

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**Ajuste de modelos predictivos para el aprovechamiento de biomasa en rodales
de *Pinus taeda* con alta densidad.**

Proyecto de Investigación
*Desarrollo de un sistema de abastecimiento de biomasa forestal a nivel
cooperativo - Código SCTyP: 16/F1183-PI*

Eldorado

Marzo de 2022

Argentina

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	3
2	MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1	Origen de la información.....	4
2.2	Simulación del trozado.....	6
2.3	Diseño experimental.....	7
2.4	Análisis estadístico.....	8
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
3.1	Volumen de piezas sólidas	9
3.2	Potencial para la obtención de biomasa.....	12
3.3	Valor de los productos elaborados.	15
4	CONCLUSIONES	17
5	BIBLIOGRAFÍA	18

1 INTRODUCCIÓN

La biomasa forestal está incrementando su importancia en los últimos años, y en Misiones se han instalado nuevas plantas térmicas para la generación de energía eléctrica. Hasta ahora la mayoría de estas plantas se abastecen de chips, de aserrín y desperdicios de los aserraderos. Sin embargo, existe en Misiones la imposibilidad de vender madera pulpable, ya que la demanda está satisfecha. Entonces los productores integrados en la Cooperativa Agrícola Mixta Montecarlo (CAMM), y cualquier productor forestal, deben buscar una alternativa para comercializar sus productos pulpables.

A esta problemática se suma que la mayoría de las plantaciones de los pequeños productores, están atrasadas, sin raleos, y consecuentemente tienen menos madera gruesa, y menor valor en pie. Esta situación se torna no viable económicamente ya que los precios de los productos forestales están deprimidos por la sobre oferta de madera. La suma de los costos del aprovechamiento y del transporte (alrededor de 14,5 USD t⁻¹ para bosques situados en un radio inferior a 50 km de la industria destinataria), no compensa los ingresos por ventas, considerando un costo de transporte de 0,127 USD m⁻³ km⁻¹. Una alternativa para estas plantaciones atrasadas es realizar talas rasas mecanizadas con el sistema de corte a medida (*cut-to-length*). Este sistema emplea una cosechadora forestal (*harvester*) para el corte, desrame y trozado de los árboles dentro del bosque. Esta trabaja en combinación con un tractor forestal articulado autocargable (*forwarder*), que realiza la extracción de las trozas hasta el camino (Tiernan *et al.*, 2004; Spinelli y Magagnotti, 2010). En estas operaciones se elaboran productos aserrables con dimensiones fijas y trozas triturables de tamaño variable. Los ápices de los fustes y las ramas pueden ser extraídas y trituradas como biomasa fresca, destinada al abastecimiento de plantas térmicas generadoras de energía a partir de biomasa vegetal.

Las trozas triturables y la biomasa para energía generalmente presentan precios de mercado bajos (21 US\$/t para las trozas triturables y 13 US\$/t para la biomasa para energía, ambas puestas en la industria). En la medida en que se incrementa la distancia entre los rodales y las industrias, los costos de transporte reducen la posibilidad de aprovechar estos productos de menor valor.

En Misiones, las forestaciones establecidas por pequeños productores poseen densidades de plantación que varían entre 1.200 y 1.600 árboles/ha. Según la tasa de crecimiento del rodal y la duración del ciclo forestal, la obtención de productos aserrables y laminables de alto valor al momento de la tala rasa requiere la realización previa de entre dos y tres raleos. Cuando los raleos no se realizan en tiempo y forma, el incremento del área basal provoca la competencia entre los árboles y reduce el crecimiento diamétrico. Un manejo con ausencia de raleos resulta en rodales que al momento de la tala rasa poseen un valor de área basal superior a 40 m²/ha, acumulando un volumen cercano a los 400 m³/ha pero sin que los árboles superen los 30 cm de DAP. En esta situación, la posibilidad de obtener trozas aserrables de alto valor se ve limitada, mientras que se incrementa el volumen de trozas de diámetro menor que pueden aprovecharse como trozas triturables o biomasa para energía.

El conocimiento de la estructura de los rodales por medio de inventarios forestales, junto al empleo de funciones alométricas de volumen individual y ahusamiento, permiten estimar el volumen obtenible para cada producto durante la cosecha. Para las forestaciones de *Pinus taeda* de Misiones, Fassola *et al.* (2010) ajustaron modelos lineales que estiman el volumen de biomasa seca existente en un árbol en función de su DAP. Estos modelos distinguen entre el volumen del fuste, de las ramas, las acículas y los conos. Su incorporación a los sistemas de simulación del trozado existentes puede permitir el análisis integral de una operación de cosecha, combinando tanto la obtención de productos sólidos como el aprovechamiento de la biomasa por medio de la trituración a borde de camino de los residuos.

El objetivo de este estudio fue simular y analizar la disponibilidad de biomasa de plantaciones sin manejo de la CAMM por medio de la simulación del trozado. Es un objetivo también analizar el impacto de la falta de comercialización de trozas pulpables, destinando este volumen a la producción de biomasa forestal, para con ello probar una alternativa viable para estas plantaciones. Se pretende evaluar de qué forma afecta el conjunto de productos elaborados durante el trozado al volumen de biomasa para energía y al valor total de los productos obtenidos durante la cosecha.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la posibilidad de obtención de biomasa en forestaciones de *Pinus taeda* bajo diferentes escenarios de trozado, se empleó información de 19 rodales del departamento Montecarlo, Misiones. A partir de la información generada por un inventario forestal, se simuló el trozado de los árboles, aplicando diferentes combinaciones de productos. Para cada situación se evaluó la capacidad de producción de madera sólida (trozas aserrables y triturables) y biomasa para energía en forma de chips (volumen de ramas, conos y acículas que podrían triturarse para abastecer a una usina eléctrica a partir de biomasa). A continuación, se presenta un detalle de la información empleada en el estudio.

2.1 Origen de la información.

Para el estudio se eligieron 19 rodales de *Pinus taeda* (79 ha) del departamento Montecarlo (Misiones), pertenecientes a socios de la Cooperativa Agrícola Mixta Montecarlo (CAMM). Los rodales elegidos corresponden a plantaciones desarrolladas con el objetivo de obtener madera aserrable de alto valor. Sin embargo, a lo largo del ciclo forestal no se realizaron todos los raleos necesarios, resultando en rodales con una alta densidad. En general estos rodales tienen un área basal superior a los 25 m²/ha, volúmenes totales de 414 m³/ha en promedio y diámetros medios inferiores a los 30 cm. Los rodales elegidos pueden clasificarse en tres grupos:

- **A**, rodales sobre-maduros, superando los 18 años de edad y con únicamente un raleo.
- **B**, rodales en turno de corta, con entre 13 y 15 años, en general sin raleos.
- **C**, rodales jóvenes, con menos de 10 años y sin raleos.

En los rodales elegidos se realizó un inventario forestal tradicional, con una intensidad de muestreo media de 5% (68 parcelas). Se emplearon parcelas de inventario rectangulares, de 600 m² (30 x 20 m). En cada parcela se contaron los árboles existentes, se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los fustes y la altura de una muestra representativa.

A partir de las alturas relevadas a campo, se ajustaron 13 funciones hipsométricas diferentes (a nivel de rodal o grupo de rodales similares), con las cuales se estimó la altura de todos los árboles (**Tabla 1**).

Tabla 1: Funciones hipsométricas ajustadas para rodales y grupos de rodales homogéneos.

Rodal	Función Hipsométrica	N	R ²
R1 – R4	$H = - 4,807 + 5,526 * \ln(\text{DAP})$	23	0,61
R8 – 9 – 11 – 12	$H = 3,086 + 6,382 * \ln(\text{DAP})$	84	0,26
R13A	$H = - 3,492 + 7,555 * \ln(\text{DAP})$	56	0,62
R13B	$H = - 1,262 + 3,825 * \ln(\text{DAP})$	11	0,59
R13D – R13F	$H = - 9,875 + 8,630 * \ln(\text{DAP})$	29	0,63
R13E	$H = - 2,177 + 6,769 * \ln(\text{DAP})$	23	0,64
R14A	$H = - 0,903 + 7,349 * \ln(\text{DAP})$	34	0,48
R14B	$H = - 4,752 + 7,606 * \ln(\text{DAP})$	13	0,73
R14Varios	$H = 4,290 + 4,101 * \ln(\text{DAP})$	54	0,32
R15 – 16	$H = 5,046 + 5,850 * \ln(\text{DAP})$	36	0,35
R17 – R18	$H = - 2,445 + 6,535 * \ln(\text{DAP})$	76	0,55
R2A-R3	$H = - 2,928 + 6,302 * \ln(\text{DAP})$	23	0,57
R2B	$H = 3,080 + 5,566 * \ln(\text{DAP})$	11	0,12
R5	$H = - 0,983 + 4,620 * \ln(\text{DAP})$	14	0,71

Donde: N, número de árboles que se emplearon en el ajuste; R²: Coeficiente de determinación R².

La **Tabla 2** presenta las características dasométricas de los rodales evaluados.

Tabla 2: Características dasométricas de los rodales evaluados.

Grupo	Rodal	Área [ha]	Edad	N [árb./ha]	DAP [cm]	dg [cm]	H [m]	H.D. [m]	G [m ² /ha]	Vol.Medio [m ³]	Vol.Total [m ³ /ha]
A	R8	4,8	19	527	29,5	30,4	24,7	27,1	38,2	0,92	484,5
A	R9-R11	8,1	19	612	29,7	30,1	24,6	26,6	43,5	0,91	541,7
A	R12	4,7	19	805	26,8	27,3	23,8	25,2	47,0	0,70	561,5
A	R16	2,2	18	733	29,7	30,2	24,6	25,4	52,4	0,89	645,3
A	R15	3,7	18	1.000	26,9	27,6	24,2	26,4	59,6	0,74	733,8
B	R14A	7,6	15	547	29,7	30,1	23,9	25,6	38,9	0,86	465,9
B	R14B	3,7	15	967	23,4	24,5	18,8	22,4	45,7	0,45	441,8
B	R14C	13,1	15	796	24,2	24,2	17,2	18,6	36,7	0,41	306,6
B	R13A	2,8	13	1.008	22,7	23,3	20,0	22,5	42,9	0,43	428,6
B	R13C	6,3	13	1.208	21,8	22,4	19,6	22,4	47,7	0,39	467,8

Grupo	Rodal	Área [ha]	Edad	N [árb./ha]	DAP [cm]	dg [cm]	H [m]	H.D. [m]	G [m ² /ha]	Vol.Medio [m ³]	Vol.Total [m ³ /ha]
B	R13D	5,9	13	1.277	20,0	20,7	15,6	19,4	42,8	0,27	342,2
B	R13E	3,5	13	956	24,2	24,7	19,1	21,3	45,8	0,46	436,1
B	R13F	1,5	13	1.417	21,7	22,0	16,5	19,9	53,8	0,32	441,5
C	R17	0,7	10	983	22,3	22,7	17,8	19,6	39,7	0,35	342,7
C	R18	9,0	10	1.070	20,7	20,9	17,3	19,2	36,5	0,29	306,9
C	R2A-R3	1,4	9	1.788	17,1	17,4	14,8	17,3	42,7	0,17	312,3
C	R1-R4	2,4	9	1.078	17,0	17,4	10,7	12,6	25,6	0,13	138,5
C	R5	2,3	9	1.038	18,1	18,5	12,3	13,9	27,8	0,16	168,0
C	R2B	0,6	8	1.300	18,1	18,5	18,1	19,9	34,9	0,24	309,0

Donde: N, densidad; DAP, diámetro a la altura del pecho; dg, diámetro cuadrático medio; H, altura media; H.D., altura dominante; G, área basal; Vol.Medio, volumen del árbol promedio; Vol.Total, volumen total en pie del rodal.

2.2 Simulación del trozado.

Los rodales de los grupos A y B poseen edades avanzadas y valores de diámetro y área basal que indican que han tenido una fuerte competencia a lo largo de su desarrollo. Estos rodales se encuentran en condiciones de ser cosechados. Por otra parte, los rodales del grupo C poseen una edad intermedia. Si estos rodales hubieran sido orientados hacia la producción de trozas aserrables de calidad por medio de la realización de raleos, a la edad actual podrían ser intervenidos con un segundo o tercer raleo, continuando el ciclo hasta alcanzar los 18 años de edad y un diámetro acorde a los requerimientos de la industria. Sin embargo, en la actualidad estos rodales poseen densidades superiores a los 1000 árboles/ha, lo que indica que no fueron intervenidos con un primer y segundo raleo. Contando con una edad avanzada sin raleos, con un área basal alta y con diámetros inferiores a los 20 cm, estos rodales ya han perdido el potencial de respuesta frente a nuevos raleos tardíos. En este escenario puede resultar conveniente evaluar una operación de tala rasa que contemple el aprovechamiento del material fino como biomasa forestal.

Para todos los rodales evaluados se planteó una operación de tala rasa, simulando la cosecha y el trozado de todos los árboles. Para la simulación del trozado mecanizado realista se empleó el simulador de trozado presentado por Hildt (2020). Este software emplea simulación estocástica para replicar las decisiones tomadas por el operador de un *harvester* al medir y cortar los distintos productos que pueden obtenerse de los árboles. Como supuestos generales, se consideró que los rodales de *Pinus taeda* presentaron 15% de árboles bifurcados y 40% de árboles con segmentos torcidos. El corte basal se realizó a 15 cm de altura del suelo. Cuando se elaboraron trozas triturables, el despunte de los árboles se realizó al alcanzar los $11,1 \pm 4$ cm de diámetro, según observaciones reportadas por Hildt *et al.*, (2019) y Hildt (2020) en el trozado mecanizado con *harvester*.

La **Tabla 3** presenta los productos considerados en la simulación de trozado y sus características principales. Para las trozas aserrables se consideraron dos longitudes (10 y 12 pies) correspondientes a los productos más frecuentes en raleos y tala rasas de la región (Hildt *et al.*,

2019). Además, se consideró que las trozas largas (12 pies) tienen una menor permisividad respecto a la presencia de curvaturas (55% de probabilidad de rechazo en árboles torcidos), respecto de las trozas cortas (10 pies, con solo un 25% de probabilidad de rechazo en árboles torcidos). Estos coeficientes permitieron modelar la presencia de defectos durante el trozado y la degradación de productos desde las clases aserrables hacia las trozas triturables y la biomasa. Los precios de los productos fueron tomados del *Boletín de precios de productos forestales Enero 2022* confeccionado por el Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones (COIFORM, 2022), transformados a dólares considerando el tipo de cambio oficial de 111,71 \$/US\$. Para estimar el precio de los productos puestos sobre el camión a borde de camino se consideró un costo de cosecha medio de 8,34 US\$/m³ para las trozas aserrables y de 7 US\$/t para la biomasa fresca. El valor de los productos puestos sobre el camión incluye el costo del flete hasta la industria.

Tabla 3: Productos evaluados durante la simulación de trozado. Fuente: COIFORM, 2022.

Categoría	Producto	Diámetro en punta fina mínimo [cm]	Diámetro en punta fina máximo [cm]	Largo	Precio en industria (US\$/m ³)	Valor sobre camión* (US\$/m ³)
Aserrable grueso	As 3,7 - 25pf	25	99	12 pies – 3,725 m	45,70	37,36
	As 3,1 - 25pf	25	99	10 pies – 3,125 m		
Aserrable medio	As 3,7 - 18pf	18	99	12 pies – 3,725 m	40,41	32,07
	As 3,1 - 18pf	18	99	10 pies – 3,125 m		
Aserrable fino	As 3,7 - 14pf	14	17,9	12 pies – 3,725 m	30,00	21,66
	As 3,1 - 14pf	14	17,9	10 pies – 3,125 m		
Triturable	Triturable	5	24,9	3,4 m ± 0,21 m	21,04	12,7
Biomasa (chips)					12,98	5,98

* Valor de los productos puestos sobre el camión, a borde del camino, una vez descontado los costos de cosecha, trituración y carga.

2.3 Diseño experimental.

Se ensayaron ocho escenarios de trozado diferentes, logrados por medio de la combinación de tres factores, con dos niveles cada uno (**Tabla 4**). Para modelar los niveles de cada factor se emplearon variables *dummy*.

- Longitud de las trozas aserrables: 12 pies [1] o 10 pies [0].

- Aprovechamiento de trozas aserrables finas: Con aprovechamiento del aserrable fino > 14 cm en punta fina [1]; o Sin aprovechamiento de trozas aserrables finas [0].

- Aprovechamiento de trozas triturables: Con aprovechamiento de trozas triturables [1] o Sin aprovechamiento de material triturable (realizando el despunte al finalizar la última troza aserrable) [0].

Tabla 4: Tratamientos de trozado aplicados a los rodales.

Tratamiento	Largo de trozas aserrables	Aserrable grueso	Aserrable medio	Aserrable fino	Triturable
T1	10 pies [0]	SI	SI	SI [1]	SI [1]
T2					NO [0]
T3				SI [1]	
T4				NO [0]	
T5	12 pies [1]	SI	SI	SI [1]	SI [1]
T6					NO [0]
T7				SI [1]	
T8				NO [0]	

En todas las situaciones se estimó la cantidad de biomasa que podría recuperarse para su aprovechamiento en la generación de energía. La principal fuente de biomasa considerada fue el ápice sólido remanente luego del despunte del fuste. Las dimensiones de esta pieza (diámetro en punta gruesa y largo) dependen de los productos considerados en el esquema de trozado y de las dimensiones de cada fuste. Para transformar el volumen de esta pieza en biomasa fresca se consideró una densidad ideal de 1 t/m³.

Por otra parte, las ramas gruesas mayores a 5 cm de diámetro, las ramas finas menores a 5 cm, las acículas y los conos también son potenciales fuentes de biomasa. El peso seco de la biomasa proveniente de estas fuentes fue estimado por medio de las funciones ajustadas por Fassola *et al.*, (2010) para *Pinus taeda* en la provincia de Misiones (**Tabla 5**). El peso fresco de esta biomasa se estimó considerando un contenido de humedad medio del 94,1% (Mitchell y Gallagher, 2007).

Tabla 5: Funciones empleadas para la estimación de biomasa.

Función	Ecuación	Coefficiente de Meyer	Ajuste R ²	Referencia
Volumen individual <i>Pinus taeda</i> en Misiones (m ³)	$\text{Ln}(\text{vcc}) = -8,70837 + 1,92414 * \text{Ln}(\text{dap}) + 0,00823 * \text{Ln}^2(\text{dap}) + 0,18622 * \text{Ln}^2(\text{h})$	1,0049507	0,99	Crechi <i>et al.</i> , 2006
Biomasa seca de conos (kg)	$\text{Ln}(\text{Bc}) = - 16,77 + 4,91 * \text{Ln}(\text{dap})$	3,61	0,62	Fassola <i>et al.</i> , 2010
Biomasa total de ramas (kg)	$\text{Ln}(\text{Br}) = - 3,63 + 2,28 * \text{Ln}(\text{dap})$	1,08	0,91	
Biomasa seca de acículas (kg)	$\text{Ln}(\text{Bac}) = - 1,67 + 1,44 * \text{Ln}(\text{dap})$	1,06	0,82	

2.4 Análisis estadístico.

Los resultados fueron analizados por medio del ajuste de modelos de regresión lineal múltiple. Para cada variable independiente se ajustaron diez modelos diferentes, combinando las variables predictoras significativas, que no presentaron problemas de multicolinealidad. Los grupos de rodales (A, B y C) no fueron empleados como un factor del modelo ya que las características de estos rodales también pueden ser descriptas por medio de la densidad, el área

basal y el volumen de árbol medio. Los modelos ajustados representan las relaciones existentes para todos los rodales evaluados. Para compensar tendencias en los residuos se incorporaron las interacciones necesarias entre las variables predictoras continuas y las variables categóricas *dummy*. En cada caso, el mejor modelo fue seleccionado atendiendo al Criterio de Información de Akaike (AIC) y al coeficiente de determinación R^2 ajustado por el número de parámetros del modelo. Los modelos elegidos cumplen con los criterios de homogeneidad de la varianza y normalidad de los residuos.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Tabla 6** presenta un resumen de los modelos elegidos para las distintas variables evaluadas. Estos modelos son aplicables a todo el conjunto de rodales evaluados, independientemente de su edad. Los modelos ajustados se diferencian en tres grupos: modelos para la estimación del volumen de piezas sólidas, modelos para la estimación de la biomasa total que potencialmente podría aprovecharse, y modelos para la estimación del valor bruto de las trozas sólidas, de la biomasa y del total combinado.

3.1 Volumen de piezas sólidas

La posibilidad de obtener trozas aserrables con más de 25 cm en punta fina dependió exclusivamente del volumen medio de los árboles y de la longitud de las trozas aprovechadas. Los rodales de los grupos B y C presentaron diámetros medios inferiores a los 25 cm, por lo que en dos situaciones no se logró obtener trozas para este producto. Estas situaciones puntuales fueron excluidas del análisis para evitar su efecto sobre la pendiente general del modelo. Por esta razón, al aplicar el Modelo 1 a rodales con un volumen medio inferior a $0,2 \text{ m}^3$, se deben considerar únicamente los resultados positivos. Al analizar los coeficientes del modelo se observa que el volumen de trozas aserrables gruesas depende del volumen medio de los árboles, siendo mayor en rodales con mayor área basal. Por otra parte, el aprovechamiento de trozas aserrables de 12 pies presenta una interacción negativa con el tamaño de los árboles. La **Figura 1A** muestra el comportamiento general del modelo para las dos longitudes evaluadas, considerando un rodal con un área basal media de $42,8 \text{ m}^2/\text{ha}$. Para los rodales evaluados, en promedio se obtuvieron $95 \text{ m}^3/\text{ha}$ cuando se cortaron trozas cortas de 10 pies y $77 \text{ m}^3/\text{ha}$ cuando se cortaron trozas de 12 pies.

La **Figura 1B** presenta la relación entre el volumen de trozas sólidas con más de 25 cm en punta fina observado durante las simulaciones de trozado, y el volumen estimado por el modelo elegido. El desvío de los datos respecto de la línea diagonal 1:1 corresponde a la variabilidad no explicada por el modelo. La diferencia de pendiente observada entre el ajuste lineal presentado en color rojo y la diagonal 1:1 denota el sesgo del modelo analizado. En este caso el modelo ajustado consiguió explicar el 98% de la variabilidad observada, sin mostrar un sesgo apreciable.

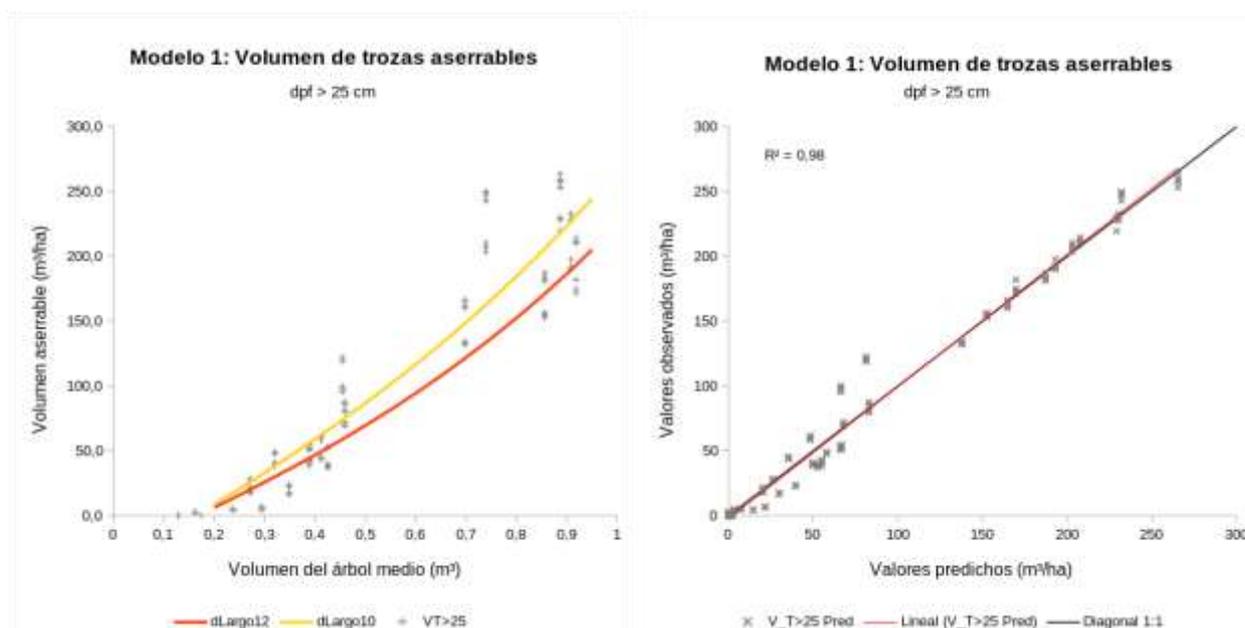


Figura 1: Comportamiento y ajuste del Modelo 1: Volumen de trozas aserrables con más de 25 cm en punta fina.

Tabla 6: Modelos predictivos ajustados para el volumen y el valor de los productos elaborados, en función de las características de los rodales y del esquema de trozado.

Modelo	Variable	Unidad	Modelo	N	R ² Aj
Modelo 1	Volumen Trozas > 25 cm	m ³ /ha	$VT_{25} = -38,24 - 7,04 * V_i + 72,83 * V_i^3 + 7,55 * dLargo_{12} + 5,58 * G * V_i - 49,47 * V_i * dLargo_{12}$	136	0,97
Modelo 2	Volumen Trozas 18 – 25 cm	m ³ /ha	$VT_{18-25} = -35,52 - 0,063 * N + 5,09 * G - 17,45 * dLargo_{12}$	152	0,86
Modelo 3	Volumen Trozas 14 – 18 cm	m ³ /ha	$VT_{14-18} = -15,35 + 0,04 * N + 0,61 * G - 7,15 * dLargo_{12}$	76	0,66
Modelo 4	Volumen Triturable	m ³ /ha	$V_{trit} = -30,70 + 0,05 * N + 2,30 * G + 0,62 * dLargo_{12} * G - 0,05 * N * dAserrableFino$	76	0,88
Modelo 5	Biomasa seca	Mg/ha	$B_{ms} = 8,82 + SI(dTriturable = 1 \text{ entonces, } 1,99 * G) + SI(dTriturable = 0 \text{ entonces, } 3,20 * G) - 10,00 * dAserrableFino$	152	0,90
Modelo 6	Biomasa fresca	Mg/ha	$B_{mf} = 17,13 + SI(dTriturable = 1 \text{ entonces, } 3,87 * G) + SI(dTriturable = 0 \text{ entonces, } 6,22 * G) - 19,41 * dAserrableFino$	152	0,90
Modelo 7	Valor Bruto Solido	US\$/ha	$Val_{rs} = -3178,04 + 94,00 * G + 303,78 * G * V_i + 1557,89 * dTriturable + 734,71 * dAserrableFino - 2169,42 * dLargo_{12} * V_i$	152	0,98
Modelo 8	Valor Bruto Biomasa	US\$/ha	$Val_{BS} = 102,45 + SI(dTriturable = 1 \text{ entonces, } 23,13 * G) + SI(dTriturable = 0 \text{ entonces, } 37,17 * G) - 116,05 * dAserrableFino$	152	0,90
Modelo 9	Valor Bruto Total	US\$/ha	$Val_{B.Total} = -2830,86 + 125,40 * G + 300,85 * G * V_i + 969,07 * dTriturable + 618,66 * dAserrableFino - 1923,01 * dLargo_{12} * V_i$	152	0,98

Donde: dLargo₁₂: *dummy* para el largo de las trozas; dTriturable: *dummy* para el aprovechamiento de trozas triturables; dAserrableFino: *dummy* para el aprovechamiento de trozas aserrables con 14-18 cm en punta fina; N: densidad (árboles/ha); G: área basal (m²/ha); V_i: volumen del árbol medio (m³).

La elaboración de trozas aserrables con entre 18 y 25 cm en punta fina resultó posible en todos los rodales. El volumen obtenido para este producto mostró una relación directamente proporcional con el área basal del rodal, e inversamente proporcional con la densidad (N) (**Figura 2A**). Esto indica que la producción de trozas aserrables de diámetro medio depende de que el rodal presente una alta ocupación con árboles de diámetros superiores a los 20 cm. En cambio, la existencia de una gran cantidad de árboles de pequeño diámetro no favorece la obtención de trozas aserrables de entre 18 y 25 cm. En promedio se obtuvieron 116 m³/ha al elaborar trozas cortas y 99 m³/ha para trozas largas. El corte de trozas de 12 pies redujo en 17,4 m³/ha el volumen de trozas aserrables obtenidas (**Tabla 6** – Modelo 2). Este efecto se debe a que resulta más probable la obtención de trozas cortas que logren satisfacer el diámetro mínimo de 18 cm en punta fina. El aprovechamiento o no de las trozas aserrables finas y las trozas triturables resultó significativo para explicar el volumen obtenido para las trozas aserrables medias. El modelo ajustado alcanzó a explicar el 86% de la variabilidad observada, sin la existencia de un sesgo en la estimación (**Figura 2B**)

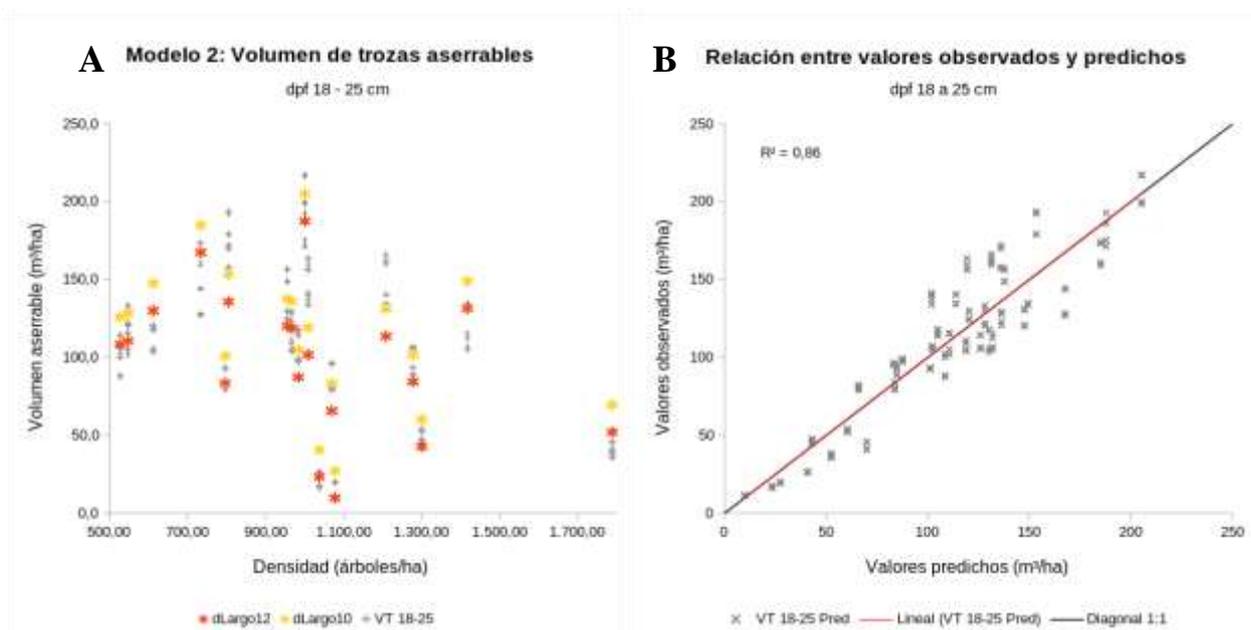


Figura 2: Modelo 2: Volumen de trozas aserrables con entre 18 y 25 cm en punta fina.

El Modelo 3 estima el volumen de trozas aserrables finas obtenidas durante la tala rasa. A diferencia de los modelos anteriores, en este caso el volumen del producto se incrementó con la densidad, tanto frente a un aumento del número de árboles como a un aumento del área basal (**Figura 3A**). Esto se debe a que este producto puede elaborarse a partir de árboles de reducidas dimensiones. De forma similar a los demás productos, la elaboración de trozas largas provocó una merma de 7,15 m³/ha en el volumen obtenido (45,6 m³/ha) respecto a cuando se elaboran trozas cortas (52,8 m³/ha). Esto se debe tanto a la dificultad de ubicar trozas largas en un fuste de diámetro

decreciente, como a los mayores requerimientos de calidad que tiene este producto. La **Figura 3B** muestra que este modelo alcanzó a explicar el 70% de la variabilidad observada en los datos.

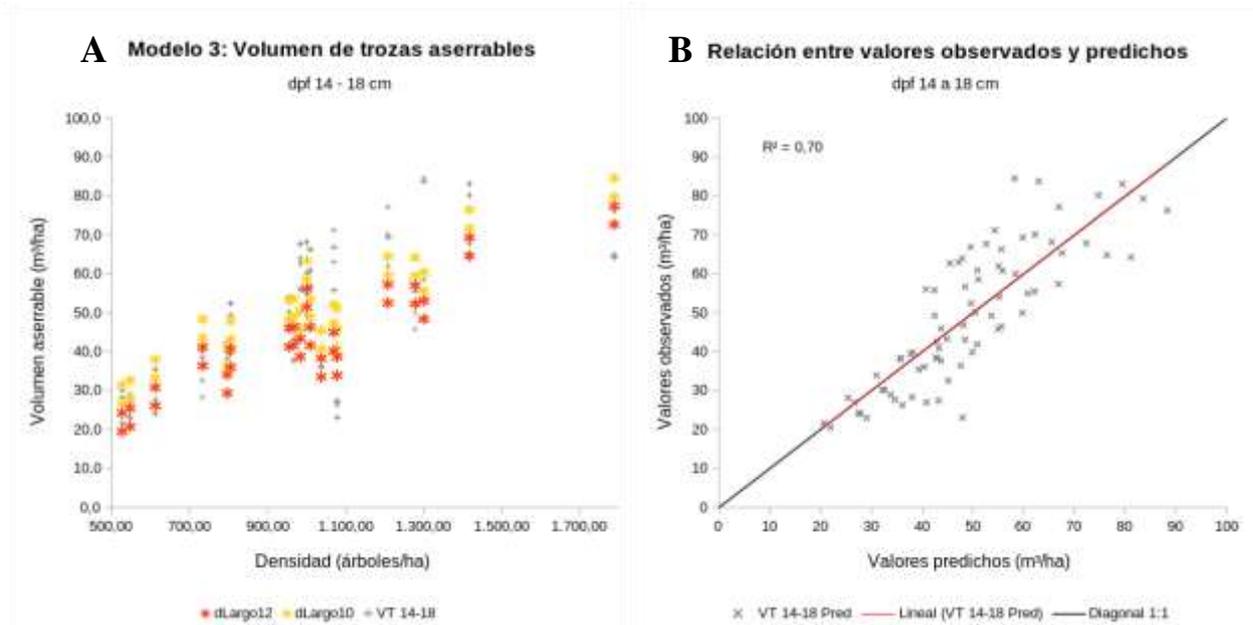


Figura 3: Modelo 3: Volumen de trozas aserrables con entre 14 y 18 cm en punta fina.

El volumen de trozas triturables mostró una relación con la densidad similar a la observada para las trozas aserrables finas (**Tabla 6** - Modelo 4). Por otra parte, el aprovechamiento de trozas largas generó un incremento del volumen de trozas triturables en situaciones con valores altos de área basal. Esto se debe a que los mayores requerimientos de calidad de las trozas largas provocan la degradación de los segmentos torcidos del fuste, los cuales pasan a procesarse como material triturable. Cuando se simuló la elaboración de trozas aserrables finas de 10 pies, las trozas triturables alcanzaron en promedio los 66,5 m³/ha. En cambio, cuando se elaboraron trozas aserrables de 12 pies, el volumen de trozas triturables ascendió a 95 m³ en promedio. Finalmente, el volumen de trozas triturables se vio incrementado cuando no se elaboraron trozas aserrables con menos de 18 cm en punta fina. En estos casos el volumen de trozas triturables se incrementó entre un 82% y un 50%, para trozas aserrables de 10 o 12 pies, respectivamente.

3.2 Potencial para la obtención de biomasa.

La biomasa que puede obtenerse al realizar una tala rasa de los rodales evaluados corresponde a la combinación de la masa contenida en los ápices de los fustes, las ramas de la copa, los conos y las acículas. El Modelo 5 presenta la estimación del peso de la biomasa seca que podría obtenerse al cosechar el rodal, en función de su área basal y con la opción de realizar o no el aprovechamiento de trozas aserrables finas y trozas triturables. Por otra parte, el Modelo 6 (**Figura 4A**) estima el peso de la biomasa fresca, ajustada por el contenido medio de humedad de este material (Mitchell y Gallagher, 2007). En ambos casos, el grado de incremento de la biomasa aprovechable con la densidad de la forestación depende de si se realiza o no el aprovechamiento de trozas triturables. Considerando un área basal media de 42 m²/ha y a la elaboración de trozas

aserrables finas y trozas triturables como una situación de referencia, se obtendrían 160 Mg/ha de biomasa fresca para energía proveniente de los ápices, las ramas y las acículas. En cambio, si se elaboraran únicamente trozas aserrables finas, sin aprovechar las piezas triturables (T2 y T6), la cantidad de biomasa obtenida se incrementaría en un 62% (259 Mg/ha). Cuando no se aprovechan trozas aserrables finas y tampoco se aprovecha el material triturable (T4 y T8), la biomasa fresca se incrementa en un 74% (278 Mg/ha) respecto de la situación de referencia. En cambio, si no se elaboran trozas aserrables finas pero esa porción del fuste se destina a las trozas triturables (T3 y T7), el incremento en la biomasa obtenida solo alcanza el 12% (180 Mg/ha).

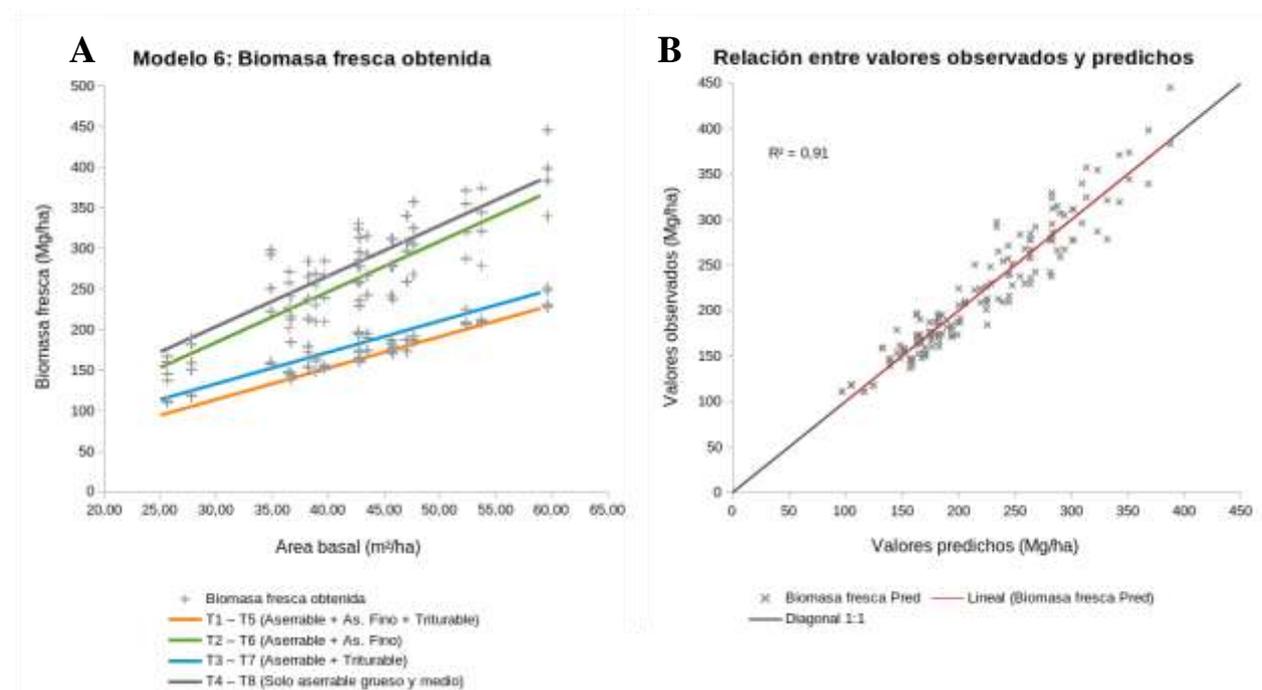


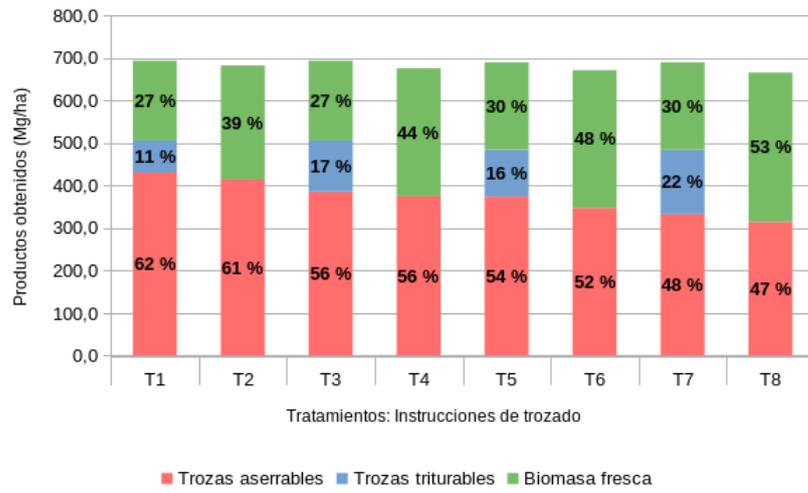
Figura 4: Modelo 6: Biomasa fresca obtenida bajo los diferentes escenarios de trozado planteados.

La **Figura 5** muestra los resultados obtenidos para el promedio de los rodales evaluados, clasificados por grupo de edad. En los rodales con mayor edad (Grupo A) las trozas aserrables acumulan la mayor proporción del volumen elaborado. En cambio, las mayores proporciones de biomasa fresca se obtienen cuando se elaboran trozas de 12 pies, no se elaboran trozas aserrables finas y no se aprovecha el material triturable (T4, T6 y T8).

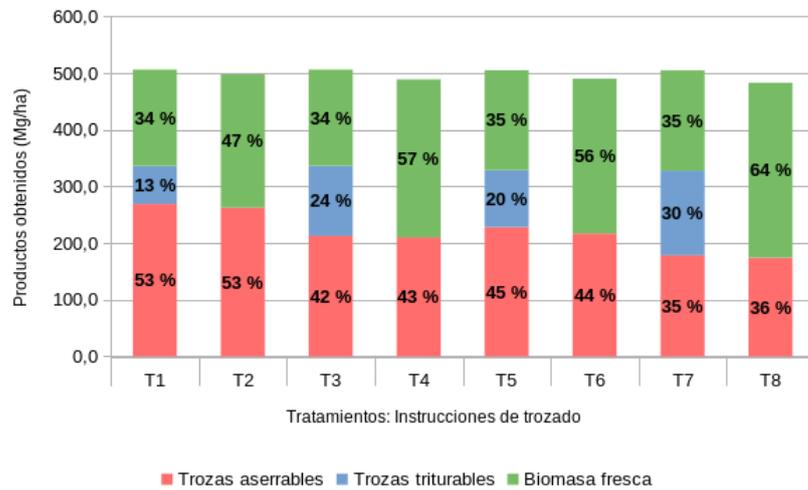
En los rodales del Grupo B (**Figura 5B**), la proporción representada por la biomasa fresca se incrementa, hasta alcanzar el 64% del total cuando no se elaboran trozas aserrables finas ni pulpables.

Las mayores proporciones de biomasa fresca se obtienen en los rodales del Grupo C (**Figura 5C**), donde el reducido diámetro de los árboles limita la posibilidad de obtener trozas aserrables y amplía al 80% la proporción del material que puede triturarse para producir biomasa fresca bajo los esquemas de trozado T4 y T8.

**A Efecto de los tratamientos sobre los productos obtenidos
Rodales del Grupo A**



**B Efecto de los tratamientos sobre los productos obtenidos
Rodales del Grupo B**



**C Efecto de los tratamientos sobre los productos obtenidos
Rodales del Grupo C**

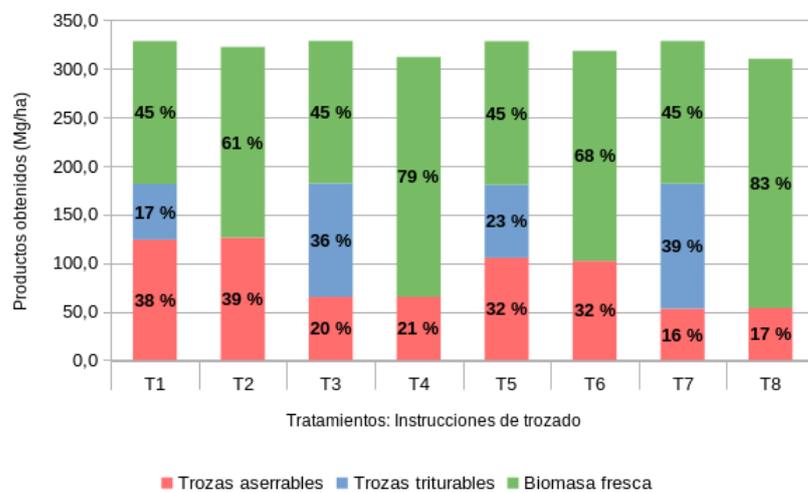


Figura 5: Volumen medio de los productos obtenidos al aplicar las diferentes instrucciones de trozado a los rodales evaluados

3.3 Valor de los productos elaborados.

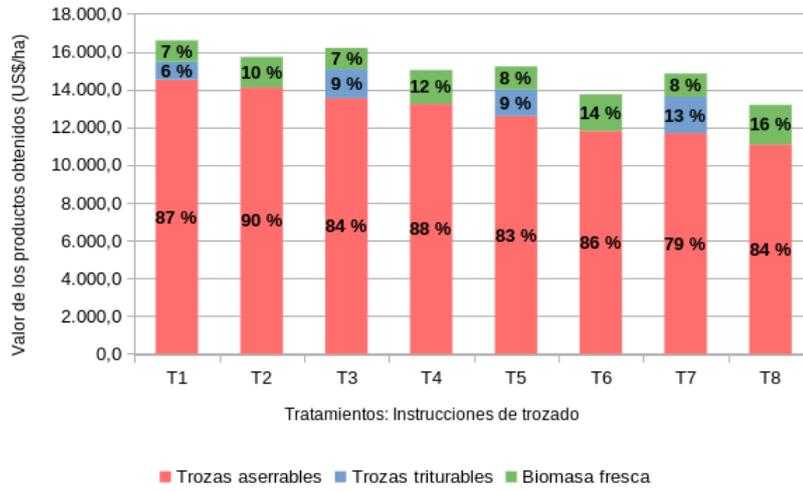
Los modelos 7, 8 (**Tabla 6**) estiman el valor total (US\$/ha) correspondiente a las piezas aserrables y triturables sólidas y a la biomasa para energía. La estructura y comportamiento de estos modelos es similar a la de los modelos ajustados para estimar el volumen de los productos sólidos y de la biomasa fresca. El valor de las piezas sólidas se incrementa en la medida en que aumenta la densidad de los rodales y el tamaño de los árboles. Por otra parte, el aprovechamiento de las trozas triturables también permite incrementar en 1.558 US\$/ha el valor de los productos sólidos. En cambio, la decisión de no elaborar trozas aserrables finas o de elaborar trozas aserrables largas, de 12 pies, repercute de forma negativa en el valor final alcanzando. Ambas decisiones provocan un incremento en el volumen de biomasa fresca que puede destinarse a la generación de energía, con un menor valor industria.

El resultado final de una operación de cosecha está definido por la combinación, tanto de productos sólidos como de biomasa triturada para la producción de energía. El Modelo 9 de la **Tabla 6** presenta la función ajustada para el Valor Total combinado de todos los productos (US\$/ha). El aprovechamiento de la biomasa para energía tuvo un efecto menor en las variables que conforman este modelo, tanto por la cantidad en que se obtiene como por su valor comercial. Los coeficientes del modelo indican que el valor total se incrementará al aumentar la densidad del rodal y el tamaño de los árboles. También aumentará cuando se decida elaborar trozas aserrables finas y trozas triturables, consiguiendo un mejor aprovechamiento del fuste. Finalmente, disminuirá si se decide trabajar con trozas aserrables largas.

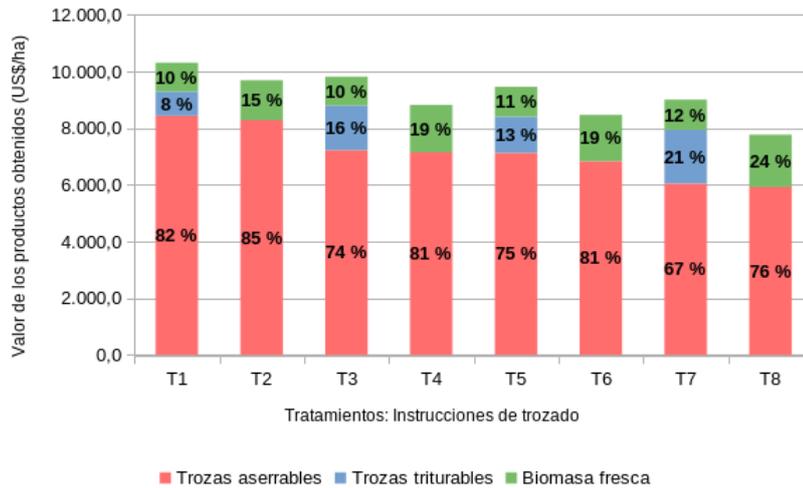
Como se observa en la **Figura 6A**, para el conjunto de rodales del Grupo A, los mejores resultados globales se obtienen en las instrucciones de trozado que elaboran productos aserrables gruesos, medios y finos, junto con productos triturables y biomasa para energía (T1 para trozas de 10 pies y T5 para trozas de 12 pies). En estos tratamientos la proporción del valor representada por la biomasa no supera el 8%, mientras que en volumen de material alcanza el 30%. Un resultado similar se observa en los rodales del Grupo B y C, donde ocurre incremento en la proporción del valor aportado por la biomasa fresca en la medida en que el diámetro de los árboles disminuye y se elaboran menos trozas aserrables (Figura 6 B y C).

En el escenario que se da en la actualidad en Misiones, donde los pequeños productores forestales no tienen la posibilidad de vender sus trozas triturables a las fabricas celulósicas, las instrucciones de trozado T1, T3, T5 y T7 dejan de ser opciones factibles. En esta situación, el aprovechamiento de la biomasa para energía tiene el potencial de incrementar el retorno hasta valores similares a los que se obtendría en un escenario tradicional, donde se comercializan las trozas pulpables pero no se aprovecha la biomasa. En la **Figura 6** se observa que el valor total alcanzado por el esquema T2 iguala al valor acumulado de las trozas aserrables y pulpables del esquema T1. La misma relación puede observarse en los demás esquemas de trozado, cuando el aprovechamiento de la biomasa para energía se compara con una cosecha tradicional que no aprovecha este producto. Por otra parte, si se plantea un escenario de abastecimiento de biomasa para suplir las necesidades de una planta térmica, los esquemas T4, T6 y T8 son los que logran producir un mayor volumen de biomasa al tiempo que también generan trozas aserrables, Aquí destaca T6 por su mayor retorno total en rodales jóvenes (Grupo 6)

**A Efecto de los tratamientos sobre el valor total obtenido
Rodales del Grupo A**



**B Efecto de los tratamientos sobre el valor total obtenido
Rodales del Grupo B**



**C Efecto de los tratamientos sobre el valor total obtenido
Rodales del Grupo C**

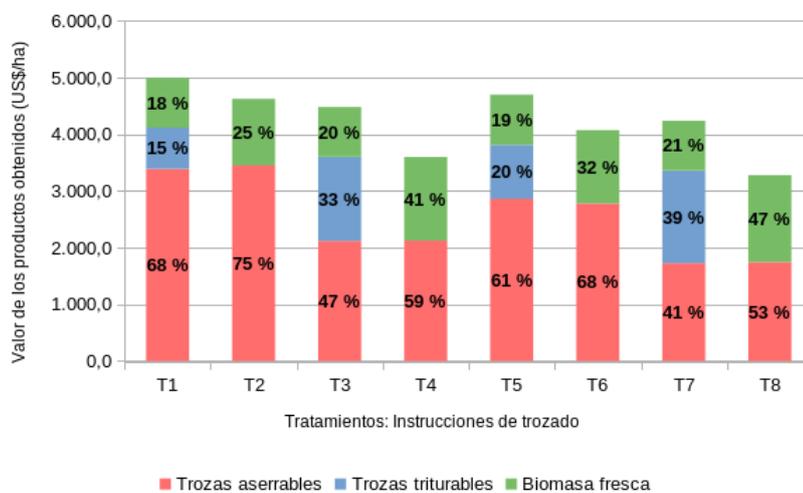


Figura 6: Valor medio de los productos obtenidos al aplicar las instrucciones de trozado a los rodales evaluados.

4 CONCLUSIONES

Este estudio aplicó una metodología de simulación del trozado con información generada por inventarios forestales, consiguiendo ajustar modelos predictivos del volumen de productos aserrables, trozas triturables y biomasa que podría obtenerse bajo diferentes escenarios de trozado. Estos modelos pueden ser aplicados a la planificación preliminar del potencial de abastecimiento de biomasa que posee una cuenca forestal poblada por rodales con altas densidades debido a la falta de raleos.

Las plantaciones forestales de *Pinus taeda*, con altas densidades debidas a un retraso en la aplicación de los raleos, tienen el potencial para producir productos aserrables, trozas triturables y biomasa para energía. El volumen de biomasa que puede generarse en una operación de cosecha depende directamente del área basal existente en el rodal y del conjunto de productos aserrables y triturables que conformen la instrucción de trozado aplicada. La elaboración de trozas aserrables de 12 pies, y el no aprovechamiento de trozas aserrables finas y trozas triturables favorecen al volumen de biomasa obtenido en la cosecha. En un mercado donde los pequeños productores no logran acceder a las industrias celulósicas, el aprovechamiento de la biomasa para energía puede ayudar a compensar la caída en el ingreso debido a la imposibilidad de comercializar las trozas pulpables.

Los resultados demostraron que la importancia del aprovechamiento de la biomasa es mayor en los rodales mas jóvenes (Grupos B y C), donde el escaso diámetro de los árboles limita la obtención de trozas aserrables. En cambio, en los rodales del Grupo A la elaboración de trozas aserrables representa hasta el 90% del valor obtenido en la cosecha.

El volumen final de biomasa recuperada en una operación de cosecha real dependerá del grado en que se consiga transportar y triturar los ápices, despuntes, ramas, acículas y conos. El estudio de las operaciones de cosecha y trituración de biomasa y el ajuste de modelos basados en datos de campo es el próximo paso natural en esta línea de trabajo.

5 BIBLIOGRAFÍA

- COIFORM (Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones). 2022. *Boletín de precios de productos forestales Enero 2022*. www.coiform.com.ar
- Fassola, H. E.; Crechi, E. H.; Barth, S. R.; Keller, A. E.; Winck, R. A.; Martiarena, R.; Von Wallis, A.; Pinazo, M.A.; Knebel, O. 2010. Modelos regionales de biomasa aérea de *Pinus taeda* para Misiones y NE de Corrientes, Argentina. En: Acta de las 14as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. (pp. 1-11). Eldorado, Misiones, Argentina.
- Hildt, E.; Leszczuk, A.; Schlichter, T.; Mac Donagh, P. 2019. Efecto de la densidad de las forestaciones y la intensidad de cosecha en raleos mecanizados con harvester. *Scientia Forestalis*. 47(123), p. 440-450.
- Hildt, E. 2020. *Desarrollo de modelos de productividad para harvesters y forwarders en plantaciones de Pinus spp. del noreste argentino: efectos de la densidad del rodal, la intensidad de raleo y los productos elaborados*. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. 123 pp.
- Mitchell, D.; Gallagher, T. 2007. Chipping Whole Trees for Fuel Chips: A Production Study. *Southern Journal of Applied Forestry*. 31(4), p. 1-9.
- Spinelli, R., Magagnotti, N. 2010. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25, p. 69-77.
- Tiernan, D., Zeleke, G., Owende, P.M.O., Kanali, C.L., Lyons, J., Ward, S.M. 2004. Effect of Working Conditions on Forwarder Productivity in Cut-to-length Timber Harvesting on Sensitive Forest Sites in Ireland. *Biosystems Engineering*, 87, p. 167-177.