



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-265

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

1 MODELACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE MADERA CON AUTOCARGADOR (FORWARDER) UTILIZANDO 2 EL CABESTRANTE DE TRACCIÓN AUXILIAR

3
4 LEITE, A.M.P.¹, COELHO, R.M.², FERNANDES, B.³ y SÁ, G.S.³

5
6 ¹ Prof. do Depart. Engenharia Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Brasil.

7 ² Engenheiro Florestal e Mestre em Ciências Florestais na UFVJM, Brasil.

8 ³ Engenheiros Florestais da Celulose Nipo-Brasileira – CENIBRA, Brasil.

9 10 **Resumen**

11 El objetivo fue modelar productividad autocargador (forwarder) en función pendiente del
12 terreno, distancia de extracción y utilización del cabrestante tracción auxiliar (CTA). Se desarrolló
13 el estudio en plantaciones eucalipto de Minas Gerais, Brasil, de febrero a abril 2015. Se evaluó el
14 rendimiento operativo de la máquina en dos condiciones: con CTA (pendiente mayor 27°) y sin
15 CTA (pendiente entre 0 - 27°). Con el estudio tiempo se determinó la relación productividad del
16 autocargador considerándose variables independientes, utilizando modelos aditivos
17 generalizados. Las actividades parciales de cargue y descargue correspondieron a un mayor
18 porcentaje del tiempo del ciclo operativo (76.35%). El tiempo medio de extracción de madera
19 usando CTA fue 36,1% superior al sin CTA. La productividad del autocargador sin CTA se redujo
20 drásticamente con el aumento de la pendiente del terreno hasta aproximadamente 15° y,
21 encima de este valor, se mantuvo estable hasta 27°. Con CTA, la productividad no cambió con el
22 declive. Pero disminuyó con el aumento de la distancia en ambos escenarios, siendo el efecto de
23 la reducción más significativa con CTA (menos 8,549 m³ h⁻¹). A través de las variables
24 consideradas si determinó el rendimiento operacional del autocargador y se modeló su
25 productividad.

26 27 **Palabras clave**

28 Productividad, Pendiente, Distancia de extracción de madera.

29 30 **1. Introducción**

31
32 Para el año 2014 en Brasil, la área destinada en plantaciones forestales correspondió a
33 7,74 millones de hectáreas (0,9% del territorio), compuestas en la mayor parte por especies del
34 genero Eucalyptus (71,9%) (IBÁ, 2015). En el mismo año, el sector forestal contribuyó con el
35 1,1% de toda la riqueza producida en el país, generando € 3 billones de euros en pago de
36 impuestos e 4,23 millones de empleos.

37
38 Las condiciones edafo-climaticas existentes en Brasil permiten un crecimiento acelerado e
39 alta productividad de las plantaciones forestales, dándole ventajas competitivas frente a otros
40 mercados internacionales. En regiones con una mayor presencia de proyectos forestales, la
41 búsqueda por áreas de pendiente para silvicultura es significativa, ya que estas tierras son, en
42 muchos casos, inapropiadas para actividades de agricultura y pecuaria (BANTEL, 2010).

43
44 La pendiente del terreno está entre las principales variables que influyen la productividad y
45 los costos en los equipamientos forestales. Mayor pendiente se traduce en limitaciones en el
46 desplazamiento de las maquinas e consecuentemente en reducción de la productividad
47 (MALINOVSKI *et al.* 2006).

48
49 La extracción de madera es una de las operaciones forestales más engorrosas
50 (MALINOVSKI *et al.*, 2008), su costo puede ser hasta 25 veces superior al transporte principal
51 en algunos países (BIRRO *et al.*, 2002). La planeación eficiente de esta operación es esencial
52 para racionar el trabajo, reducir los costos, aumentar la calidad del producto e disminuir los
53 daños ambientales (SANTOS *et al.*, 2013).

54

55 Dentro los equipamientos empleados en la extracción de madera, el autocargador
56 (forwarder) está entre los principales. Originalmente fabricado en Canadá, corresponde a un
57 tractor forestal articulado, auto cargable. Tiene una caja de caga e un cargador hidráulico con
58 capacidad de 300 a 1.800 kg de carga, un alcance de 3 a 12 metros, teniendo como función la
59 retirada de madera desde los rodales, llevándola hacia los patios de acopio o para la margen de
60 las vías (SEIXAS, 2008).

61
62 La productividad del autocargador es fuertemente relacionada con la distancia de
63 extracción (MINETTE *et al.*, 2004; CAVALLI; GRIGOLATO; BERGOMI, 2009; CONEGLIAN *et al.*,
64 2010). Su productividad aumenta en la medida que disminuye la distancia de extracción. La
65 operación de este equipamiento es indicada para distancia de 200 a 300 metros (SEIXAS, 2008).

66
67 La inclinación del terreno también esta relacionada con la productividad del autocargador,
68 siendo muchas veces un factor limitante para la operación con este equipamiento. En la medida
69 que la inclinación aumenta, la productividad de la maquina cae (HITTENBECK, 2013; ROBERT,
70 2013; LEITE *et al.*, 2014).

71
72 El desarrollo de equipamientos adecuados para las condiciones topográficas desfavorables
73 es fundamental para disminuir el requerimiento de mano de obra, aumentar la productividad e
74 reducir costos operacionales (LIMA; LEITE, 2008).

75
76 La introducción del cabrestante tracción auxiliar (CTA) favoreció la extracción mecanizada
77 de madera en áreas accidentadas. El CTA tiene como principal función proveer tracción adicional
78 durante el desplazamiento de la máquina, evitando que patine las ruedas motrices,
79 principalmente en terrenos accidentados.

80
81 La primera máquina que utilizó un CTA fue desarrollada en Suiza por *Herzog Forsttechnik*
82 en 2008 (WEGMANN, 2009). En Brasil, las empresas forestales iniciaron el test con cabestrante
83 en *harvesters* y *autocargadors* en el año 2012 (ROBERT, 2013).

84
85 El CTA provee más de 50% de fuerza motriz necesaria durante el desplazamiento en el
86 sentido de la pendiente, minimizando daños al suelo producto del patinaje de las ruedas
87 (WEGMANN, 2009). La reducción del patinaje de las ruedas permite una operación con
88 seguridad en pendientes de hasta 38°, considerando las propiedades del suelo, como humedad
89 (CASTRO, 2013). Este equipamiento viene siendo empleado en empresas forestales como una
90 solución para mecanizar o aprovechamiento forestal en áreas accidentadas. Aun así, son
91 escasas las informaciones operacionales con CTA.

92
93 La modelación estadística es una herramienta capaz de ayudar en la toma de decisiones
94 de los gestores forestales, con el objetivo de maximizar la capacidad productiva de los
95 equipamientos e la reducción de costos. En este sentido, estudios sobre las variables que
96 influyen la productividad y el costo del autocargador en terrenos inclinados son imprescindibles
97 para ayudar la planeación adecuada de la actividad.

98 99 **2. Objetivos**

100
101 Modelar la productividad del autocargador en función de las variables: pendiente del
102 terreno, distancia de extracción y uso del cabestrante de tracción auxiliar.

103 104 **3. Metodología**

105 106 **3.1 Área de estudio**

107
108 El trabajo fue realizado en cultivos de *Eucalyptus* spp. de una empresa forestal localizada
109 en el Estado de Minas Gerais, Brasil, entre las coordenadas geográficas 19° 29` latitud sur y
110 42° 48` longitud oeste, en el municipio de Antônio Dias.

111
 112 Según la clasificación de Köppen, el clima de la región es del tipo Cwb, mesotérmico de
 113 invierno seco y verano ameno (CENIBRA, 2001). La precipitación media anual es de 1.342 mm,
 114 altitud media de 1.200 m.s.n.m, temperatura y humedad media anual de 20,0°C y 77%,
 115 respectivamente (GATTO et al., 2010).

116
 117 La extracción de madera con autocargador fue valuada en tres proyectos forestales,
 118 denominados Pinhão, Barbosão IV y Cubas. En la Tabla. 1 se presenta informaciones del
 119 inventario forestal de cada proyecto. Se evaluarán cultivos en régimen de primera rotación cuyo
 120 espaciamiento de plantío correspondió a 3,0 metros entre individuos e 3,33 metros entre filas.

121 Tabla 1 - Estimaciones medias del inventario forestal de los tres proyectos evaluados en el estudio.

Proyecto	DAP (cm)	Altura (m)	Vtcc** (m³ ha⁻¹)	IMA*** (m³ ha⁻¹ año⁻¹)	Edad (años)
Pinhão	16,43	24,92	286,15	48,5	5,9
Barbosão IV	18,37	29,48	351,88	46,3	7,6
Cubas	17,95	26,63	327,12	37,6	8,7

122 *DAP = diámetro a 1,30 metros del suelo; **Vtcc = volumen total con corteza; ***IMA = incremento medio anual.

123 124 3.2 Toma de datos 125

126 Para obtener el rendimiento operacional del autocargador en diferentes condiciones de
 127 inclinación del terreno e distancias de extracción se realizó un Estudio de Tempos e Movimientos
 128 (ETM). Este procedimiento es el método más utilizado en la medición del trabajo y tiene el
 129 objetivo de evaluar los factores que influyen en la eficiencia de determinada actividad con el fin
 130 de facilitar su perfeccionamiento (ILO, 1992).

131
 132 Fueron consideradas las siguientes actividades parciales del ciclo operacional del
 133 autocargador:

- 134 (a) Desplazamiento sin carga: tiempo de desplazamiento de la maquina con la caja de carga
 135 vacía, iniciando en el borde de la vía hasta inicio del cargamento;
- 136 (b) Cargamento: tiempo de movimiento de la grúa para recoger la madera en el rodal y la
 137 acción de cargar la caja de carga, finalizando con el compartimento de carga completo e
 138 el posicionamiento de la grúa sobre las trozas de madera;
- 139 (c) Desplazamiento con carga: tiempo de desplazamiento de la maquina con el
 140 compartimento de carga lleno, en dirección al borde de la vía, finalizando con el
 141 posicionamiento de esta para descargue;
- 142 (d) Descargue: tiempo de movimiento de la grúa retirando las trozas de la caja de carga e
 143 apilándolos en el borde de la vía, finalizando con el posicionamiento de la misma sobre la
 144 caja de carga vacía;
- 145 (e) Instalación des cabestrante: tiempo correspondiente a la parada de la máquina e
 146 instalación del cabestrante de tracción auxiliar, terminando con el retorno del
 147 desplazamiento de maquina;
- 148 (f) Desinstalación del cabestrante: tiempo correspondiente a la parada de la máquina y
 149 desinstalación del cabestrante, finalizando con el retorno del movimiento del
 150 autocargador.
 151

152
 153 Con el fin de determinar el número mínimo de observaciones para conseguir un error de la
 154 muestra admisible de 5% y un 95% de probabilidad, se realizó un estudio piloto para el ciclo
 155 operacional del autocargador conforme la metodología propuesta por Barnes (1968). El número
 156 de unidades muestrales necesarias fue obtenida por la ecuación 1:
 157

$$n \geq \frac{t^2 CV^2}{E^2} \quad (1)$$

158

159 Donde:

160 n = número de unidades muestrales necesarias;

161 t= valor "t" Student para el nivel de probabilidad deseado y (n-1) grados de libertad;

162 CV = coeficiente de variación (%); y

163 E = error admisible (%).

164

165 Se utilizó un clinómetro digital de marca Haglöf Sweden para medir la pendiente del
166 terreno, siendo esta determinada en porcentaje para, posteriormente, ser convertida en grados.
167 La pendiente fue medida no eje de desplazamiento de la maquina en todos los ciclos
168 operacionales, con la medición iniciando en el borde de la vía hasta la distancia máxima
169 recorrida en el interior del rodal.

170

171 La distancia de extracción fue obtenida por medio de un distanciómetro de marca
172 Burshnell, modelo Yardage Pro 600, siendo esta determinada a partir del borde de la vía hasta la
173 maquina en el interior del rodal, usando como referencia la cabina del autocargador.

174

175 Los datos fueron tomados durante el periodo de febrero a abril del 2015, en el turno de
176 trabajo de las 7:00 a las 16:00h.

177

178 3.3 Características técnicas del autocargador

179

180 Maquina fabricada por Ponsse, modelo ElephantKing, motor diesel, potencia nominal de
181 275 hp (Figura 1 - A). Las dimensiones del autocargador son 10 metros de largo, 3 metros de
182 ancho, con una altura de la caja de carga variando de 4,5 a 6,1 metros. La máquina pesa 22.900
183 kg con capacidad de carga de 20.000 kg.

184

185 El autocargador está equipado con una grúa hidráulica compuesta por lanza, brazo, barra
186 telescópica, rotador y garra para cargue y descargue de madera. La grúa tiene un alcance
187 máximo de 9,6 metros pudiendo izar una carga máxima de hasta 2.300 kg (longitud de 4 metros)
188 y 1.010 kg en su longitud máxima. La garra de cargamento es modelo Ponsse 420, con un área
189 equivalente 0,42 m².

190

191 El sistema de rotación está constituido de neumáticos BPAF (baja presión e alta
192 fluctuación), asociado con semitracción de oruga. La máquina posee tracción 8x8, velocidad de
193 desplazamiento de 0 a 20 km hora⁻¹.

194

195 Para trabajar en pendientes superiores a 27° los autocargadors son equipados con
196 ganchos de tracción auxiliar marca Herzog modelo HSW9-S1 (Figura 1 - B). El CTA pesa 1.900
197 kg, siendo fijado en el chasis de la máquina, funcionando sincronizado con el sistema de
198 transmisión. Éste equipamiento puede estar equipado con dos tipos de cable de acero, siendo
199 uno de 15 mm y 300 metros de largo, o de 14 mm y 350 metros, ambos con resistencia a
200 tracción de 200 kN (20 toneladas).

201

202 Los comandos del cabestrante están instalados en la cabina de la máquina, y son
203 operados por medio de control remoto.

204



(A)



(B)

Figura 1 - Autocargador Ponsse modelo Elephantking (A). Localización del cabestrante de tracción auxiliar en el compartimiento de carga - seta roja (B).

3.4 Procedimientos operacionales del autocargador

El autocargador inicia la operación a partir de la vía con la cabina de la maquina direccionada para el interior del rodal (Figura 2). El desplazamiento vacío ocurre hasta la menor cota altimétrica del rodal donde es iniciado el cargamento. La madera depositada en el compartimiento de carga es provenientes de pilas localizadas en ambos lados de la maquina (derecha e izquierda). Después de completar la carga, el desplazamiento cargado es hasta el borde de la vía ocurre no sentido de declinación, con el compartimiento de carga direccionado para la vía. El descargue se inicia con el accionamiento de la grúa depositando las trozas en pilas al borde de la vía. En lugares donde hay restricciones operacionales para depósito de madera, está se desplace en la vía hasta encontrar un local adecuado para descargar.

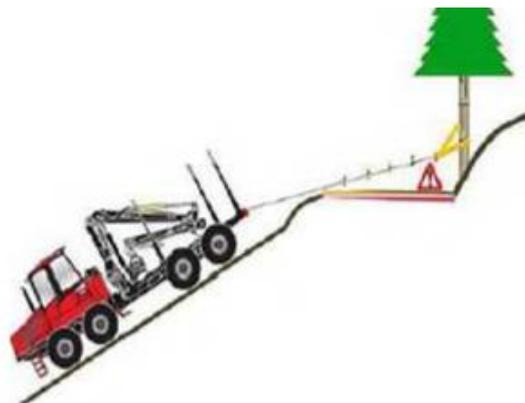


Figura 2 - Procedimiento operacional del autocargador (Fuente: FIRME, 2014).

Se evaluó la extracción de madera con autocargador en dos condiciones operacionales:

- (a) Operación sin uso de CTA, para pendientes inferiores a 27° ,
- (b) Operación con CTA, para pendientes del terreno superiores a 27° .

La extracción de madera fue evaluada de la declinación, o sea, el desplazamiento cargado ocurrió "pendiente arriba".

229
230
231
232
233
234
235
236
237

3.5 Productividad del autocargador

Corresponde al volumen de madera en metros cúbicos, sin corteza, extraída del rodal hasta el borde de la vía por hora efectiva de trabajo ($m^3 \text{ he}^{-1}$). El volumen medio de madera transportada por el autocargador por ciclo operacional es de 14 m^3 . Mediante acompañamiento de la operación en campo se determinó el tiempo efectivo de cada ciclo operacional de la máquina. La productividad fue obtenida por intermedio de la ecuación 2:

$$Pr = \frac{vm}{he} \quad (2)$$

238
239
240
241
242
243
244
245
246

Donde:

Pr = productividad ($m^3 \text{ he}^{-1}$);

vm = volumen de madera en la caja de carga (m^3);

he = horas efectivas de trabajo.

La evaluación ocurrió siempre con el compartimiento de carga completo.

247
248

3.6 Modelación de la productividad del autocargador

249
250
251
252
253
254

La inclinación del terreno, distancia de extracción y el uso del CTA fueran las variables independientes utilizadas para explicar la productividad del autocargador (variable dependiente). El uso de cabestrante correspondió a una variable cualitativa (dummy). Esta variable asume el valor de 1 (uno) cuando la operación envuelve el uso del cabestrante y, 0 cuando la extracción de madera ocurre sin este equipamiento.

255
256
257
258
259
260
261
262
263

Se utilizó modelos aditivos generalizados para relacionar la productividad del autocargador con las variables independientes. Así, las relaciones entre la productividad del autocargador y la pendiente, y la distancia de extracción fueran representadas en gráficos, donde las curvas permitieron visualizar la forma de esta relación. En los gráficos, las líneas continuas representaron los valores ajustados por el modelo y, las líneas punteadas corresponden al error estándar, pudiendo ser interpretadas como intervalo de confianza. Las barras verticales encima del eje de las abscisas representan los valores observados y su localización al largo de la curva ajustada.

264
265
266
267
268
269
270
271
272

Y el test F para verificar la significancia de las curvas suavizadas y, para cada curva estimada, se presenta información sobre el grado de libertad (G.L) estimado. Así, cuando menor el G.L del término suavizado, más próximo de lineal es la asociación entre las variables. Cuando el valor de G.L es exactamente igual a 1(un) significa existencia de asociación lineal simple entre las variables. Se empleó el test t para verificar la significancia de la variable cualitativa uso de cabestrante. El nivel de significancia adoptado fue de 5% (significativo si $p\text{-valor} < 0,05$) para ambos tests, o sea, $p\text{-valor} < 0,05$ indica asociación significativa entre las variables estudiadas. Cuando menor el $p\text{-valor}$, mayor la intensidad de asociación.

273
274
275
276
277
278

La identificación y exclusión de informaciones discrepantes (*outliers*) fueran realizadas después del ajuste por medio del análisis gráfico de residuos. Luego de la remoción de los *outliers* se realizó un nuevo ajuste para el modelo. Se evaluó la calidad del ajuste por medio del coeficiente de determinación y de gráficos de residuos. La análisis gráfica envolvió la comparación de los valores ajustados y valores observados con inclusión de una línea de 45° , donde cuando más próximo los valores estuvieran de la línea, mejor el ajuste del modelo.

279
280
281
282

El modelo ajustado proporcionó la construcción de gráficos de contorno donde, las variables independientes son presentadas en los ejes cartesianos y la productividad de la máquina por líneas en el interior de este.

283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300

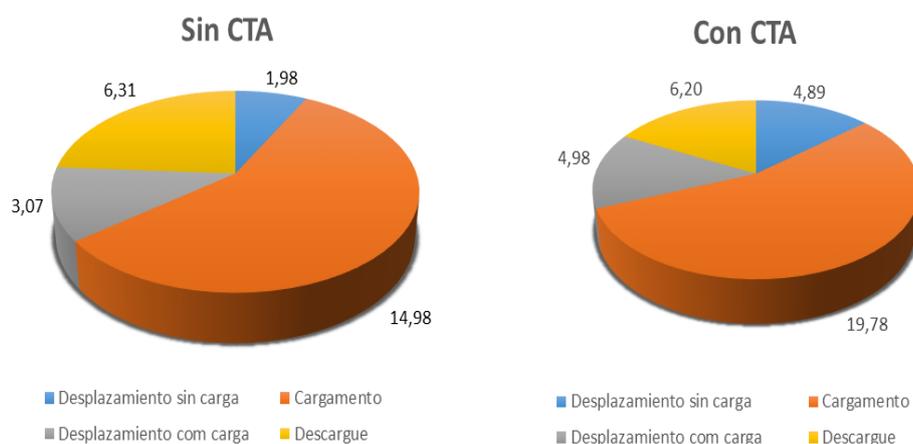
Los análisis fueron procesados en el software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014), utilizando el paquete “mgcv” (WOOD, 2006), específico para ajuste de modelos aditivos generalizados.

4. Resultados

4.1 Estudio de tiempos e movimientos

Con base en el estudio piloto se definió la necesidad de tomar 37 ciclos operacionales del autocargador para atender el error establecido. Con la finalidad de representar mayor variabilidad de las condiciones operacionales fueron tomados 131 ciclos en la extracción de madera con la respectiva máquina, de los cuales 71 fue sin operación de CTA y, 60, con CTA.

El tiempo del ciclo operacional del autocargador considerando conjuntamente las dos condiciones operacionales evaluadas (con y sin cabestrante) fue de 30,7 minutos. La Figura 3 presenta el tiempo de cada actividad del ciclo operacional del autocargador para las operaciones sin y con uso del CTA.



301
302
303

Figura 3 - Tiempo medio (minutos) de cada elemento del ciclo operacional del *autocargador*, para dos condiciones operacionales evaluadas.

304 El tiempo medio de la extracción de madera utilizando CTA fue 36,1% superior a la
305 operación sin equipamiento. El desplazamiento sin carga constituyo la actividad parcial con
306 mayor porcentaje de aumento, correspondiendo a 149,97% comparativamente con la operación
307 sin cabestrante.

308 Debido a que el cabestrante de tracción auxiliar funciona sincronizado con el sistema de
309 transmisión del autocargador, la velocidad de desplazamiento de la maquina debe ser
310 compatible con la salida del cable de acero del cabestrante, por lo tanto, es inferior a la
311 alcanzada en situaciones sin el uso del CTA.
312

313 El tiempo de desplazamiento con carga fue 62,2% superior cuando comparado a esta
314 misma actividad parcial en la operación sin cabestrante. Este aumento es debido a la velocidad
315 menor presentada por el autocargador con uso de cabestrante, además de la dificultad de
316 desplazamiento en inclinaciones mayores del terreno.
317

318 El tiempo de cargamento en la operación con cabestrante fue 32% superior a la misma
319 actividad sin este equipamiento, pues el aumento de la pendiente dificulta el cargamento. Los
320 operadores necesitaron ser más cuidadosos en la formación de la carga, principalmente en la
321 finalización de esta. Con la inclinación acentuada del terreno las trozas de madera pueden
322

323 deslizarse del compartimiento de carga da máquina, cayendo en el suelo o, hasta, impactar con
324 la cabina.

325
326 A pesar de ser mayor dispendioso el tiempo usado en la extracción con CTA se resalta que
327 en pendientes superiores a 27°, la extracción de madera sin este equipamiento es inviable. El
328 patinaje excesivo ante las tentativas de desplazar el compartimiento cargado de la maquina con
329 la pendiente dificulta su movimiento y maniobrabilidad y, consecuentemente, puede ocasionar el
330 volcamiento de la carga de madera.

331 332 **4.1.1 Instalación y desinstalación del CTA**

333
334 El tiempo medio de instalación del cabestrante correspondió a 10,33 minutos, siendo 1,76
335 y 26,31 minutos los valores mínimos y máximos para esta actividad, respectivamente. La grande
336 amplitud en el tiempo de instalación del cabestrante se debe a la diversidad de condiciones
337 operacionales en la utilización de este equipamiento. El anclaje al interior del rodal demanda
338 menos tiempo comparativamente a la instalación del cabestrante próximo a la vía. En este último
339 caso, se hace necesario impedir el acceso de vehículos y personal próximo a las áreas de trabajo
340 (señalización), acarreado un mayor uso de tiempo.

341
342 El tiempo medio de desinstalación del cabestrante fue de 4,89 minutos, en el cual los
343 valores máximo y mínimo fueron de 7,05 y 1,67 minutos, respectivamente.

344 345 **4.2 Modelación de la productividad del autocargador**

346
347 El desempeño operacional del autocargador fue influenciado por la inclinación del terreno,
348 por la distancia de extracción y por el uso de CTA.

349 350 **4.2.1 Efecto del CTA**

351
352 La Tabla 2 presenta el estimativo de la variable cualitativa uso del CTA para el modelo ajustado.

353
354 Tabla 2 - Significancia de la variable cualitativa uso del CTA por el test t.

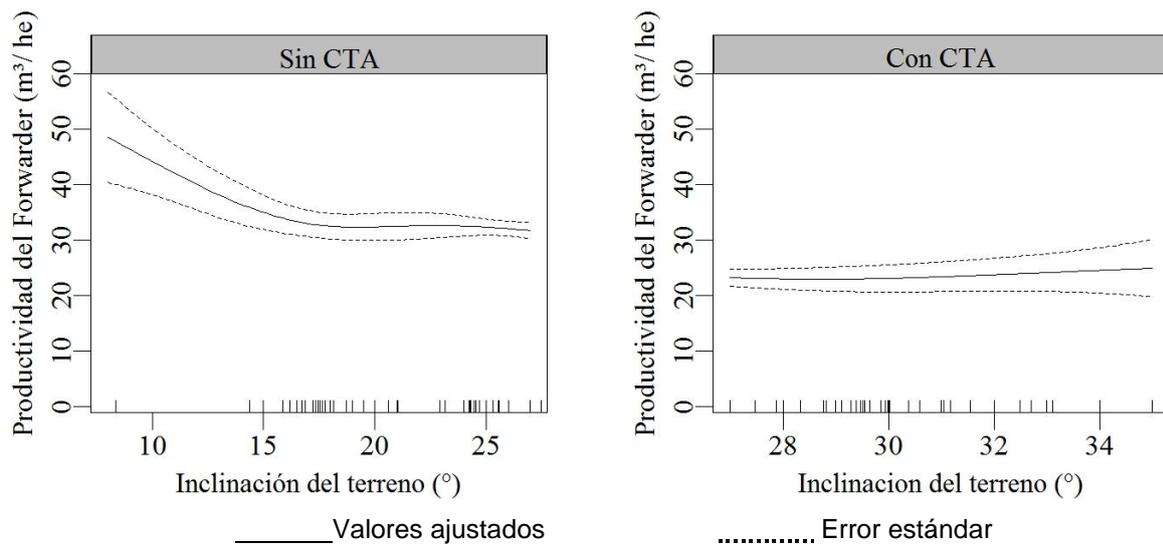
Parametros	Estimativo	Error Estándar	t calculado	p-valor
Intercepto	32,419	1,011	32,068	2,0x10 ⁻¹⁶
Uso CTA	-8,549	1,98	-4,318	3,8x10 ⁻⁰⁵

355
356 La variable utilización del CTA fue significativa en la modelación de la productividad,
357 verificada por el test t (p-valor < 0,05). El signo negativo del parámetro uso del CTA indica
358 reducción de la productividad del autocargador en 8,549 m³ he⁻¹.

359 360 **4.2.2 Efecto de la pendiente del terreno**

361
362 En la Figura 4 están representadas las curvas de la productividad del autocargador en las
363 dos condiciones operacionales, sin CTA (0 a 27°) y con CTA (arriba de 27°).

364



365 Figura 4 - Curvas suavizadas de la productividad del autocargador en función de la inclinación del terreno, para dos
 366 condiciones operacionales.

367 La Tabla 3 presenta el test de significancia de la curva suavizada productividad en función
 368 de la pendiente del terreno.
 369

370 Tabla 3 - Test de significancia para curva suavizada productividad en función de la inclinación del terreno.

Inclinación	
G.L.#	3,941
F	3,438
p-valor	0,00704**

371 # Grados de libertad (estimado) correspondiente al termino suavizado; ** Significativo ($p < 0,01$).

372

373 En la operación sin CTA, la productividad del autocargador presentó disminución con el
 374 aumento de la inclinación del terreno hasta aproximadamente 15°, luego este valor mostró ser
 375 estable hasta 27° (Figura 3 - Sin CTA).

376

377 En la operación con CTA, la productividad de la maquina casi no se alteró con el aumento
 378 de la inclinación del terreno (Figura 4- Con CTA). La capacidad de remolcar del cabestrante hace
 379 con que la velocidad del desplazamiento del autocargador permanezca constante, independiente
 380 de la pendiente evaluada.

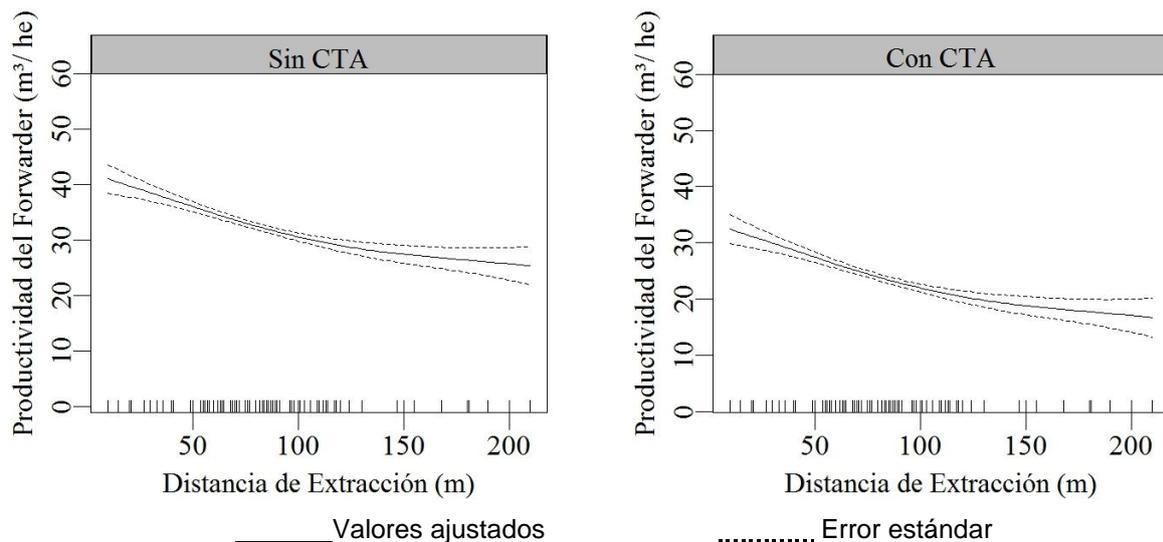
381

382 4.2.3 Efecto de la distancia de extracción

383

384 La Figura 5 presenta las curvas suavizadas de la productividad del autocargador en función
 385 de la distancia de extracción.

386



387 Figura 5 - Curvas suavizadas de la productividad del autocargador en función de la distancia de extracción, en las dos
 388 condiciones operacionales.

389 La distancia de extracción fue significativa en la modelación de la productividad del
 390 autocargador (Tabla 4).
 391

392 Tabla 4 - Test de significancia para la curva suavizada de la productividad en función de la distancia de extracción.
 393

Distancia de extracción	
G.L#	2,161
F	29,634
p-valor	2,79x10 ^{-13***}

394 # Grado de libertad (estimado) correspondiente al termino suavizado; ***Significativo ($p < 0,001$).

395 La productividad del autocargador es inversamente proporcional a la distancia de
 396 extracción en las dos condiciones operacionales (Figura 5). El aumento unitario de la distancia de
 397 extracción ocasionó una reducción media de 0,08 m³ he⁻¹ en la productividad de la máquina.
 398

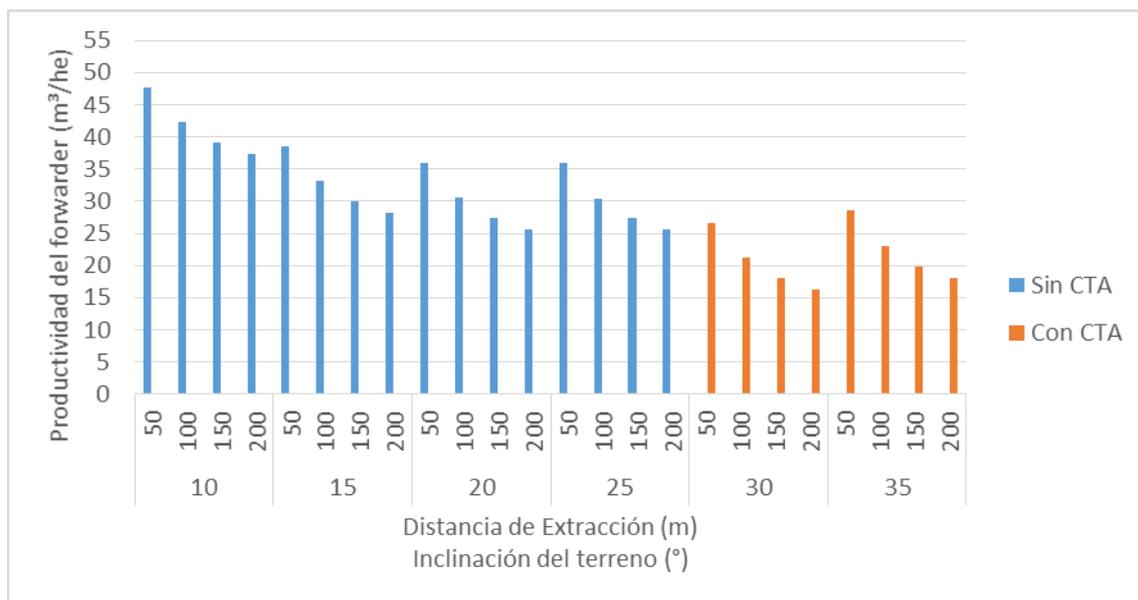
399 Para una misma distancia de extracción, la productividad del autocargador en operación
 400 con CTA fue 8,549 m³ he⁻¹ inferior a la operación sin el uso de este equipamiento. Así, la
 401 reducción de la velocidad de desplazamiento de la máquina, mayor inclinación del terreno e
 402 irregularidades del micro relieve fueron los principales factores causadores de este desempeño.
 403

404 4.2.4 Influencia de las variables en la productividad del autocargador

405 La Figura 6 presenta las productividades de extracción de madera con autocargador en
 406 función de la distancia de extracción, pendiente del terreno y uso del CTA.
 407

408

409



410

411 Figura 6 -Productividad del autocargador en función de la distancia de extracción, pendiente del terreno y uso del CTA.

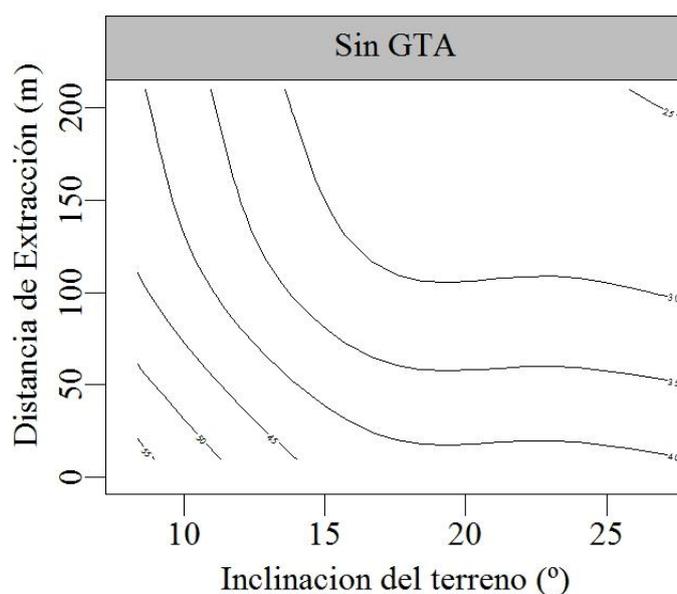
412 La productividad decreció con el aumento de la pendiente y de la distancia de extracción.
 413 En la condición de pendiente igual a 10°, el aumento de la distancia de extracción de 100 para
 414 200 metros resultó en una productividad 9,2% menor. La disminución de la productividad es
 415 mayor aún en pendientes más acentuadas por ejemplo, a 20° esta disminución fue de 16,0%.

416

417 En la operación con CTA, el aumento de la distancia de extracción causa una mayor caída
 418 en la productividad. En esta situación, el aumento de 100 metros en la distancia de extracción en
 419 una inclinación de 35°, ocasionó una caída de 21,2% de la productividad.

420

421 Las Figuras 7 y 8 presentan la productividad estimada de la extracción de madera con el
 422 autocargador ($m^3\ he^{-1}$), para diferentes pendientes del terreno y distancias de extracción (líneas
 423 continuas).

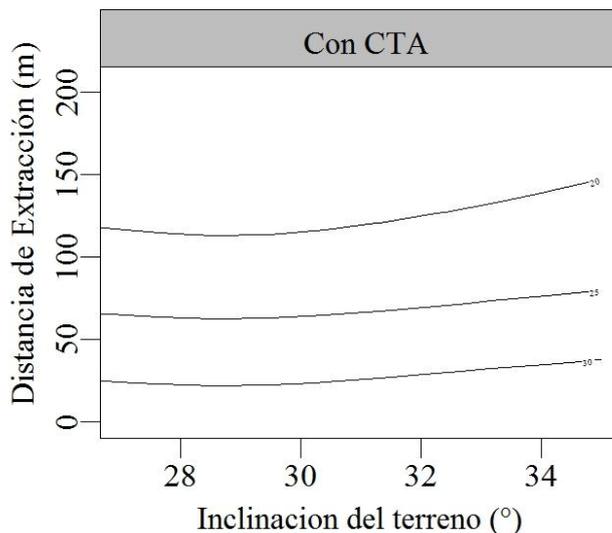


424

425 Figura 7 - Productividad del autocargador ($m^3\ he^{-1}$) en función de la pendiente y distancia de extracción para operación
 426 sin CTA.

427 En la realización de la actividad sin cabestrante, el efecto de la inclinación del terreno es
 428 más expresivo sobre la productividad del autocargador hasta la pendiente de 15°. Para

429 pendientes superiores a 20°, la distancia de extracción ejerce mayor efecto sobre la
430 productividad de la máquina. Las líneas de contorno permanecen poco alteradas con el aumento
431 de la pendiente de 20 a 26°.



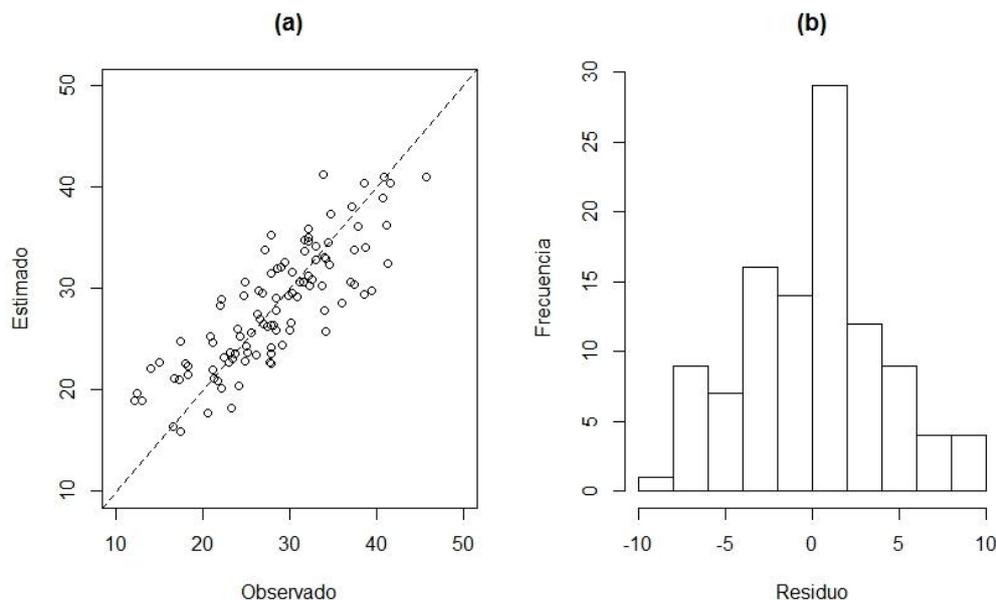
432
433 Figura 8 - Productividad del autocargador ($m^3 \text{he}^{-1}$) en función de la pendiente y distancia de extracción para operación
434 con CTA

435 El efecto de la distancia de extracción fue más expresivo sobre la productividad de la
436 máquina con CTA (Figura 8). El cabestrante de tracción auxiliar minimiza los efectos de la
437 inclinación del terreno sobre la productividad, pues la capacidad de remolcar de este
438 equipamiento hace con que la velocidad de desplazamiento de la máquina permanezca
439 constante, indiferente de la pendiente evaluada.

440 441 4.2.5 Calidad del ajuste

442
443 El coeficiente de determinación (R^2) del modelo correspondió al 72,1%, o sea, 72,1% de la
444 variación de la productividad del autocargador fue explicada por las variables independientes
445 pendientes del terreno, distancia de extracción y uso de cabestrante.

446
447 La Figura 9 presenta la relación de la productividad observada con la estimada por el
448 modelo (a) e, histograma de residuos (b).
449



450

451 Figura 9 - Relación de la productividad observada del autocargador con la ajustada por el modelo (a). La línea
 452 punteada posee inclinación de 45°. Histograma de residuos del modelo ajustado (b).

453 El grafico (a) indica que, entre más próximo los puntos estén de la línea punteada, mejor el
 454 ajuste del modelo y, puntos localizados sobre la línea indican valores estimados iguales a los
 455 observados. El histograma de residuos (b) permite evaluar la distribución de los erros.

456

457 5. Discusión

458

459 La productividad es una de las principales variables que viabiliza o no la retirada de
 460 madera de plantaciones forestales. Así, su adecuada predicción es de suma importancia para
 461 que sean elaborados por las empresas partidas presupuestales fidedignas (MALINOVSKI et al.,
 462 2006).

463

464 5.1 Distancia de extracción

465

466 La variable explicativa distancia de extracción es ampliamente utilizada para determinar el
 467 rendimiento operacional del autocargador (TIERNAN et al., 2004; MALINOVSKI et al., 2008;
 468 MINETTE et al., 2008), demostrando ser significativa en estos estudios.

469

470 El aumento de la distancia de extracción ocasiona reducción en la productividad del
 471 autocargador, sobretodo en regiones con relieve accidentado. Leite et al. (2014) corroboró en
 472 esta afirmación, donde el incremento unitario en la distancia de extracción resultó en la
 473 disminución de 0,051 (m³ he⁻¹) en la productividad del autocargador, trabajando en áreas con
 474 pendientes accidentadas.

475

476 Resultados semejantes fueron obtenidos por Leite (2012) en estudio con autocargador en
 477 áreas accidentadas en el cual, el aumento de la distancia de extracción de 150 para 300 metros
 478 resultó en la disminución del 17% de la productividad de esta máquina.

479

480 De acuerdo con Oliviera et al. (2009), para la optimización de la extracción de la madera
 481 con el autocargador es importante considerar la distancia recorrida por la máquina, debido a su
 482 baja velocidad de desplazamiento. Tiernan et al. (2004), afirmó que la maximización del
 483 cargamento de la caja de carga y optimización de la distancia de extracción son puntos cruciales
 484 para garantizar la extracción de madera en terrenos con topografía desfavorable con un costo
 485 viable.

486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540

Además de la reducción en la productividad, mayores distancias resultan en mayor frecuencia de viajes del autocargador en una franja / eje de extracción, de acuerdo con Lopes et al. (2015), inúmeros viajes del autocargador en las vías de extracción contribuyen para aumentar la compactación del suelo.

Silva et al. (2007) afirmo que el tráfico de máquinas de aprovechamiento varias veces en un mismo local puede facilitar procesos erosivos y dificultar el crecimiento de raíces. Según este autor, el efecto perjudicial de los neumáticos sobre la capa orgánica del suelo reduce la infiltración de agua, resultando en el aumento de escorrentía superficial y erosión hídrica. Este proceso es facilitado en locales con pendientes acentuadas.

5.2 Pendiente del terreno y uso del CTA

Leite et al. (2014) afirma que la variable pendiente explica el 75% del comportamiento de la productividad del autocargador en la extracción de madera. El cambio del sentido de la extracción de la pendiente ocasiona alteración en el comportamiento de la productividad, en el cual 55% corresponde al porcentaje explicado por la declividad del terreno.

En áreas con declividad, el sentido de desplazamiento cargado es un factor crucial en la planificación de las actividades de extracción de madera. Tiernan et al., (2004) afirma que la extracción en el sentido de la pendiente redujo la productividad del autocargador de 0,8 a 5,1 m³ he⁻¹, siendo esta diferencia dependiente de la distancia de extracción y del volumen de la caja de la máquina.

Segundo Leite et al. (2014), el autocargador presenta mayor capacidad de extracción de madera operando con desplazamiento cargado en el sentido de descenso de la pendiente, siendo en media 20% superior la extracción en el sentido de la pendiente. En este sentido, siempre que es permitido según el aprovechamiento planificado, la extracción en el sentido del descenso de la pendiente debe ser adoptada.

Ghaffarian et al. (2007) encontró resultados diferentes a esto estudio. Según esos autores, el aumento de la inclinación del terreno resultó en menor tiempo de extracción del autocargador en Austria. Este hecho es debido al aumento de la velocidad de desplazamiento cargado con incremento de la inclinación del terreno, para operaciones en el sentido de descenso de la pendiente.

Cavalli et al. (2009) evaluando extracción de madera con autocargador equipado con cabestrante de tracción auxiliar afirma que, el aumento de la pendiente de 11° para 22° ocasionó disminución máxima de 2m³ en la productividad de la máquina. De acuerdo con esos autores, el sistema del cabestrante de tracción auxiliar minimiza los efectos de la inclinación del terreno sobre la productividad de la máquina.

Por lo tanto, además de viabilizar la mecanización en terrenos montañosos (arriba de 27°), el empleo del CTA ameniza el efecto de la pendiente del terreno sobre la caída del rendimiento operacional / productividad del autocargador.

6. Conclusiones

Las variables explicativas pendiente del terreno, distancia de extracción y uso del CTA permiten modelar la productividad y, determinar el rendimiento operacional del autocargador.

El incremento de la pendiente del terreno y de la distancia de extracción proporcionara una caída de la productividad del autocargador trabajando sin CTA (relación inversa).

541 El incremento de la distancia de extracción y el uso del CTA ocasionaran una reducción en
542 la productividad del autocargador en pendientes superiores a 27°. Entretanto, este equipamiento
543 torna asequible la extracción mecanizada de madera arriba de esta clase de pendiente,
544 amenizando el efecto de la inclinación del terreno en contra la reducción de la productividad de
545 esta máquina, además de trabajarse con mayor seguridad.

546

547 7. Agradecimientos

548

549 La UFVJM, la FAPEMIG y la CENIBRA.

550

551 8. Bibliografía

552

553 BANTEL, C. A. **Estudo de diferentes sistemas de colheita de *Eucalyptus spp.* em área**
554 **montanhosa.** 2010. 166 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências
555 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

556

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

559

560 BIRRO, M. H. B.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; MINETTI, L. J. Avaliação técnica e econômica da
561 extração de madeira de eucalipto com *track-skidder* em região montanhosa. **Revista Árvore,**
562 Viçosa, v. 26, n. 5, p. 525-532, 2002.

563

564 CASTRO, G. P. **Colheita florestal em áreas montanhosas.** Disponível em: <
565 http://colheitademadeira.com.br/noticias/colheita_florestal_em_areas_montanhosas/>. Acesso
566 em 16 de nov. de 2015.

567

568 CAVALLI, R.; GRIGOLATO, S.; BERGOMI L. Z. Esbosco in ambiente montano con Cable-
569 *Autocargador.* **Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura.** Taormina (ME): 16-19 outubro
570 2009. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 1476-1481.

571

572 CELULOSE NIPO-BRASILEIRA S.A. - CENIBRA. Relatório do levantamento semidetalhado de solos
573 da Cenibra: Fase 2. Belo Oriente, 2001. v.1. 101p.

574

575 FIRME, D. J. **Colheita de madeira em áreas com relevo acidentado utilizando equipamentos de**
576 **alta performance.**2014. 49 slides originais.

577

578 GATTO, A.; BARROS, N. F; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, E. M. A.
579 Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira**
580 **Ciência do Solo,** Viçosa, v.34, n.4. p.1069-1079, 2010.

581

582 GHAFARIAN, M. R.; STAMPFER, K.; SESSIONS, J. Forwarding productivity in Southern Austria.
583 **Croatian Jornal of Forest Engineering,** v.28, n.2, p.169-175, nov., 2007.

584

585 IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2015.** Brasília, 2015.

586

587 LEITE, E. S. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de**
588 **toras curtas.** 2012. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-
589 graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

590

591 LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L.
592 Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo *forwarder.* **Revista Árvore,** Viçosa-MG,
593 v.38, n.5, p.879-887, 2014.

594

595 LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. Mecanização. In: MACHADO, C. C. (Org). **Colheita florestal**. 2.ed.
596 Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2008. p.43-65.
597
598 LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, C. K.; DRINKO, C. H. Compactação de um solo submetido
599 ao tráfego do *harvester* e do *forwarder* na colheita de madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica,
600 v.22. n.2, p.223-230, 2015.
601
602 MALINOVSKI, R. A.; FENNER, P. T; SCHACK-KIRCHNER, H.; MALINOVSKI, J. R.; MALINOVSKI, R. A.
603 Otimização da distância de extração de madeira com *forwarder*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba,
604 v.36, n.79, p.171-179, 2008.
605
606 MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R.; YAMAJI, F. M.. Análise das variáveis de
607 influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características
608 físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, v. 36, n. 2,
609 p.169 - 182, 2006.
610
611 MINETTE, L. J.; SILVA, E. N.; MIRANDA, G. M.; SOUZA, A. P.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica da
612 operação de extração de *Eucalyptus* spp. utilizando trator autocarregável e o trator florestal
613 transportador “*forwarder*” na região sul da Bahia. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.16, n.3,
614 p.312-317, 2008.
615
616 INTERNACIONAL LABOUR OFFICE (ILO). **Introduction to work study**. 4 ed. Geneva, ILO, Internation
617 Labour Office, 1992. 442 p.
618
619 OLIVEIRA, D.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do *Autocargador* na
620 extração de toras de pinus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 525-533, dez. 2009.
621
622 R DEVELOPMENT CORE TEAM (2014). R: A language and environment for statistical computing. R
623 Foudation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL [http://www.R-](http://www.R-project.org)
624 [project.org](http://www.R-project.org).
625
626 ROBERT, R. C. G. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita mecanizada em**
627 **plantios de *Eucalyptus* spp. em duas condições de relevo acidentado**. 113 p. Tese (Doutorado em
628 Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade
629 Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
630
631 ROBERT, R. C. G.; SILVA, F. A. P. C.; ROCHA, M. P.; AMARAL, E. J.; GUEDES, I. L. Avaliação do
632 desempenho operacional do *harvester* 911.3 X3M em Áreas Declivosas. **Floresta e Ambiente**,
633 v.20 n.2 p. 183-190, 2013.
634
635 SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C. C. (Org). **Colheita florestal**. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade
636 Federal de Viçosa, 2008. p.98-145.
637
638 SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, F. P. Alterações do solo
639 influenciadas pelo tráfego e carga de um *forwarder* nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto.
640 **R. Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.371-377, 2007. Nota.
641
642 TIERNAN, D; ZELEKE, G. OWENDE, P. M. O.; KANALI, C. L.; LYONS, J.; WARD, S. M. Effect of
643 working conditions on forwarder productivity in cut-to-length timber harvesting on sensitive forest
644 sites in Ireland. **Biosystems Engineering**, Ireland, v.87, p.167-177, 2004.
645
646 WEGMANN, U. Kletterkünstler Hangforwarder. **Wald und Holz**. Nr. 1, S.
647 30-31, 2009.
648
649 WOOD, S. N. (2006) Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman and Hall/CRC.