



Rendimiento en aserrío de trozas de raleo de *Pinus patula* de 22 años en Cajamarca, Perú

Sawmill yield of 22-years thinned logs of *Pinus patula* in Cajamarca, Peru

Rolando Montenegro Muro¹ y Miguel Meléndez Cárdenas^{1,*}

Recibido: 24 setiembre 2024 | **Aceptado:** 18 diciembre 2024 | **Publicado en línea:** 10 enero 2025

Citación: Montenegro Muro, R; Meléndez Cárdenas, M. 2024. Rendimiento en aserrío de trozas de raleo de *Pinus patula* de 22 años en Cajamarca, Perú. Revista Forestal del Perú 39(2): 312-322. DOI: <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1665>

Resumen

El presente estudio analiza el rendimiento en aserrío de trozas de raleo de *Pinus patula* de 22 años y evalúa la mejor forma de estimar el volumen de madera aserrada a obtener, en Porcón, Perú. Se halló que las trozas poseen un diámetro promedio de 25.1 cm y que el rendimiento promedio es de 43.2 % considerado bajo. Se encontró que la calidad del 81.1 % de las trozas aserradas corresponde a primera y solo 4.7 % son de tercera. Asimismo, el 54.3 % de las tablas producidas pertenece a la denominación Especial y el 29.3 % a la denominación comercial. Se demuestra que no existe relación entre el rendimiento y el diámetro de la troza y que la mejor estimación del volumen de madera aserrada se obtiene a partir del diámetro menor de la troza y no a través del Coeficiente de Conversión.

Palabras clave: aserrado, aclareo, plantaciones, *Pinus*, rendimiento

Abstract

This study analyzes the sawlog yield of 22-year-old thinning logs of *Pinus patula* and evaluates the best way to estimate the volume of sawn timber to be obtained in Porcón, Peru. It was found that the logs have an average diameter of 25.1 cm and that the average yield is 43.2 %, which is considered low. The quality of 81.1 % of the sawn logs was found to be of first quality and only 4.7 % were of third quality. Likewise, 54.3 % of the timber produced belong to the Special designation and 29.3 % to the commercial designation. It is shown that there is no relationship between yield and log diameter and that the best estimate of the volume of sawn timber is obtained from the smallest diameter of the log and not through the Conversion Coefficient.

Key words: sawmill, commercial thinning, plantations, *Pinus*, yields

¹ Departamento de Industrias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Av. La Molina s/n, La Molina, Lima, Perú.

* Autor de Correspondencia: mmeccd@lamolina.edu.pe

Introducción

En el Perú, en el departamento de Cajamarca, se realizó el único esfuerzo de reforestación planeado a gran escala (Guariguata *et al.* 2017), donde se emplearon especies de pino. De esta plantación se obtiene principalmente madera aserrada por ser la opción de uso más beneficiosa, económicamente hablando, tras haber dejado atrás la idea original de ser utilizada como fuente de materia prima en la industria de pulpa para papel. En la industria nacional de aserrío, el suministro de materia prima es insuficiente (Llavé 2008); sin embargo, se sigue trabajando sin considerarlo como un problema. Ello se refleja en la escasez o falta de estudios sobre rendimiento de madera rolliza a madera aserrada, productividad, entre otros; lo cual no es ajeno a los aserraderos de Cajamarca. En cuanto al estudio de rendimiento, se han desarrollado una serie de herramientas y procedimientos, destacando la Tabla de Rendimiento por permitir la estimación del volumen de producto final a partir de la materia prima. Con ello se facilita la cuantificación y control de la materia prima requerida, además de proporcionar un indicador que alerte de fallas o defectos a corregirse en la producción.

Según Ospina *et al.* (2011), *Pinus patula* es de porte mediano a grande, con ejemplares longevos que pueden alcanzar alturas de hasta 40 m y 120 cm de diámetro. El tronco es recto, cilíndrico en un comienzo y bastante cónico en casi toda su longitud. Del Pozo (1996) señala que la madera es suave, de color claro, ligeramente amarillenta con vetas morenas pálidas, fácil de trabajar, poco resinosa, con un peso específico de 460 a 490 kg/m³ y buen comportamiento al secado. Esta especie, posee una densidad anhidra de 480 kg/m³ y una densidad básica de 430 kg/m³. La madera presenta durabilidad natural baja y recién cortada presenta olor agradable a resina. Es de fácil preservación por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y vacío presión, lo cual permite utilizarla en construcción como vigas y columnas, tablillas para pisos y revestimiento de interiores y exteriores. Además, en postes para servicios públicos y madera aserrada (Ospina *et al.* 2011).

El término “coeficiente de conversión”, también es conocido como factor de conversión, coeficiente de aserrío, coeficiente de transformación, rendimiento volumétrico o factor de rendimiento. Si bien estos se expresan de manera decimal, Marchesan (2012) y Rodrigues (2013) señalan la necesidad de expresar dicha relación en forma porcentual. Bustamante (2016) define el rendimiento en aserrío como la relación que expresa el volumen de madera aserrada que se obtiene de cada troza procesada.

Tuset y Durán (2007) definen como coeficiente de aserrío a la relación del volumen de madera aserrada que se obtuvo y el volumen de las trozas que se usaron para producirla. Bustamante (2016) añade que los estudios del procesamiento de las trozas y su transformación en madera aserrada son importantes para determinar la rentabilidad de la operación.

Almeida *et al.* (2014) y Esteves *et al.* (2010) coinciden en que el rendimiento de madera aserrada está determinado por una interacción de diversas variables, como el diámetro de la troza, su longitud, curvaturas, conicidad, calidad interna de la madera, la toma de decisiones por parte del personal del aserradero, la condición y mantenimiento del equipo de aserrío, los métodos de aserrío, las dimensiones de las piezas aserradas y el tipo de especies procesadas (coníferas o latifoliadas). Esteves *et al.* (2010) agregan como factores el nivel tecnológico de las máquinas utilizadas y el tipo de aserradero, Bustamante (2016) también incluye el ancho de corte de la sierra y la demanda de piezas de mayores dimensiones.

Entre los factores principales que afectan el rendimiento destacan el diámetro y forma de las trozas a procesar, la clase de madera y su calidad, el patrón de corte y el tipo de sierra empleado para transformar la materia prima (Quirós *et al.* 2005).

En el Perú se utiliza el Coeficiente de conversión de 52 %, aplicado frecuentemente por la Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre para determinar el equivalente de un volumen de madera aserrada en madera rolliza

o viceversa (Schrewe 1981). Sin embargo, en estudios con madera de plantaciones se encontraron valores diferentes. Por ejemplo, en una latifoliada como *Tectona grandis*, Llavé (2008), halló un factor de conversión de 0.48 para trozas de raleo sin considerar defectos ni estado sanitario; mientras que para coníferas como *Pinus tecunumanii*; Sulca (2021) determina un rendimiento promedio de 50.9 % para trozas de 18 años.

Como antecedente de la especie en estudio, *Pinus patula*, Del Pozo (1996) establece un factor de conversión de 0.39 para trozas provenientes del raleo de una plantación de 11 años en Cajamarca, con un diámetro promedio de 17.4 cm o 6 pulgadas. En el mismo estudio se señala que el diámetro de troza se relaciona en forma inversa con el factor de conversión y que ello se puede explicar por la baja calidad de las trozas, las cuales tuvieron gran presencia de abultamientos y torceduras.

Con relación a los estudios de rendimiento y coeficiente de conversión para especies del mismo género se puede señalar, que en Brasil según Murara *et al.* (2005), el rendimiento en aserrío con el sistema convencional varía entre 35.2 % y 43.2 %, mientras que en el aserrío optimizado con patrones de corte varía de 41.7 % a 64 %. Para *Pinus taeda*, Dobner (2012) determinó un rendimiento promedio de 57 % en trozas provenientes de una plantación de 30 años en el municipio de Campo Belu, Brasil, con diámetros entre 20 y 57 cm. Se debe resaltar que la variación del rendimiento de 37 % a 78 % se explica por una marcada tendencia de aumento lineal cuando aumenta el diámetro de la troza.

Entre otros estudios de rendimiento cabe mencionar el de Herrera y Leal-Pulido (2012), quienes determinaron, en Colombia, que mediante el uso de programación matemática se podía aumentar el rendimiento promedio de una troza de *Pinus caribea* de 45 % a 55 %. Por otro lado, en México, Nájera (2012) determinó en dos aserraderos privados de El Salto, Durango un rendimiento promedio de 61.4 % para *Pinus sp.* Con el coeficiente de rendimiento en

aserrío se facilita la cuantificación y control de la materia prima requerida, además de proporcionar un indicador de gestión para planificar la producción de aserraderos que procesan trozas de plantaciones.

El presente estudio tiene como objetivo analizar el rendimiento en aserrío a partir del coeficiente de conversión determinado con trozas provenientes del raleo de una plantación de *Pinus patula* de 22 años en Porcón, así como determinar la mejor forma de estimar el volumen de madera aserrada a partir del volumen de trozas.

Materiales y métodos

Material de estudio

Las trozas utilizadas en el presente estudio provienen del raleo de una plantación de *Pinus patula* ubicada en el bosque de Porcón, en Cajamarca. El aserrío se efectuó en el aserradero de ADEFOR, ubicado en Tartar, a 3 km de la ciudad de Cajamarca. Es importante señalar que tanto la procedencia de las trozas como el aserradero estudiado son los mismos del estudio de Del Pozo (1996).

Caracterización de la planta de aserrío

Se caracterizó la planta de aserrío tomando en cuenta las especificaciones técnicas de las máquinas y equipos instalados, las cuales corresponden a un aserradero pequeño típico para el corte de madera de plantaciones. En el Cuadro 1 se caracterizan las máquinas del aserradero.

Recopilación de datos

En el patio de trozas del aserradero se tomó al azar una muestra de 85 trozas estimada a partir de la variabilidad del volumen de 30 trozas, aplicando la siguiente expresión:

$$n = \frac{t^2 \times CV^2}{E^2}$$

Donde:

n: tamaño de la muestra redondeado al inmediato superior a partir de 0.5.

t: valor de la tabla t-student para 95 % de probabilidad ($t = 2$).

CV: Coeficiente de Variabilidad del volumen es de 45.5 % para una muestra de 30 trozas.

E: Error de muestreo del 10 %.

Luego se registró la información que sigue a continuación

a) Trozas:

- Diámetro mayor y menor en cruz en el sistema inglés (comercial) y en el sistema métrico

- Longitud total de la troza, en el sistema inglés y en el sistema métrico.

- Forma de la sección transversal:

Circular: Se califica con 3 y corresponde a la Primera Calidad.

Ovalada: Se califica con 2 y corresponde a la Segunda Calidad.

Irregular: Se califica con 1 y corresponde a la Tercera Calidad.

- Rectitud de la troza:

Derecha: Se califica con 3 y corresponde a la Primera Calidad.

Semisinuosa: Se califica con 2 y corresponde a la Segunda Calidad.

Torcida: Se califica con 1 y corresponde a la Tercera Calidad.

- Conicidad:

Cilíndrica (coeficiente de ahusamiento ≤ 2 cm/m): Se califica con 2 y corresponde a la Primera Calidad.

Semicilíndrica ($2 \text{ cm/m} < \text{Coeficiente de ahusamiento} \leq 5 \text{ cm/m}$): Se califica con 1 y corresponde a la Segunda Calidad.

Ahusada (Coeficiente de ahusamiento $\geq 5 \text{ cm/m}$): Se califica con 0 y corresponde a la Tercera Calidad.

- Presencia de manchas y/o pudrición:

Si no existen: Se califica con 2 y corresponde a la Primera Calidad

Si hay presencia solo de manchas: Se califica con 1 y corresponde a la Segunda Calidad.

Si hay presencia de pudrición: Se califica con 0 y corresponde a la Tercera Calidad.

b) Madera aserrada:

- Número de troza de procedencia.

- Espesor ancho y largo de las tablas en el sistema inglés y en el sistema métrico.

Procesamiento de datos

Con la información recopilada se realizaron los siguientes cálculos:

a) Volumen de madera rolliza:

Se estimó aplicando la Fórmula de Smalian:

$$V_r = \pi \frac{D^2 + d^2}{8} L$$

Donde:

V_r : Volumen rollizo en m^3 .

D: Diámetro promedio mayor (m) sin corteza.

d: Diámetro promedio menor (m) sin corteza.

L: Longitud de la troza en metros.

b) Volumen de madera aserrada:

Se determinó para cada troza mediante la siguiente expresión:

$$V_s = \sum e_{ij} \cdot a_{ij} \cdot l_{ij}$$

V_s : Volumen aserrado en m^3 .

e_{ij} : Espesor de la tabla "j" perteneciente a la troza "i".

a_{ij} : Ancho de la tabla "j" perteneciente a la troza "i".

l_{ij} : Longitud de la tabla "j" perteneciente a la troza "i".

i: 1, 2, 3, ..., 85.

j: 1, 2, 3, ..., n.

Determinación del Coeficiente de Conversión

El Coeficiente promedio de Conversión se calculó aplicando la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente de Conversión} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{85} \frac{V_{s_i}}{V_{r_i}}\right)}{85}$$

Donde:

V_{s_i} : Volumen aserrado de la troza i .

V_{r_i} : Volumen rollizo de la troza i .

i : 1, 2, 3, ..., 85.

d) Determinación del Rendimiento (%)

El Rendimiento se obtuvo con la siguiente expresión:

Rendimiento (%) = Coeficiente de Conversión Promedio \times 100

e) Calidad de la troza.

Se determinó sumando las calificaciones asignadas de acuerdo con las categorías para: forma de la sección transversal, rectitud de la troza, conicidad y presencia de manchas y/o pudrición de la troza. De esta manera, las trozas con una calificación mayor o igual a 9 se clasifican en la primera categoría; una calificación de 8 a 7 las clasifica en la segunda categoría y las calificadas con menos de 7 se clasifican en la tercera categoría. Esta calificación obedece a la prioridad de los criterios forma de la sección transversal y rectitud de la troza sobre los otros criterios para la clasificación de trozas provenientes de plantaciones.

f) Clasificación de la madera aserrada por dimensiones

- La madera aserrada se agrupó bajo las siguientes categorías, siguiendo la propuesta de Llavé, (2008):

- Comercial: espesor de 1 a 4 pulgadas, ancho desde 6 pulgadas y longitud de 6 a 16 pies.

- Larga angosta: espesor de 1 a 4 pulgadas, ancho menor a 6 pulgadas y longitud de 6 a 16 pies.

- Corta: espesor de 1 a 4 pulgadas, ancho desde 4 pulgadas y longitud menor a 6 pies.

- Especial: espesor desde $\frac{3}{4}$ de pulgada, ancho menor a 4 pulgadas y longitud menor a 6 pies.

Análisis estadístico

Se determinaron las medidas de tendencia central y de dispersión considerando las variables de las medidas de la troza (diámetros y longitud), así como también el coeficiente de conversión.

Para la determinación del volumen aserrado se evaluó como variables predictoras a las medidas de la troza, en un modelo lineal simple y múltiple, así como también al coeficiente de conversión. El método utilizado para el análisis fue la regresión lineal con validación cruzada de $k = 10$ pliegues. Ella se realizó con el programa estadístico R (R Core Team 2024) y con el paquete "caret" (Kuhn 2008). Se comprobó además que el modelo elegido cumpliera con los supuestos del Análisis de Residuales. La selección del mejor modelo para predecir el volumen aserrado se realizó haciendo un ranking del mejor comportamiento del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio absoluto (MAE).

Resultados

Caracterización de la madera rolliza

En el Cuadro 2 se presentan los valores de diámetro promedio de troza, longitud de troza y Coeficiente de conversión de madera rolliza a madera aserrada para la especie *Pinus patula* obtenidos en el presente estudio mientras que en el Cuadro 3 se puede observar la clasificación de las trozas de acuerdo con su calidad.

Se realizó un análisis de regresión entre el diámetro promedio y el coeficiente de rendimiento, hallándose la siguiente relación:

$$\text{Coef. Rdto} = 36.9654 + 0.2492\text{Diám. Promedio}$$

Esta relación tiene un R^2 de 0.15. En términos prácticos, se podría decir que el diámetro no explica el coeficiente de rendimiento.

Máquinas del aserradero	Características
Sierra principal de cinta	<p>Marca: Turbina LTDA – Brasil Fabricación: 06/93 Peso: 800 kg Motor: Trifásico de 20 cv, marca WEG (Brasil) Diámetro de volante: 81.20 cm (32") Ancho de cinta: 8.89 cm (3 ½") Dientes: Simples sin estilizado. Ancho de corte: 3 mm Mantenimiento: semanal</p>
Carro portatroza	<p>Marca: Turbina LTDA – Brasil Fabricación: 07/93 Motor del winche: trifásico 5 hp Cable de winche: 20 m x ½" de diámetro. Funcionamiento: hidráulico, sistema de tres fases. Longitud de rieles: 13 m; Distancia entre rieles: 1 m Ancho del carro: 4 m Número de ruedas: 8; Número de escuadras: 4 Graduación de corte: Manual de ½ a 3 pulgadas Volteo de trozas: manual Mantenimiento: semanal</p>
Despuntadora	<p>Tipo: péndulo de disco Marca: Turbina LTDA – Brasil Motor: Trifásico WEG, 5 cv Número de sierras: 01 Diámetro de disco: máximo 50.8 cm (20") Tipo de dientes: Reforzados Ancho de corte: 5 mm Número de rodillos: 16 Longitud de mesa de apoyo: 7 m Mantenimiento: semanal</p>
Canteadora	<p>Marca: Diseñada en Cajamarca Motor: Trifásico, 12hp, DELCROSA SA – Perú, 1746 r/m Transmisión: 2 fajas en V. Diámetro del disco: máximo 25.4 cm (10") Tipo de dientes: Fijos Afilado del disco: cada dos días Número de guías: una con dos escuadras Capacidad máxima de corte: 27.9 cm (11") Ancho de corte: 5 mm Mantenimiento: semanal</p>

Cuadro 1. Características de las máquinas del aserradero.

Calidad de las trozas

Como se observa en el Cuadro 3, la calidad del 81.1 % de las trozas (69) corresponde a Primera, mientras que tan solo 4.7 % son de Tercera.

Caracterización de la madera aserrada

En el Cuadro 4 se observa la clasificación de la madera aserrada en base a sus dimensiones. Se debe señalar que el aserrío de las 85 trozas generó 577 piezas de distintas dimensiones.

Variable	Estimador	Valor a los 22 años
Diámetro menor (sin corteza)	Media aritmética (cm)	23.61
	Desviación Estándar (cm)	4.16
	Coefficiente de Variación (%)	17.63
Diámetro Promedio (sin corteza)	Media aritmética (cm)	25.14
	Desviación Estándar (cm)	4.90
	Coefficiente de Variación (%)	19.46
Longitud de Troza	Media aritmética (m)	2.43
	Desviación Estándar (m)	0.28
	Coefficiente de Variación (%)	11.58
Coefficiente de Conversión	Media Aritmética (%)	0.43
	Desviación Estándar	0.06
	Coefficiente de Variación (%)	12.73

Cuadro 2. Medidas de tendencia central y dispersión.

Criterio	Categorías		
	Primera	Segunda	Tercera
Forma de sección	60	11	4
Conicidad	70	15	0
Rectitud	61	10	4
Manchas u hongos	69	16	0
Calidad de troza	69	12	4

Cuadro 3. Calidad de las trozas aserradas en el estudio de rendimiento.

Denominación	Nº de Piezas	Volumen (pt)	Volumen (%)
Comercial	103	566 ⁸	29.3
Larga angosta	49	158	8.2
Corta	51	158 ¹⁰	8.2
Especial	374	1051	54.3
Total	577	1934⁶	100

Cuadro 4. Distribución de piezas aserradas según su clasificación por dimensiones

N°	Mejor modelo	RMSE	R ²	MAE	Ránking
1	$Vol_a = -21.4 + 1.87Diám_{min}$	4.71	0.76	3.52	1
2	$Vol_a = -16.69 + 1.57Diám_{prom}$	4.90	0.74	3.57	2
3	$Vol_a = -18.78 + 0.96Coef.Rdto$	7.27	0.38	5.92	3

Cuadro 5. Modelos de regresión propuestos.

Es decir, en promedio se obtuvo 6.8 tablas por troza con una desviación estándar de 2.3 tablas por troza. El mayor volumen de madera aserrada pertenece a la denominación Especial (54.3 %), seguido por la denominación Comercial (29.3 %). La alta frecuencia en tablas de denominación Especial se debe a que el espesor comúnmente dado a las tablas es $\frac{3}{4}$ " lo cual se observa en 343 tablas (59.4 %).

Análisis de regresión

En el Cuadro 5 se observa el mejor modelo tras la validación cruzada, el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R²), el error absoluto medio (MAE) y el ránking de los modelos en función a las medidas de error. El Modelo 1 predice el comportamiento del Volumen aserrado a partir de la variable independiente Diámetro mínimo; el modelo 2 lo hace utilizando el Diámetro promedio; y el modelo 3 utiliza el coeficiente de rendimiento. En la Figura 1 se aprecia el comportamiento de las 10 regresiones obtenidas por la validación cruzada del Diámetro mínimo versus el Volumen aserrado.

Discusión

El diámetro promedio de la muestra de 25.1 cm, para trozas de 22 años, tal como se aprecia en el Cuadro 2, supera en 7.8 cm al diámetro promedio obtenido por Del Pozo (1996), quien evaluó la misma plantación a los 11 años. Esta diferencia es atribuible a la edad.

La longitud promedio y el bajo coeficiente de variación de las trozas de 2,4 m se deben a que en el bosque se busca que las trozas tengan 8 pies de longitud. Sin embargo, en algunas oca-

siones, tras obtener la mayor cantidad de trozas de 8 pies de largo también se lleva al aserradero el resto del tronco que mide menos de 8 pies.

El coeficiente de conversión en aserrío de 0.432 representa un rendimiento comercial de 43.2%. Este rendimiento se encuentra dentro del rango de 35.2 % a 43.3 %, establecido por Murara *et al.* (2005) para el aserrío convencional. Sin embargo, se considera bajo respecto al 52 % sugerido por la Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (Schrewe, 1981). Y también es bajo en comparación con otros valores hallados para el mismo género en Brasil (Dobner 2012), Colombia (Herrera y Leal-Pulido 2012) y México (Nájera 2012). Para Cajamarca, el Coeficiente de Conversión del presente estudio aumentó en 0.04 con respecto al determinado por Del Pozo (1996). Este resultado confirma la tendencia encontrada por Sulca (2021) de que el factor de conversión en aserrío aumenta con el incremento del diámetro, pero contradice a Murara *et al.* (2005) quien afirma que en el aserrío convencional no hay mejora en el rendimiento cuando aumenta el diámetro.

Relación rendimiento vs diámetro

A pesar de que la relación entre el diámetro y el rendimiento no muestre una tendencia definida, se puede señalar que existe un cambio en el comportamiento de las variables, cuando comparado con lo hallado por Del Pozo (1996) en la misma plantación a los 11 años, se verificó una relación inversa entre dichas variables. Este cambio de tendencia se explica por la afirmación de Murara *et al.* (2005) de que en el aserrío optimizado el rendimiento presentó una tendencia a aumentar cuando el

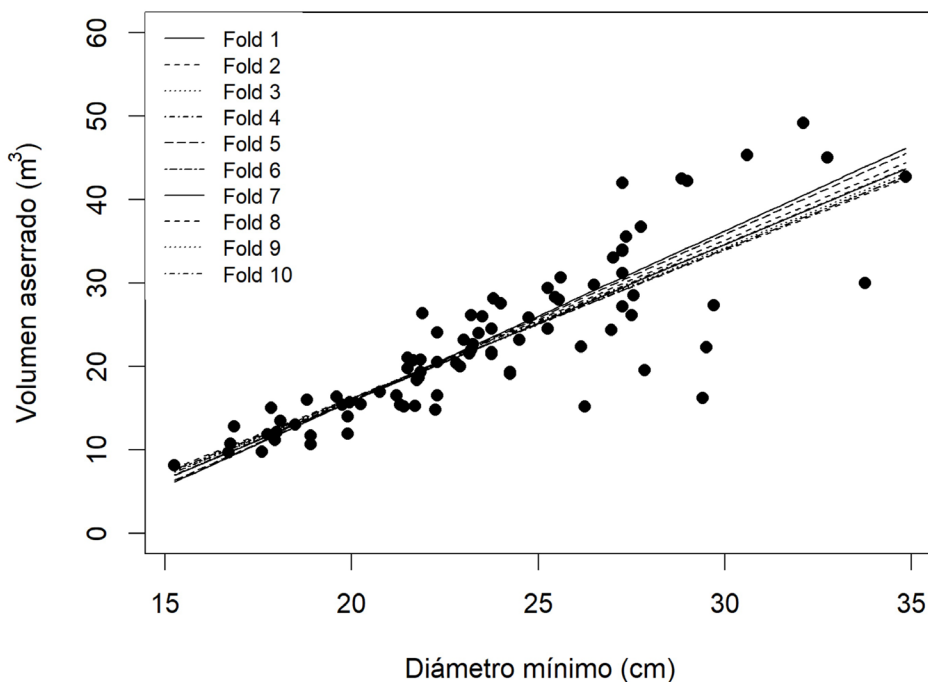


Figura 1. Visualización de ajustes de modelos de regresión lineal para la predicción del volumen aserrado vs. el diámetro mínimo mediante validación cruzada ($k = 10$)

diámetro aumentaba, señalando que cuando se trabaja con madera de plantaciones, como el caso de los pinos, los diámetros de las trozas disminuyen y se homogenizan facilitando la utilización de técnicas de optimización en el aserrío.

Calidad de las trozas

Las trozas evaluadas muestran una gran mejoría en la calidad con respecto a lo evaluado por Del Pozo (1996) quien señala que las trozas utilizadas en su estudio eran torcidas y presentaban, en su gran mayoría, nudos resaltantes (69 %). Ello se debe a la implementación de buenas prácticas de manejo, ya que antes de llegar al aserradero las trozas son clasificadas en campo, donde se eligen las trozas de mejores características para el aserrío, considerando como criterio de selección las trozas más rectas y con un diámetro mínimo de 6 pulgadas en el extremo menor, libres de defectos tales como curvaturas, sinuosidades y abultamientos.

Según Vignote y Martínez (2006) los defectos en la madera rolliza (curvatura, conicidad y médula excéntrica) llevan consigo una merma de rendimientos en el proceso de aserrío o una transmisión de esos defectos a un porcentaje de las piezas aserradas. Sulca (2021) evidencia que el rendimiento disminuye en las trozas de mala calidad determinada por la alta cantidad de defectos.

Análisis de regresión

Adicionalmente, a los modelos del Cuadro 5, se evaluaron modelos de regresión múltiple considerando a la variable longitud de troza como segunda variable predictora. Dado que las trozas se dimensionan a 8 pies de longitud previo a su traslado al aserradero, la variable longitud de troza no presenta variabilidad. Ello produce un incumplimiento de supuestos para el modelo y hace que el ANOVA sea inválido. Por ello, no se presentan dichos modelos en el Cuadro 5.

El análisis de validación cruzada con 10 pliegues divide los datos en diez grupos, y usa nueve grupos para entrenar el modelo, y en el grupo restante se mide el ajuste de dicho modelo. Este proceso se repite 10 veces, rotando el grupo de prueba, lo que permite evaluar la capacidad predictiva de los modelos usando todos los datos disponibles. Finalmente, se eligió el modelo con la estimación más robusta en función del RMSE, R^2 y MAE. En la Figura 1, se observa el cambio de comportamiento en los distintos modelos. En el Cuadro 5 se observa que el modelo que mejor predice el volumen aserrado a obtener es el construido a partir del diámetro mínimo, dado que tiene mayor coeficiente de determinación (R^2) y menores medidas de error (MAE y RMSE). El diámetro mínimo es, además, en términos prácticos, más fácil de medir que el diámetro promedio, por lo que se sugiere su uso para una mejor estimación de los volúmenes de madera aserrada a obtener.

Conclusiones

Las trozas de raleo de *Pinus patula* de 22 años con un diámetro promedio de 25,1 cm tienen un rendimiento promedio en aserrío de 43.2 % que se considera bajo. El aumento en el Rendimiento de las trozas de *Pinus patula* de 22 años respecto a las trozas de 11 años se explica principalmente por el aumento en diámetro y la mejora en calidad de las trozas. El mejor predictor del rendimiento a madera aserrada es el diámetro mínimo, siendo además este valor de mayor facilidad en su medición. Finalmente, los criterios de calidad de troza deben ser cuantificados en estudios futuros para poder evaluar su efecto en el coeficiente de conversión.

Agradecimientos

El presente estudio fue posible gracias al auspicio de la Asociación Civil para la Investigación y el Desarrollo Forestal (ADEFOR) de Cajamarca-Perú.

Contribución de los autores

RMM: redacción y análisis de datos. MMC: redacción y análisis de datos.

Conflicto de intereses

Los autores no incurrir en conflictos de intereses.

Fuentes de financiamiento

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de ninguna agencia de financiación, sector gubernamental ni comercial o sin fines de lucro.

Aspectos éticos / legales

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos ni haber omitido normas legales.

ID ORCID

Rolando Montenegro Muro

<https://orcid.org/0000-0002-7300-856X>

Miguel Meléndez Cárdenas

<https://orcid.org/0000-0003-2278-2771>

Referencias

- Almeida, M; Sacone, B; Sousa, R. 2014. Análise de aproveitamento no desdobro de madeira serrada – *Pinus* spp. Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas 4: 1-4. Disponible en <https://revista.fait.edu.br/cloud/artigos/2024/05/20240503204811-01188.pdf>.
- Bustamante, N. 2016. Guía de Prácticas del Curso Aserrado de la Madera. Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Industrias Forestales, Sección de Aserrío y Trabajabilidad de la Madera. La Molina, Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 198 p.
- Del Pozo, F. 1996. Factor de Conversión en Aserrío para Productos de Raleo en Plantaciones de Pino Pátula en Cajamarca. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 91 p.
- Dobner, M; Rioyei, A; Pereira, M. 2012. Rendimiento em Serraria de Toras de *Pinus taeda*:

- Sortimentos de Grandes Dimensões. Floresta e Ambiente 19(3): 385-392.
- Esteves, W; Bolzon, G; Lomeli, M; Batista, D. 2010. Estudio de la productividad de corte en madera *Pinus elliottii* utilizando un prototipo de aserradero portátil. Maderas Ciencia y Tecnología 12(1):43-52.
- Guariguata, MR; Arce, J; Ammour, T; Capella, JL. 2017. Las plantaciones forestales en Perú. Center for International Forestry Research. Documento Ocasional 169. Disponible en <https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf/files/OccPapers/OP-169.pdf>.
- Herrera, JF; Leal-Pulido, RO. 2012. Generación de Patrones de Corte a partir de la programación matemática para la planificación táctica-operativa de aserríos madereros. Colombia Forestal 15(2): 227-245.
- Kuhn, M. 2008. Building Predictive Models in R using the caret Package. Journal of Statistical Software 28(5): 1-26. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>.
- Llavé, A. 2008. Factor de Conversión en Aserrío de Trozas de Raleo Provenientes de una plantación de Teca (*Tectona grandis*) en Chanchamayo – Junín. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 99 p.
- Marchesan, R. 2012. Rendimiento e qualidade de madeira serrada de três espécies tropicais. Tesis Mag. Sc. Curitiba, Brasil, Universidade Federal de Paraná. 76 p.
- Murara, M; Pereira, M; Timofeiczky, R. 2005. Rendimiento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologías de desdoble. Floresta. 35(3): 473-483.
- Nájera, JA; Adame, GH; Méndez, J; Vargas, B; Cruz, F; Hernández FJ; Aguirre, CG. 2012. Rendimiento de la madera aserrada en dos aserraderos privados de El Salto, Durango, México. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes 55: 11-23.
- Ospina, C; Hernández, R; Rincón, E; Sánchez, F; Urrego, J; Rodas, C; Ramírez, C; Riaño, N. 2011. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: El *Pinus patula* Schl et Cham. FNC-Cenicafé. Colombia. 104 p. Disponible en https://www.cenicafé.org/es/publications/guia_pinus.pdf.
- Quirós, R; Chinchilla, O; Gómez, M. 2005. Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. Agronomía Costarricense 29(2): 7-15.
- R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en <https://www.R-project.org/>.
- Rodrigues P; Souza, AR; Souza, DV. 2013. Rendimiento na produção de madeira serrada de ipê (*Handroanthus* sp). Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia 9(17): 2315-2329.
- Schrewe, H. 1981. La Industria del aserrío en el Perú. Documento de trabajo N° 8. Proyecto PNUD/FAO/PER/78/003. Lima, PE. 60 p.
- Sulca, K. 2021. Estudio de calidad y rendimiento de la madera rolliza a aserrada para Pino tecunumani (*Pinus tecunumanii* Eguluz & Perry) de la zona de Oxapampa-Perú. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 112 p.
- Tuset, R; Durán, F. 2007. Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Proceso de Utilización. Aserrado de Maderas. Montevideo, Uruguay. Editorial Hemisferio Sur. 370 p.
- Vignote, S; Martínez, I. 2006. Tecnología de la madera. (3ra ed.). Madrid, España. MUNDI-PRENSA Libros S.A. 687 p.