dando origem a mais de 14.000 linhas de dados.

As informações de cada empresa foram extraídas das respectivas planilhas e os dados passaram por uma padronização, possibilitando a sua utilização em um único processo de análise. O uso desse tipo de informação pode ter como inconveniente a ausência de fatores que podem interferir na operação das máquinas e que não estão relacionados nos bancos de dados. Entre estes podem ser citados: o turno de trabalho, a influência de ventos fortes, pequenos problemas mecânicos que reduzem a capacidade de produção da máquina, mas não a impede de operar, entre outros.

Máquinas

Foram analisadas apenas as produtividades alcançadas pelos "harvesters" na colheita de plantios homogêneos de *Eucalyptus spp.*, em primeira rotação, durante o ano de 2000.

Na Tabela 1 estão relacionadas as máquinas que geraram os dados utilizados no presente trabalho, os tipos de cabeçotes utilizados e o sistema de trabalho em que operaram.

O cabeçote processador tipo "Slingshot" foi originalmente desenvolvido para operar em colheita de florestas com baixo volume por fuste, especialmente em segunda rotação, processando várias árvores simultaneamente. Entretanto, os dados utilizados no presente trabalho referem-se à utilização destes cabeçotes apenas em florestas em primeira rotação.

Variáveis de influência

Foram coletadas todas as informações presentes nos bancos de dados das empresas visitadas, referentes à capacidade produtiva dos "harvesters" e às condições encontradas na ocasião da colheita. Foram obtidos dados referentes a: empresa, fazenda, talhão, máquina, operador, tempo efetivo gasto e número de árvores colhidas. A partir desses valores, foram obtidas as produtividades efetivas das diferentes combinações de operador, máquina e talhão. As produtividades obtidas foram confrontadas com todas as variáveis disponíveis, relacionadas a seguir:

✓ Quanto à floresta: diâmetro à altura do peito (DAP) médio (cm); altura média das árvores (m); volume médio por árvore (m³/árvore); número

Tabela 1

Grupos de máquinas analisadas com suas principais características construtivas.
(Machine group analyzed with their respective main construction characteristics)

Grupo	"Harvester"	Rodado	Cabeçote	Potência (Kw)	Quantidade	Sistema de trabalho
1	Sisu-Valmet 601	4x4	Valmet 960	128	1	Sem descascamento
2	Bell	esteiras	FX 450	73,5	1	Sem descascamento
3	Timberjack 608	esteiras	Risley slingshot	125	5	Sem descascamento
4	Caterpillar 320	esteiras	Risley slingshot	95,5	3	Sem descascamento
5	Sisu-Valmet 601	6x6	Valmet 960	128	2	Sem descascamento
6	Caterpillar 320	esteiras	Valmet 965	95,5	15	Com e sem descascamento
7	Fiat FH 200	esteiras	Valmet 965	105	6	Sem descascamento
8	Volvo EC 201	esteiras	Votec W-650	107	25	Com e sem descascamento
9	Timberjack 1270B	6x6	Timberjack 762-C	163	8	Com descascamento
10	Timberjack 2618	esteiras	Timberjack 762-C	153	2	Com descascamento

de árvores por hectare; produtividade do talhão (m^3/ha); idade do plantio; porcentagem de casca.

✓ Quanto às características técnicas: tipo, modelo e idade das máquinas; número de combinações máquina/operador por talhão; índice pluviométrico do mês em que foi realizada a colheita; tempo de experiência dos operadores.

Análise estatística

Inicialmente os dados foram divididos em duas planilhas diferentes, uma com valores referentes à madeira processada sem descascamento e outra para madeira descascada pelo “harvester” no campo. Essa opção foi devido à diferença entre os resultados obtidos pelos dois sistemas e à impossibilidade de se analisar dois sistemas diferentes ao mesmo tempo.

As produtividades obtidas foram confrontadas inicialmente com cada uma das variáveis obtidas na forma de regressão. Foram realizados estudos de suposições e análises de variância com a determinação do “Erro Padrão da Média” para as regressões simples, através do módulo “SAS Lab” do programa “SAS”. Os gráficos foram construídos através do programa “Microsoft Excel”.

Os equipamentos analisados foram, inicialmente, separados por sistema de trabalho e, em seguida, agrupados por modelo da máquina base e do cabeçote processador. Os resultados obtidos pelos diferentes grupos foram avaliados por análise de variância e ordenados pelo teste de “Tukey” para comparação de médias, ao nível de 5% de probabilidade.

Finalmente, foram feitas regressões lineares múltiplas para cada sistema estudado, com a inclusão dos diferentes modelos de equipamentos na forma de variável “Dummy”, com estudo de suposições, através do módulo “SAS Lab” do programa “SAS”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos de suposições feitos para as regressões simples com todas as variáveis estudadas nos dois sistemas (com e sem descascamento de madeira) indicaram a necessidade da transformação da variável resposta “Produtividade (m^3/h)” em “logaritmo neperiano da produtividade”, para corrigir problemas de heterogeneidade de variância dos resíduos. O modelo que mais se adequava aos dados era o cúbico, cuja principal característica é um ponto de inflexão ao longo da curva, que se justifica, uma vez que as máquinas possuem limites operacionais, a partir dos quais surge a tendência de queda da produtividade.

Regressões Simples

Volume por árvore

Segundo a bibliografia anteriormente citada, o volume por árvore é a variável de influência que mais explica as variações nas produtividades obtidas pelos “harvesters”. Os resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras 1 e 2, para madeira não descascada e para madeira descascada pelos “harvesters”, respectivamente.

Comparando-se as Figuras 1 e 2, nota-se que o sistema sem descascamento de madeira apresenta um resultado ligeiramente superior em árvores de menor porte (entre 0,1 e 0,3 m^3), com um rápido aumento da produtividade dos equipamentos com o aumento do volume individual das árvores dentro dessa faixa. A partir desse volume, o aumento se torna mais lento. Já no sistema com descascamento de madeira, o aumento da produtividade dos equipamentos é praticamente linear até 0,5 m^3 por árvore e a partir desse volume existe uma tendência à estabilização da produtividade dos equipamentos.

A menor produtividade do sistema com descascamento de madeira, quando operando em árvores de menor porte, pode ser atribuída

ao tempo gasto com o descascamento, que é praticamente o mesmo em árvores de maior ou menor porte, especialmente no que se refere ao diâmetro.

A variável "volume por árvore" explica boa parte da produtividade alcançada pelas máquinas. Entretanto, isso pode ser atribuído, em parte, ao fato de que o volume de madeira colhido pelos equipamentos é determinado, de forma indireta, pela multiplicação do número de árvores colhidas pelo volume médio das árvores, estimado pelo inventário pré-corte, daí a relação tão estreita entre as variáveis preditora e resposta.

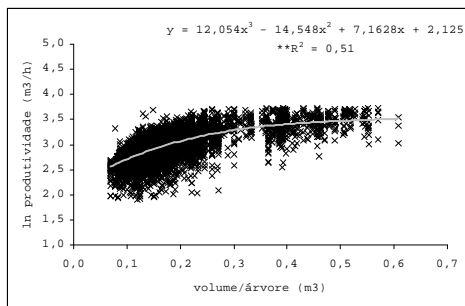


Figura 1

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, sem descascamento de madeira, em relação ao volume médio por árvore.

(Graphic of logarithm machine productivity, with no debarking, based on mean volume)

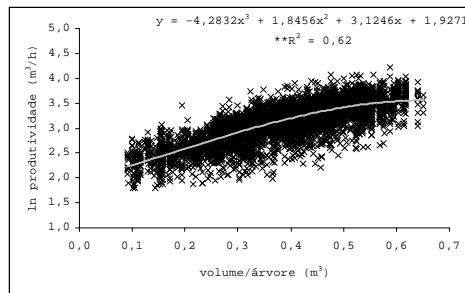


Figura 2

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, com descascamento da madeira, em relação ao volume médio por árvore.

(Graphic of logarithm machine productivity, with debarking, based on tree mean volume)

DAP médio

O DAP médio das árvores também é citado na bibliografia (Eliasson, 1999; Gingras, 1988) como um dos fatores que influenciam fortemente a produtividade de equipamentos de colheita florestal. Os resultados obtidos para esta variável podem ser vistos nas Figuras 3 e 4.

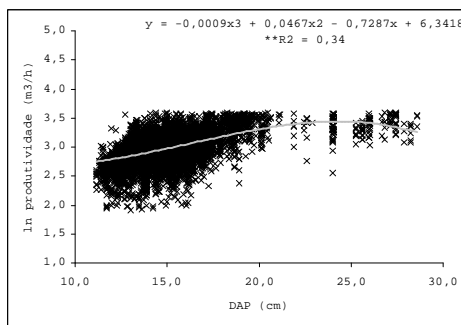


Figura 3

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, sem descascamento da madeira, em relação ao DAP médio.

(Graphic of logarithm machine productivity, with no debarking, based on mean DBH)

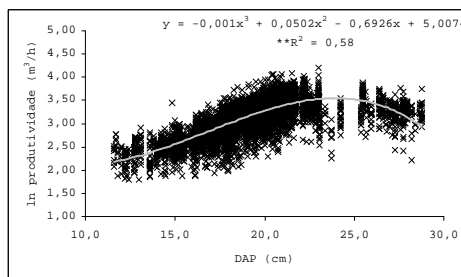


Figura 4

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, com descascamento da madeira, em relação ao DAP médio.

(Graphic of logarithm machine productivity, with debarking, based on mean DBH)

Nos dois sistemas, os comportamentos dos dados foram bastante semelhantes, com um rápido aumento da produtividade em função do aumento do DAP até aproximadamente 24 cm, notando-se uma forte tendência de queda nas produtividades a partir desse valor. Esse com-

portamento indica que, em média, os cabeçotes processadores utilizados são mais adequados para trabalhar com árvores até 24 cm de DAP.

Seria importante que esse tipo de informação fizesse parte das especificações dos cabeçotes processadores, onde geralmente consta apenas o diâmetro máximo de corte, que dificilmente é alcançado em plantios comerciais.

Altura média das árvores

Da mesma forma que o DAP, a altura também possui forte influência sobre a produtividade dos equipamentos de colheita. Observando-se os resultados nas Figuras 5 e 6, nota-se que não existe diferença entre os dois sistemas. Vale ressaltar, porém, que não existe a tendência de queda da produtividade, mas sim de estabilização a partir de 40m de altura, provavelmente porque o aumento em altura não implica em ultrapassar os limites operacionais dos equipamentos, que estão mais diretamente ligados ao diâmetro.

Esse comportamento sugere que, eventualmente, o melhoramento florestal talvez devesse buscar um ganho maior em altura, que em diâmetro. Assim, seria obtido o aumento da produtividade da floresta, ao mesmo tempo em que se manteria a capacidade de produção dos equipamentos de colheita.

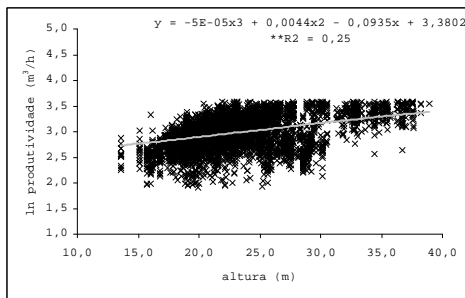


Figura 5
Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, sem descascamento da madeira, em relação à altura média.
(Graphic of logarithm machine productivity, with no debarking, based on tree mean height)

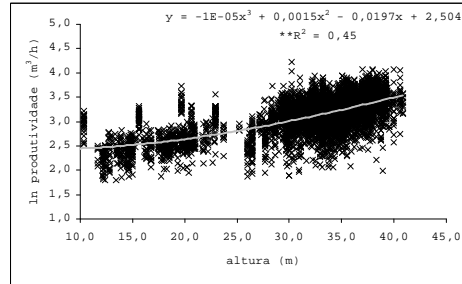


Figura 6
Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, com descascamento da madeira, em relação à altura média.
(Graphic of logarithm machine productivity, with debarking, based on tree mean height)

Volume por hectare

O volume de madeira por hectare está fortemente relacionado ao aumento do volume individual das árvores ($R^2 = 0,74$ para madeira com casca e $0,84$ para madeira sem casca). Em função disso, é natural que seja encontrada uma influência dessa variável sobre a produtividade dos “harvesters”.

Como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, os comportamentos das curvas de regressão são bastante semelhantes aos verificados nas avaliações dos volumes individuais das árvores (Figuras 1 e 2), porém com coeficientes de determinação menores, possivelmente, porque o volume por hectare engloba, além do volume das árvores, a densidade da floresta, o que torna a relação menos direta.

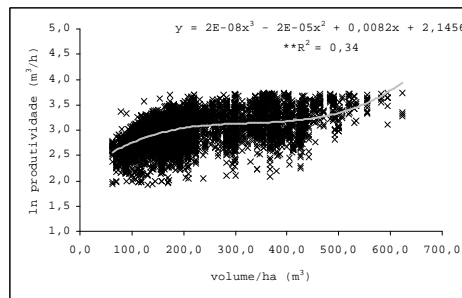


Figura 7
Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, sem descascamento da madeira, em relação ao volume de madeira por hectare.
(Graphic of logarithm machine productivity, with no debarking, based on wood volume per hectare)

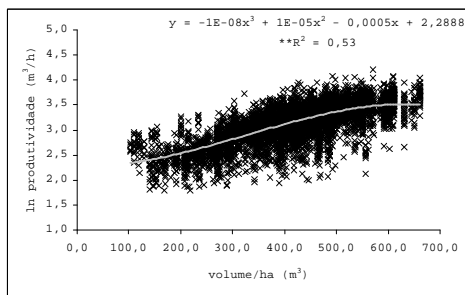
**Figura 8**

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, com descascamento da madeira, em relação ao volume de madeira por hectare.

(Graphic of logarithm machine productivity, with debarking, based on wood volume per hectare)

Árvores por hectare

O aumento da densidade da floresta implica diretamente na redução do volume individual das árvores. Como pode ser visto nas Figuras 9 e 10, essa redução resulta numa queda considerável na capacidade produtiva dos "harvesters", em função do aumento do número de árvores por hectare, principalmente no sistema com descascamento de madeira.

Esse tipo de comportamento deve ser levado em conta na ocasião do planejamento do plantio, sendo que, do ponto de vista da produtividade dos equipamentos de colheita, a faixa ideal está entre 800 e 1200 árvores/ha.

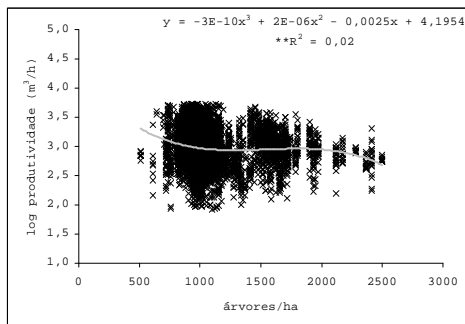
**Figura 9**

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, sem descascamento da madeira, em relação ao número de árvores por hectare.

(Graphic of logarithm machine productivity, without debarking, based on number of tree per hectare)

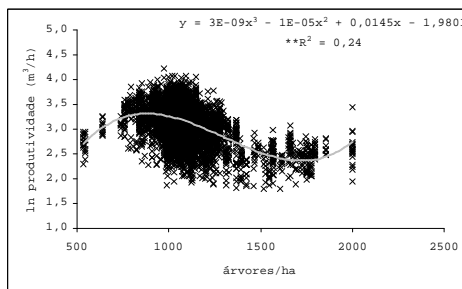
**Figura 10**

Gráfico do logaritmo das produtividades das máquinas, com descascamento da madeira, em relação ao número de árvores por hectare.

(Graphic of logarithm machine productivity, without debarking, based on number of tree per hectare, containing tendency line)

Modelos dos equipamentos

Com o intuito de se analisar a influência do tipo de equipamento sobre a produtividade alcançada, os equipamentos utilizados foram agrupados de acordo com suas características construtivas, fabricante e modelo da máquina base e tipo de cabeçote processador (Tabela1).

Para comprovar a existência de diferenças significativas entre os resultados alcançados pelos modelos de equipamentos, foi feita a análise de variância entre os resultados obtidos pelos diferentes grupos, mantendo-se a separação por sistema de trabalho, ou seja, com ou sem descascamento de madeira. Em seguida, foi realizado o "Teste de Tukey" para comparação de médias. Nas Tabelas 2 e 3 estão plotados os resultados do sistema sem descascamento de madeira, e nas Tabelas 4 e 5, os do sistema com descascamento de madeira.

Tabela 2

Análise de variância entre os diferentes modelos de máquinas que operaram no sistema sem descascamento da madeira.

(Variance analysis among different machines operating without debarking)

	GL	SQ	QM	F	Valor - p
Modelo	6	13661,83	2276,97	49,84	0,0001
Resíduo	7078	323362,56	45,69		
Total	7084	337024,38			

Tabela 3

Análise comparativa das médias de produtividade dos grupos de máquinas que operaram sem o descascamento de madeira.

(Mean comparative analysis of machine productivity operating without debarking)

Modelo	Média	Número de Amostras
8	24,15 a	909
4	21,06 b	158
7	20,87 b	1210
5	20,46 bc	207
6	20,25 bc	4266
3	18,78 cd	252
1	17,17 d	83

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de "tukey" com 5% de probabilidade

Observando-se os resultados obtidos, nota-se que a maioria dos modelos de equipamentos analisados apresenta valores médios de capacidade produtiva muito próximos. O modelo oito que se sobressai em relação aos demais, tem um excelente desempenho em árvores de maior volume individual, o que contribuiu para o aumento da sua média de produtividade.

Destaca-se também o desempenho do modelo quatro, com boa capacidade produtiva, uma vez que se tratam de máquinas equipadas com cabeçote "slingshot", que, em teoria, deveriam apresentar produtividades inferiores.

Novamente, o modelo oito conseguiu uma média de produtividade bastante superior aos demais, inclusive superior à sua própria média no sistema sem descascamento de madeira. Isto provavelmente ocorreu em virtude de terem sido colhidas mais árvores com maior volume individual nesse sistema (Figuras 1 e 2).

Foram também analisadas, isoladamente, as variáveis: idade de corte, que apresentou uma natural, porém fraca tendência ao aumento da produtividade dos "harvesters" com o aumento da idade; pluviosidade no mês da colheita, cujo fraco efeito de redução da produtividade dos equipamentos de colheita em função de um maior teor de umidade no solo foi detectado apenas em terrenos declivosos.

Tabela 4

Análise de variância entre os diferentes modelos de máquinas que operaram no sistema com descascamento da madeira.

(Variance analysis among different machines operating with debarking)

	GL	SQ	QM	F	Valor - p
Modelo	3	115529,59	38509,86	748,57	0,001
Resíduo	7392	380280,02	51,44		
Total	7395	495809,61			

Tabela 5

Análise comparativa das médias de produtividade dos grupos de máquinas que operaram descascando a madeira no campo.

(Mean comparative analysis of machine productivity operating with debarking)

Modelo	Média	Número de amostras
8	25,78 a	6654
6	19,16 b	55
10	13,30 c	149
9	11,97 c	538

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de "tukey" com 5% de probabilidade

Regressões lineares múltiplas

Com o objetivo de obter um modelo que se ajustasse melhor aos dados, e dessa forma fosse mais preciso na predição das produtividades dos "harvesters", foram feitas regressões lineares múltiplas para os dois sistemas de operação.

Sistema sem descascamento de madeira feito pelo "harvester"

Inicialmente foi feita uma regressão linear múltipla com todas as variáveis disponíveis em todos os bancos de dados e que se mostraram significativas nas regressões simples. Os modelos de equipamentos foram incluídos na forma de variável classificatória "Dummy" (Tabela 6).

Em seguida, foi feita nova regressão sem as variáveis que não apresentaram valor-P significativo e sem a variável "idade de corte", que apresentou coeficiente negativo, quando o na-

tural seria que o coeficiente fosse positivo. Esse tipo de ocorrência sugere a existência de problemas de multi-colinearidade, ou seja, a inclusão de duas variáveis estritamente relacionadas na mesma regressão (Tabela 7).

Tabela 6

Resultado da regressão linear múltipla, realizada com todas as variáveis, para o sistema sem descascamento de madeira.

(Multiple linear regression realized with all variables for without debarking system)

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor - p
Interseção	2,25589	0,04139	54,49911	0,00000
DAP (cm)	-0,00185	0,00198	-0,93780	0,34838
Volume/árvore (m ³)	2,88754	0,06889	41,91507	0,00000
Volume/hectare (m ³)	0,00150	0,00016	9,24975	0,00000
Altura (m)	0,01297	0,00159	8,16742	0,00000
Árvores/ha	0,00000	0,00001	-0,30844	0,75776
Idade de corte (anos)	-0,03426	0,00293	-11,62209	0,00000
EQ 3*	0,05644	0,02254	2,50429	0,01229
EQ 4	0,09568	0,02328	4,10985	0,00004
EQ 5	0,09015	0,02221	4,05877	0,00005
EQ 6	0,24577	0,01997	12,30846	0,00000
EQ 7	0,15778	0,02053	7,68461	0,00000
EQ 8	-0,12630	0,02237	-5,64541	0,00000

Significativo com 5% de probabilidade

R²=0,7701 Erro padrão da estimativa = 0,1968

* Os modelos representados pela sigla EQ estão descritos na tabela 1

Tabela 7

Resultado da regressão linear múltipla, realizada sem as variáveis DAP, idade de corte e árvores por hectare, para o sistema sem descascamento de madeira.

(Multiple linear regression realized with DBH, fell age and tree per hectare variables on without debarking system)

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor - p
Interseção	2,04738	0,03033	67,51358	0,00000
Volume/árvore (m ³)	2,23711	0,08009	27,93099	0,00000
Volume/hectare (m ³)	0,00026	0,00007	3,96597	0,00007
Altura (m)	0,01270	0,00147	8,62971	0,00000
EQ 3	0,08399	0,02269	3,70117	0,00022
EQ 4	0,08829	0,02354	3,75114	0,00018
EQ 5	0,06746	0,02237	3,01576	0,00257
EQ 6	0,25819	0,01987	12,99195	0,00000
EQ 7	0,18931	0,02060	9,19075	0,00000
EQ 8	-0,13938	0,02212	-6,32284	0,00000

Significativo com 5% de probabilidade

R²=0,7701 Erro padrão da estimativa = 0,1966

Dessa forma o modelo final de regressão para o sistema sem descascamento de madeira pelo “harvester” fica com o seguinte formato:

$$\text{Prod}(\text{m}^3/\text{h}) = e^{(2,04738+\text{EQ}+2,2371.x+0,0127.y+0,00026.z)}$$

Onde:

EQ = coeficiente para cada tipo de equipamento utilizado conforme Tabela 7 e para EQ1: coeficiente = 0.

X = volume/árvore (m³)

y = altura média (m)

z = volume/hectare (m³/ha)

R² = 0,7655

Erro padrão da estimativa = 3,56 m³/h

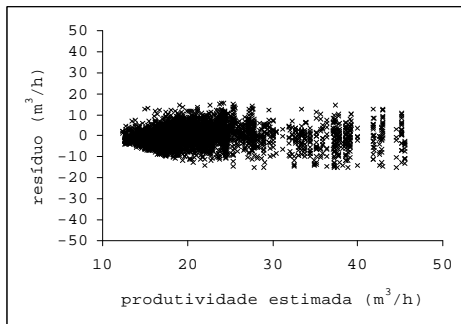


Figura 11
Gráfico da dispersão do resíduo da regressão múltipla para o sistema sem descascamento de madeira.
(Graphic of residual dispersion of the multiple regression for no debarking system)

Na Figura 11 estão plotados os resíduos da regressão múltipla convertidos para a escala original (m³/h). Vale ressaltar que em 83% das observações o erro ficou abaixo de 5 m³/h.

Sistema com descascamento de madeira feito pelo “harvester”

Foi utilizada a mesma metodologia do sistema anterior, ou seja, uma regressão linear múltipla com todas as variáveis e em seguida foi feita nova regressão sem as variáveis que não apresentaram valor-P significativo e sem a variável “idade de corte”, que novamente indicou problemas de multi-colinearidade (Tabela 8).

Dessa forma, o modelo final para o sistema com descascamento de madeira feito pelo “harvester” ficou com a seguinte forma:

$$\text{Prod}(\text{m}^3/\text{h}) = e^{(1,96203+\text{EQ}+1,9532.x+0,00294.y+0,00024.z)}$$

Onde:

EQ = coeficiente para o tipo de equipamento utilizado, conforme Tabela 8 e para EQ 9: coeficiente = 0.

X = volume/árvore (m³)

y = altura média (m)

z = volume/hectare (m³/ha)

R² = 0,7913

Erro padrão da estimativa = 4,73 m³/h

Tabela 8

Resultado da regressão linear múltipla, realizada com todas as variáveis, para o sistema com descascamento de madeira.

(Multiple linear regression realized with all variables for with debarking system)

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor - p
Interseção	1,96203	0,01590	123,36934	0,00000
Volume/árvore (m3)	1,95317	0,06794	28,75014	0,00000
Altura (m)	0,00294	0,00084	3,51068	0,00045
Volume/hectare (m3)	0,00024	0,00006	3,69289	0,00022
EQ 10*	0,06623	0,02096	3,15920	0,00159
EQ 6	0,44698	0,03319	13,46659	0,00000
EQ 8	0,23473	0,01514	15,50671	0,00000

Significativo com 5% de probabilidade

R²=0,7913 Erro padrão da estimativa = 0,2261

*Os modelos representados pela sigla EQ estão descritos na tabela 1

Na Figura 12 estão plotados os resíduos da regressão múltipla convertidos para a escala original (m^3/h). Vale ressaltar que em 75% das observações o erro ficou abaixo de $5 m^3/h$.

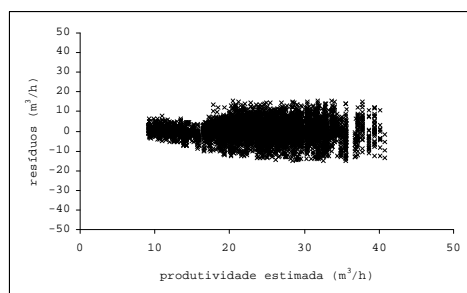


Figura 11
Gráfico da dispersão do resíduo da regressão múltipla para o sistema com descascamento de madeira.
(Graphic of residual dispersion of the multiple regression for system with debarking)

CONCLUSÕES

Através dos modelos de regressão simples comprovou-se a hipótese inicial do trabalho, com o volume médio das árvores sendo a variável que melhor explicou, isoladamente, as produtividades alcançadas pelos "harvesters". As outras variáveis de destaque foram DAP médio, altura média e volume por hectare. O volume médio por árvore representou cerca de 55%, em média, da variação da capacidade produtiva do "harvester".

Para a obtenção de modelos mais precisos foi necessária a utilização de regressões lineares múltiplas com a inclusão das variáveis: volume por árvore, altura média, volume por hectare e tipo de equipamento utilizado. A consideração destas variáveis em conjunto representou, aproximadamente, 80% da capacidade produtiva da máquina.

A utilização dos modelos obtidos neste trabalho em outras situações deve ser encarada com ressalvas, considerando-se as particularidades de cada empresa. Neste caso, recomenda-se a elaboração de bancos de dados inclu-

indo informações mais aprimoradas sobre a capacidade produtiva dos "harvesters" e uma maior precisão dos valores das possíveis variáveis de influência.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

MARCELO BRAMUCCI é Mestre em Recursos Florestais pela ESALQ/USP – Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 - E-mail: mbramucc@esalq.usp.br

FERNANDO SEIXAS é Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 - E-mail: fseixas@esalq.usp.br

Os autores agradecem à FAPESP, pelo apoio financeiro, e às empresas Duratex S.A., Votorantim Celulose e Papel, Cia. Suzano de Papel e Celulose Ltda. e Aracruz Celulose, pela cessão dos dados para a realização deste trabalho.

O uso de nomes comerciais é para a conveniência do leitor e não implica, em momento algum, no endosso dos mencionados produtos pelos autores em exclusão de outros similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ELIASSON, L. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest science*, v.45, n.1, p.26-34, 1999.
- EQUIPE TÉCNICA DA DURATEX. Colheita de madeira em florestas com baixo volume por árvore. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 4, Campinas, 1999. *Anais*. Viçosa: SIF / UFV, 1999b. p. 54-72
- EQUIPE TÉCNICA DA DURATEX. Utilização do "timberhauler" no transporte de madeira a curta distância. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 4, Campinas, 1999. *Anais*. Viçosa: SIF / UFV, 1999a. p.1-13
- EWING, R.H.; LIRETTE, J. Commercial thinning on difficult terrain with the Valmet 901C single-grip harvester. *FERIC field note: partial cutting*, n.28, p.1-2, 1999.

- GINGRAS, J.F. Mechanized tree-length harvesting using a Keto 150 harvester head. **FERIC field note: felling**, n.11, p.1-2, 1992.
- GINGRAS, J.F. The effect of site and stand factors on feller-buncher performance. **FERIC technical report**, n.84, p.1-18, 1988.
- HUNT, J.A. Initial thinning trials with the Valmet Woodstar 546 harvester and forwarder. **FERIC field note: silviculture**, n.47, p.1-2, 1992.
- PLAMONDON, J.A. Tree-length at the stump with the 4500 Ultimate harvester head. **FERIC field note: felling**, n.20, p.1-2, 1993.
- RICHARDSON, R.; GINGRAS, J.F. Shelterwood cutting and commercial thinning of softwood stands with the Valmet 701 harvester. **FERIC field note: partial cutting**, n.5, p.1-2, 1995.
- RICHARDSON, R.; MAKKONEN, I. The performance of cut-to-length systems in Eastern Canada. **FERIC technical report**, n.109, p.1-16, 1994.
- SANTOS, S.L.M.; MACHADO, C.C. Análise técnico-econômica do processamento de madeira de eucalipto em áreas planas, utilizando o processador. **Revista árvore**, v.19, n.3, p.346-57, 1995.
- SANTOS, S.L.M.; MACHADO, C.C.; LEITE, H.G. Análise técnico-econômica da extração de eucalipto em áreas planas com o "forwarder". **Revista árvore**, v.19, n.2, p.213-227, 1995.
- VALVERDE, S.R.; MACHADO, C.C.; REZENDE, J.L.P.; SOUZA, A.P.; ANTIQUEIRA, A.C. Análise técnica e econômica do arraste com "skidder" no sistema de colheita de árvores inteiras de eucalipto. **Revista árvore**, v.20, n.1, p.101-109, 1996a.
- VALVERDE, S.R.; MACHADO, C.C.; REZENDE, J.L.P.; SOUZA, A.P.; ANTIQUEIRA, A.C. Análise técnico-econômica do corte de madeira com o trator florestal derrubador-amontoador (feller-buncher) no sistema de colheita florestal de árvores inteiras de eucalipto. **Revista árvore**, v.20, n.2, p.229-240, 1996b.
- WADOUSKI, L.H. Fatores determinantes da produtividade e dos custos na colheita de madeira. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 10, Curitiba, 1997. **Anais**. Curitiba: UFPR / FUPF, 1997. p.77-84

