



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

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

Cortas selectivas sobre montes bajos jóvenes de encina y rebollo: comparación de su ejecución mecanizada con taladora-apiladora pesada con la alternativa de motosierra y apilado manual. Productividad, costes y efectos ambientales

TOLOSANA ESTEBAN, E.¹, SPINELLI, R.², LAINA RELAÑO R.¹, AMINTI, G.² y LÓPEZ VICENS, I.¹

¹ E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. C/José Antonio Novais, 10. 28040 Madrid. Eduardo.tolosana@upm.es

² Institute of BioEconomy, CNR IBE National Research Council, Florence, Italy.

Resumen

Se estudian cortas selectivas fuertes sobre montes bajos de encina y rebollo en Palencia, comparando una taladora-apiladora pesada de sierra circular con una cuadrilla de dos motoseristas y un apilador. La productividad mecanizada dependió de especie, peso por árbol y porcentaje de área basimétrica extraída, mientras la semimecanizada dependió sólo de especie y peso por árbol. La productividad, especialmente mecanizada, es significativamente mayor en los encinares. Los tratamientos no se autofinanciaron, pero se aproximaron al balance cero en los encinares, en los que el coste del aprovechamiento mecanizado fue menor que el de la cuadrilla para todo el rango diamétrico, especialmente para diámetros mayores. En el rebollar, la mecanización resulta más cara que la cuadrilla para diámetros inferiores a 13 cm, y el coste crece mucho para diámetros muy pequeños. Los daños sobre pies remanentes son más frecuentes al mecanizar, especialmente en la encina por su copa más voluminosa, aunque sólo un 10% de pies presentó daños graves. Los daños sobre tocones fueron mucho más severos al mecanizar, aunque su trascendencia futura es incierta. No hubo daños relevantes sobre los suelos. Se propone el ensayo de máquinas más ligeras y dotadas de grúa para ganar productividad y reducir los daños.

Palabras clave

Biomasa forestal, árboles completos, mecanización forestal, *Quercus ilex*, *Quercus pyrenaica*.

1. Introducción

Los cambios socioeconómicos de la segunda mitad del S. XX perjudicaron la rentabilidad de los montes bajos tradicionales en Europa, por lo que su gestión se ha abandonado frecuentemente (Carvalho *et al.*, 2017), implicando la subutilización de un recurso natural relevante y una pérdida de biodiversidad asociada con las prácticas selvícolas tradicionales (Mullerová *et al.*, 2015). El envejecimiento y densificación han incrementado la vulnerabilidad a incendios y derribos, cada vez más frecuentes durante el último siglo (Schelhaas *et al.*, 2003) y se estima que provocarán pérdidas anuales cercanas al millón de metros cúbicos en Europa para 2030 (Seidl *et al.*, 2014).

Las claras sobre montes bajos pueden reducir los costes de extinción de incendios forestales, especialmente si se controla el rebrote y se utiliza el sistema de aprovechamiento de árboles completos, dado que la extracción total de la biomasa aérea reduce su severidad potencial en comparación con otros sistemas que dejan ramas y copas en el monte (Corona *et al.*, 2015). El desarrollo operativo de opciones de aprovechamiento de biomasa que son técnicamente posibles pero no se han implementado ampliamente debe ser una prioridad en la futura investigación forestal (Anderson y Mitchel, 2016).

En España, los montes bajos ocupan aproximadamente 4 millones de ha, siendo la encina (*Quercus ilex* L.) y el rebollo o melojo (*Q. pyrenaica* Willd.) las especies más extendidas (Piqué *et al.*,

2017). Los montes bajos constituyen una fuente potencial muy relevante de biomasa para energía o bioproductos.

La selección de técnicas y equipos adecuados al medio es crucial para la sostenibilidad económica del suministro (Enache *et al.*, 2015). Ello es especialmente cierto para los montes bajos, con árboles de pequeño tamaño y brotes agrupados en cepas que incrementan los costes de tratamiento (Spinelli *et al.*, 2017).

La tecnología para su aprovechamiento evoluciona hacia una mayor mecanización con equipos más eficientes y de mayor tamaño (Spinelli *et al.*, 2016), conllevando una mayor productividad y reduciendo los costes de aprovechamiento (Laina *et al.*, 2013). Además, la mecanización contribuye a reducir la gravedad y la frecuencia de accidentes laborales (Albizu *et al.*, 2013).

El aprovechamiento mecanizado de los montes bajos es técnica y económicamente complejo, debido a la dificultad que encuentra el cabezal de apeo para aproximarse a troncos agrupados en cepas (Schweier *et al.* 2015). Los efectos potenciales no deseados de la mecanización – daños edáficos, sobre pies remanentes y tocones – provocan preocupación entre los científicos y gestores forestales (Spinelli *et al.*, 2017; Pyttel *et al.*, 2013), y deben tenerse en cuenta al planificar estos aprovechamientos.

Una de las tecnologías para esta mecanización es el cabezal talador – apilador de sierra de disco, con ventajas por su velocidad de corte y su capacidad de cortar varios troncos a la vez. Se ha ensayado recientemente en montes bajos mediterráneos donde ha resultado menos productivo que en cultivos energéticos de turno corto, pero ha reducido el daño en los tocones en comparación con los cabezales de cuchilla (Schweier *et al.*, 2015).

La empresa forestal castellanoleonesa SOMACYL comenzó los ensayos de una taladora-apiladora con cabezal de sierra de disco adosado al chasis (sin grúa) para el aprovechamiento de biomasa de árboles completos de encina y rebollo para energía, lo que permitió estudios de tiempos para evaluar el rendimiento, costes, eficiencia y nivel de daños sobre suelo, tocones y masa remanente (Tolosana *et al.*, 2018).

La misma empresa llevó a cabo pasado cierto tiempo, sobre los mismos montes, ensayos de apeo con motosierra y apilado manual de árboles completos para el mismo destino. El estudio de este apeo y apilado no mecanizados permitió la comparación con el sistema mecanizado estudiado previamente.

2. Objetivos

Los objetivos de esta fase del estudio son los siguientes:

- Desarrollar ecuaciones predictivas de la productividad del apeo con motosierra y el apilado manual para las claras por el sistema de árboles completos sobre los montes bajos de encina y rebollo, identificando los factores de que depende.
- Utilizar esas ecuaciones para estimar los costes unitarios del apeo con motosierra y el apilado manual, en función de dichos factores.
- Comparar el coste unitario del apeo con motosierra y con taladora-apiladora para distintas condiciones dendrométricas y/o dasométricas, tanto para el apeo y apilado como para la operación completa del aprovechamiento – incluyendo también la extracción y apilado de los árboles en cargadero-.

- Estudiar los impactos ambientales de la opción no mecanizada – daños sobre el suelo, la masa remanente y los tocones – y la eficiencia en la recogida de la biomasa (porcentaje de biomasa disponible realmente aprovechado) y compararlos con los previamente estudiados para el sistema mecanizado.

3. Metodología

3.1. Ensayos de campo

Se llevaron a cabo en 2017 y 2018, en el primer caso empleando medios mecanizados (taladora-apiladora) y en el segundo apeando y apilando por operarios manuales con motosierras. Los dos métodos se ensayaron en dos montes bajos dominados por cada una de las especies elegidas, localizados en Palencia (Municipios de Becerril de Campos y Paredes de Nava), el primero era una masa pura de encina y el segundo un rebollar.

El apeo y apilado mecanizados los ejecutó una máquina base John Deere 643J (de 130 kW de potencia y 12.7 t de peso), equipada con un cabezal de apeo de sierra circular con capacidad acumuladora JD FD45, adosado al chasis, sin una grúa, lo cual obliga a este tipo de taladoras a aproximarse mucho a los árboles a cortar.

El apeo con motosierra y apilado manual se ejecutó por una cuadrilla de tres trabajadores. Dos de ellos apeaban direccionalmente los pies usando motosierras de tamaño mediano, mientras que el tercero apilaba los arbolillos completos manualmente para facilitar su carga posterior.

En ambos casos, los árboles fueron desemboscados por un autocargador pesado John Deere 1910E (con 186 kW de potencia y 19 t de capacidad de carga) que contaba con un remolque compresor Dutch Dragon PC-48.

Cada uno de los métodos se aplicó en la mitad de 34 parcelas pareadas de 25x25 m², distribuidas aleatoriamente entre los dos montes bajos, que se consideraron como replicaciones en el análisis estadístico de los datos; de esta forma, se contó con 8 y 9 replicaciones para cada método, respectivamente en cada uno de los montes.

Ambas masas fueron inventariadas antes y después del tratamiento, utilizando instrumentos y técnicas convencionales. Las esquinas de las parcelas se geolocalizaron empleando un GPS de alta precisión.

3.2. Inventario previo.

De los 17 pares de parcelas, se situaron 9 en el monte bajo de *Q. ilex* y 8 en el *Q. pyrenaica*. Las parcelas del estudio del apeo y apilado manuales eran adyacentes (con un lado común) a las que se emplearon para el estudio de las operaciones mecanizadas por Tolosana et al (2018). Se midió el diámetro normal de todos los pies. Para estimar el peso seco de los pies apeados, se ajustó una tabla de peso como parte del mencionado estudio, apeando y midiendo 30 pies por cada monte, y tomando muestras de humedad según la norma ISO 18134-3:2015.

3.3. Estudio de tiempos y de producción de biomasa.

El estudio previo de las operaciones mecanizadas (Tolosana et al. 2018) se llevó a cabo por ciclos de trabajo mediante un ordenador de campo Husky Hunter con el programa Siwork3 (Kofman 1995). Para el posterior estudio de las operaciones no mecanizadas se adoptó un método de

cronometraje por muestreo, dado que los tres trabajadores debían controlarse simultáneamente (Magagnotti *et al.*, 2012). Ambos métodos proporcionan información análoga sobre productividad y distribución de las tareas de trabajo.

Para evaluar la biomasa extraída de cada parcela, el autocargador apiló los árboles provenientes de cada una en pilas separadas a borde de pista, que fueron astilladas, transportadas y pesadas individualmente; las asillas de cada pila se muestrearon para determinar su contenido en humedad.

Para obtener la ecuación de productividad, se ajustó una regresión múltiple con los datos de 14 de las 17 parcelas (una se cortó antes del estudio y otras dos se rechazaron por presentar residuos muy elevados). Las variables independientes ensayadas fueron: especie (como variable “dummy”); peso seco por árbol (masa inicial); peso seco por árbol extraído; peso seco por hectárea; número inicial de pies por ha; número de pies extraídos por ha; área basimétrica extraída y porcentaje de área basimétrica extraída.

Durante la extracción con autocargador, se cronometró un turno completo para cada sistema de trabajo y monte, midiendo el número de viajes y pilas para obtener una estimación de la productividad media en cada caso. Para estimar los costes, la empresa ejecutora proporcionó los costes reales de las máquinas y operarios a partir de sus propios registros (SOMACYL, 2020).

La superficie total estudiada fue de 0.56 ha en el monte bajo de *Q.ilex* y de 0.50 ha en el de *Q.pyrenaica*. El resto de las masas fueron también aclaradas, unas 100 ha de encinar y 20 de rebollar. El estudio de tiempos del desembosque se llevó a cabo en las claras “normales”, fuera de las parcelas del estudio.

3.4. Inventario posterior y estudio de daños.

Se midió el diámetro normal de todos los pies remanentes. Los daños a los pies remanentes se caracterizaron siguiendo la metodología de Tavankar *et al.* (2013).

Los daños edáficos se valoraron mediante la metodología de Mc Mahon (1995), aplicada sobre subparcelas circulares de 4 m de radio con centro en el punto de cruce de las diagonales de cada parcela cuadrada.

Se contaron los tocones dentro de esas subparcelas, midiendo su altura y evaluando la presencia, tipo y gravedad de los daños.

3.5. Medición de la eficiencia en la recogida de la biomasa.

En el interior de cada subparcela se recolectó y pesó la biomasa que quedó sobre el terreno, tomando dos muestras para estimar la humedad.

4. Resultados

4.1. Inventario inicial y descripción de los tratamientos

La densidad inicial del encinar era de 5,310 pies·ha⁻¹, con diámetro normal (d_n) medio de 5.9 cm, altura media de 4.1 m y área basimétrica media (AB) de 14.3 m²·ha⁻¹. El número medio de cepas por hectárea era de 886, con una media de 6.0 brotes por mata. Se extrajo el 90% de los pies y del 63% del AB, dejando 545 pies remanentes por hectárea.

La densidad del rebollar era de 3,868 pies-ha⁻¹ con d_n medio 6.7 cm, altura media 6.0 m y AB media 13.6 m²-ha⁻¹. Había una media de 1,004 cepas-ha⁻¹, con media de brotes por cepa de 2.8. Había además 2,564 robles aislados-ha⁻¹) Se extrajo un 81.5% de los pies y un 47% del AB inicial, dejando 716 pies-ha⁻¹.

El peso medio de biomasa extraído en el encinar fue 40 toneladas secas por hectárea (ts-ha⁻¹) y en el rebollar 21 ts-ha⁻¹.

3.2. Estudio de tiempos.

En el encinar, la productividad del apeo y apilado osciló entre 2.5 y 3.5 ts por hora productiva (ts-HProd⁻¹) para la cuadrilla de tres trabajadores. Los tiempos no productivos fueron prácticamente nulos, pues no hubo incidentes ni interrupciones. La productividad media fue de 2.85 ts-HProd⁻¹.

En el rebollar, la productividad de la cuadrilla varió entre 0.9 y 3.2 ts-HProd⁻¹. Tampoco se registraron retrasos o incidencias La productividad media alcanzó 2.18 ts-HProd⁻¹.

3.3. Ecuación de productividad para el apeo y apilado no mecanizados.

Resultaron estadísticamente significativas como variables explicativas la especie y el peso seco medio por pie (estimado para la masa inicial). La primera se introdujo como variable “dummy”, con valor unidad para *Q. ilex*, y valor nulo para *Q. pyrenaica*.

La curva de regresión ajustada fue:

$$\text{Productividad (ts-HProd}^{-1}\text{)} = 0.945 + 0.867 \cdot Q_{ilex} (0/1) + 0.082 \cdot \text{PesoSecoUnitario (kg}_{MS}\text{pie}^{-1}) \quad (1)$$

Los estadísticos de la regresión se reflejan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estadísticos del ajuste.				
Número de observaciones: 14				
Coefficiente	Estimación	Error típico	Estadístico-T	Valor-P
Constante	0.945	0.399	2.37	0.0372
<i>Qilex</i>	0.867	0.205	4.23	0.0014
kg _{MS} pie ⁻¹	0.082	0.024	3.45	0.0055
ADEVA				
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F
Modelo	2.86	2	1.43	11.24
Residual	1.40	11	0.127	
Total (Corr.)	4.26	13		
R-cuadrada = 67.2 %				
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 61.2 %				
Error típico de la est. = 0.36				
Error Medio Absoluto = 0.24				
Estadístico Durbin-Watson = 2.32 (P=0.60)				

Utilizando los valores medios de productividad y extracción por hectárea, el tiempo por ha en los montes bajos estudiados se estimó como 14.0 HProd (16.5 HTrab)-ha⁻¹ para *Q. ilex* y 9.6 HProd (11.3 HTrab)-ha⁻¹ para *Q. pyrenaica*.

3.4. Estimación del coste unitario.

El coste horario de los operarios fue 21.0 €HTrab⁻¹ por trabajador, o 63.0 €HTrab⁻¹ para la cuadrilla, incluyendo motosierras. El coste de alquiler del autocargador se fijó en €HTrab⁻¹ y el de la astilladora y el transporte en €tonelada verde⁻¹. El coste de transporte se estimó para una distancia de 80 km (ida), al igual que en el estudio previo de la opción mecanizada.

Las estimaciones de ingresos y costes se basan en una humedad media de las astillas (base húmeda) de 15.3 y 34.5%, respectivamente para encina y rebollo, y un coeficiente de utilización (TProd en % del TTrab de la cuadrilla) del 85%. Se midió un mayor tiempo de carga para el autocargador tras el apilado manual, que redujo su productividad comparado con la alternativa mecanizada de 7.0 a 4.3 tsHProd⁻¹ en el encinar y de 6.6 a 3.9 tsHProd⁻¹ en el rebollar, debido a la peor calidad del apilado manual. Las estimaciones de costes se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Costes operativos y unitarios totales para las operaciones no mecanizadas de aprovechamiento de biomasa.

Operación/es	Coste horario cuadrilla / máquina (€HTrab ⁻¹)	Coste horario cuadrilla / máquina (€HProd ⁻¹)	Productividad media (tsHProd ⁻¹)		Coste unitario alquiler (€t verde ⁻¹)	Coste unitario (€ts ⁻¹)	
			<i>Q. ilex</i>	<i>Q. pyrenaica</i>		<i>Q. ilex</i>	<i>Q. pyrenaica</i>
Apeo/apilado	63.0	74.1	2.85	2.18	—	26.00	33.99
Desembosque autocargador	71.5	79.4	4.28	3.88	—	18.56	20.46
Astillado	—	—	—	—	11.0	12.99	16.79
Transporte astillas (dist = 80 km)	—	—	—	—	7.46	8.81	11.39
Total (costes unitarios directos)	—	—	—	—	—	66.36	82.63
+15% Gastos generales	—	—	—	—	—	76.31	95.03

Los costes directos en planta fueron 66 €ts⁻¹ para las astillas de encina y 83 €ts⁻¹ para las de rebollo. Esas cifras se incrementaron en un 15% para cubrir los costes generales, alcanzando costes unitarios en destino de 76 €ts⁻¹ y 95 €ts⁻¹. El coste para *Q. ilex* es ligeramente inferior al estimado para la alternativa mecanizada - 78 €ts⁻¹, en Tolosana et al. (2018) -; esto se debe en parte a la baja humedad de las astillas en el tratamiento no mecanizado, que redujo los costes de astillado y transporte, pagados por tonelada verde. En *Q. pyrenaica*, el coste de la opción no mecanizada es claramente inferior al del sistema mecanizado, 120 €ts⁻¹ (Tolosana et al., 2018).

La ecuación de productividad (1) se combinó con el coste horario de la cuadrilla para obtener la ecuación de coste:

$$\text{Coste unitario (€ts}^{-1}\text{)} = 63.0[0.945 + 0.867 \cdot Q_{ilex} (0/1) + 0.082 \cdot \text{PesoSecoUnitario (kg}_{MS}\text{pie}^{-1})]^{-1} \quad (2)$$

El coste de apeo y apilado por tonelada se transforma en coste por hectárea: 3,052 €ha⁻¹ para *Q. ilex* y 1,979 €ha⁻¹ para *Q. pyrenaica*.

Los precios actuales (final de 2020) de una tonelada verde de astillas de árbol completo con humedades del 15.3% y 34.5% son de 63 y 46 €, correspondiendo a 74 y 70 €ts⁻¹ (SOMACYL; 2020). El balance operacional neto es negativo (-92.0 €ha⁻¹ para *Q. ilex* y -509 €ha⁻¹ para *Q. pyrenaica*), sin considerar precio en pie ni beneficios de la empresa ejecutora. Las pérdidas son muy inferiores para *Q. ilex* por la mayor extracción y especialmente por la producción de astillas mucho más secas - por el mayor tiempo entre aprovechamiento y astillado -, que mejoró los precios y la economía del transporte.

3.5. Impactos ambientales.

La frecuencia y gravedad de los daños en la masa remanente se muestran en la Tabla 3. La frecuencia de daños es significativamente mayor en encina, especialmente los que afectan a la madera y son causados por la motosierra. Ello puede deberse a su mayor densidad de masa, copas más globosas y corteza más delgada que en rebollo.

Las heridas son mayoritariamente pequeñas o de tamaño medio (superficie < 200 cm²), particularmente en encina. En rebollo, el autocargador causó la mayoría de los daños, en encina un 25% fueron heridas de motosierra.

La frecuencia de heridas profundas es pequeña – cerca del 5% - y similar en ambas especies.

Tabla 3. Daños sobre los pies remanentes por el aprovechamiento no mecanizado de los montes bajos por especies (nota: las diferentes letras - a y b – denotan diferencias estadísticamente significativas - > 95% - entre las dos especies).

DAÑOS EN PIES REMANENTES (% ÁRBOLES DAÑADOS SOBRE EL TOTAL)														
Tipo	Qi	Qp	Lugar	Qi	Qp	Altura	Qi	Qp	Tamaño	Qi	Qp	Causa	Qi	Qp
Corteza	4.0 a	6.2 a	Fuste	10.6 a	9.5 a	Baja (0-0.3 m)	2.0 a	0.0 a	Peq. (<50 cm ²)	12.1 a	5.9 b	Movim. Máquina	75.0 a	100.0 b
Madera	5.2 a	0.3 b												
Ramas rotas	4.8 a	4.5 a	Copa	3.6 a	1.5 a	Media (0.3- 1.0 m)	4.4 a	3.3 a	Med. (50- 200 cm ²)	1.6 a	2.1 a	Herida de corte	25.0 a	0.0 b
Copa destruida	0.0 a	0.0 a												
Total	14.1 a	11.0 a	Raíz	0.0 a	0.0 a	Alta (> 1.0 m)	7.3 a	7.7 a	Grande (>200 cm ²)	0.4 a	3.0 b	Otras	0.0 a	0.0 a
Graves	5.2 a	3.9 a												

Los daños edáficos y en tocones se resumen en la Tabla 4. Los primeros fueron perturbaciones ligeras y superficiales (escalpado o rodadas superficiales de profundidad < 5 cm). Hubo alteraciones en un 6% de la superficie en rebollo y en un 16% en encina (diferencia no significativa), debido al movimiento del autocargador, potencialmente más intenso en *Q. ilex* por la mayor extracción y tamaño de copa.

Los daños sobre los tocones fueron infrecuentes y leves: menos del 10% mostraron rajaduras u otros daños graves, mucho menos que los daños en el estudio previo de la alternativa mecanizada (Tolosana et al. 2018).

Tabla 4. Daños edáficos y en los tocones después del aprovechamiento no mecanizado de monte bajo, por especies.

	DAÑOS EDÁFICOS, PORCENTAJE DE LA SUPERFICIE TOTAL							
ESPECIE	Sin evidencia de daños		Hojarasca presente, daños ligeros		Hojarasca removida, suelo superficial expuesto		Hojarasca y suelo superficial mezclados, rodadas > 5 cm	
<i>Q. ilex</i>	0.0		15.7		0.0		0.0	
<i>Q. pyrenaica</i>	0.0		6.4		0.0		0.0	
	ALTURA DE TOCÓN, % DEL NÚMERO DE TOCONES			ESTADO DEL TOCÓN, PORCENTAJE DEL NÚMERO DE TOCONES				
ESPECIE	<10 cm	10-20 cm	>20 cm	Sin daños	<50% corteza separada	>50% corteza	Tocón rajado	Tocón destruido

						separada		
<i>Q. ilex</i>	45.6	50.6	3.8	58.7	26.0	6.8	3.4	5.1
<i>Q. pyrenaica</i>	28.9	59.8	11.3	71.1	17.5	3.1	5.2	3.1

3.6. Eficiencia en la recogida de biomasa.

Osciló entre el 83 y el 99% (para *Q. ilex* y *Q. pyrenaica*, respectivamente), tomando como referencia el peso teórico estimado por los inventarios. La biomasa que quedó en el suelo fue como media 3.7 ts·ha⁻¹ para encina y 2.1 ts·ha⁻¹ para rebollo, incluyendo restos de matorrales.

3.7. Comparación con la alternativa mecanizada.

3.7.1. Costes de apeo y apilado

Se tomaron del estudio previo únicamente los datos de costes de apeo y apilado, por la diferencia en la humedad de las astillas entre ambos estudios. Se tuvo en cuenta el impacto del apilado en el desembosque, dado que el apilado mecanizado produjo pilas más grandes y mejor conformadas comparado con el manual, lo que redujo los costes de carga en autocargador.

Para el apeo y apilado mecanizados se obtuvo una ecuación de productividad en función de la especie, el peso seco unitario por árbol y el porcentaje de área basimétrica extraída (Tolosana *et al.* 2018), que se empleó para estimar la productividad del apeo y apilado mecanizados para el mismo porcentaje de área basimétrica extraída que en el método no mecanizado (70% y 45%, respectivamente, para *Q. ilex* y *Q. pyrenaica*). Se ha buscado, como variable explicativa más sencilla que el peso unitario por árbol, el dn, utilizando las tablas de peso desarrolladas en el estudio previo.

El incremento de productividad del desembosque en la alternativa mecanizada supuso incrementos de coste unitario para la opción no mecanizada de 7.2 €·ts⁻¹ para encina y 8.4 €·ts⁻¹ para rebollo, costes que se sumaron a los directos de apeo y apilado en esa alternativa para comparar los costes unitarios incluyendo esos sobrecostes. El resultado de la comparación de costes se representa en las Figuras 1 y 2, respectivamente para encina y rebollo.

En el encinar (Fig. 1), el apeo y apilado – teniendo en cuenta los sobrecostes de desembosque – es algo menos costoso para la opción mecanizada, especialmente para los dn mayores. En el aprovechamiento estudiado y para su diámetro normal medio, el coste directo fue de 31.5 €·ts⁻¹ para la alternativa mecanizada. Teniendo en cuenta el sobrecoste de desembosque, el sistema no mecanizado resultó un 6% más caro, 33.2 €·ts⁻¹.

En el rebollar (Fig. 2), la opción mecanizada es más cara, especialmente para árboles pequeños como los observados (también incluyendo los sobrecostes de desembosque). La diferencia se reduce al crecer el dn, alcanzándose la igualdad de costes para dn > 13 cm, fuera del rango observado. Para árboles mayores, la opción mecanizada sería ligeramente menos costosa. Los montes bajos de rebollo son generalmente masas densas con árboles de inferior tamaño, y cuando lo alcanzan pueden aprovecharse para destinos más favorables que la biomasa astillada para uso energético.

Para las condiciones medias del rebollar, la alternativa mecanizada habría tenido un coste de apeo y apilado de 69.0 €·ts⁻¹, más costoso que la opción no mecanizada (42.4 €·ts⁻¹, incluyendo sobrecostes de desembosque).

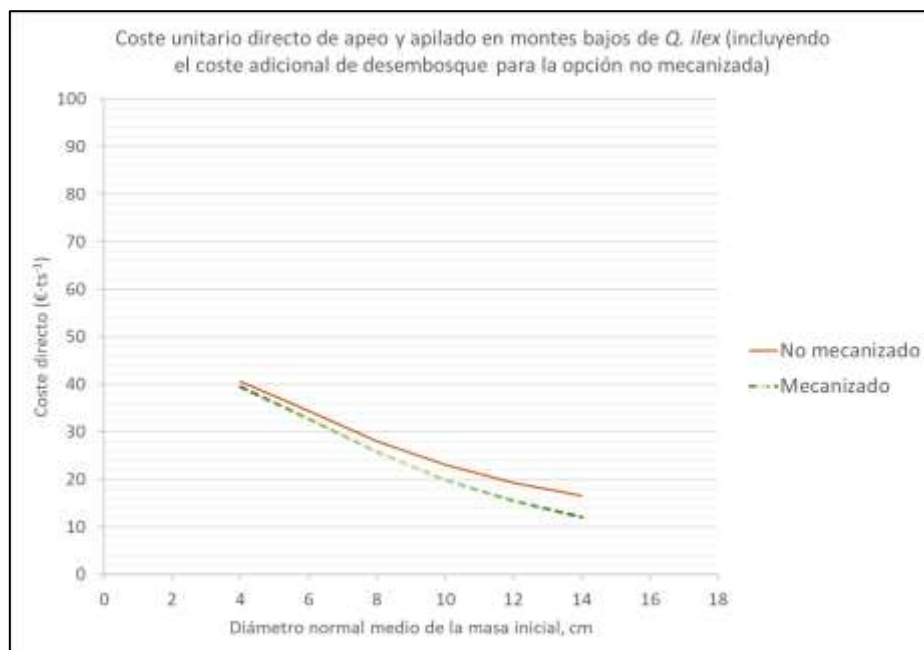


Figura 1. Coste directo de apeo y apilado mecanizado y no mecanizado en claras de montes bajos de *Quercus ilex*.



Figura 2. Coste directo de apeo y apilado mecanizado y no mecanizado en claras de montes bajos de *Quercus pyrenaica*.

3.7.2. Calidad del tratamiento y efectos ambientales.

El peso de las claras y su selectividad fueron muy similares en las parcelas no mecanizadas coimparadas con las tratadas con la cortadora-apiladora.

La frecuencia de daños en los pies remanentes en encina fue 14 y 54%, respectivamente para las opciones no mecanizada y mecanizada. Las frecuencias de daños graves, de superficie > 200 cm² y/o que afectaron a la madera, fueron 5.2% y 10.0%. Esas diferencias no fueron estadísticamente significativas, por la amplia variación entre las parcelas de un mismo tratamiento.

Las mismas tendencias se detectan en rebollo, aunque los porcentajes de daños fueron menores: 11.0 y 22.4% para los tratamientos no mecanizado y mecanizado, respectivamente, y de 3.9 y 10.3% para daños graves (las diferencias sí fueron estadísticamente significativas).

Las alteraciones edáficas fueron irrelevantes por el terreno llano y arenoso, bastante seco durante los aprovechamientos.

El apeo mecanizado produjo daños generalizados en los tocones en comparación con la motosierra, aunque ésta también produjo algunos daños.

5. Discusión

El tamaño de los árboles (diámetro normal, volumen o peso unitarios) es la variable explicativa más común en las ecuaciones de productividad de apeo y apilado (Spinelli *et al.* 2016; Schweier *et al.* 2015; Spinelli *et al.* 2007; Visser and Spinelli, 2012; Erber *et al.* 2017; Chakroun *et al.* 2016; Ghaffariyan *et al.* 2019). En el presente estudio no se ha encontrado relación significativa con el peso de la extracción (peso por hectárea o área basimétrica extraídos), como en otros estudios (Spinelli *et al.* 2016; Tolosana *et al.* 2018). Probablemente el rango de variación en los montes bajos estudiados no fue suficientemente amplio.

La influencia de las especies estudiadas se debe a la diferente estructura de las copas de encina y rebollo (Ruiz-Peinado *et al.* 2012), que afectó a la eficiencia de la manipulación de los árboles completos durante su apeo y apilado.

Este estudio muestra que una evaluación adecuada de diferentes niveles de mecanización debe cubrir en lo posible la cadena completa de suministro, no restringirse a un eslabón. Si se analizase solamente el apeo y apilado, la alternativa mecanizada resultaría la más costosa. Los beneficios de la mecanización en árboles pequeños se obtienen a menudo en la fase de desembosque, por las pilas más grandes, densas y mejor alineadas, como se ha observado en anteriores estudios (Magagnotti *et al.* 2011; Spinelli *et al.* 2006).

Las operaciones estudiadas incurren en pérdidas, aunque el tratamiento del encinar fue próximo a la autofinanciación. Para alcanzarla usando las tecnologías ensayadas, se deberían aplicar a árboles de mayores dimensiones, menos frecuentes en la realidad que los observados. La rentabilidad podría alcanzarse reduciendo los costes – por ejemplo, por la gestión directa de la maquinaria en vez de su alquiler o subcontratación, o por una logística que buscara un mayor secado de la biomasa para incrementar su valor y reducir los costes de su transporte -.

El diámetro límite de igualdad de costes unitarios entre las opciones no mecanizada y mecanizada para rebollo es consistente con estudios anteriores comparando apeo y procesado con motosierras y cosechadoras forestales convencionales (Tolosana *et al.*, 2017).

Los peores resultados en cuanto a daños sobre la masa remanente del método mecanizado contradicen estudios anteriores que encontraron que el apeo mecanizado provocaba menores daños que con motosierra (Magagnotti *et al.* 2012; Spinelli *et al.* 2014). Estos estudios se referían a árboles de mayor tamaño y máquinas con cabezal en punta de grúa. En este estudio los árboles eran más pequeños y el impacto de su caída sobre los pies remanentes no es tan relevante, pero la taladora-apiladora estudiada presenta un cabezal adosado al chasis, sin grúa, por lo que maniobraba continuamente para aproximarse a los pies a cortar, golpeando a los árboles próximos (Tolosana *et al.* 2018; Tolosana *et al.* 2002).

Pocos estudios proporcionan información precisa sobre los daños en los tocones debidos al apeo mecanizado en montes bajos. La mayoría muestran un nivel de daños más alto que en el apeo con motosierra (Schweier *et al.* 2015; Spinelli *et al.* 2007); no obstante, la trascendencia de esos daños sobre el vigor y el crecimiento de la regeneración futura no resulta clara (Spinelli *et al.* 2017).

6. Conclusiones

Las principales conclusiones del presente trabajo son las siguientes:

- Se han desarrollado ecuaciones predictivas de la productividad para el apeo con motosierra y apilado manual (Sistema de árboles completos) en claras sobre montes bajos de encina y rebollo. Los principales factores explicativos fueron: especie y peso unitario medio estimado antes de la clara.
- El balance económico es generalmente negativo, aunque se aproxima a la autofinanciación en las operaciones mecanizadas en el encinar. Se proponen medidas para reducir pérdidas, aunque el aprovechamiento de estos montes bajos es frecuentemente una operación poco rentable, justificada por la necesidad de gestionar el territorio y de prevenir riesgos.
- El apeo y apilado mecanizados tienen un coste unitario directo mayor que las operaciones no mecanizadas equivalentes. Pero la mayor calidad del apilado mecanizado reduce significativamente el coste de desembosque con autocargador. Por ello, en encina el tratamiento mecanizado resulta menos costoso. En rebollo, sin embargo, sólo es menos costoso para diámetros superando los 13 cm, pero es bastante más costoso que el no mecanizado para los diámetros normales observados.
- Los resultados selvícolas fueron similares y adecuados a las prescripciones de la gestión para ambos niveles de mecanización y ambas especies, aunque los daños sobre la masa remanente fueron mayores para la opción mecanizada, especialmente en el encinar, por sus copas más voluminosas con ramas más gruesas. Los daños graves – mayores de 200 cm² o afectando al xilema – afectaron a menos del 6 y del 11% de los pies remanentes (en la opción no mecanizada y mecanizada, respectivamente), no considerándose relevantes dado el destino de estas masas.
- Los daños en los tocones fueron más graves en el aprovechamiento mecanizado. Hay poca evidencia científica sobre el efecto de estos daños en la mortalidad de los tocones o en el vigor del rebrote, que apunta a una relevancia escasa. Aún así, sería conveniente extender este estudio al seguimiento de la futura regeneración vegetativa.
- La conveniencia de la mecanización de las operaciones forestales es innegable, tanto por la mayor y más estable capacidad de producción como por la gran mejora en seguridad laboral, aunque se debe dedicar más esfuerzo a seleccionar los tipos y modelos de máquinas y los sistemas de trabajo más adecuados al aprovechamiento de montes bajos para bioenergía, a pesar de sus condiciones difíciles en comparación con otros tipos de montes.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Director de Recursos Naturales, Rubén García Pérez, y de los ingenieros forestales Alberto Fernández López y Carlos Martínez Torres, de SOMACYL, así como el apoyo financiero de La Caixa, a través de la Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León, y de la Acción COST europea FP1301 (Eurocoppice) en el ámbito de su programa de *Short Term Scientific Missions*).

8. Bibliografía

- ALBIZU, P. M.; TOLOSANA, E.; ROMAN-JORDAN, E.; 2013. Safety and health in forest harvesting operations. Diagnosis and preventive actions. A review. *For Syst* 22(3) 392 - 400.
- ANDERSON, N.; MITCHELL, D.; 2016. Forest Operations and Woody Biomass Logistics to Improve Efficiency, Value, and Sustainability. *Bioenerg. Res.* 9, 518–533.
- CARVALHO, J.; MAGAGNOTTI, N.; NICOLESCU, V.N.; RUCH, P.; SPINELLI, R.; TOLOSANA, E.; 2017. Active management of traditional coppice forests: An interface between silviculture and operations. In UNRAU, A.; BECKER, G.; SPINELLI, R.; LAZDINA, D.; MAGAGNOTTI, N.; NICOLESCU, V.N.; BUCKLEY, P.; BARTLETT, D.; KOFMAN, P.D. (Eds.), *Coppice Forests in Europe*. Ed. Albert Ludwig University of Freiburg. (pp. 72-76). Friburgo, Alemania.
- CHAKROUN, M.; BOUVET, A.; RUCH, P., MONTAGNY, X.; 2016. Performance of two shear heads for harvesting biomass in hardwood stands in France. *Biomass Bioenergy* 91 227-233.
- CORONA, P.; ASCOLI, D.; BARBATI, A.; BOVIO, G.; COLANGELO, G.; ELIA, M.; GARFÌ, V.; IOVINO, F.; LAFORTEZZA, R.; LEONE, V.; LOVREGGIO, R.; MARCHETTI, M.; MARCHI, E.; MENGUZZATO, G.; NOCENTINI, S.; PICCHIO, R.; PORTOGHESI, L.; PULETTI, N.; SANESI, G.; CHIANUCCI, F.; 2015. Integrated forest management to prevent wildfires under Mediterranean environments. *Annals of Silvicultural Research* 39 (1) 1-22.
- ENACHE, A.; KÜHMAIER, M.; VISSER, R.; STAMPFER, K.; 2015. Forestry Operations in the European Mountains: A study of current practices and efficiency gaps. *Scand J For Res.* 7581: 1–39.
- ERBER, G.; HOLZLEITNER, F.; KASTNER, M.; STAMPFER, K.; 2017. Effect of multi-tree handling and tree-size on harvester performance in small-diameter hardwood thinning. *Silva Fennica* 50 (1).
- GHAFFARIYAN, M.R.; ACUNA, M.; BROWN, M.; 2019. Machine productivity evaluation for harvesters and forwarders in thinning operations in Australia. *Silva Balcanica* 20(2) 13-25.
- KOFMAN, P.D.; 1995. SiWork 3 User Guide. Ed. Danish Forest and Landscape Research Institute, Vejle, Denmark. 37 pp.
- LAINA, R.; TOLOSANA, E.; AMBROSIO, Y.; 2013. Productivity and cost of biomass harvesting for energy production in coppice natural stands of *Quercus pyrenaica* Willd. in central Spain. *Biomass Bioenergy* 36 1–9.
- MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R.; ACUÑA, M.; BIGOT, M.; GUERRA, S.; HARTSOUGH, B.; KANZIAN, C.; KÄRHÄ, K.; LINDROOS, O.; ROUX, P.; TALBOT, B.; TOLOSANA, E.; ZORMAIER, F.; 2012. Good Practice Guidelines for Biomass Production Studies. Magagnotti N, Spinelli R (Eds.), Ed. CNR – IVALSA. 50 pp. Florencia (Italia)

MAGAGNOTTI, N.; NATI, C.; PICCHI, G.; SPINELLI, R.; 2011. Mechanized thinning of walnut plantations established on ex-arable land. *Agrofores Syst* 82 (1) 77-86.

MC MAHON, S.; 1995. Accuracy of two ground survey methods for assessing site disturbance. *Int. J. For. Eng* 6 (2) 27-33.

MÜLLEROVÁ, J.; HÉDL, L.; SZABÓ, P.; 2015. Coppice abandonment and its implications for species diversity in forest vegetation. *For. Ecol. Manag.* 343 (1) 88-100.

PIQUÉ, M.; LAINA, R.; VERICAT, P.; BELTRÁN, M.; BUSQUETS, E.; TOLOSANA E.; 2017. Spain. In UNRAU, A.; BECKER, G.; SPINELLI, R.; LAZDINA, D.; MAGAGNOTTI, N.; NICOLESCU, V.N.; BUCKLEY, P.; BARTLETT, D.; KOFMAN, P.D. (Eds.); 2017. Coppice Forests in Europe. Ed. : Albert Ludwig University of Freiburg. pp. 331-336. Friburgo, Alemania.

PYTTEL, P.L.; FISCHER, U.F.; SUCHOMEL, C.; GÄRTNER, S.M.; BAUHUS, J.; 2013. The effect of harvesting on stump mortality and re-sprouting in aged oak coppice forests. *For. Ecol. Manag.* 289 (2013) 18-27.

RUIZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; DEL RIO, M.; 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *For Syst* 21(1) 42-52.

SCHELHAAS, M.-J.; NABUURS, G.J.; SCHUCKS, A.; 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9 (11) 1620-1633.

SCHWEIER, J.; SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; BECKER, G.; 2015. Mechanized coppice harvesting with new smallscale feller-bunchers: Results from harvesting trials with newly manufactured felling heads in Italy. *Biomass Bioenergy* 72 85-94.

SEIDL, R.; SCHELHAAS, M.-J.; RAMMER, W.; VERKERK, P.J.; 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat Clim Chang.* 4(9) 806-810.

SOMACYL, 2020: Comunicación personal del Director de Recursos Naturales, R. GARCÍA.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; SCHWEIER, J.; 2017. Trends and perspectives in coppice harvesting. *Croat. j. for. eng.* 38(2) 219-230.

SPINELLI, R.; PARI, L.; AMINTI, G.; MAGAGNOTTI, N.; GIOVANNELLI, A.; 2017. Mortality, re-sprouting vigor and physiology of coppice stumps after mechanized cutting. *Ann. For. Sci.* 74 (5) 12 pp.

SPINELLI, R.; CACOT, E.; MIHELIC, M.; NESTOROVSKI, L.; MEDERSKI, P.; TOLOSANA, E.; 2016. Techniques and productivity of coppice harvesting operations in Europe: a meta-analysis of available data. *Ann. For. Sci.* 73 1125-1139.

SPINELLI, R.; LOMBARDINI, C.; MAGAGNOTTI, N.; 2014. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fennica* 48 (1).

SPINELLI, R.; CUCHET, E.; ROUX, P.; 2007. A new feller-buncher for harvesting energy wood: Results from a European test programme. *Biomass Bioenergy* 31(4) 205-210.

SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N.; 2006. Biomass harvesting from buffer strips in Italy: Three options compared. *Agroforest Syst* 68 (2) 113-121.

TAVANKAR, F.; MAJNOUNIAN, B.; BONYA, A.E.; 2013. Felling and skidding damage to residual trees following selection cutting in Caspian forests of Iran. *J. For. Sci.* 59 (5) 196–203.

TOLOSANA, E.; SPINELLI, R.; AMINTI, G.; LAINA, R.; LÓPEZ-VICENS, I.; 2018. Productivity, Efficiency and Environmental Effects of Whole-Tree Harvesting in Spanish Coppice Stands Using a Drive-to-Tree Disc Saw Feller-Buncher. *Croat. j. for. eng.* 39(2) 163-172.

TOLOSANA, E.; LAINA, R.; 2018. Post-Fire Regenerated Mixed Stand Thinning and Biomass Harvesting with a FIXTERI Feller-Bundler In Spain: Environmental, Productivity And Cost Analysis. Proceedings of the 51st Edition of the International Symposium Of Forest Mechanization FORMEC. Pág. 343-345. Ed. FUCOVASA. 482 pág. Madrid (España).

TOLOSANA, E.; LAINA, R.; MARTÍNEZ-FERRARI, R.; MARTÍN, M.; AMBROSIO, Y.; 2017. Economic evaluation of mechanized and motormanual options for selective felling of *Quercus pyrenaica* coppices in Leon (NW Spain). Final Conference: Coppice Forests in Europe: a traditional natural resource with great potential. Limoges, France. https://www.researchgate.net/publication/318228241_Economic_evaluation_of_mechanized_and_motormanual_options_for_selective_felling_of_Quercus_pyrenaica_coppices_in_Leon_NW_Spain.

TOLOSANA, E.; VIGNOTE, S.; AMBROSIO, Y.; 2002. Rendimientos, costes y efectos ambientales de las claras mecanizadas sobre repoblaciones de *Pinus sylvestris* L. en España. In Spanish, English Summary. *Sistemas y Recursos Forestales (now Forest Systems)* 11(2) 39-65.

VISSER, R.; SPINELLI, R.; 2012. Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing. *J. For. Res.* 17(5) 397–402.