



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Tronzado óptimo de fustes a partir de datos tomados con un escáner láser terrestre (TLS) para maximizar el valor de las masas forestales

PRENDES PÉREZ, C.¹, ACUNA, M.², CANGA LÍBANO, E.¹, ORDOÑEZ GALÁN, C.⁴ y CABO GÓMEZ, C.^{3,4}

¹ Área de Geomática. Fundación Centro Tecnológico y Forestal de la Madera de Asturias (CETEMAS).

² Forest Industries Research Centre. Universidad de Sunshine Coast, Australia

³ Facultad de Ciencia e Ingeniería. Universidad de Swansea.

⁴ Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo

Resumen

La morfología de un árbol influye notablemente en el valor de los productos comerciales obtenidos a partir de él. Por ello, conseguir un tronzado óptimo es clave para maximizar los beneficios. Este estudio presenta una metodología para evaluar el potencial del escaneado láser terrestre (TLS) en la estimación de diámetros a lo largo del fuste para posteriormente introducir los resultados en un algoritmo de tronzado óptimo. El tronzado se optimiza en base a los productos forestales incluidos en el algoritmo (Aserrables 1,2,3; Chapa; Pulpable). La metodología propuesta se evaluó en una parcela de *Pinus radiata* con datos TLS y se comparó con los procedentes de una función de perfil. Aunque el valor total de la parcela fue similar en ambos casos, para los diámetros calculados con TLS el diámetro de la cara menor de cada troza es menos limitante que para la función de perfil. Consecuentemente, para los datos TLS el número de trozas de mayor valor es superior y su longitud más corta. Sin embargo, en el producto de menos valor (Pulpable), la función de perfil produce más trozas que el TLS porque el algoritmo trata de paliar la falta de productos de más valor cortando más trozas pulpables.

Palabras clave

Metodología, diámetros, productos forestales, modelo de tronzado óptimo, programación dinámica.

1. Introducción

Con el fin de hacerlos aptos para ser procesados, los árboles que se talan en el monte se cortan generalmente en piezas más pequeñas que reciben el nombre de trozas (KIVINEN, 2007). Esta operación, conocida como “tronzado”, es un paso crítico en la conversión de la madera en pie en productos finales y juega un papel fundamental a la hora de determinar la rentabilidad de una empresa o propietario forestal (ACUNA Y MURPHY, 2005). Las decisiones sobre cómo realizar el tronzado en el momento de la corte del árbol condicionan las características, la cantidad y el valor de los productos que se puedan obtener de él de forma que un tronzado mal ejecutado conduce a la pérdida de valor del árbol, como se ha demostrado diversos estudios (LABELLE AND HUß, 2018; PILKERTON et al., 2013; SPINELLI et al., 2011).

La determinación de un patrón de corte que garantice el tronzado óptimo considerando las características individuales de cada tronco es uno de los principales objetivos, y a la vez de los principales desafíos, a los que se enfrentan los gestores forestales. Según ARCE et al., (2004) esta tarea la realiza casi exclusivamente el operario de la procesadora/motosierra, basándose en su intuición, lo que puede comprometer la rentabilidad del negocio forestal (SILVA et al., 2020).

Por esta razón, son varios los autores que señalan la necesidad de una perspectiva más analítica que permita obtener patrones de tronzado basados en mediciones objetivas aplicables a distintas especies y características de los fustes. La determinación del tronzado óptimo a nivel de árbol individual se puede llevar a cabo con distintas técnicas, las cuales incluyen programación

dinámica (DP), programación de redes, simulación y programación lineal entera (BRIGGS 1980; NASBERG 1985; SESSIONS 1988). Una de las limitaciones al utilizar modelos de tronzado es que rara vez se dispone de los datos necesarios para la obtención de buenos resultados. Algunos sistemas de inventario previo al aprovechamiento proporcionan descripciones detalladas de una pequeña muestra de árboles que se pueden utilizar como base para determinar precios relativos y especificaciones antes de que la cosechadora se traslade a un rodal (MURPHY et al., 2004). Por ello el grado de representatividad de la masa que tengan los datos seleccionados en el inventario influirá de manera importante en los resultados. Además, el proceso de medición en campo es laborioso y por tanto caro, sin olvidar que las bases de datos de los fustes recopiladas durante el inventario no incluirán información sobre sus defectos (y por tanto de su calidad de madera). Por un lado, una opción viable para la obtención de datos que alimenten al algoritmo de tronzado sería usar funciones de perfil, ecuaciones matemáticas que relacionan el diámetro o el radio del tronco con la altura a la que se alcanza dicho diámetro o radio. Constituyen una importante herramienta de gestión, ya que midiendo el *dbh* (diámetro a la altura del pecho) y la *h* (altura total) permiten estimar tres características básicas de los árboles (i) diámetros en cualquier punto del tronco, (ii) altura del tronco a la que se localiza un cierto diámetro y (iii) volumen entre dos diámetros o alturas del tronco, o volumen hasta un diámetro o altura límite de utilización (Canga et al., 2008). Las funciones de perfil son de fácil aplicación, pero a costa de realizar una simplificación del tronco, suponiendo que se trata de fustes con cierto ahusamiento cuyos diámetros van en descenso a medida que aumenta la altura y que no presentan ramas ni defectos.

Por otro lado, el uso de técnicas de teledetección, más concretamente del TLS, ha demostrado ser de gran utilidad en la estimación de variables del tronco (CABO et al., 2018a; PITKÄNEN et al., 2019; PRENDÉS et al., 2021). El hecho de que el escáner tome datos desde el suelo hace posible obtener una nube de puntos de alta resolución y precisión de la estructura del tronco a nivel de árbol individual, permitiendo el modelado 3D de los troncos (ZONG et al., 2021). De esa forma, es posible realizar mediciones de distinta índole a lo largo del fuste (diámetros, alturas, variables de forma, ramosidad, etc.) al igual que variables de forma sin la necesidad de apear el árbol (LIANG et al., 2016). Estos datos se pueden utilizar de forma directa en los algoritmos de tronzado, pero para poder hacerlo de forma eficiente es necesario desarrollar herramientas que permitan transformar los datos de la nube cruda en variables de interés forestal que se puedan introducir en el algoritmo de tronzado de forma automática.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es doble: (1) Utilizar los diámetros estimados a partir de datos capturados con TLS para introducirlos en un algoritmo de tronzado óptimo que decide cómo cortar cada fuste en función de sus características para maximizar su valor económico (2) Repetir el proceso alimentando el algoritmo de tronzado con diámetros calculados con una función de perfil y comparar con los resultados obtenidos con TLS en términos del número de trozas, volumen y valor económico.

3. Metodología

3.1 Zona de estudio

El área de estudio está ubicada en Asturias (Figura 1A). En el invierno 2005–2006 se establecieron cuatro ensayos de poda en rodales monoespecíficos de *Pinus radiata* cubriendo toda el área de distribución de esta especie en la región (HEVIA et al., 2018). Los ensayos se distribuyeron de forma que se incluyeran diferentes calidades de estación seleccionando rodales jóvenes (de 7 a 11 años) sin tratamientos previos de podas o clareos y donde los árboles tuviesen un diámetro adecuado para las intervenciones de poda. De estos cuatro ensayos, se eligió la parcela que está situada en el concejo de Villaviciosa ($43^{\circ} 4'5.00''$ N $11^{\circ} 27'17.46''$ W). La parcela tiene una superficie aproximada de 5.000 m² con suelo arcillo-arenoso y una pendiente media de 22,3 °. El diámetro

medio de la masa es de 22,6 cm y su altura media de 17,7 m. En cuanto al sotobosque hay una ligera presencia de diferentes especies de arbustos y helechos (*Ulex europaeus* y *Pteridium aquilinum* mayoritariamente).

3.2 Toma de datos

La adquisición de datos se realizó en la parcela descrita en la zona de estudio en febrero de 2018 utilizando un láser escáner terrestre Leica P40. Con el objetivo de fusionar las nubes de puntos de los escaneos individuales en una sola nube con un sistema de coordenadas unificado, se utilizaron varias dianas de madera de 12x20 cm fijadas a jalones topográficos (Figura 1B). Se numeraron del 1 al 21 para facilitar su identificación en la nube de puntos resultante. Además, se tomó su posición en campo mediante un GNSS (*Global Navigation Satellite System*), para dotar a la nube final de coordenadas absolutas.

Finalmente, se midió el *dbh* y *h* de todos los árboles dentro de la parcela utilizando una forcípula y un hipsómetro digital (Vertex IV 360°). Paralelamente al inventario de campo, todos los individuos fueron geoposicionados con ayuda del GNSS y una estación total, haciendo posible la identificación de todos los árboles medidos en campo en la nube de puntos. Esto permitió poder relacionar las mediciones tomadas con TLS con los datos de inventario a nivel de árbol individual.



Figura 1.A) Masa de *Pinus radiata* dentro de la parcela de estudio B) Dianas de madera utilizadas para la georreferenciación de la nube de puntos.

3.3 Obtención de diámetros a lo largo del tronco

Los diámetros a lo largo del fuste que sirven como datos de entrada para el algoritmo de tronzado se obtuvieron para la parcela de estudio de dos formas diferentes: (1) mediante el uso de una función de perfil (2) a partir de la nube de puntos tomada con TLS. Ambas aproximaciones se explican en detalle a continuación.

3.3.1 Función de perfil

Para la extracción de diámetros a lo largo del fuste se utilizó la función de perfil de CANGA et al. (2008) ajustada específicamente para masas de *Pinus radiata* en el noroeste de España. Está basada en la función de perfil compatible de FANG et al. (2000). La función de perfil incluye dos puntos de inflexión y tres factores de forma, uno para cada segmento del fuste. Introduciendo en la función los diámetros normales y la altura medidas en campo, se obtuvieron, a nivel de árbol individual, los diámetros cada 10 cm para un intervalo de altura comprendido entre 0.2 m y la altura total de cada árbol.

3.3.2 TLS

Paralelamente, la nube de puntos de la parcela de estudio se analizó mediante la metodología para la estimación automática de diámetros a lo largo del fuste y alturas totales a partir de datos tomados con TLS descrita en detalle en CABO et al. (2018) y PRENDES et al. (2021). Como resultado, se obtuvieron, de forma automática y para cada árbol, los diámetros de las secciones a lo largo del tronco espaciadas 10 cm y para un rango de altura entre 0,2 y 10 m, además de sus centros (definidos por las coordenadas X, Y, Z). En algunos árboles no se consiguió ajustar el rango completo debido principalmente a dos razones: (1) el número de puntos en la sección era insuficiente para realizar el ajuste del diámetro (2) algunas secciones presentaban anomalías en el ajuste del diámetro. Para este último caso, la metodología incluye varios filtros para detectar anomalías y es capaz de etiquetar las secciones del fuste que son potencialmente incorrectas, para su posterior revisión. En este caso tanto las secciones ausentes como las etiquetadas para revisión se interpolaron a partir de los diámetros inmediatamente superiores o inferiores disponibles.

3.4 Algoritmo de tronzado óptimo.

La programación dinámica es la técnica matemática más empleada por investigadores y compañías forestales para optimizar el tronzado de árboles en bosques comerciales.

El algoritmo de tronzado utilizado en este estudio es una variante del algoritmo de programación dinámica presentado en ACUNA & MURPHY, (2005), programado originalmente en C++. Para el presente estudio, el algoritmo fue convertido al lenguaje de programación Python e implementado con una interfaz gráfica por medio de la librería PyQt5. Para cada tipo de producto, el sistema devuelve el valor económico, volumen, número de trozas, así como los diámetros y largos promedio. Además, el algoritmo calcula el volumen total de los troncos y su valor económico.

En cuanto a los datos de entrada, se necesitan dos archivos diferentes para correr al algoritmo: uno que proporciona información detallada de los fustes y otro que especifica los requerimientos de cada uno de los productos (tipos de trozas) posibles de cortar. En el primer caso, el archivo de fustes contiene información de la altura, el diámetro, el volumen y la calidad, los cuales generalmente se detallan cada 10 cm. El archivo de requerimiento de productos especifica las características que deben cumplir las trozas para cada producto. Éstas incluyen los diámetros mínimos de la cara inferior (DCI) y superior (DCS) de las trozas y los precios de mercado (absolutos o relativos). Este archivo también especifica las posibles longitudes de cada producto (longitudes múltiples), así como la curvatura máxima (opcional) aceptada por cada producto. Este último requerimiento no fue incluido en el estudio.

Los pasos básicos del algoritmo se resumen a continuación:

- (1) Empezando desde la sección más baja del fuste se analizan todas las longitudes posibles para cada tipo de troza.
- (2) Para cada tipo de troza del paso (1) se comprueba el cumplimiento de los diámetros mínimos inferior y superior de cada troza, y se comprueba que cumplan las especificaciones de cada producto. En el caso de incluir curvatura, aquí también se comprueba que cumpla la curvatura máxima permitida por cada producto.
- (3) Para aquellos tipos de trozas que cumplen todos los requerimientos y que son factibles de cortar, se calcula el valor acumulado hasta la etapa actual (altura a la cual se encuentra la parte superior de la troza) y se guarda la solución económica más alta para esa etapa.
- (4) Se avanza a la siguiente etapa (etapa original + 10 cm) y se repiten los pasos 1-3 hasta que todo el fuste ha sido analizado.

3.4.1 Productos considerados

Para elegir los productos a incluir en el algoritmo de tronzado óptimo se ha tomado como referencia los productos maderables de *Pinus radiata* en Asturias cuyas características se resumen en la Tabla 1. Tanto el tipo de producto como sus características y precios fueron extraídos del “Observatorio de precios de productos forestales” elaborado por COSE (Confederación de Organizaciones de Selvicultores de España) dentro del proyecto RedFor (GARCÍA-MÁRQUEZ, 2014). En el norte de España las masas de *Pinus radiata* tienen un gran potencial productor de aserrables y de chapa. En el caso de la madera Pulpable, no es un producto habitual en Asturias, sin embargo, se ha incluido con el fin de aumentar la casuística de datos a introducir en el algoritmo de tronzado. El precio de este producto por tanto es una estimación basada en el conocimiento experto de los autores. Toda la madera que no se puede incluir en ninguno de los cinco tipos de productos que se consideran va a parar a la categoría de “Desperdicio”, cuyo valor de mercado es 0.

Tabla 1. Características de los productos derivados de la madera de *Pinus radiata* en Asturias.

Producto	DIÁMETRO CARA INFERIOR TROZA (DCI)	LONGITUD (m)	PRECIO*
ASERRABLE 1	Troza Ø>25 cm	2,5/3/5/6	50
ASERRABLE 2	Troza Ø>22 cm	2,5/3/5	45
ASERRABLE 3	Troza Ø>20 cm	2,5/3	40
CHAPA	Troza Ø>28 cm	2,5/30	60
PULPABLE	Troza Ø > 6	Entre 2,5-5 (cada 10 cm)	25
DESPERDICIO	Sin requisitos específicos		0

*precios del m³ con corteza a pie de fábrica en 2015

3.4.2 Set de datos analizados y comparados

En este estudio para el mismo conjunto de árboles se obtuvieron dos conjuntos de datos de entrada del algoritmo de tronzado, uno obtenido mediante funciones de perfil (A) y otro mediante el procesamiento de la nube de puntos TLS (B) como se detalla a continuación:

1. Conjunto de datos A: los diámetros de cada fuste fueron determinados cada 10 cm mediante la función de perfil presentada en la sección 3.3.1.
2. Conjunto de datos B: los diámetros de cada fuste fueron estimados cada 10 cm en la nube de puntos mediante el algoritmo de estimación de diámetros descrito en la sección 3.3.2. Es necesario señalar que muchos árboles no contaron con información detallada del fuste en las partes altas (>10 m) debido a la escasa penetración del haz láser en estas zonas. De esta manera, se optó por completar la información de la parte alta de los fustes con estimaciones proporcionadas por la función de perfil. Tanto para los conjuntos de datos A y B se asumió que los árboles eran completamente rectos.

Una vez hechas las estimaciones con el algoritmo de tronzado óptimo sobre los conjuntos de datos A y B, se analizaron y compararon los resultados de acuerdo con el número total de trozas cortadas, el volumen total y el valor económico total. Esto permitió determinar el impacto que tiene sobre estas métricas el utilizar un conjunto de datos u otro.

4 Resultados

Debido a que los diámetros son el dato de entrada más importante para el algoritmo de tronzado, en la Tabla 2 se muestran los DCI y DCS medios que se han obtenido para cada producto, separados en función de si han sido calculados a partir del conjunto de datos A o del B. Tomando como referencia un diámetro en punta delgada de 6 cm, solo el 83% del fuste de los árboles (en promedio) es aprovechable, por debajo de ese diámetro, el tronco se considera desperdicio). De ese porcentaje aprovechable, en el caso de B, el 50 % se ha estimado con TLS y el 33% restante se ha

completado con la función de perfil. Así pues, la parte superior del tronco es la misma en los dos conjuntos de datos A y B.

Tabla 2. Diámetro cara superior (DCS) e inferior (DCI) de cada troza y longitud expresados en valor medio por cada producto y separados por método de cálculo de diámetros utilizado.

PRODUCTO	A) FUNCIÓN DE PERFIL			B) TLS		
	DCI (cm)	DCS (cm)	Longitud (m)	DCI (cm)	DCS (cm)	Longitud (m)
Aserrable 1	26,0	33,1	3,34	26,2	27,8	3,08
Aserrable 2	23,1	28,8	3,36	22,9	26,1	3,08
Aserrable 3	20,5	25,0	3,35	20,6	23,2	3,11
Chapa	29,1	38,2	3,34	29,2	29,4	2,5
Pulpable	12,1	16,8	3,35	11,3	16,2	3,15

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras haber aplicado el algoritmo de tronzado a los dos conjuntos de datos A y B que se componen de 120 árboles. Concretamente, en la Figura 2 se presenta una comparativa del número de trozas que se obtienen para cada producto. Un total de 534 (Aserrable 1: 18; Aserrable 2: 45; Aserrable 3: 67; Chapa: 6; Pulpable:398) y 546 (Aserrable 1: 21; Aserrable 2: 62; Aserrable 3: 84; Chapa: 12; Pulpable:367) trozas fueron cortadas al utilizar los conjuntos de datos A y B, respectivamente.

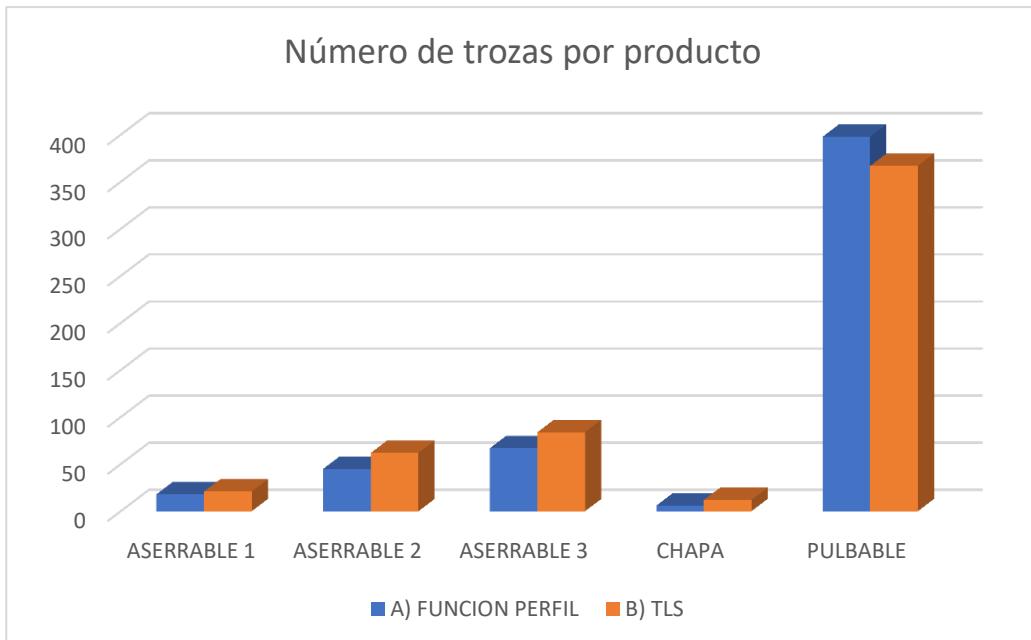


Figura 2. Número de trozas por producto obtenido con la función de perfil vs TLS.

De forma análoga, la Figura 3 recoge la comparativa del volumen total que se obtiene de cada producto expresado en m³. Al incluir todos los productos, el volumen total obtenido con el conjunto de datos A fue de 43,2 m³, mientras que para el conjunto de datos B se obtuvo un volumen total de 41,2 m³.

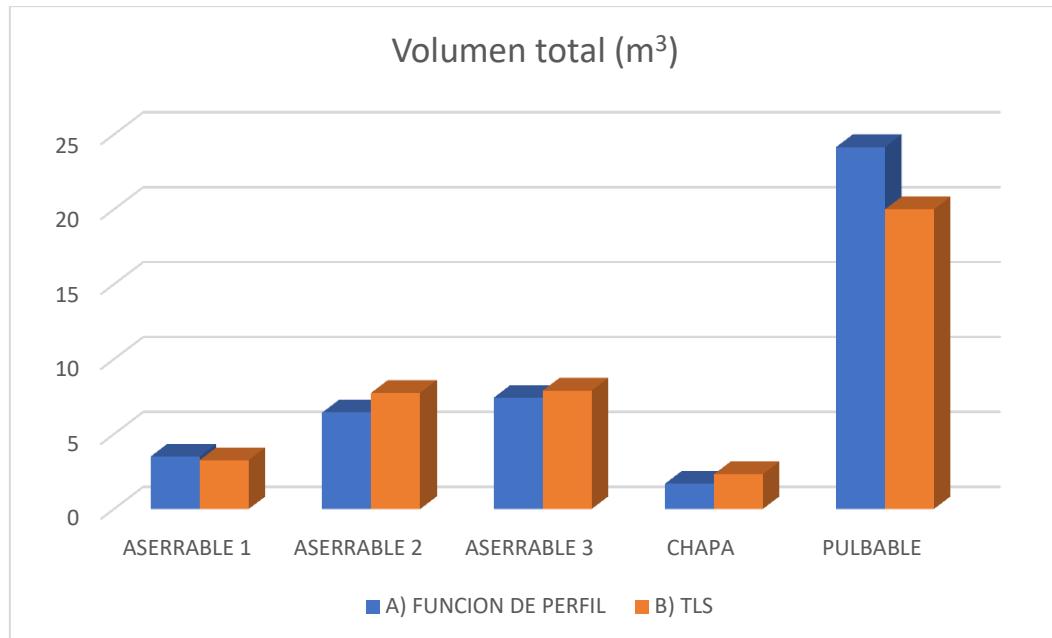


Figura 3. Volumen total por producto obtenido con la función de perfil vs TLS.

Finalmente, la Figura 4 muestra una comparativa del valor total de cada producto en términos absolutos expresado en euros. El valor total para el conjunto de datos A ascendió a 1467,71 €, mientras que para el conjunto de datos B, éste ascendió a 1467,38 €.

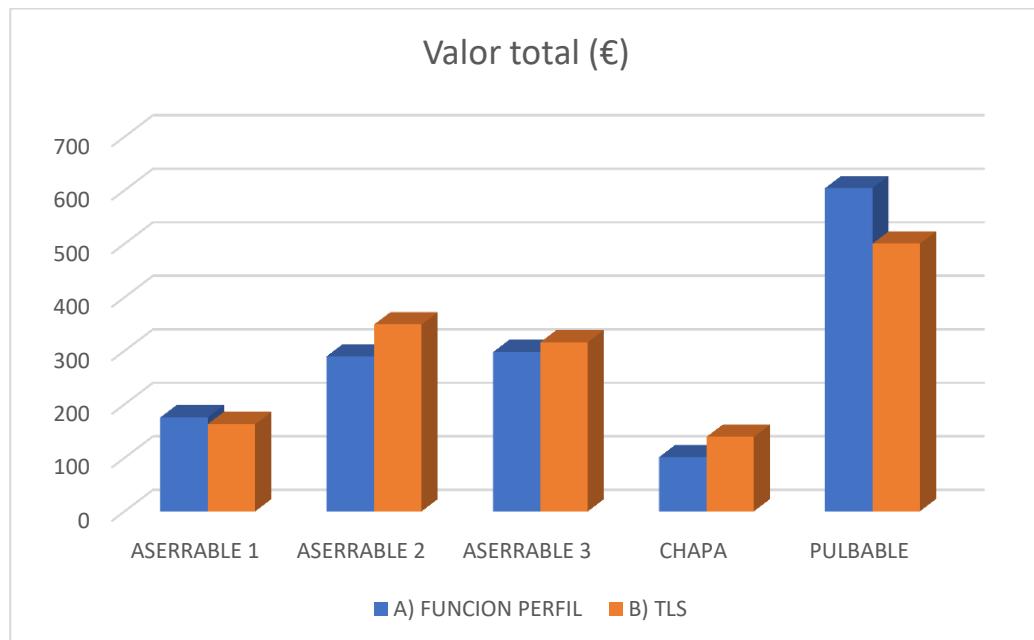


Figura 4. Valor total obtenido por producto (en €) obtenido con la función de perfil vs TLS.

A la vista de los tres gráficos, para todos los productos, excepto para Pulpable, se obtiene un número mayor de trozas en el caso del set de datos B. En cuanto al volumen y valor total por producto, éstos también son mayores en el caso del set de datos B, excepto para los productos Aserrable 1 y Pulpable.

5 Discusión

En este trabajo se han comparado los resultados obtenidos de aplicar un algoritmo de tronzado óptimo a un conjunto de árboles cuyos diámetros se han obtenido (1) con una función de perfil y (2) a partir de una nube TLS hasta donde era posible en cada árbol y completando las partes altas del árbol con los diámetros de la función de perfil. Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto varias cosas interesantes.

En términos absolutos el valor de mercado de los árboles es prácticamente igual en los dos conjuntos de datos, A y B. Sin embargo, tanto el número de trozas de cada producto como su valor y volumen asociado presentan diferencias importantes entre sí. El origen de estas diferencias está en los valores de los diámetros que nutren al algoritmo de tronzado. Por un lado, en el caso del TLS, los principios básicos de estimación de diámetros que se aplican en este estudio han sido probados en parcelas de diferentes características en varios estudios comparativos (LIANG et al. 2018; HOLLAUS, MOKROŠ, AND WANG 2019). Estos estudios analizaron el funcionamiento de más de 20 algoritmos diferentes en una gran variedad de escenarios (e.j. nubes de puntos de diferentes densidades, diferentes configuraciones de parcela y distintos modelos de escáneres) y obtuvieron muy buenos resultados cuando se comparaba el *dbh* con mediciones de campo. En el caso de PRENDÉS et al. (2022) también se obtuvieron muy buenos resultados al comparar los diámetros estimados por el algoritmo a lo largo del fuste con los estimados manualmente en la nube por un operador humano en *Pinus pinaster*. Por otro lado, la función de perfil que se utilizó en este estudio asume que por debajo del primer punto de inflexión (unos 2 m en este caso) el fuste tiene forma de neiloide y por encima de él los diámetros van en descenso a medida que se asciende en altura. Sin embargo, estos dos supuestos, que se utilizan para posibilitar la construcción de un modelo pensado para ser aplicado a nivel de masa, no siempre se cumplen a nivel de árbol individual. En este caso, cuando se comparan los diámetros medios DCI y DCS obtenidos para cada producto, los valores DCS son en términos generales mayores que los obtenidos para B, especialmente en el caso de Chapa y de Aserrado 1. Ambos productos son los más exigentes en cuanto a diámetro mínimo aceptable, y por tanto sus trozas proceden de las partes bajas del fuste. De acuerdo con todo lo anterior, es altamente probable que, al asumir la forma de un neiloide en la parte más baja del fuste, la función de perfil sobreestime los diámetros por debajo de los 2 m de altura.

Para entender los resultados del tronzado hay que tener en cuenta dos cosas (i): el algoritmo busca maximizar el valor de cada fuste, por lo que si dos trozas de un producto más barato aportan más valor que una sola troza de un producto más caro, se decantará por la primera opción a la hora de hacer el corte, (ii) cada árbol puede tener un número (o incluso tamaño) de trozas distinto en el mismo producto/destino, lo que hace que los resultados no sean comparables árbol por árbol. De acuerdo con esto, los diámetros estimados con TLS presentan una disminución mucho más lenta en altura que los que proceden de la función de perfil, por lo que el SED de cada troza no es un factor tan limitante. Así pues, la mejor definición de los diámetros a lo largo del tronco que aporta el TLS hace que el número de trozas con productos de mayor valor (Aserrable 1, Aserrable 2, Aserrable 3 y Chapa) sea superior en el caso de B que en el de A, y que dichas trozas sean más cortas. Es decir, en el caso de B el algoritmo “encaja” más trozas en cada fuste, pero más corta que en el caso de A. Sin embargo, en el caso de A, el algoritmo corta trozas de productos de más valor en la base del tronco lo más largas posible y completa el resto del corte con trozas pulpables que no tienen ninguna exigencia de diámetro mínimo para incrementar el valor total de la categoría Pulpable. En cuanto al volumen, es una variable que para cada troza depende de sus diámetros SED y LED, pero también de su longitud. Para los dos conjuntos de datos y todos los productos, excepto Aserrable 1, a mayor número de trozas mayor volumen. En el caso de Aserrable 1, A tiene más volumen que B a pesar de tener menos trozas. Esto se explica por la sobreestimación de los diámetros que se da en la parte basal del fuste donde las trozas Aserrables 1 se obtienen mayoritariamente. El valor de mercado depende enteramente del volumen de la troza, es decir, para cada producto el valor total aumenta al aumentar el volumen en los dos conjuntos de datos.

Por motivos de simplicidad, en este trabajo no se ha tenido en cuenta un factor clave en el tronzado óptimo como es la calidad de las trozas. Este parámetro depende principalmente de dos factores: la presencia de ramas (que generan aparición de nudos en la madera) y la curvatura de la troza (que tiene una gran influencia en el proceso de aserrado). En este sentido, y debido a la gran definición de los fustes que se puede obtener con datos TLS, sería posible definir algunas características de las ramas (ángulo de inserción, grosor...) e incluirlas como parámetro en el algoritmo de tronzado. Además, el hecho de que la metodología aplicada para el cálculo de diámetros en B estime las coordenadas (X, Y, Z) de los centros de las secciones permite obtener información muy detallada del perfil del tronco y hacer estimaciones de curvatura con la metodología propuesta por PRENDES et al. (2022). La inclusión de requerimientos de calidad en el modelo de tronzado ayudaría a obtener un valor de mercado más realista y, por lo tanto, éste debería ser un tema que investigar en futuros estudios. En el caso de las funciones de perfil, no es posible hacer análisis de la forma de las trozas ni de las ramas. Eso, unido a que han demostrado una tendencia a sobreestimar/subestimar los diámetros en función de la parte del tronco donde se encuentren, hace que su uso para el tronzado óptimo se recomienda únicamente para (1) obtener una aproximación muy grosera de los productos que se podrían obtener de una parcela en caso de no disponer de datos TLS, o (2) para completar los datos de las partes altas del árbol que no se puedan obtener de la nube TLS (correspondientes a la parte menos valiosa del tronco) en caso de querer aplicar el algoritmo de tronzado al árbol entero.

Finalmente, uno de los mayores desafíos a los que se enfrentan los gestores forestales a la hora de trabajar con datos TLS es el de reducir el tiempo invertido en la toma de datos en campo y el procesado de las nubes para que su uso sea rentable. Esto depende en gran medida del nivel de automatización que se pueda lograr mediante el análisis asistido por software de las parcelas escaneadas (THIES et al., 2004). En este caso, el nivel de automatización para la obtención de diámetros a lo largo del tronco, así como del patrón de tronzado óptimo es total, y la metodología propuesta es aplicable a cualquier nube de puntos tomada desde el suelo que tenga una buena calidad, incluyendo las tomadas con un escáner de mano (WLS- Wearable Laser Scanner) que permite reducir notablemente el tiempo de escaneado (CABO et al. 2018b).

6 Conclusiones

El valor total en euros de los árboles de la parcela de estudio ha sido muy similar en el conjunto de diámetros calculados con la función de perfil y con TLS más función de perfil (por encima de los 10 m de altura). Sin embargo, el número de trozas y su distribución en los distintos productos ha variado notablemente. En el caso de los diámetros calculados con la función de perfil se aprecia una tendencia a la sobreestimación en las partes bajas del tronco (por debajo de 2 m) y a la reducción pronunciada de los valores de los diámetros a medida que se sube en altura. Para los diámetros calculados con TLS, el perfil del tronco no presenta una disminución tan rápida del valor de los diámetros, por lo que el SED de cada troza es un factor menos limitante. En consecuencia, el número de trozas de productos de mayor valor (Aserrable 1, Aserrable 2, Aserrable 3 y Chapa) es superior y su longitud más corta que en el caso de la función de perfil. Sin embargo, en el producto de menos valor, Pulpable, para el conjunto de datos procedentes de la función de perfil se producen más trozas que para los datos TLS porque el algoritmo trata de paliar la falta de productos de más valor cortando más trozas pulpables.

Finalmente, el uso de datos tomados con TLS aporta información más realista del perfil de los troncos al basarse en una medición realizada directamente sobre la nube de puntos tridimensional de cada árbol, y no en un modelo matemático predictivo. El hecho de disponer de una representación tridimensional del árbol entero y de secciones a lo largo del tronco definidas por su diámetro y la posición de su centro (X, Y), abren la puerta a la inclusión en el algoritmo de tronzado de la curvatura de las trozas y de las características de las ramas, ambos factores de calidad de la madera que son esenciales para trozas aserrables y chapa de alto valor comercial.

7. Agradecimientos

Gracias a los técnicos de campo Ernesto Álvarez y Manuel Alonso-Graña por haber escaneado la parcela de estudio.

8. Bibliografía

- ACUNA, M.A., MURPHY, G.E., 2005. Optimal bucking of Douglas fir taking into consideration external properties and wood density. *N. Z. J. For. Sci.* 35, 139–152.
- ARCE, J.E., MACDONAGH, P., FRIEDL, R.A., 2004. Optimal bucking pattern generation through cutting algorithms applied to individual stems. *Rev. Árvore* 28, 207–217.
- BRIGGS, D. G., 1980. A dynamic programming approach to optimizing stem conversion. University of Washington.
- CABO, C., ORDÓÑEZ, C., LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A., ARMESTO, J., 2018a. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 69, 164–174.
- CABO, C., DEL POZO, S., RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P., ORDÓÑEZ, C., GONZÁLEZ-AGUILERA., D. 2018. Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sens.* 10 (4): 540.
- CANGA, L., 2008. Crecimiento y producción de pinares regulares de *Pinus radiata* d.don en Asturias. Tesis doctoral dirigida por Asunción Cámara Obregón (dir. tes.), Ulises Diéguez Aranda (codir. tes.). Universidad de Oviedo (2008).
- ENACHE, A., KÜHMAIER, M., VISSER, R., STAMPFER, K., 2016. Forestry operations in the European mountains: a study of current practices and efficiency gaps. *Scand. J. For. Res.* 31, 412–427.
- FANG, Z., BORDERS, B. E., BAILEY R. L., 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *For. Sci.* 46(1), 1-12.
- GARCÍA, E., 2014. Observatorio de precios de la madera. Colaboración técnica N 61. Páginas 22-27
- HEVIA, A., CRABIFFOSSE, A., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., RUIZ-GONZÁLEZ, A.D., MAJADA, J., 2018. Assessing the effect of pruning and thinning on crown fire hazard in young Atlantic maritime pine forests. *J. Environ. Manage.* 205, 9–17.
- HOLLAUS, MARKUS, MARTIN MOKROŠ, AND YUNSHENG WANG. 2019. “International Benchmarking of Terrestrial Image-Based Point Clouds for Forestry.” In *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 21.
- KIVINEN, V.-P., 2007. Design and testing of stand-specific bucking instructions for use on modern cut-to-length harvesters. *Diss. For.*
- LABELLE, E., HUß, L., 2018. Creation of value through a harvester on-board bucking optimization system operated in a spruce stand. *Silva Fenn.* 52.
- LIANG, X., KANKARE, V., HYPPÄ, J., WANG, Y., KUKKO, A., HAGGRÉN, H., YU, X., KAARTINEN, H., JAAKKOLA, A., GUAN, F., HOLOPAINEN, M., VASTARANTA, M., 2016. Terrestrial laser

scanning in forest inventories. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., Theme issue “State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science” 115, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>

LIANG, XINLIAN, JUHA HYYPÄÄ, HARRI KAARTINEN, MATTI LEHTOMÄKI, JIRI PYÖRÄLÄ, NORBERT PFEIFER, MARKUS HOLOPAINEN, GÁBOR BROLLY, PIROTTI FRANCESCO, Y JAN HACKENBERG. 2018. “International Benchmarking of Terrestrial Laser Scanning Approaches for Forest Inventories.” ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 144: 137–179. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021

MURPHY, G., MARSHALL, H., BOLDING, M.C., 2004. Adaptive control of bucking on harvesters to meet order book constraints. For. Prod. J. 54, 114-114–121.

NASBERG, M. 1985: Mathematical programming model for optimal log bucking. Linkoping University, Sweden, Dissertation No. 132. 200 p.

PILKERTON, S.J., SESSIONS, J., KELLOGG, L.D., 2013. Development of efficient cutting patterns to maximize value with a log-allocation constraint. Int. J. For. Eng. 24, 42–52.

PITKÄNEN, T., RAUMONEN, P., KANGAS, A., 2019. Measuring Stem Diameters with TLS in Boreal Forests by Complementary Fitting Procedure.” ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 147, 294–306. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.11.027.

PRENDÉS, C., CABO, C., ORDOÑEZ, C., MAJADA, J., CANGA, E., 2021. An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in *Pinus pinaster*. GIScience Remote Sens. 58, 1130–1150.

PRENDÉS, C., CANGA, E., ORDOÑEZ, C., MAJADA, J., CABO, C., 2022. Automatic assesment of individual stem shape parameters in forest stands through TLS point clouds. *Forests*, 13(3), 431. doi.org/10.3390/f13030431SESSIONS, J. 1988: Making better tree-bucking decisions in the woods. J. of For 86(10): 43–45.

SILVA, R.F., AGUIAR, M.O., DA SILVA, M.L.M., DA SILVA, G.F., DE MENDONÇA, A.R., 2020. SISFLOR: A computational system to determine the optimal tree bucking. Rev. Eng. Na Agric.-Reveng 28, 192–201.

SPINELLI, R., MAGAGNOTTI, N., NATI, C., 2011. Work quality and veneer value recovery of mechanised and manual log-making in Italian poplar plantations. Eur. J. For. Res. 130, 737–744.

THIES, M., PFEIFER, N., WINTERHALDER, D., GORTE, B. G. (2004). Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. Scand. J. For. Res. 19(6), 571-581.ZONG, X., WANG, T., SKIDMORE, A.K., HEURICH, M., 2021. The impact of voxel size, forest type, and understory cover on visibility estimation in forests using terrestrial laser scanning. GIScience Remote Sens. 58, 323–339.