



# Análisis económico de la cosecha mecanizada en repoblaciones de *Eucalyptus* spp. en sitios montañosos

## Economic analysis of the mechanized harvesting of *Eucalyptus* spp. in mountainous sites

Renato Cesar Gonçalves Robert<sup>1</sup>, Rafael Oliveira Brown<sup>1\*</sup> y Camila Castillo Ruy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná. Departamento de Ingeniería y Tecnología Florestal.

\* Autor de correspondencia. brownrafael@gmail.com

### RESUMEN

El avance de la mecanización en la cosecha forestal viene a reforzar los índices de competitividad del sector de producción en Brasil, aunque el uso de máquinas en zonas de pendiente sea un desafío técnico y operacional para la ingeniería de equipos. Este trabajo pretende evaluar los costos operacionales y de producción del *harvester* 911.3 X3M y del *forwarder* 860.4 con grúa de tracción auxiliar, en situaciones montañosas y analizar la influencia de cada variable en los costos. Los datos analizados fueron de áreas de repoblación de eucaliptos en Minas Gerais. Se observó un costo de producción de USD 4.59 m<sup>-3</sup> (a costos de 2017 en todos los casos) para el *harvester*. El *forwarder* presentó un costo de producción de USD 2.75 m<sup>-3</sup>. Se concluye que estas máquinas pueden operar en situaciones montañosas con costos equivalentes a los de otras máquinas, sin pérdidas significativas de productividad con el aumento de la pendiente. Además, se notó que el valor de adquisición del equipo fue la variable que más influyó en el costo operacional y, entre más nueva la máquina, mayor influencia tiene el precio del combustible; por otro lado, cuanto más usada, más influencia tienen los costos de mantenimiento y reparaciones.

**PALABRAS CLAVE:** costo operacional, costo de producción, pendiente, *Eucalyptus* spp.

### ABSTRACT

The progress of mechanization in the forest harvest has reinforced the competitiveness of the production sector in Brazil, although the use of machines in sloping areas is a technical and operational challenge for equipment engineering. This work aims to evaluate the operational and production costs of harvester 911.3 X3M and forwarder 860.4 with auxiliary traction crane in mountainous areas and to analyze the influence of each variable on costs. The data are from areas of eucalyptus repopulation in Minas Gerais. A production cost of USD 4.59 m<sup>-3</sup> was observed for the harvester. The forwarder presented a cost of production of USD 2.75 m<sup>-3</sup>. It is concluded that these machines can operate in mountainous situations with costs equivalent to those of other machines, without significant losses of productivity with the increase of the slope. In addition, the acquisition value of the equipment was the variable that most influenced the operational cost and that the newer the machine, the greater the influence of the price of the fuel, while the more used, the more influence maintenance costs and repairs.

**KEYWORDS:** operating cost, cost of production, slope, *Eucalyptus* spp.

### INTRODUCCIÓN

La expansión rápida de las repoblaciones forestales en el territorio brasileño, aunada a la gran demanda de madera de esta procedencia, hace que el sector forestal de Brasil destaque a escala internacional. Sin embargo, como estos cultivos son de mediano a largo plazo, la silvicultura, a

diferencia de los cultivos agrícolas, muchas veces se desarrolla en zonas que no tienen características topográficas propicias para el uso de maquinaria de alto desempeño en las operaciones de cosecha. La tala y la extracción en terrenos con pendientes mayores a 25° se presentan como un desafío técnico y operacional para la

ingeniería de equipos. Hoy día, muchas tecnologías están siendo desarrolladas con la intención de que estas operaciones se realicen con mayor seguridad, además de atender a las exigencias ergonómicas y operar a costos competitivos en el mercado. La empresa Komatsu Forest, en su filial alemana, desarrolló los tractores *harvester* modelo 911.3 X3M y el *forwarder* modelo 860.4 con grúa de tracción auxiliar (GTA), para garantizar mayor seguridad en la tala y extracción de la madera; estos tractores pueden operar en pendientes entre 20° y 38°.

Los sistemas de cosecha se pueden clasificar de acuerdo con las longitudes de las trozas y la manera como son extraídas hasta el lugar de procesamiento (Malinovski, Malinovski y Camargo, 2008). En Brasil, el sistema más antiguo en uso es el de producción de trozas (*cut-to-length*), que cuando se complementa con más mecanización, se obtiene la combinación *harvester + forwarder*. El derribo del árbol y el troceado del fuste en secciones pequeñas con un máximo de seis metros de largo se hacen con el *harvester*, mientras la extracción de las trozas hasta la brecha de saca o hasta donde se cargan los camiones, con el *forwarder*. La introducción de nuevos sistemas de cosecha en áreas donde ya existían operaciones de tala y extracción de madera, hace necesaria una evaluación que justifique su viabilidad económica. De esta manera la comparación de los costos en la práctica con los que se proponen puede garantizar una visualización clara y objetiva de las ventajas de uso de un sistema en detrimento de otro. En un sistema de tala rasa a los siete años de edad en una repoblación de *Eucalyptus viminalis* Labill, se han estimado costos de USD 95 h<sup>-1</sup> para la corta con el *harvester* y USD 78 h<sup>-1</sup> para la extracción con el *forwarder* (Hartsough y Cooper, 1999). Al estudiar el planeamiento de la cosecha con un sistema *harvester + forwarder* en pendientes de 4° a 26°, Leite (2010) concluyó que el costo es 10% mayor en estas zonas que en zonas llanas (de 0° a 4° de pendiente). En un estudio realizado en una repoblación de *Eucalyptus grandis* W. Hill, en que la primera tala rasa se dio a los seis años de edad, Simões y Fenner (2010a) observaron que los costos de extracción de la madera con el *forwarder* son inversamente proporcionales al rendimiento operacional. Al comparar

sistemas de cosecha terrestres con aéreos, Drews, Doyal, Hartsough y Kellog (2001) encontraron un costo de producción de USD 0.71 kN<sup>-1</sup> (USD 7 Mg<sup>-1</sup>) para el *forwarder*, en tanto que el cable aéreo les resultó en un costo de USD 3.34 kN<sup>-1</sup> (USD 33 Mg<sup>-1</sup>). Sin embargo, al comparar *harvesters* de distintos portes (pequeño, medio y grande) en un sistema de tala rasa en Irlanda, Jiroušek, Klvač y Skoupý (2007) concluyeron que cuando los árboles tienen volúmenes individuales mayores que 0.5 m<sup>3</sup> no hay diferencias significativas en los costos en función de la variación (80 kW a 120 kW) de la potencia de la máquina.

En el análisis de un sistema de cosecha forestal se pueden utilizar distintas metodologías de cálculo y los costos cambian al comparar un método con otro, o de una empresa a otra, en función de la situación y el sistema en que operan (Leite, 2012). Lopes (2007) define los costos fijos como aquellos que no cambian con las horas de operación, además de que no son influenciados por las actividades de la máquina, tampoco por el nivel de producción, es decir, son costos inherentes a la operación de la máquina. Morais (2012) menciona que los costos variables son los que carga la empresa proporcionalmente a su nivel de producción, dependientes de las actividades ejecutadas en un cierto período. Lopes (2007) define estos costos como los que tienen variación proporcional a la cantidad producida o con el uso de la máquina. Para evaluar el grado de variación de los indicadores de cálculo financiero frente a las variables que componen el costo con mayor importancia, se hace un análisis de sensibilidad (Oliveira 2009). Los resultados pueden presentarse en un diagrama que permite analizar el límite de cada variable independientemente de la influencia que su variación tenga en el resultado final y también permite obtener la relación lineal o no lineal entre las variables dependiente e independiente.

De esta manera, por tratarse de la introducción inédita de dos máquinas, que en conjunto hacen la cosecha en el sistema de trozas cortas en pendientes por encima de los niveles convencionales, que suelen ser hasta de 25°, se hace necesario el análisis de sus costos operacionales y de producción.



## OBJETIVOS

Analizar los costos operacionales y de producción de los tractores *harvester* modelo 911.3 X3M y *forwarder* modelo 860.4 con grúa de tracción auxiliar (GTA), con el fin de compararlos con los costos que generan otras máquinas. Adicionalmente, evaluar la productividad considerando el aumento de la pendiente del terreno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área

El trabajo se realizó en una empresa forestal en el estado de Minas Gerais ubicado en la región sureste de Brasil, en las localidades de Ferros y Antônio Dias, ubicado en 19°23'43" S y 42°48'18" O. El clima característico de la región es el Cwa (Köppen) y la altitud media de 640 m. El relieve es fuerte ondulado a escarpado con pendientes que varían de 7° a 38°. La textura de suelo que predominaba en la región es arcillo-arenosa con coloración bruno-rojizo (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [Embrapa], 1999). La repoblación de *Eucalyptus* spp. tiene 85 meses de edad, volumen medio por árbol de 0.188 m<sup>3</sup> y un espaciamiento de 3.00 m × 3.33 m. El área se caracteriza por poseer rodales en zonas de cuesta con rampas largas y sin la presencia de pequeños montes o micro relieve irregular.

### Descripción de las máquinas y operaciones

La maquinaria evaluada en este estudio fue el *harvester* 911.3 X3M, también denominada de *SNAKE*, y el *forwarder* 860.4 con grúa de tracción auxiliar (GTA), (Fig. 1), ambos del fabricante Komatsu Forest.

El sistema de cosecha empleado fue el de producción de trozas cortas (*cut-to-length*), en que el *harvester* apea y trocea los árboles, perpendicularmente a las curvas de nivel y con una faja de trabajo compuesta por cuatro líneas de árboles, y el *forwarder* hace la extracción con auxilio de la grúa de tracción que se ata a un árbol ancla que en general se sitúa

en el borde del rodal en una cota más alta que la de la línea de extracción.

El *harvester* estuvo compuesto por un tractor de orugas con cadenas adaptadas en un *boogie* de neumáticos, con peso operacional de 245.2 kN (25 Mg) y equipado con un cabezal cortador Komatsu tipo 360.2 que tenía 9190 horas de uso cuando se iniciaron las pruebas. En la operación realizó el apeo, el desramado, el troceado y el descortezado hacia arriba y hacia abajo de la cuesta en zonas con pendientes hasta de 38°.

El *forwarder* quedó equipado con una grúa de tracción que permite realizar la extracción en zonas con pendientes del 27° a 37°. El peso de esta máquina fue de 156.9 kN (16 Mg) y tenía 44 horas de uso cuando inició las pruebas en el área. El sistema de rodado fue de llantas semiimplementadas con orugas flexibles. Según datos de la empresa, la máquina tiene una capacidad de cargar 15 m<sup>3</sup>.

### Determinación de la productividad

En el caso del *harvester* la variable dependiente medida fue el volumen en metros cúbicos de madera procesada en trozas de 3.30 m y 6.0 m con corteza y 6.30 m sin corteza, por hora de trabajo efectiva (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). Se establecieron parcelas con 60 árboles, distribuidos en cuatro líneas con 15 árboles cada una (Tabla 1). Los valores medios referentes al número de árboles derribados y procesados y el volumen medio individual por parcela fueron medidos por el sistema de información y control de la máquina (MaxExplorer). El diseño experimental permitió evaluar un total de 5.22 hectáreas de área cosechada.

Para el *forwarder*, la productividad representó el volumen de madera, en metros cúbicos, extraído del rodal hasta el patio o hasta el borde del camino, por hora de trabajo efectivo (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). La máquina operó en distancias de extracción de 20 m hasta 235 m, mientras el uso o no de la grúa dependió de la combinación de este factor con la pendiente, que varió de 7° a 41°.

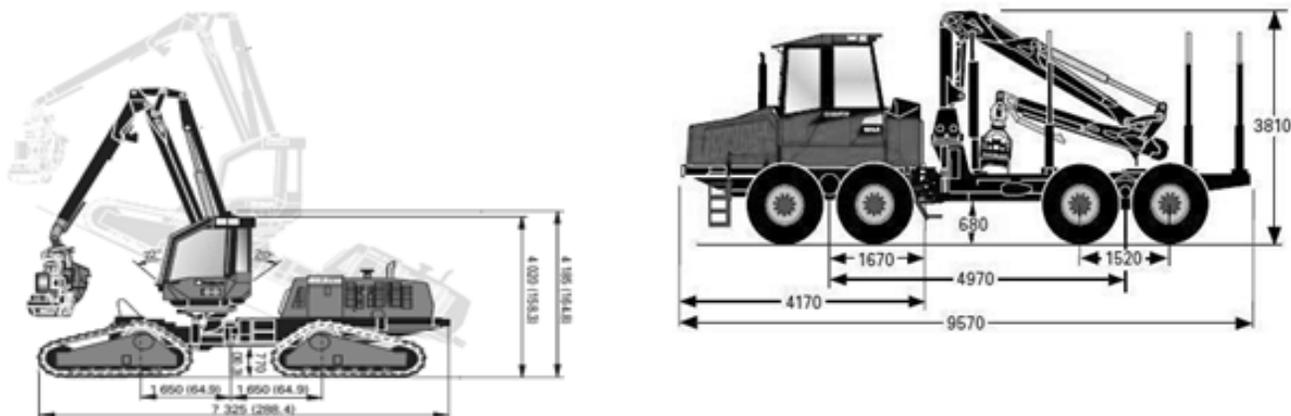


Figura 1. Perfil del *harvester* 911.3 X3M (izquierda) y del *forwarder* modelo 860.4 (derecha).

TABLA 1. Diseño experimental con clases de pendiente y esquemas de trozado.

	Tratamientos (Clases de pendiente)		
Esquema de trozado	1 0° a 20°	2 20.1° a 27°	3 Más de 27.1°
3.30 m con corteza	18 parcelas*	6 parcelas**	5 parcelas***
6.00 m con corteza	18 parcelas*	6 parcelas**	5 parcelas***
6.30 m sin corteza	18 parcelas*	6 parcelas**	5 parcelas***

\*Número medio de árboles por parcela = 60; total de árboles observados= 1080  
 \*\*Número medio de árboles por parcela = 60; total de árboles observados= 360  
 \*\*\* Número medio de árboles por parcela = 60; total de árboles observados= 300

Para obtener un número mínimo de observaciones con un nivel de confianza deseado, se determinó el número de muestras necesarias para un error de muestreo admisible de 5% a un nivel de confianza de 95%. La intensidad de muestreo de los ciclos operacionales se calculó con la ecuación

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

donde:

- $n$  = número de muestras necesarias
- $t$  = valor de  $t$  Student, para un nivel de confiabilidad deseado con  $(n-1)$  grados de libertad
- $CV$  = coeficiente de variación (%)
- $E$  = error admisible (%)

Con la prueba de Bartlett se verificó la homogeneidad de las varianzas y también se realizó el análisis de varianza (Andeva) a 95% de confianza.

Las ecuaciones 2 y 3 fueron utilizadas para el cálculo de la productividad media del *harvester* y del *forwarder*, respectivamente.

$$Pr = \frac{(n \times vmi)}{ta} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{vmc}{te} \quad (3)$$

donde:

- $Pr$  = productividad en metros cúbicos por hora efectiva ( $m^3 h^{-1}$ )
- $n$  = número de árboles derribados y procesados por parcela



$v_{mi}$  = volumen medio individual de cada árbol ( $m^3$ )

$t_a$  = tiempo para derribar y procesar los árboles de la parcela (horas efectivas)

$v_{mc}$  = volumen máximo de carga ( $m^3$ )

$t_e$  = tiempo de trabajo efectivo por desplazamiento del *forwarder* (h)

## Escenarios

Se establecieron dos escenarios relacionados con la eficiencia total o con la tasa de utilización de la máquina, que se calculó por la ecuación 4 (Paccola, 2011).

$$TU = EO \times DM \quad (4)$$

donde:

$TU$  = tasa de utilización (%)

$EO$  = eficiencia operacional (%)

$DM$  = disponibilidad mecánica (%)

El escenario 1 representa valores de eficiencia operacional de 75% y disponibilidad mecánica de 80%, usuales para las instalaciones de la empresa en ambas áreas, así como para cada máquina. En el escenario 2 fue considerada una situación optimista de trabajo en que la eficiencia operacional fue establecida en 83% y la disponibilidad mecánica en 90%. Para ambos escenarios se consideraron tres turnos de trabajo con ocho horas, o sea 24 horas

trabajadas por día, trabajando 30 días al mes (360 en el año), con un número de cuatro operadores.

## Determinación de los costos operacionales y de producción

Los costos de las máquinas se calcularon en una situación real; esto es, con 9190 horas en el principio de las pruebas para el *harvester* y con 44 horas para el *forwarder*, además de los costos para el *harvester* en situación de máquina nueva y para el *forwarder* con 9190 horas de uso, con la intención de homogeneizar el estado de la vida útil de cada máquina. Los costos de las operaciones de derribo y trozado de la madera fueron calculados en dólares estadounidenses por hora de trabajo ( $USD\ h^{-1}$ ). Los valores de compra del *harvester* y del *forwarder* fueron proporcionados por el fabricante y se pueden observar en la tabla 2.

El costo operacional de cada máquina se obtuvo por la suma de los costos fijos y los costos variables. Los costos fijos fueron compuestos por la tasa de interés, la inversión media anual, la depreciación, las tasas de administración, los seguros y cobertura, y fueron calculados por las ecuaciones 5, 6, 7, 8, 9 y 10; respectivamente. En el cálculo del interés de los seguros e impuestos la tasa anual considerada fue de 12%, correspondiente al capital proporcionado por una agencia financiera, si se aplica la tasa de interés mencionada a la inversión media anual.

TABLA 2. Valores adoptados para la compra de maquinaria nueva entregada por el fabricante en el bosque.

Máquina	Harvester 911.3 X3M + cabezal cortador		Forwarder 860.4 + 2 pares de orugas flexibles
Valor de compra (USD)	516640	96400	526254
Flete, tasas de importación y seguros (USD)	72864		89722
Transporte fábrica – puerto en Alemania (USD)	3968		4960
Transporte nacional puerto – área forestal (USD)	10120		9064
Costo de compra (USD)	700000		630000

Fuente: contactos telefónicos y personales en Komatsu Forest Brasil y Komatsu Forest Alemania (2013).

Los cargos administrativos, seguros y cobertura fueron contabilizados en los costos fijos según la *American Society of Agricultural Engineers, US* [ASAE] (2001), que utiliza un factor de ajuste (FA) sobre el valor de compra del *harvester/forwarder*. En este estudio los valores del factor de ajuste para cada caso fueron los mismos utilizados por Simões y Fenner (2010b): 1.0% para las tasas administrativas, 0.25% para los seguros y 0.75% para la cobertura. Se calcularon los seguros de protección contra riesgo de robo e incendios, entre otros. El precio de reventa o valor residual considerado fue de 20% del valor inicial con vida útil definida por el fabricante en 25000 horas para ambas máquinas, y de 10% con vida útil de 12500 horas para el cabezal cortador.

$$JS = \frac{IMA \cdot i}{h} \quad (5)$$

$$IMA = \frac{(Ca - Vr)(N + 1)}{2N} \quad (6)$$

$$D = \frac{Ca - Vr}{N \cdot h} \quad (7)$$

$$T = \frac{Ca \cdot FA}{h} \quad (8)$$

$$S = \frac{Ca \cdot FA}{h} \quad (9)$$

$$Cab = \frac{Ca \cdot FA}{h} \quad (10)$$

donde:

- $JS$  = interés, seguros e impuestos (USD h<sup>-1</sup>)
- $IMA$  = inversión media anual (USD)
- $i$  = tasa anual de interés añadida de seguros anuales simples (%)
- $h$  = horas efectivas de uso anual
- $Ca$  = costo de compra del *harvester/forwarder* (USD)
- $Vr$  = valor residual del *harvester/forwarder* (USD)
- $N$  = vida útil estimada del *harvester/forwarder* (años)
- $D$  = depreciación anual (USD h<sup>-1</sup>)
- $T$  = tasas de administración (USD h<sup>-1</sup>)
- $FA$  = factor de ajuste del valor inicial del *harvester/forwarder* de acuerdo con Simões, Fenner y Esperancini (2010)
- $S$  = seguros (USD h<sup>-1</sup>)

$Cab$  = costo de cobertura del *harvester/forwarder* (USD h<sup>-1</sup>)

Los costos variables de las operaciones por máquina fueron: combustible, lubricantes, aceite hidráulico, neumáticos/orugas, mano de obra, mantenimiento y reparaciones, transporte del personal y transporte de maquinaria; y se calcularon con las ecuaciones 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18, respectivamente.

$$Comb = Cmm \times Pu \quad (11)$$

$$I = ILG \times Comb \quad (12)$$

$$Oh = I \times Comb \quad (13)$$

$$Pe = \frac{Npe \times Vpe}{Hpe} \quad (14)$$

$$MDO = \frac{Sop \times ES}{He} \quad (15)$$

$$CMR = \frac{[Ca \times FR_1 \left(\frac{h+He}{1000}\right)^{FR_2}] - [Ca \times FR_1 \left(\frac{h}{1000}\right)^{FR_2}]}{He} \quad (16)$$

$$TP = \frac{dd \times ck \times da}{He \times Ne} \quad (17)$$

$$TM = ITM \times TP \quad (18)$$

donde:

- $Comb$  = costo con combustible por hora efectiva de trabajo (USD h<sup>-1</sup>)
- $Cmm$  = consumo medio horario de la máquina (L h<sup>-1</sup>)
- $Pu$  = precio por litro de combustible (USD L<sup>-1</sup>)
- $I$  = costo de lubricantes (USD h<sup>-1</sup>)
- $ILG$  = índice de costos con lubricantes
- $Oh$  = costo del aceite hidráulico (USD h<sup>-1</sup>)
- $I$  = índice de consumo de aceite hidráulico por máquina
- $Pe$  = costo de neumático y/u orugas (USD h<sup>-1</sup>)
- $Npe$  = número de neumáticos y/u orugas por máquina
- $Vpe$  = precio de un neumático y/u oruga de la máquina (USD)
- $Hpe$  = vida útil del neumático y/u oruga (h)
- $MDO$  = costo de mano de obra por hora efectiva (USD h<sup>-1</sup>)
- $Sop$  = sueldo mensual del operador (USD)



- ES*= tasa de encargos sociales  
*He*= horas efectivas trabajadas por mes  
*CMR*= costo de mantenimiento y reparaciones (USD h<sup>-1</sup>)  
*Ca*= costo de compra de la máquina (USD)  
*FR<sub>1</sub>*= factor de reparación 1  
*b*= horas de uso acumuladas hasta el principio del año en análisis  
*He*= horas efectivas de uso en el año de análisis  
*FR<sub>2</sub>*= factor de reparación 2  
*TP*= costo de transporte del personal (USD h<sup>-1</sup>)  
*dd*= media de desplazamientos por día (km día<sup>-1</sup>)  
*ck*= costo por kilómetro (USD km<sup>-1</sup>)  
*da*= días trabajados por mes  
*He*= horas efectivas trabajadas por mes  
*Ne*= número de operadores por vehículo de transporte  
*TM*= transporte de maquinaria (USD h<sup>-1</sup>)  
*ITM*= índice de transporte de máquinas

Para los costos con combustible se adoptó el precio de USD 1.10 por litro. Los costos referentes al consumo de aceites y grasas se calcularon con base en un porcentaje del combustible consumido por la máquina, de acuerdo con lo sugerido por Silva, Miranda y Cordeiro (2008). Para los lubricantes, ese porcentual fue de 20, mientras que para el aceite hidráulico se adoptó 20% para el *harvester* y 50% para el *forwarder*. Se consideran gastos de mano de obra a los referentes al sueldo total de los operadores, que incluye aguinaldo, vacaciones, beneficios, prestaciones sociales, seguros, asistencia sanitaria y alimentación (Burla 2008). Como sueldo base se adoptó el promedio de sueldos mensuales en la región de USD 1010.10 con una tasa de impuestos sociales del 1.74 considerándose los 12 meses de año. Para las dos máquinas en estudio, los costos de mantenimiento y reparaciones fueron calculados durante su vida útil, tomando en cuenta la mano de obra con prestaciones sociales, así como las piezas para reposición y otros materiales, de acuerdo con Simões y Fenner (2010b), y adoptando valores de 0.003 como factor de reparación 1

y 2.0 como factor de reparación 2. El transporte del personal se refiere al costo por el desplazamiento de los trabajadores hasta el lugar de las operaciones de corta; los valores relativos a este rubro se obtuvieron de la empresa de transporte de trabajadores de cada región. El valor fue de USD 0.38 km<sup>-1</sup> al considerar un desplazamiento promedio diario de 210 km, en tres turnos de operación y con un número de 18 operadores por vehículo de transporte. El costo por transporte de maquinaria es lo que se gasta para transportar la máquina entre proyectos o fincas; este estudio llevó en consideración un índice de transporte de 75%. Calculados los costos operacionales obtenidos por la suma de los costos fijos y variables, se calculó el costo de producción por medio de la ecuación 19.

$$CPr = \frac{CT}{Prod} \quad (19)$$

donde:

*CPr* = costo de producción de la máquina en análisis (USD m<sup>-3</sup>);

*CT* = costo operacional total de la máquina en análisis (USD h<sup>-1</sup>);

*Prod* = productividad de la máquina en análisis (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

### Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar los valores mínimos, medios y máximos de las variables más relevantes que constituyen el costo operacional del sistema de corta en cada una de las condiciones estudiadas. Se admitió una variación de 40% (20% arriba de la media y 20% debajo de la media) en los valores de los siguientes componentes del costo: tasa de interés, precio del combustible, depreciación, valor de la máquina, vida útil de la máquina, mantenimiento y reparaciones. Se adoptaron los valores de costo operacional para condición de operación con dos máquinas nuevas y tasa de utilización de 60%, durante tres turnos de trabajo en un período de 24 horas. Los valores obtenidos para cada área y cada máquina fueron trazados gráficamente en un diagrama de telaraña.

## RESULTADOS

La productividad del *harvester* alcanzó un promedio de 28.7 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>, mientras que para el *forwarder* los resultados fueron de 31.8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (Tabla 3).

El costo operacional está bastante influenciado por el consumo de combustible, el cual fue considerado bajo para el *harvester* en esta zona con pendientes ya que, en terrenos más planos, Martins, Seixas y Stape. (2009) encontraron USD 113. 28 h<sup>-1</sup> y Oliveira (2013) USD 191.7 h<sup>-1</sup>. Los factores que posiblemente llevaron a esto fueron la topografía del terreno que se presenta con largas rampas. Además, se notó una disminución en los costos, de manera general, al aumentar la tasa de utilización, esa diferencia fue evidente en todas las operaciones. Esa es una de las razones por las que grandes empresas del sector forestal invierten en la búsqueda de mejores valores de eficiencia operacional y disponibilidad mecánica.

Al analizar las variables más relevantes que constituyen el costo operacional del sistema de cosecha, se nota una similitud en lo que afecta más a cada máquina, según se observa en la figura 2.

En conjunto, los costos de mantenimiento y reparaciones y la depreciación representaron más de 50% del costo del *Harvester*, mientras que Oliveira (2013) obtuvo 65.7% con mantenimiento y depreciación. En la tercera posición de influencia quedan la mano de obra y el combustible, representando cada uno 13.5% de la composición del costo final.

Para el *forwarder*, la principal diferencia en relación con el *harvester* fue la reducción de 12.9% del gasto de mantenimiento y reparaciones, en función de que la máquina inició las operaciones con apenas 44 horas de uso, es decir, siendo una máquina nueva. Debido a esto, otros costos tuvieron mayor influencia, como mano de obra, intereses, seguros, neumáticos y orugas y aceite hidráulico; estos dos últimos se explican por el hecho de que el *forwarder* está compuesto por un tractor de semiorugas y posee la grúa de tracción auxiliar, que necesita grasas especiales.

Las variables que tuvieron más influencia en los costos de las dos máquinas fueron: la tasa de interés, el precio del combustible, la depreciación, el valor de compra de la máquina, la vida útil económica, los mantenimiento y reparaciones y el sueldo de los operadores.

El análisis de sensibilidad para el *harvester* X3M (Fig. 3) demuestra las variables principales del costo operacional teniéndose en cuenta la vida útil idéntica al período de pruebas de 9190 horas, con una tasa de 60% de utilización.

La variable de mayor influencia en el costo del *harvester* fue el valor de compra de la máquina, seguida de los costos de mantenimiento y reparaciones y el precio del combustible, que han obtenido las mayores inclinaciones de cada variable. Además, se observa en cuarta posición de importancia la depreciación (Fig. 3). Tras ellos, están el sueldo de los operadores y la tasa de interés, con la influencia menor en este análisis.

TABLA 3. Costos operacionales y de producción en las áreas estudiadas en distintos escenarios.

Parámetros de referencia	Tasa de utilización Productividad (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Harvester X3M		Forwarder 860.4 con GTA	
		60%	75%	60%	75%
		28.70		31.79	
Máquina nueva	Costo operacional (USD h <sup>-1</sup> )	93.28**	89.93**	87.52*	84.14*
	Costo de producción (USD m <sup>-3</sup> )	3.25**	3.13**	2.75*	2.64*
Máquina usada	Costo operacional (USD h <sup>-1</sup> )	131.88*	128.53*	122.26**	118.88**
	Costo de producción (USD m <sup>-3</sup> )	4.59*	4.47*	3.84**	3.73**

\*Representa el escenario real en la coleta de los datos; \*\*representa el escenario simulado (máquina nueva para *harvester* y máquina usada para *forwarder*).

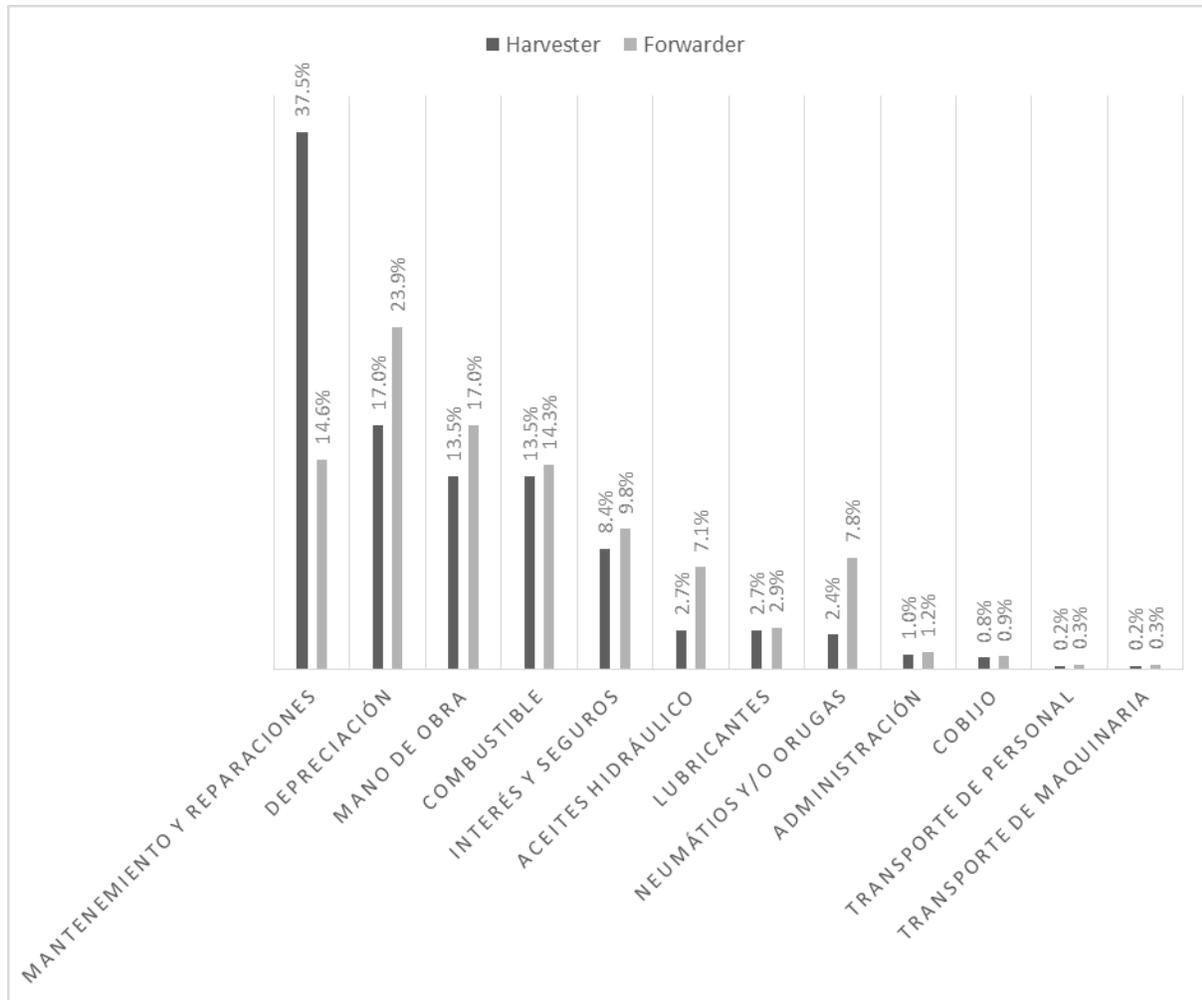


FIGURA 2. Porcentaje de los componentes del costo operacional del *harvester* y del *forwarder* con 60% de tasa de utilización.

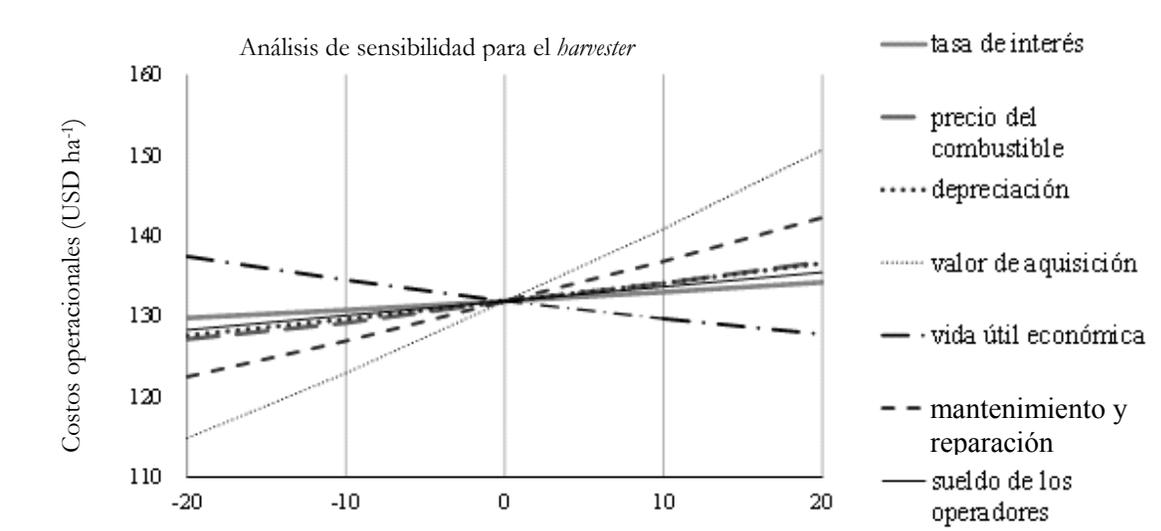


FIGURA 3. Diagrama de telaraña de las siete variables principales del costo operacional del *harvester*

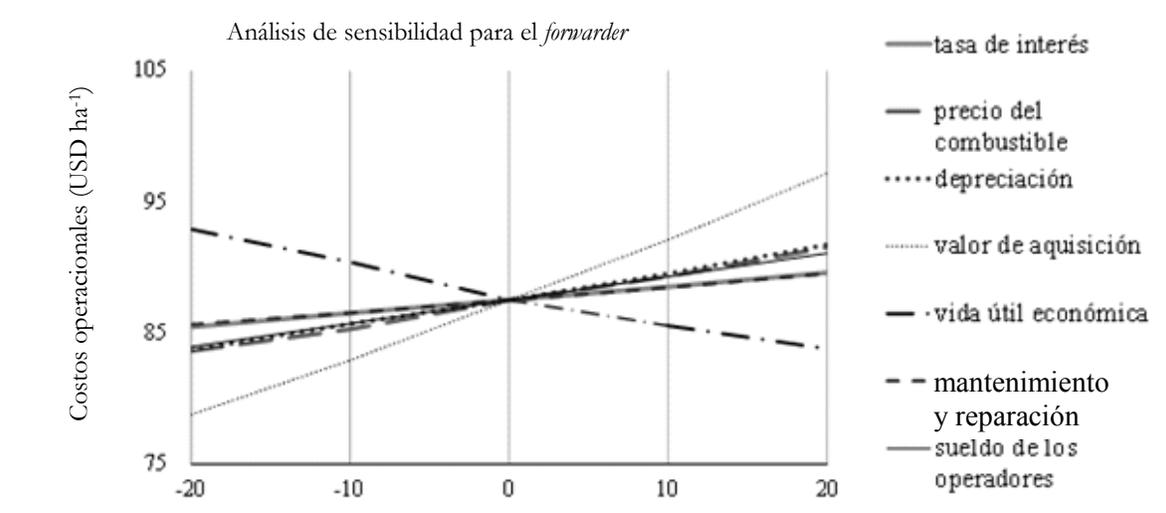


FIGURA 4. Diagrama de telaraña de las siete variables principales del costo operacional del *forwarder*.

Los resultados del análisis de sensibilidad para el *forwarder* se observan en la figura 4.

Mediante el diagrama de la figura 4, se nota la distribución de las variables del costo operacional por importancia que son ordenadas de mayor a menor: el valor de compra de la máquina, el precio del combustible, la vida útil, la depreciación, el sueldo de los operadores, la tasa de interés y el costo de mantenimiento y reparaciones. Esas peculiaridades pueden ser un factor de análisis en la planificación y anticipación de costos relacionados con eventuales aumentos de precio del combustible.

A diferencia del *harvester*, el *forwarder* no tuvo como más influyentes los costos de reparación y mantenimiento. Eso ocurrió debido a que el *forwarder* era nuevo en el período de pruebas, mientras el *harvester* ya tenía cerca de 9000 horas trabajadas. Con eso fue posible observar en las dos zonas que el estado actual de la máquina (vida útil de momento) es primordial en el análisis de sensibilidad y en los cuidados que se deben adoptar a lo largo de su vida útil.

## DISCUSIÓN

### Costos operacionales y de producción

Para el *harvester*, en ambas áreas los costos obtenidos en este estudio son un poco mayores que los USD 116.49 por hora efectiva de trabajo observados por Fernandes, Burla, Leite

y Minette (2013) con un *harvester* de neumáticos con seniorugas, con aproximadamente 16 000 horas trabajadas operando en pendientes de hasta 30° en descenso y 25° en ascenso. El *harvester* X3M tiene costos menores que los presentados por Leite (2012) en su estudio con un sistema mecanizado de trozas cortas en zonas con plantaciones similares, en que observa un costo operacional de USD 145.36 h<sup>-1</sup> para el *harvester* y USD 125.24 h<sup>-1</sup> para el *forwarder* a un costo de producción de USD 4.90 m<sup>-3</sup> y USD 3.80 m<sup>-3</sup>, respectivamente.

Simões y Fenner (2010b) encontraron para el *harvester* un costo de producción de USD 2.13 para una productividad media de 23 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, para árboles con un volumen medio individual de 0.22 m<sup>3</sup> con corteza. Además, su costo operacional de extracción en un sistema de cables aéreos en una plantación de *Eucalyptus grandis* con 84 meses de edad y con distancia de extracción de hasta 400 metros es de USD 80.90 por hora de trabajo con un rendimiento operacional de 14.16 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, resultado no muy distinto al de este estudio con el *forwarder* con grúa de tracción auxiliar. Se debe tener en consideración que en operaciones con cables aéreos el riesgo de accidentes es grande y que el costo de producción del cable fue de USD 5.71, mientras que el del *forwarder* en ambas áreas es cerca de la mitad de este valor (USD 2.75).



## Composición de los costos

En un análisis con *harvester* de neumáticos con vida útil de 16 000 horas, Leite (2012) presenta para ambas áreas una similitud en la proporción de los componentes de costo. Existen algunas discrepancias pequeñas, que son el costo mayor de mano de obra y el costo menor de combustibles. El costo mayor por mano de obra observado en este estudio es influenciado por el hecho de que, en situaciones de pendiente acentuada, añadida a la introducción de maquinaria nueva (como es el caso de *harvester* X3M), se hace necesario que los operadores estén más entrenados y consecuentemente tengan sueldos mejores. Mientras que el costo menor en combustible se puede explicar por las 7000 horas menos que tenía de vida útil la máquina bajo estudio comparada con la de Leite (2012).

Para el *forwarder* los porcentajes obtenidos de mano de obra y depreciación son mayores que los presentados por Simões y Fenner (2010a) y Leite (2012), en tanto que los costos de combustibles y mantenimiento y reparaciones son menores, con mención a este último que tiene relación directa con el número bajo de horas trabajadas por el *forwarder*.

## Análisis de sensibilidad

Los resultados para el *harvester* se diferencian con respecto a los observados por Leite (2012) en la cuarta magnitud de influencia, pues la depreciación influyó más en los costos que la vida útil de la máquina.

## CONCLUSIONES

A partir del análisis de los datos obtenidos con el *harvester* X3M 911.3 y con el *forwarder* 860.4 con grúa de tracción auxiliar se puede concluir que: la aplicación de estas máquinas en la cosecha en laderas de hasta 38° de pendiente puede ser realizada con costos equivalentes a los de otras máquinas y sin pérdidas significativas de la productividad con el aumento de la pendiente y que el valor de compra de la máquina es la variable que más influye en el costo operacional.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

## REFERENCIAS

- American Society of Agricultural Engineers, US [ASAE] (2001). *D472-3- machinery, equipment, and buildings: operating costs*. Ames.
- Burla, E. R. (2008). Avaliação técnica e econômica do harvester na colheita do eucalipto. (Tesis Magister en Ciencia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Drews, E. S., Doyal, J. A., Hartsough, B. R., & Kellog, L. D. (2001). Harvester-Forwarder and Harvester-Yarder Systems for Fuel Reduction Treatments. *International Journal of Forest Engineering*, 12(1), 81-91.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [Embrapa]. (1999). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Fernandes, H. C., Burla, E. R., Leite, E. S., & Minette L. J. (2013). Avaliação técnica e econômica de um “Harvester” em diferentes condições de terreno e produtividade da floresta. *Scientia Forestalis*, 41(97), 141-151.
- Hartsough, B. R., & Cooper, D. J. (1999). Cut-to-Length Harvesting of Short-Rotation Eucalyptus. *Forest Products Journal*, 49(10), 69-75.
- Jíroušek, R., Klvač, R., & Skoupý, A. (2007). Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science*, 53(10), 476-482.
- Leite, E. S. (2010). *Desenvolvimento de planos de colheita florestal de precisão utilizando tecnologias de geoprocessamento*. (Tesis de maestría). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Leite, E. S. (2012). *Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas*. (Tesis doctoral). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Lopes, S. E. (2007). Análise técnica e econômica de um sistema de colheita florestal. (Tesis doctoral). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Malinovski, J. R., Malinovski, R. A., & Camargo, C. M. S. (2008). Sistemas. En C. C. Machado (Ed.), *Colheita Florestal* (2ª ed.). Viçosa: UFV/Imprensa Universitária.

- Martins, R. J., Seixas, F., & Stape, J. L. (2009). Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 37(83), 253-263.
- Morais, M. G. A. (2012). *Colheita e transporte de madeira: terceirização X verticalização das operações*. (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Oliveira, R. J. (2009). *Avaliação técnica e econômica de cabos aéreos na colheita de pinus no município de Cerro Azul/Pr*. (Tesis Magíster en Ciencias). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Oliveira, D. (2013). Análise operacional e custos de sistemas de colheita de madeira em povoamentos de eucalipto. (Tesis de maestría). Universidade Estadual do Centro Oeste. Unicentro. Irati, Brasil.
- Paccola, J. E. (2011). *Manutenção e operação de equipamentos móveis* (1a ed.), São José dos Campos: JAC.
- Silva, M. L., Miranda, G. M., & Cordeiro, A. S. (2008). Custos. En C. C. Machado (Ed.) *Colheita Florestal* (pp. 231-260p), Viçosa: UFV/Imprensa Universitária.
- Simões, D., & Fenner, P. T. (2010a). Avaliação técnica e econômica do forwarder na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. *Revista Floresta*, 40, 711-720. doi: 10.5380/rf.v40i4.20323
- Simões, D., & Fenner, P. T. (2010b). Influência do relevo na produtividade e custos do harvester. *Scientia Forestalis*, 38(85), 107-114.
- Simões, D., Fenner, P. T., & Esperancini, M. S. T. (2010). Avaliação técnica e econômica da colheita de florestas de eucalipto com harvester. *Scientia Forestalis*, 38(88), 611-618.

Manuscrito recibido el 30 de agosto de 2017

Aceptado el 23 de marzo de 2018

Publicado el 18 de diciembre de 2018

Este documento se debe citar como:

Robert, R. C. G., Brown, R. O., & Ruy, C. C. (2018). Análisis económico de la cosecha mecanizada en repoblaciones de *Eucalyptus* spp. en sitios montañosos. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431621. doi: 10.21829/myb.2018.2431621



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.