

Impacto del proceso de aserrío en la retención de carbono en productos y subproductos de *Pinus* spp. y *Abies* sp.

Impact of the sawing process on carbon retention in products and byproducts of *Pinus* spp. and *Abies* sp.

Jarinzi Corona-Terán^{1*}

¹ Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, División de Ingeniería Forestal. CP. 51200. Valle de Bravo, México.

cjarinzi@yahoo.com.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Rendimiento maderable; calidad del proceso; trozas; aserraderos; CO₂.

Los árboles capturan dióxido de carbono durante la fotosíntesis y lo almacenan en su madera. Este estudio evaluó el proceso de aserrío de los géneros forestales *Pinus* spp. y *Abies* sp. estimando el carbono almacenado en productos y subproductos. Se analizaron 101 trozas por género, con diámetros de 16 cm a 85 cm, aplicando un coeficiente de aprovechamiento para determinar el porcentaje de madera en rollo, madera aserrada y subproductos. Se aserraron 32.27 m³ para *Abies* y 34.71 m³ para *Pinus*, obteniendo 20.80 m³ y 22.77 m³ de madera aserrada, respectivamente. Los subproductos de *Abies* fueron 11.47 m³, equivalente a 4.35 t de biomasa y 2.19 t de carbono; por otro lado, para *Pinus*, fue estimado en 11.94 m³, equivalente a 5.16 t de biomasa y 3.59 t de carbono. Estos resultados indican que el género *Pinus* almacena mayor cantidad de carbono en subproductos, implicando mayor liberación tras su descomposición.

Abstract

Keywords: Timber yield; process quality; logs; sawmills; carbon dioxide.

Trees capture carbon dioxide during photosynthesis and store it in their parts like wood. This study evaluated the sawing process of the forest genera *Pinus* spp. and *Abies* sp., estimating the carbon stored in products and byproducts. A total of 101 logs per genus, with diameters ranging from 16 cm to 85 cm, were analyzed using a utilization coefficient to determine the percentage of round wood, sawn wood, and byproducts generated. Volumes of 32.27 m³ for *Abies* and 34.71 m³ for *Pinus* were sawn, yielding 20.80 m³ and 22.77 m³ of sawn wood, respectively. The byproducts for *Abies*, amounted to 11.47 m³, equivalent to 4.35 t of biomass and 2.19 t of carbon; for *Pinus*, byproducts were estimated at 11.94 m³, equivalent to 5.16 t of biomass and 3.59 t of carbon. These results indicate that the *Pinus* genus stores a greater amount of carbon in byproducts, implying a higher potential for carbon release upon decomposition.

Recibido: 31 de agosto de 2024

Aceptado: 7 de mayo de 2025

Publicado: 27 de agosto de 2025

Cómo citar: Corona-Terán, J. (2025). Impacto del proceso de aserrío en la retención de carbono en productos y subproductos de *Pinus* spp. y *Abies* sp. *Acta Universitaria* 35, e4346. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2025.4346>

Introducción

El aserrío es una de las actividades menos compleja de las industrias mecánicas forestales. Comprende la manipulación y transporte de las trozas, el aserrado, así como el secado de la madera, su selección y clasificación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 1991). La eficiencia del proceso se evalúa a través de estudios de coeficientes de aprovechamiento y de rentabilidad (Zavala & Hernández, 2000). Estos estudios reflejan la relación entre las características de las trozas, sus dimensiones y su calidad; los productos generados; la proporción de espesores; los refuerzos; la calidad de la madera aserrada; el tipo de maquinaria empleada y la destreza de los operadores. El análisis de estos parámetros se vuelve más importante día con día debido al aumento de precios de la materia prima, a la disminución en calidad y cantidad de la madera en rollo disponible (Zavala, 1996) y a la presencia de un mercado altamente competitivo (Young *et al.*, 2007).

Idealmente, el aserradero produce madera con bordes paralelos y extremos rectangulares y alineados. Sin embargo, las anomalías en el aserrado generan variaciones en el espesor y ancho, lo que requiere un procesamiento adicional, reduce la recuperación, aumenta los costos de producción (Rasmussen *et al.*, 2004) y disminuye los beneficios económicos (Young *et al.*, 2007). Estos factores afectan negativamente el rendimiento del proceso de aserrío.

En este proceso productivo se generan subproductos como aserrín, astilla, viruta, costeras, corteza, lampazos, recortes, entre otros (González *et al.*, 2007). Un volumen importante de estos residuos se acumula en los patios de los aserraderos, convirtiéndose en agentes de contaminación ambiental, pues su disposición final es generalmente la combustión, liberando dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera (Manzanares *et al.*, 2007).

El CO_2 es uno de los gases de efecto invernadero más importantes (Ordóñez & Masera, 2001), contribuye al calentamiento global y aumenta a medida que el ser humano quema combustibles fósiles (Anderson *et al.*, 2016). Se incorpora a las plantas mediante el proceso fotosintético (Montoya *et al.*, 1995), fijando el carbono para la composición de su estructura, tallos, ramas, hojas y raíces (Ordóñez *et al.*, 2008).

El CO_2 en la madera permanece almacenado a lo largo de la vida útil de un producto, como la madera en rollo, leña, madera aserrada, tableros de partículas, contrachapado, entre otros, regresando a la atmósfera después de su tiempo de vida útil (Brown *et al.*, 1998). El objetivo del presente estudio es evaluar el proceso de aserrío de los géneros forestales *Pinus* spp. y *Abies* sp. y la cantidad de carbono almacenado en productos terminados y en los subproductos generados, con la finalidad de identificar áreas de oportunidad que permitan mejorar el proceso de transformación y, con ello, reducir la liberación de CO_2 a la atmósfera.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó en el municipio de San José del Rincón, Estado de México, México. Geográficamente, se localiza entre los paralelos 19° 29' y 19° 47' de latitud norte, los meridianos 100° 01' y 100° 16' de longitud oeste, a una altitud entre 2500 m. s. n. m. y 3700 m. s. n. m. El municipio presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y una precipitación anual comprendida entre 800 mm a 1100 mm, con un rango de temperatura de 8 °C a 14 °C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010). La zona se ubica dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, donde se distribuye de manera natural el bosque de coníferas con la dominancia de especies de los géneros *Abies* y *Pinus*. Los aserraderos son de propiedad privada y se dedican a la producción de madera aserrada en dimensiones comerciales.

Características de la maquinaria del aserradero 1

Se compone de una torre principal sin marca con diámetro de volantes de 1.38 m accionado por un motor Cimins de diésel estacionario de 240 HP, con una sierra cinta de 17.5 cm de ancho en calibre 19; un carro de dos escuadras de 3.5 m de longitud y 1.15 cm de ancho, con 8 m de rieles; una desorilladora de dos discos de 35 cm de diámetro; y un trimmer de dos sierras circulares de 35 cm de diámetro.

Características de la maquinaria del aserradero 2

Se compone de una torre principal sin marca con diámetros de volantes de 1 m accionado por un motor Perkins de diésel estacionario de 240 HP, con una sierra cinta de 15 cm de ancho en calibre 17; un carro de tres escuadras de 4.60 m de longitud y 1.40 m de ancho, con 15 m de rieles, una desorilladora de dos discos de 35 cm de diámetro, un trimmer de dos sierras circulares de 35 cm de diámetro.

Rendimiento maderable

Se estimó el tamaño de muestra en 101 trozas tomadas al azar del patio de trocería (SFF, 1978, citado por Zavala & Hernández, 2000) de cada género. Las trozas seleccionadas fueron marcadas y medidas para determinar su volumen conforme a la fórmula de Smalian (Husch *et al.*, 2003). Se cubicó la madera aserrada obtenida por troza de origen, cada tabla fue medida al milímetro (Romahn & Ramírez, 2010). Se realizó un coeficiente de aprovechamiento, cuya determinación es a través de la relación del volumen de la madera aserrada entre el volumen de la madera en rollo, expresada en porcentaje (SFF, 1978, citado por Zavala & Hernández, 2000). La determinación del volumen de la tira, costera y recorte se cubicó aplicando un factor de apilamiento (Romahn & Ramírez, 2010). En el caso del aserrín, se obtuvo el volumen por diferencia (Zavala, 1981). Se determinó la conicidad de las trozas, definida como la diferencia entre el diámetro mayor y menor, considerando la distancia entre ambos (Scanavaca & García, 2003). Las trozas se agruparon en siete categorías diamétricas con un ancho de clase de 10 cm; se consideró el diámetro mayor sin corteza. La calidad del aserrío de la trocería se analizó de acuerdo con lo sugerido por Brown (2000). A partir de esta información, se evaluó la desviación estándar dentro de la tabla, la desviación estándar entre tablas y la desviación total del proceso (Brown, 2000).

Almacenamiento y carbono liberado

Se determinó la biomasa seca correspondiente (Soto-Sandoval *et al.*, 2000) mediante la siguiente expresión:

$$BT = VT * DM$$

donde BT = Biomasa seca total (t), VT = Volumen total de productos o subproductos (m^3) y DM = Densidad de la madera (kg/m^3).

Se utilizó información de la densidad de la madera por género, estableciendo un promedio de $493.3 kg/m^3$ para *Pinus* y $380 kg/m^3$ para *Abies* (Sotomayor *et al.*, 2005). El carbono almacenado en los productos y el carbono liberado a partir de la descomposición de los subproductos se determinó considerando un factor de conversión de biomasa a carbono igual a 0.5 (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006), utilizando la siguiente ecuación:

$$C = BT * 0.5$$

donde, C = Carbono almacenado o liberado (t), BT = Biomasa seca total (t) y 0.5 = factor de conversión de biomasa a carbono.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza mediante un modelo lineal general. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey. Los análisis estadísticos se hicieron a un nivel de significancia de $p < 0.05$ y una confiabilidad de 95%. Se procesaron con el programa Minitab V.18 (Minitab Inc., 2018).

Resultados

Los valores correspondientes a las categorías diamétricas van de 16 cm a 85 cm (Tabla 1). La calidad de la trocería de las clases segunda y tercera representaron el 100% de las trozas para el género *Abies*, mientras que para el género *Pinus* correspondió el 85% (Figura 1).

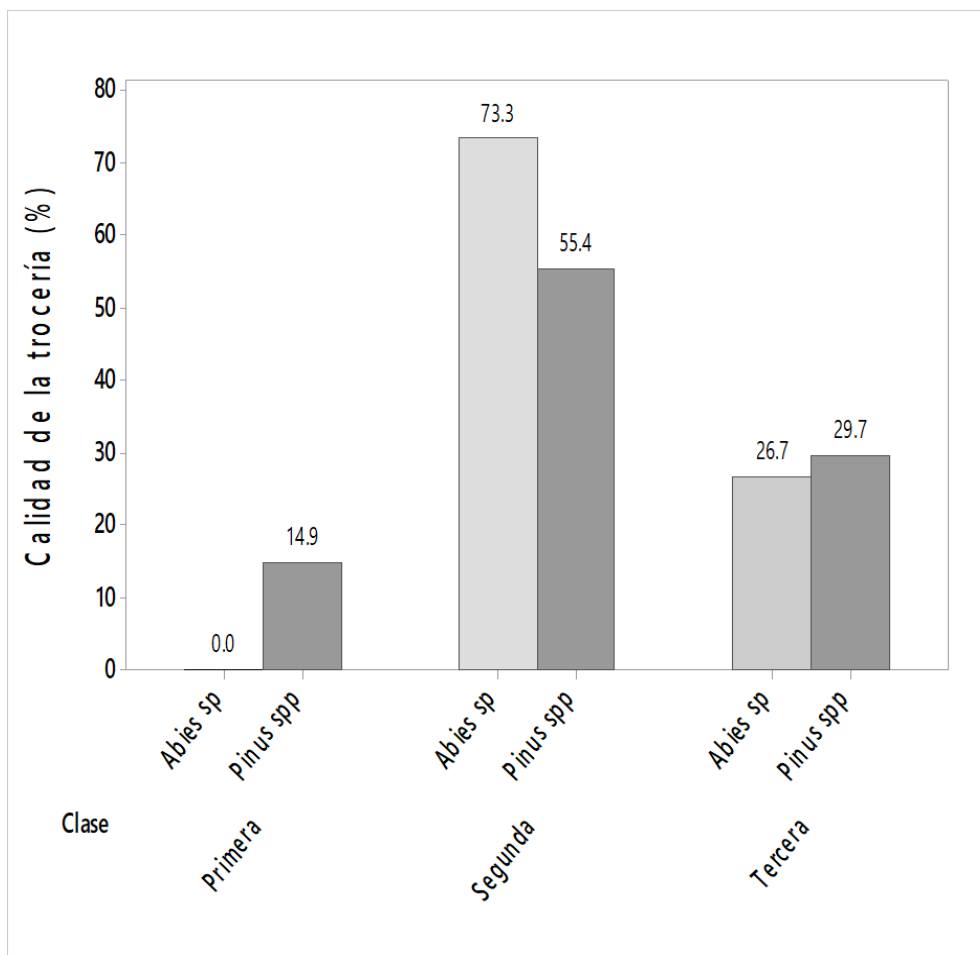


Figura 1. Calidad de las trozas analizadas por género forestal.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Características de las trozas analizadas por género forestal.

Género forestal	Categoría diamétrica (cm)	Trozas por categoría (n)	Categoría de conicidad (cm/m ⁻¹)	Trozas por categoría (n)
<i>Abies</i> sp.	16-25	5	0-1	54
	26-35	28	1.1-2	37
	36-45	38	2.1-3	8
	46-55	18	3.1-4	2
	56-65	6		
	66-75	6		
	Total	101		101
<i>Pinus</i> spp.	16-25	2	0-1	56
	26-35	26	1.1-2	32
	36-45	46	2.1-3	9
	46-55	12	3.1-4	4
	56-65	9		
	66-75	5		
	76-85	1		
	Total	101		101

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento maderable

Se aserró un volumen total de 32.27 m³ rollo en el caso del género *Abies*, obteniendo 20.80 m³ en piezas aserradas. En el caso del género *Pinus*, se aserró un volumen total de 34.71 m³ rollo, obteniendo 22.77 m³ en piezas aserradas. El rendimiento promedio en la producción de madera aserrada fue de 65.59%. El volumen en subproductos se concentró en las tiras (16.23%) para el caso del género *Abies*, mientras que para el género *Pinus* se concentró en el aserrín (13.63%) (Tabla 2).

Tabla 2. Volumen obtenido de la transformación primaria de la madera, por género forestal analizado.

Variable	Sumatoria (m ³)		Media (m ³)		Desv. Std (m ³)		Porcentaje (%)	
	Género <i>Abies</i>	Género <i>Pinus</i>	Género <i>Abies</i>	Género <i>Pinus</i>	Género <i>Abies</i>	Género <i>Pinus</i>	Género <i>Abies</i>	Género <i>Pinus</i>
Volumen en rollo	32.27	34.71	0.32	0.34	0.18	0.18	100.00	100.00
Volumen madera aserrada	20.80	22.77	0.21	0.23	0.13	0.13	64.44	65.59
Volumen costera	2.87	2.70	0.03	0.03	0.01	0.01	8.90	7.79
Volumen tiras	5.24	4.27	0.05	0.04	0.04	0.04	16.23	12.29
Volumen recorte	0.33	0.24	0.01	0.01	0.01	0.01	1.02	0.70
Volumen aserrín	3.04	4.73	0.03	0.05	0.03	0.04	9.42	13.63

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento volumétrico por producto

La producción del aserrío en el género *Abies* se concentró en los polines con un 31.38% del volumen total aserrado. Los anchos nominales de 304.80 mm, 254.00 mm, 203.20 mm, 152.40 mm y un espesor nominal de 22.23 mm representan el 18.32%, mientras que el 14.77% corresponde al ancho nominal de 152.40 mm, con un espesor nominal de 38.10 mm. En el caso del género *Pinus*, la producción de tabloncillos con un espesor nominal de 5.08 mm y un ancho nominal de 304.80 mm representa el 14.60%, mientras que el mismo espesor y anchos nominales de 254.00 mm, 203.20 mm, 152.40 mm y 101.60 mm representan el 16.73%. Los tabloncillos de 3.81 mm de espesor representan el 17.03%; los polines el 16.58%; y las tablas con un ancho nominal de 203.20 mm, 152.40 mm y un espesor de 2.54 mm representan el 0.66%.

Rendimiento volumétrico por clase

Del volumen total de 32.27 m³ rollo correspondiente al género *Abies*, se generaron 1 608 piezas de diferentes dimensiones y clases, de las cuales el 67.5% se clasificó en la clase segunda. Por otro lado, para el género *Pinus* se produjo 1 702 piezas aserradas, con el 53.6% ubicadas en la clase tercera (Tabla 3).

Tabla 3. Rendimiento volumétrico por clase, por género forestal analizado.

Clase	<i>Abies</i> sp		<i>Pinus</i> spp	
	N° de piezas	Porcentaje (100%)	N° de piezas	Porcentaje (100%)
Primera	62	3.9	387	22.8
Segunda	1 086	67.5	376	22.1
Tercera	440	27.4	912	53.6
Cuarta	20	1.2	26	1.5
Quinta	0	0	1	0.1
Total	1 608	100	1 702	100

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento por categoría de conicidad

El rendimiento promedio por categoría de conicidad de las trozas se encontró en el 64.22% para el caso del género *Abies*, mientras que para el género *Pinus* fue de 65.59%. El análisis de varianza no reveló diferencias significativas por categoría de conicidad (Tabla 4).

Tabla 4. Rendimiento por categoría de conicidad de las trozas, por género forestal analizado.

Género forestal	Categoría de conicidad (cm/m ³)	Número de trozas por categoría (n)	Número de piezas	Volumen en rollo (m ³)	Volumen aserrado (m ³)	Rendimiento promedio (%)
<i>Abies</i> sp.	0-1	54	802	15.46	9.92	62.24 ^a
	1.1-2	37	572	11.66	7.63	63.74 ^a
	2.1-3	8	169	3.53	2.33	61.02 ^a
	3.1-4	2	65	1.62	0.91	69.86 ^a
	Total	101	1 608	32.27	20.80	64.22
<i>Pinus</i> spp.	0-1	56	865	16.60	10.96	66.28 ^a
	1.1-2	32	475	10.16	6.53	63.24 ^a
	2.1-3	9	234	4.88	3.19	65.52 ^a
	3.1-4	4	128	3.08	2.09	67.32 ^a
	Total	101	1 702	34.71	22.77	65.59

Nota.^a: medias con la misma letra entre categorías de conicidad no son significativamente diferentes a $p \leq 0.05$.

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento por categoría de diámetro

El rendimiento promedio por categoría diamétrica de las trozas se encontró 63.10% para el caso del género *Abies*, mientras que para el género *Pinus* fue de 63.50%. El análisis de varianza reveló diferencias significativas por categoría diamétrica (Tabla 5).

Tabla 5. Rendimiento por categoría diamétrica de las trozas, por género forestal analizado.

Género forestal	Categoría diamétrica (ancho de clase) (cm)	Trozas por categoría (n)	Número de Piezas	Volumen en rollo (m ³)	Volumen aserrado (m ³)	Rendimiento promedio (%)
<i>Abies</i> sp	16-25	5	26	0.54	0.27	49.57 ^c
	26-35	28	267	5.36	3.03	60.18 ^{bc}
	36-45	38	556	11.43	7.45	65.78 ^{ab}
	46-55	20	433	8.09	5.18	66.59 ^{ab}
	56-65	5	179	3.80	2.75	72.26 ^a
	66-75	5	147	3.03	2.11	69.10 ^{ab}
	Total	101	1 608	32.27	20.80	63.91
<i>Pinus</i> spp	16-25	2	8	0.21	0.10	48.32 ^b
	26-35	26	201	4.15	2.59	62.69 ^{ab}
	36-45	46	735	13.45	8.43	67.04 ^a
	46-55	12	264	5.75	3.82	67.04 ^a
	56-65	9	272	5.76	3.87	67.32 ^a
	66-75	5	164	4.14	3.14	65.87 ^{ab}
	76-85	1	58	1.23	0.82	66.24 ^{ab}
	Total	101	1 702	34.70	22.77	63.50

Nota. Medias con la misma letra entre categorías diamétricas no son significativamente diferentes a $p \leq 0.05$. El superíndice "a" es significativamente diferente de una categoría con una "b" o una "c". El superíndice "ab", significa que no es significativamente

diferente de las categorías marcadas con "a" y no es significativamente diferente de las categorías marcadas con "b". Es como un grupo intermedio que se solapa con ambos.

Fuente: Elaboración propia.

Calidad del aserrío

El análisis se realizó con madera de 0.75 pulgadas de espesor más el refuerzo igual a 1 pulgada (19.05 mm). La desviación total del proceso fue de 1.67 mm para el género *Abies* y de 2.00 mm para el género *Pinus* (Tabla 6).

La desviación entre tablas muestra valores obtenidos de 1.50 mm para el género *Abies* y 1.95 mm para el género *Pinus*, siendo mayor que la desviación dentro de las tablas, correspondiente a 0.82 mm y 0.54 mm para el género *Abies* y el género *Pinus*, respectivamente, ejerciendo una mayor influencia en la desviación estándar total.

Tabla 6. Calidad del aserrío, por género forestal analizado.

Género forestal	Tablas	Media (mm)	Sw (mm)	Sb (mm)	St (mm)
<i>Abies</i> sp	101	25.05	0.82	1.50	1.67
<i>Pinus</i> spp	101	24.78	0.54	1.95	2.00

Nota. Sw = desviación estándar dentro de la tabla; Sb = desviación estándar entre tablas; St = desviación total del proceso.

Fuente: Elaboración propia.

Almacenamiento y carbono liberado

El volumen de subproductos se estimó en 11.47 m³ en el caso del género *Abies*, equivalente a 4.35 t de biomasa y 2.19 t de carbono, que potencialmente puede ser liberado a la atmósfera en poco tiempo. En el género *Pinus*, el volumen de subproductos se calculó en 11.94 m³, equivalente a 5.16 t de biomasa y 3.59 t de carbono (Tabla 7). El subproducto que presentó el mayor volumen fue el de tiras con un total de 5.24 m³ (16.23%). El volumen menor correspondió a recorte, con un total de 0.33 m³ (1.02%). Ambos subproductos del género *Abies*.

Tabla 7. Madera aserrada, subproductos del aserrío y carbono que se libera a la atmósfera.

Variable	Género <i>Abies</i>				Género <i>Pinus</i>			
	V (m ³)	B (t)	C (t)	EC (C %)	V (m ³)	B (t)	C (t)	EC (C %)
Madera en rollo	32.27 ^a	12.26 ^b	6.13 ^b	-	34.71 ^a	15.04 ^a	7.52 ^a	-
Madera aserrada	20.80 ^a	7.90 ^b	3.95 ^b	-	22.77 ^a	9.87 ^a	4.93 ^a	-
Costera	2.87 ^a	1.09 ^a	0.55 ^a	8.9 ^a	2.70 ^a	1.17 ^a	0.59 ^a	7.78 ^a
Tiras	5.24 ^a	1.99 ^a	1.0 ^a	16.23 ^a	4.27 ^a	1.84 ^a	0.92 ^a	12.26 ^b
Recorte	0.33 ^a	0.12 ^a	0.06 ^a	1.02 ^a	0.24 ^a	0.1 ^a	0.06 ^a	0.69 ^a
Aserrín	3.04 ^b	1.15 ^b	0.58 ^b	9.42 ^b	4.73 ^a	2.05 ^a	1.02 ^a	13.63 ^a

Nota. Medias con la misma letra entre categorías diamétricas no son significativamente diferentes a $p \leq 0.05$. V = volumen; B = biomasa;

C = carbono; EC = emisión de carbono.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El rendimiento promedio en la producción de madera aserrada fue de 64.44%, lo que indica que, por cada metro cúbico de madera en rollo, se obtiene 0.6444 m³ de madera aserrada (273.2 pt).

Los valores obtenidos son superiores a lo reportado por Zavala & Hernández (2000), quienes llevaron a cabo un análisis sobre el rendimiento y la utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino, determinando un coeficiente de aprovechamiento nominal de 51%, una proporción de costeras y recortes de 27% y el porcentaje de aserrín de 22%. Los valores también son superiores a lo reportado por Murara *et al.* (2013), quienes evaluaron dos métodos de aserrío para *Pinus taeda*, determinando un rendimiento de 44.21% en el método convencional, mientras que en el método optimizado obtuvieron un rendimiento de 53.60%. Lo anterior indica que no existen dos aserraderos iguales y que las variables que afectan el rendimiento suelen variar de una instalación industrial a otra (FAO, 1991; Steele, 1984), como son las propiedades de la madera; el tipo y sistema de producción utilizado por la industria hasta obtener el producto final (Fontes, 1994); la experiencia y la lógica de los operadores; el posicionamiento y el número de cortes; así como el dimensionamiento de la madera aserrada, con el fin de obtener productos más adecuados y eliminar los defectos de las trozas (Murara *et al.*, 2013).

Contreras-Hernández (2007), en un análisis de eficiencia de un aserradero, determinó para el aserrío de trocería de pino una relación directa entre la calidad de la trocería con la calidad de la madera aserrada, observándose la misma tendencia en un estudio realizado en Oaxaca (Zavala & Hernández, 2000). Esto es consistente con el análisis del presente estudio, donde la trocería para ambos géneros se concentró en segunda y tercera clase, produciendo 31.38% de polines para el caso de *Abies* sp. y 16.58% para el género *Pinus* spp., productos cuyo uso final es la construcción.

Scanavaca & Garcia (2003) analizaron el rendimiento maderable de *Eucalyptus urophylla*, de 19 años de edad, y una conicidad de 0.0156 cm/m, concluyendo que la conicidad no tuvo efecto sobre el rendimiento de la madera aserrada, debido a la edad de los ejemplares. Grosser (1980) afirma que la conicidad influye en el rendimiento con valores superiores a 1 cm/m. Para este estudio, la conicidad no tuvo efecto en el rendimiento maderable, a pesar de que las trozas presentaban conicidad hasta de 4 cm/m. El mayor número de trozas incluidas en la categoría de 0 cm/m⁻¹ a 1 cm/m⁻¹ explica la relación de este parámetro con el rendimiento.

Se observó que el rendimiento maderable se incrementó conforme incrementó la categoría diamétrica. Zavala & Hernández (2000) evaluaron trocería de pino en San Pedro Zimatlán, Oaxaca, con un rendimiento en madera aserrada del 51% sin corteza, sin encontrar una dependencia de aumento conforme aumenta el diámetro de la troza, lo que coincide con Nájera-Luna *et al.* (2011a), quienes encontraron valores del 49% al 51% para trozas de 30 cm a 65 cm. Lo anterior difiere con la tendencia observada en el presente estudio. El rendimiento de la madera se incrementa al incrementarse el diámetro de las trozas (Esteves *et al.*, 2010; Haro *et al.*, 2015; Wade *et al.*, 1992). Diversas investigaciones indican que, a mayor diámetro de las trozas, mayor es su rendimiento, estableciendo una relación positiva. Además, destacan la relevancia del diámetro de las trozas como uno de los factores que más influye en el proceso de aserrío (Leyva *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2016; Rascón & Aguirre, 2023).

De acuerdo con Brown (2000), la relevancia de la desviación estándar total del proceso (St) radica en su capacidad para detectar problemas en el funcionamiento del aserradero. En este estudio se puede observar que la desviación entre tablas es mayor que la desviación dentro de las tablas, ejerciendo mayor influencia en la desviación estándar del proceso.

La desviación estándar dentro de las tablas (Sw) indica cómo el espesor o ancho varía a lo largo de la longitud de la tabla, sugiriendo problemas de velocidad de alimentación y alineación del carro portatrazos. Por otro lado, la desviación estándar entre tablas (Sb) muestra cómo el espesor o ancho varía de una tabla a otra, dentro de la misma línea de la sierra, o dentro de la maquinaria del aserradero, proponiendo examinar el problema. Ambriz *et al.* (2018) determinan que una desviación estándar total del proceso cercana a 0 se establece cuando el grosor final y el grosor promedio de corte son similares.

En un estudio realizado en cinco aserraderos de Durango, México, en madera aserrada de pino, se determinó la desviación estándar total del proceso consistente en 1.54 mm, 1.36 mm, 1.73 mm, 1.30 mm y 1.34 mm (Nájera-Luna *et al.*, 2011b), mientras que en un aserradero en Michoacán el valor obtenido para el género *Pinus* fue de 0.99 mm (Ambriz *et al.*, 2018). En una evaluación de refuerzo de asierre se determinó un valor de 0.85 mm para madera aserrada de pino (Torrecillas-Silva *et al.*, 2020). Los valores obtenidos en este estudio reflejan que la calidad del proceso de aserrío es baja, considerando que la calidad en el proceso de asierre para coníferas es de 0.38 mm (Brown, 1986). El incremento en este valor requiere acciones correctivas a implementar, como limpieza y ajuste de ruedas y rieles, rectificación de las ruedas del carro, ajuste de las guías de la sierra, disminución de la velocidad de alimentación y rectificación de los volantes (Nájera-Luna *et al.*, 2012). Kilborn (2002) determinó, en aserraderos de Alaska, que por una reducción en el sobredimensionamiento de 0.8 mm en el espesor del producto se obtenía una recuperación de 25%.

La desviación entre tablas representa un indicador de la capacidad de los ajustes y alimentadores para producir la misma medida de madera, en forma constante (Vuorilehto, 2001), siendo necesario revisar el método de medición y examinar la repetitividad de las líneas de corte, el espaciado de las mediciones o analizar el origen-máquina del producto. Por otro lado, la desviación dentro de las tablas sugiere una sobrealimentación de la sierra y deficiencias en la alineación de la máquina (Brown, 2000).

Los subproductos que se generan en la industria de transformación o fábrica de contrachapados constituyen aproximadamente del 45% al 55% de la materia prima (FAO, 1991). En la mayoría de los aserraderos, los subproductos derivados del aserrío (costeras, recortes y aserrín) no se cuantifican (Pereira *et al.*, 2014; Zavala & Hernández, 2000). Zavala & Hernández (2000) consideran importante analizar su composición y rentabilidad.

Contreras-Hernández (2007) analizó, en trocería de pino, la proporción de subproductos obtenidos en el proceso de transformación a madera aserrada, concentrando en las costeras el 16.91%, mientras que para el aserrín obtuvo 15.14%. Estas proporciones son menores a las indicadas por Zavala & Hernández (2000), quienes obtuvieron un valor de costeras y recortes de 27% y aserrín de 22%.

La generación de los subproductos está relacionada con el rendimiento maderable, evidenciando una relación inversa directa, es decir, a medida que el rendimiento aumenta, la generación de subproductos tiende a disminuir. En los resultados de este estudio se destaca una estimación más elevada de almacenamiento de carbono, en el caso del género *Pinus* spp. Esto se atribuye no solo al volumen calculado, sino también a una mayor densidad de la madera (Sotomayor *et al.*, 2005), por lo que retiene una mayor cantidad de carbono en los productos elaborados en forma de madera aserrada (4.93 tC), en contraste con el género *Abies* (3.95 tC).

Bámaca *et al.* (2004), en un estudio con especies tropicales, estimaron un coeficiente de aserrío de 45%, generando residuos por 601.33 tC, que se liberan a la atmósfera debido a que no tienen un uso específico, valores que son superiores a los reportados en este estudio.

Conclusiones

El rendimiento promedio en la producción de madera aserrada alcanzó el 64.44% para el género *Abies*, mientras que para el género *Pinus* fue de 65.59%. En cuanto al volumen de subproductos, en el caso del género *Abies* se observó una concentración en las tiras, representando el 16.23%, mientras que para el género *Pinus* se concentró en el aserrín, alcanzando el 13.63%. La calidad de la trocería fue baja, concentrándose en segunda y tercera clase, lo que resultó principalmente en la producción de polines. La conicidad no tuvo efecto en el rendimiento maderable, pero sí el diámetro de las trozas. La calidad del proceso de aserrío fue baja para ambos géneros, lo que podría estar relacionado con diversos factores, como las características de la trocería, el tipo y mantenimiento de la maquinaria empleada o la capacitación de los operadores. A excepción de la calidad de la trocería, el resto de los factores no fueron evaluados directamente en este estudio. Destaca una estimación más alta de almacenamiento de carbono para el género *Pinus*, tanto en madera aserrada como en subproductos. Se recomienda un programa integral de mejora que incluya monitoreo y alineación de la sierra, evaluación y optimización del mantenimiento de la maquinaria, capacitación continua para los operadores y mejoras en la tecnología de la maquinaria; además, se sugiere buscar mercados para los productos generados.

Agradecimientos

La autora agradece a los propietarios de los aserraderos por las facilidades brindadas para la realización de la presente investigación y al Ingeniero Omar Martínez Gómez por el apoyo brindado.

Conflictos de interés

La autora declara que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Ambriz, E., Andrade-Torres, M. Y., & Sosa-Villanueva, H. M. (2018). Rendimiento volumétrico e importancia del control de calidad de madera aserrada de *Pinus* spp. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 12(1), 37-41. <https://revistascientificas.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/132/1970>
- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Bámaca, E. E., Kanninen, M., Louman, B., Pedroni, L., & Gómez, M. (2004). Contenido del carbono en los productos y residuos forestales generados por el aprovechamiento y el aserrío en la Reserva de Biosfera Maya. *Comunicación Técnica. Recursos Naturales y Ambiente*, 102-110. https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/articles/AKanninen0401.pdf
- Brown, S., Lim, B. & Schlamadinger, B. (1998). *Evaluating approaches for estimating net emissions of carbon dioxide from forest harvesting and wood products*. Report of a meeting sponsored by the IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/pdfiles/dakar.pdf>
- Brown, T. D. (1986). *Lumber size control*. Forest Research Laboratory. Oregon State University.
- Brown, T. D. (2000). *Lumber size control, part 2: size analysis considerations*. Oregon State University. <https://lumberquality.com/wp-content/uploads/2014/12/Performance-Excellence-EM8731.pdf>
- Contreras-Hernández, E. (2007). *Análisis de la eficiencia del aserradero del Tarahumar y Bajíos del Tarahumar, Tepehuanes, Durango, para incrementar su productividad* (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Esteves, W. L., Bolzon, G. I., Lomeli, M. G., & Batista, D. C. (2010). Estudio de la productividad de corte de madera de *Pinus elliotii* utilizando un prototipo de aserradero portátil. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 12(1), 43-52. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/1380/1328>
- Fontes, P. J. P. (1994). *Auto-suficiência energética em serraria de Pinus e aproveitamento dos resíduos* (Tesis de Maestría). Universidade Federal do Paraná. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/28882>
- González, P., Alvarez, V., Stange, M., Herrera, C., Cohen, M., & Pardo, E. (2007). *Residuos de la industria primaria de la madera, Disponibilidad para uso energético*. Comisión Nacional de Energía. https://energypedia.info/images/0/Of/Potencial_Residuos_Madereros_GTZ.pdf
- Grosser, D. (1980). *Defeitos da madeira*. Série Técnica FUPF.
- Haro, A. J., Nájera, J. A., Méndez, J., Corral, S., Hernández, J. C., Carrillo, A., & Cruz, F. (2015). Factor de conversión de productos forestales en la industria de tarimas en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(30), 90-105. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n30/v6n30a8.pdf>
- Husch, B., Miller, C., & Beers, T. (2003). *Forest mensuration*. John Wiley & Sons.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. San José del Rincón, México. Clave geoestadística 15124*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15124.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: agriculture, forestry, and other land use*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Kilborn, K. A. (2002). *Lumber recovery studies of Alaska sawmills, 1997 to 1999*. USDA. <https://www.arlis.org/docs/vol1/B/50065279.pdf>
- Leyva, I., Álvarez, D., La O. Y., Céspedes, G., & Segurado, Y. (2020). Rendimiento y calidad dimensional de la madera aserrada de *Samanea saman* Jacq. en el Aserradero de la Empresa Agroforestal Guantánamo. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(3), 507-518. https://www.researchgate.net/publication/348407104_Rendimiento_y_calidad_dimensional_de_la_madera_aserrada_de_Samanea_saman_Jacq_en_el_Aserradero_de_la_Empresa_Agroforestal_Guantanamo
- Manzanares, K., Velázquez, D., & Guyat, M. A. (2007). Experiencia del aprovechamiento de los residuos en un aserrío. *Ciencia e Investigación Forestal*, 13(2), 325-334. <https://revista.infor.cl/index.php/infor/article/view/286/287>

- Minitab Inc. (2018). *Minitab statistical software Minitab Release*, 17.2.1.
- Montoya, G., Soto, L., de Jong, B., Nelson, K., Farias, P., Yakactic, P., Taylor, J. H., & Tippe, R. (1995). *Desarrollo Forestal Sustentable: captura de carbono en las zonas Tzeltal y Tojolabal del estado de Chiapas*. Instituto Nacional de Ecología.
https://www.researchgate.net/publication/242232842_Desarrollo_forestal_sustentable_Captura_de_carbono_en_las_zonas_tzeltal_y_tojolabal_del_estado_de_Chiapas/link/00b4953baacee8965a000000/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIn19
- Murara, M. I., Pereira, M., & Trugilho, P. F. (2013). Estimativa do rendimento em madeira serrada de pinus para duas metodologias de desdobro. *Floresta e Ambiente*, 20(4), 556-563.
<https://www.floram.org/article/10.4322/floram.2013.037/pdf/floram-20-4-556.pdf>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas, J. J., & Vargas-Larreta, B. (2011a). Tiempos y rendimientos del aserrío en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 199-213.
<https://www.redalyc.org/pdf/629/62919277003.pdf>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas, J. J., & Vargas-Larreta, B. (2011b). Rendimiento volumétrico y calidad dimensional de la madera aserrada en aserraderos de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 77-91.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000200007&script=sci_arttext
- Nájera-Luna, J. A., Montañez-Rivera, J. T., Méndez-González, J., Hernández, F. J., Vargas-Larreta, B., Cruz-Cobos, F., & Aguirre-Calderón, C. G. (2012). Evaluación de acciones correctivas tendientes a mejorar la calidad dimensional de la madera aserrada de *Pinus* spp en Durango, Méx. *Investigación y Ciencia*, 20(54), 22-29.
<https://biblat.unam.mx/es/revista/investigacion-y-ciencia-universidad-autonoma-de-aguascalientes/articulo/evaluacion-de-acciones-correctivas-tendientes-a-mejorar-la-calidad-dimensional-de-la-madera-aserrada-de-pinus-spp-en-durango-mex>
- Ordóñez, J. A. B., & Masera, O. (2001). La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3-12.
<https://doi.org/10.21829/myb.2001.711314>
- Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H. J., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. V., Guerrero, G., Martínez, R., & Masera, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, México. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2074-2084.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.024>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1991). *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales*. <https://www.fao.org/4/T0269S/T0269S00.htm>
- Ortiz, R., Martínez, S. D., Vázquez, D. E., & Juárez, W. S. (2016). Determinación del coeficiente y calidad de aserrío del género *Pinus* en la región Sierra Sur, Oaxaca, México. *Colombia Forestal*, 19(1), 79-93.
<https://www.redalyc.org/journal/4239/423943446006/html/>
- Pereira, C., Ferreira, E., & Stachiw, R. (2014). Produção e destinação dos resíduos gerados em serrarias no município de Rolim de Moura – RO. *Revista Brasileira de Ciências da Amazônia*, 3(1), 47-56.
https://www.rosalvoescritor.com.br/_files/ugd/e133e3_156c2179464b4bbe8ba1ed8b42c102a3.pdf?index=true
- Rascón, J., & Aguirre, O. A. (2023). Rendimiento de aserrado en el sureste del estado de Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 266-293. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1347>
- Rasmussen, H. K., Kozak, R. A., & Maness, T. C. (2004). An analysis of machine-caused lumber shape defects in British Columbia sawmills. *Forest Products Journal*, 54(6), 47-56.
https://www.academia.edu/12612292/An_analysis_of_machine_caused_lumber_shape_defects_in_British_Columbia_sawmills
- Romahn, C. F., & Ramírez, H. (2010). *Dendrometría*. Universidad Autónoma Chapingo.
<https://difo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometría.pdf>
- Scanavaca, L., & Garcia, N. J. (2003). Rendimiento em madeira serrada de *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, (63), 32-43. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr63/cap03.pdf>

- Soto-Sandoval, J. A., Aguirre, J. A., Méndez, J., & Páez, G. (2000). Evaluación económica y ambiental de residuos forestales de Costa Rica. Comunicación técnica. *Revista Forestal Centroamericana*, 29-33.
https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6288/Evaluacion_economica_y_ambiental_pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sotomayor, J. R. (2005). Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 1(1), 1-24.
https://www.researchgate.net/publication/260752809_Caracteristicas_mecanicas_y_clasificacion_de_150_especies_de_maderas_Mexicanas
- Steele, P. H. (1984). *Factors determining lumber recovery in sawmilling. General Technical Repots, FPL-39*. Department of Agriculture. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fplgtr39.pdf>
- Torrecillas-Silva, C. A., Orozco-Contreras, R., Nájera-Luna, J. A., Hernández-Díaz, J. C., Hernández, F. J., De la Cruz-Carrera, R., Corral-Rivas, J. J., & Goche-Télles, J. R. (2020). Evaluación del refuerzo de asierre en madera seca y cepillada del ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57), 87-107.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.645>
- Vuorilehto, J. (2001). *Size control of sawn timber by optical means in breakdown saw machines* (Tesis de Doctorado). University of Technology. <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512256622/isbn9512256622.pdf>
- Wade, M. W., Bullard, S. H., Steele, P. H., & Araman, P. A. (1992). Estimating hardwood sawmill conversion efficiency based on sawing machine and log characteristics. *Forest Products Journal*, 42(11/12), 21-26.
https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_wade004.pdf
- Young, T. M., Bond, B. H., & Wiedenbeck, J. (2007). Implementation of a real-time statistical process control system in hardwood sawmills. *Forest Products Journal*, 57(9), 54-62.
https://www.nrs.fs.usda.gov/pubs/jrnl/2007/nrs_2007_wiedenbeck_001.pdf
- Zavala, D. (1981). *Analysis of the sawmilling practices in the State of Durango, México* (Tesis de Maestría). The University of British Columbia.
<https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0095111?o=2>
- Zavala, D. (1996). Coeficientes de aprovechamiento de trocería de pino en aserraderos banda. *Ciencia Forestal en México*, 21(79), 165-181.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1004/2309>
- Zavala, D., & Hernández, R. (2000). Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques*, 6(2), 41-55. <https://doi.org/10.21829/myb.2000.621374>