

PROYECTO DE INVESTIGACION APLICADA (PIA 10107)

Optimización del trozado de fustes de pinos y eucaliptos cultivados en Misiones y Corrientes

Yapura Pablo¹, Sañudo Gastón¹, Fassola Hugo Enrique², Crechi Ernesto Héctor², Keller Aldo Esteban² y Caraballo Horacio¹.

Las plantaciones forestales pueden conducirse bajo diferentes sistemas de manejo silvícola (SMS), lo cual influye en las características de los fustes producidos. En términos de productividad maderera, los resultados de los SMS se evalúan en función del rendimiento obtenido durante un período de tiempo y la cantidad o valor de los diferentes productos cosechados. Los distintos destinos comerciales o industriales a los cuales se destinará la producción demandan un tipo particular de productos, generalmente definidos por el diámetro y la longitud de las trozas. La forma en que los fustes son fraccionados en trozas para obtener los diferentes productos se denomina compartimentación de la producción. Esta actividad influye sobre la rentabilidad de las actividades forestales debido a que los distintos productos se diferencian por su precio en el mercado. Con la finalidad de proveer una herramienta que permita optimizar la compartimentación de la producción de un modo eficiente, considerando la forma y dimensiones del fuste, así como las dimensiones y precio de los productos demandados, se desarrolló un modelo de optimización del trozado de fustes para tres especies cultivadas en la provincia de Misiones y en el noreste de la provincia de Corrientes: *Pinus taeda*, pino híbrido (*Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* F2) y *Eucalyptus grandis*. Para ello se recurrió a técnicas de programación dinámica, las cuales han sido poco aplicadas en el país a la resolución de esta etapa del proceso de producción forestal.

La optimización del trozado del fuste requiere tomar una secuencia de decisiones interrelacionadas de modo tal que la eficiencia de todas las decisiones sea maximizada. Ante este tipo de problemas, la programación dinámica, una rama de la Investigación Operativa, provee una serie de procedimientos sistemáticos para determinar la combinación de decisiones que maximiza la eficiencia total de un sistema. En esencia, el trozado de un fuste es representado como un diagrama de redes (grafo) para el cual es necesario desarrollar algoritmos específicos para hallar la combinación de nodos (estados del sistema en cada etapa) y arcos (decisiones tomadas) que generan el máximo beneficio, obteniéndose consecuentemente la solución óptima del problema. Para el caso que nos ocupa esto es el patrón óptimo de trozado.

RESULTADOS

Con la finalidad de lograr una estimación precisa del diámetro del fuste a cualquier altura, así como una del volumen de cualquier porción del mismo, se ajustó una función de forma para cada especie estudiada y a partir de ella se derivaron los modelos de volumen total y parcial. Los modelos son:

$$d = \sqrt{DAP^2 \cdot \left(\frac{h}{1,30}\right)^{(2-\gamma)} \cdot \left(\frac{H-h}{H-1,30}\right)}$$

1. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

2. INTA, EEA Montecarlo.
Correo-e del primer autor:
ypf@agro.unlp.edu.ar

$$V_{(h_1/h_2)} = \frac{0,78539816 \cdot 1,30^{(\gamma-2)} \cdot DAP^2}{(H - 1,30)} \cdot \left[\frac{(\gamma - 4) \cdot h_1^3 \cdot H + (3 - \gamma) \cdot h_1^4}{(\gamma^2 - 7 \cdot \gamma + 12) \cdot h_1^\gamma} - \frac{(\gamma - 4) \cdot h_2^3 \cdot H + (3 - \gamma) \cdot h_2^4}{(\gamma^2 - 7 \cdot \gamma + 12) \cdot h_2^\gamma} \right]$$

En la que DAP es el diámetro del fuste a 1,30 m de altura (cm), h es la variable independiente que representa la altura del fuste (m), H es la altura total del fuste (m), d es el diámetro del fuste (cm) a la altura h, $V(h^1, h^2)$ es el volumen (m^3) de la porción del fuste comprendida entre h^1 y h^2 , h^1 y h^2 son las alturas inferior y superior (m), respectivamente, de la porción del fuste cuyo volumen se quiere estimar y γ es un parámetro que depende de la especie (Tabla 1).

Tabla 1. Valores del parámetro β y coeficiente de determinación para las tres especies estudiadas.

TABLA 1		
Especie	β	R^2
<i>Eucaliptus grandis</i> con corteza	2,12089	0,9882
<i>Eucaliptus grandis</i> sin corteza	2,10828	0,9854
<i>Eucaliptus grandis</i> duramen	2,15796	0,8987
Pino híbrido con corteza	2,09245	0,9823
Pino híbrido sin corteza	2,08185	0,9793
Pino taeda con corteza	2,08818	0,9751
Pino taeda sin corteza	2,09134	0,9726

Mediante el empleo de las funciones de forma y volumen ajustadas, y con la programación dinámica como técnica de optimización, fue posible desarrollar un modelo para el trozado transversal del fuste óptimo para las tres especies estudiadas. La consolidación del modelo en planillas de cálculo, junto con la elaboración de macros, permite operar el modelo de forma sencilla y rápida. En síntesis, el modelo consolidado comprende:

Las funciones de forma, volumen total y volumen parcial, con y sin corteza, para *Pinus taeda*, pino híbrido (*P. elliotii* x *P. caribaea* F2) y *Eucalyptus grandis*;

El algoritmo de optimización desarrollado sobre la base de técnicas de programación dinámica;

Las macros que permiten automatizar la carga de datos y el procesamiento de la información; y

Una interfaz de usuario sencilla e intuitiva para el ingreso de datos (Figura 1) y consulta de las salidas del sistema, las que comprenden el patrón óptimo de trozado, la cantidad de trozas, sus dimensiones y los ingresos y volúmenes generados (Figuras 2 y 3).

FIGURA 1.

OPTIMIZADOR DE TROZADO

DAP (cm) 33,0
H total (m) 26,00
V total CC (m³) 0,712
V total SC (m³) 0,600

Para cada fila de datos: [▼]
Máximo valor: [▼]

[OPTIMIZAR] [LAMPAR 1] [LAMPAR 2]

Producto	Categoría	Long. m/n (m)	Long. max (m)	OPFm (cm)	OPFmax (cm)	Precio (\$/m³)
Deschuchado P. Fino	Aserrado	4,5	4,5	35,0	40,0	220,00
Pulpa Papel Maltosa n. 1	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 1	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 1	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 2	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 2	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 2	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 3	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 3	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 3	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 4	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 4	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 4	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 5	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 5	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 5	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 6	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 6	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 6	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 7	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 7	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 7	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 8	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 8	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 8	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 9	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 9	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 9	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 10	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 10	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 10	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00

MODELA LIBRE DE NUDO

Producto	Categoría	Long. m/n (m)	Long. max (m)	OPFm (cm)	OPFmax (cm)	Precio (\$/m³)
Deschuchado P. Fino	Aserrado	4,5	4,5	35,0	40,0	220,00
Deschuchado Maltosa n. 1	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00

Figura 1. Interfaz de usuario del optimizador: ventana de ingreso de datos

FIGURA 2.

Descripción del fuste

DAP (cm)	33,00
H total (m)	26,00
V total CC (m³)	0,712
V total SC (m³)	0,601

Trozado óptimo

Destino	Volumen (m³)	Valor (\$)
Laminado	---	---
Aserrado	0,60	119,9
Pulpa/triturado	0,11	16,5
Leña	---	---
Descarte	0,002	---
Total	0,71	136,3

Figura 2. Interfaz de usuario del optimizador: salida resumida

FIGURA 1.

OPTIMIZADOR DE TROZADO

DAP (cm) 33,0
H total (m) 26,00
V total CC (m³) 0,712
V total SC (m³) 0,600

Para cada fila de datos: [▼]
Máximo valor: [▼]

[OPTIMIZAR] [LAMPAR 1] [LAMPAR 2]

Producto	Categoría	Long. m/n (m)	Long. max (m)	OPFm (cm)	OPFmax (cm)	Precio (\$/m³)
Deschuchado P. Fino	Aserrado	4,5	4,5	35,0	40,0	220,00
Pulpa Papel Maltosa n. 1	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 1	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 1	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 2	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 2	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 2	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 3	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 3	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 3	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 4	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 4	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 4	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 5	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 5	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 5	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 6	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 6	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 6	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 7	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 7	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 7	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 8	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 8	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 8	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 9	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 9	Aserrado	4,20	4,30	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 9	Aserrado	4,00	4,20	30,0	35,0	120,00
Deschuchado Maltosa n. 10	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00
Aserrado Maltosa n. 10	Aserrado	3,90	4,00	35,0	40,0	120,00
Pulpa Maltosa n. 10	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00

MODELA LIBRE DE NUDO

Producto	Categoría	Long. m/n (m)	Long. max (m)	OPFm (cm)	OPFmax (cm)	Precio (\$/m³)
Deschuchado P. Fino	Aserrado	4,5	4,5	35,0	40,0	220,00
Deschuchado Maltosa n. 1	Aserrado	3,75	3,90	30,0	35,0	120,00

Figura 3. Interfaz de usuario del optimizador: salida detallada

El modelo desarrollado permite optimizar de forma precisa y expeditiva el trozado del fuste considerando el precio y las dimensiones de diferentes productos. La evaluación del rendimiento puede realizarse en términos de valor o volumen, obteniéndose asimismo la cantidad y tamaño de rollizos generados. Para su operación, solamente hace falta relevar a campo el DAP y la altura total del fuste, variables de fácil medición, lo que torna muy sencillo el empleo del modelo. Las citadas características permiten aplicar el modelo a escala operativa en las etapas de aprovechamiento, inventario forestal y planificación del manejo silvícola.

El modelo permite optimizar el trozado de fustes pie a pie, brindando también una sólida base para estudios futuros que permitan abordar el problema de optimización a nivel de rodal, por ejemplo usando el enfoque conocido como trozado a la orden. Sintéticamente, este trozado a la orden intenta aprovechar un rodal dado de modo que se produzcan todos los volúmenes requeridos de cada uno de los productos deseados, en forma óptima.

Los beneficiarios directos del modelo de optimización del trozado de fustes pueden ser los productores que cultivan o aprovechan bosques de las tres especies estudiadas en Misiones y el noreste de Corrientes, en todas las escalas productivas. Asimismo, el optimizador puede constituir una importante herramienta para las empresas dedicadas al aprovechamiento forestal y para los profesionales independientes dedicados a las actividades de inventario forestal y planificación del manejo silvicultural. Potencialmente y en forma indirecta se beneficiarán diferentes eslabones del sector foresto-industrial de la región. Por otro lado, el modelo constituye una valiosa herramienta para el ámbito científico-tecnológico con aplicación, entre otras cosas, a la simulación y evaluación del efecto de diferentes sistemas de manejo silvícola sobre el rendimiento y la cantidad de productos brindados. Finalmente, el modelo también puede emplearse con fines didácticos en el entorno académico.