



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



Productividad y costes de la corta selectiva y empacado mediante la máquina Fixteri FX-15a en rodales con predominio de pino pinaster de una masa de regeneración post-incendio en Girona.

TOLOSANA ESTEBAN, E.¹ y LAINA RELAÑO, R.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

Resumen

La taladora-empacadora aclaró fuertemente (de 6200 a 1900 pies·ha⁻¹) rodales jóvenes – DAP medio de 9 cm – en zonas de de poca pendiente con predominio de pino y, en mucha menor medida, eucalipto, provenientes en su mayoría de regeneración natural post-incendio, dentro de una masa mixta de marcado carácter mediterráneo, con abundante matorral y fuerte pendiente. La productividad media alcanzó las 5.33 t verdes/hora de trabajo. Los coeficientes de utilización fueron 89% de tiempo productivo sobre tiempo de trabajo y 75% de tiempo de trabajo sobre tiempo de actividad. Se ajustó mediante regresión múltiple un modelo de productividad que identificó como principales factores el porcentaje de área basimétrica extraída y el peso por árbol. Se propusieron prácticas para incrementar la productividad, tras estudiar los movimientos de la máquina, tanto mediante observación directa como por análisis de vídeo y posiciones GPS. Se estimó el balance económico, próximo a la autofinanciación, así como los efectos ambientales sobre la masa remanente (8.3 % de pies con daños leves) y los suelos, poco relevantes. Las condiciones sanitarias de los rodales tratados, así como el riesgo de incendios, mejoraron sensiblemente, pudiéndose destacar que prácticamente no quedaron restos de corta tras empacarse los arbolllos completos.

Palabras clave

Biomasa forestal, árboles completos, mecanización forestal, prevención de incendios, *Pinus pinaster*.

1. Introducción

De acuerdo con Bergström *et al.* (2015), el primer prototipo de taladora-empacadora de árboles completos para aprovechamiento de pies de pequeño tamaño fabricada por Fixteri OY fue probado en Finlandia en 2007 (Jylhä y Laitila 2007), este primer estudio mostró que la productividad del empacado se veía limitada por el hecho de que las fases de apeo y empacado sólo se producían de forma simultánea entre un 8 y un 18% del tiempo de trabajo efectivo. Se concluyó que el desarrollo estudiado no era competitivo con las máquinas y sistemas de aprovechamiento convencionales, si bien el concepto tenía un gran potencial de desarrollo futuro.

Se estudió un segundo prototipo en 2009 (Kärhä *et al.* 2009; Nuutinen *et al.* 2011); la productividad se había incrementado entre un 38 y un 77% comparado con el primero, gracias a la mayor capacidad de corta y acumulación en el cabezal y a las mejoras hidráulicas en la unidad de empacado, que aumentaron la posibilidad de ejecutar simultáneamente al apeo y el empacado.

Se lanzó al mercado una tercera versión del sistema de empacado “Fixteri”, La FX-15a, en 2013 y su eficiencia (tiempo por paca) tras su implementación en la máquina combinada (taladora-empacadora) creció entre un 90 y un 160% en comparación con las versiones anteriores (Björheden y Nuutinen, 2014).

Una de las ventajas de esta tecnología, que se considera preferible a las alternativas en los Países Nórdicos para tamaños de árbol de diámetro normal entre 7 y 14 cm (Kärhä *et al.*, 2011) o volúmenes entre 30 y 85 dm³ (Bergström y Di Fulvio, 2014; Ala-Varvi y Ovaskainen, 2013), es el

abaratamiento del coste de extracción en autocargador (Laitila *et al.*, 2009; Kärha *et al.*, 2009; Alavarvi y Ovaskainen, 2013) y de transporte a largas distancias (Fernández-La Cruz y Bergström, 2015), así como la elevada productividad media del astillado de pacas (Kons *et al.*, 2015; Nuutinen *et al.*, 2015); según Nuutinen *et al.* (2016) la productividad del astillado de pacas es entre 1.5 y 3.2 veces mayor que la de material no empacado.

La empresa fabricante, Fixteri OY, promovió el ensayo de esta máquina por la empresa Forest Linna OY, subcontratada por la empresa catalana Lignia Biomassa S.L., en el Término de Riudarenes (Girona) en 2018, con el objeto de probar su eficacia y productividad para el aprovechamiento de biomasa en una masa mixta en que se mezclaban ejemplares supervivientes del incendio de agosto de 1994 y masas densas de regenerado post-incendio (especies arbóreas y de matorral).

El tratamiento perseguía la eliminación de los restos de antiguas plantaciones de eucalipto, en muy mal estado, y del regenerado post-incendio de pino marítimo, afectado por un ataque de *Matsococcus* spp., con el objetivo de reducir la densidad, mejorar el estado sanitario y favorecer como especie principal, por el interés de su aprovechamiento corchero, al alcornoque (*Quercus suber* L.), que estaba presente tanto a través de ejemplares maduros supervivientes al fuego como de ejemplares jóvenes regenerados con posterioridad. Simultáneamente, se buscaba la prevención de incendios o la mayor facilidad de su extinción en caso de producirse. Esta fue también la razón de escoger un sistema de aprovechamiento de árboles completos, para evitar dejar residuos de corta que pudieran incrementar la carga combustible.

La promoción de especies frondosas, especialmente especies resistentes y resilientes como el alcornoque (Catry *et al.*, 2012; Mundet *et al.*, 2018), y el control de la densidad mediante desbroces y claras, así como el aprovechamiento de biomasa como forma de gestionar el combustible, se han recomendado por distintos autores en Cataluña como formas de prevenir los incendios o mitigar sus consecuencias (González y Pukkala, 2006; Torras y Saura, 2008; Francos *et al.*, 2016; Rodríguez-Carreras *et al.*, 2020).

Los pinos y eucaliptos procedían principalmente de antiguas plantaciones en las zonas de menor pendiente. Como se ha indicado, los pinos padecían plagas y muchos de los eucaliptos más grandes estaban muertos. La regeneración post-incendio de los pinares consistía en rodales muy densos con altas tasas de mortalidad.

Mezcladas con estas especies plantadas había diversas especies arbóreas de frondosas mediterráneas y matorrales, especialmente en las zonas con pendientes fuertes, donde no se habían establecido plantaciones, en que las especies más abundantes eran *Quercus suber*, *Quercus petraea*, *Quercus ilex*, *Arbutus unedo*, *Sorbus* spp. y otras menos frecuentes. El sotobosque era bastante denso y alto en las zonas abruptas, siendo las especies dominantes los brezos (*Erica* spp.), seguidos por *Smilax aspera*, *Ruscus aculeatus*, *Hedera helix*, *Phillyrea angustifolia*, *Viburnum tinus* y otras menos frecuentes. Esta composición se corresponde con la de los alcornocales mejor conservados en el área (Catry *et al.*, 2012).

La empresa fabricante de la máquina, Fixteri OY, encargó al equipo de la U.P.M. al que los autores pertenecen la realización de estudios de productividad y costes de esta experiencia.

2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo fueron:

- Realizar un estudio de productividad de la Fixteri FX-15a trabajando en tratamientos fitosanitarios y de prevención de incendios forestales, para identificar los factores explicativos de la misma y desarrollar ecuaciones predictivas.

- Llevar a cabo un estudio de tiempos detallado de la máquina para identificar posibles ineficiencias en su manejo o en su concepto mecánico para este tipo de trabajos y sugerir, en su caso, posibilidades de mejora en el diseño o en los métodos de trabajo.
- Estudiar los costes del aprovechamiento de biomasa y valorar su rentabilidad o, en caso de no alcanzarse, el posible ahorro con respecto a tratamientos alternativos convencionales.

3. Metodología

Se diseñó un inventario forestal antes de la clara, correspondiendo a la masa a tratar 61 parcelas de 8.0 m de radio, localizadas de forma sistemática en los nudos de una malla cuadrada de 60x60 m (la fracción de muestreo sería del 5.6%, para una superficie forestal total de aproximadamente 22.0 hectáreas).

Finalmente, sólo se midieron 45 parcelas, las restantes 16 no se midieron debido a su localización en zonas muy pendientes y/o muy alejadas de las pistas temporales, inaccesibles para la clara mecanizada con la máquina a ensayar.

Se registraron en cada parcela las especies de matorral y su fracción de cabida cubierta, las especies arbóreas y cada diámetro a la altura del pecho (DAP). Para la estimación de peso de la biomasa se utilizaron las ecuaciones de Montero *et al.* (2005). Para la expresión de resultados en términos de peso seco en estufa se llevaron a cabo análisis de una muestra de humedad por parcela de inventario, siguiendo el método gravimétrico de secado en estufa acorde con la norma ISO 18134-3:2015.

Las parcelas tratadas se volvieron a inventariar después de la clara, registrándose las mismas variables y tomándose datos de restos sobre el terreno y daños en subparcelas de 4 m de diámetro. En esas subparcelas, se contabilizaron los pies remanentes dañados y los daños sobre los suelos, siguiendo las metodologías de Tavankar *et al.* (2013) y Mc Mahon (1995).

Sólo 17 de las 61 parcelas iniciales fueron aclaradas, lo que corresponde a una superficie forestal tratada de 6.1 hectáreas, un 28% de la de la masa completa y un 38% de la zona inventariada. El resto de las parcelas no se pudieron tratar por la pendiente excesiva para la máquina y por la negativa del propietario particular del monte a que se abrieran calles además de las pistas temporales ya existentes.

La máquina taladora-apiladora montaba la mencionada unidad empacadora de árboles completos Fixteri FX-15a y un cabezal de apeo acumulador Nisula280E+ (del fabricante NisulaForest OY), ambos acoplados a una máquina base Logman 811 FC de 125 kW de potencia nominal, con una grúa telescópica Logmer C140-11 que permitía el apeo selectivo desde pistas temporales o calles (Figura 1).



Figura 1. Taladora-empacadora de árboles completos Fixteri FX-15a durante los ensayos.

Las pacas fueron extraídas mediante un autocargador de fabricación española DINGO AD8-18 8x8 de 115 kW de potencia y 8.0 toneladas de capacidad de carga, que las transportaba al centro logístico donde se descargaban, situado a una distancia máxima de 400 m del borde de las pistas temporales.

Allí, después de un periodo de sacado, las pacas se cargaban en un camión de madera y se transportaban a la central de consumo situada a 35 km de distancia, donde serían astilladas usando una astilladora eléctrica fija.

Para medir la productividad de la máquina, se llevó a cabo un seguimiento mediante GPS durante 14 días en marzo de 2018, y la superficie tratada y las trayectorias se combinaron con los datos de pesaje automático que producía la propia máquina mediante un dinamómetro incorporado que pesa cada paca y sube los datos de peso y de tiempo a una base de datos accesible en la nube, por medio del programa Wnexus 2.

La precisión del dinamómetro fue testada por la empresa Lignia Biomassa S.L. mediante pesado de las cargas de autocargador en una báscula calibrada, encontrando diferencias despreciables – alrededor del 1% -.

Esos datos permitieron ligar la producción diaria con las condiciones dasométricas y/o dendrométricas obtenidas por el inventario (o la comparación de inventarios) en las parcelas correspondientes – más cercanas – a la superficie tratada diariamente, con el objetivo de encontrar factores condicionantes de la productividad en este tipo de tratamientos.

Un estudio de tiempos por muestreo (Magagnotti et al., 2012), mediante cronometraje por el equipo de investigación, se llevó a cabo durante 12 horas y 1.5 minutos de tiempo de actividad, equivalentes a 10 horas y 4 minutos de tiempo de trabajo y 8 horas y 58 minutos de tiempo productivo (Bhöjerden y Thompson, 2000). Fue un cronometraje discontinuo simultáneo tanto del cabezal como de la unidad empacado por parte de un observador. Se dividió el trabajo del cabezal

en operaciones elementales: desplazamiento, cabezal en vacío hacia el árbol, apeo, alimentación, agrupación de árboles en el suelo y manejo de pacas y simultáneamente se anotó la actividad de la unidad empacadora marcando 2 estados, trabaja o no trabaja. Además, se grabó el trabajo del cabezal de manera continua durante 116 minutos y gracias a los vídeos se hizo un conteo de pies y cortes por ciclo de apeo.

La ecuación predictiva de productividad se obtuvo mediante técnicas de regresión múltiple empleando el programa StatGraphics v18. Se consideraron como variables dependientes la productividad media diaria por hora de actividad y por hora de trabajo efectivo E15 (sin considerar como interrupciones las pausas inferiores a 15 minutos). Se ensayaron como variables explicativas la densidad inicial y extraída ($\text{pies}\cdot\text{ha}^{-1}$), el área basimétrica inicial y extraída, el porcentaje de pies y de área basimétrica extraídos, el peso seco medio unitario (por pie) y la extracción media en toneladas secas por hectárea ($\text{ts}\cdot\text{ha}^{-1}$).

La productividad del autocargador no se registró *in situ*, pero puede estimarse utilizando la ecuación general de productividad de desembosque desarrollada como consecuencia de un metaanálisis por Tolosana *et al.* (2017).

La estimación de costes del tratamiento se basó en la ecuación de productividad combinada con los costes horarios. Los costes de alquiler de las máquinas se estimaron como de $120 \text{ €} \cdot \text{HTrab efectivo}^{-1}$ para la taladora-empacadora (Merilainen, 2019) y en $50 \text{ €} \cdot \text{Htrab efectivo}^{-1}$ para el autocargador (Callol, 2019).

Los costes se pasaron a la hectárea considerando la extracción media de biomasa obtenida del inventario, y se compararon con referencia españolas para los costes de este tipo de tratamientos (TRAGSA, 2021).

4. Resultados

La masa forestal objeto de tratamiento era muy heterogénea en pequeños rodales, desde fragmentos arbolados muy densos hasta áreas de matorral con arbolado disperso. Las principales especies en la zona tratada fueron *Pinus pinaster* (desde regenerado hasta fustales de 25-30 cm de DAP), alcornoques (*Quercus suber*, algunos de ellos supervivientes al incendio de tamaños medianos y grandes, la mayoría pequeños árboles regenerados tras el incendio), otros robles y encina (*Quercus spp.*), pequeños pies de madroño (*Arbutus unedo*) y eucaliptos plantados en algunas parcelas. El DAP medio antes del tratamiento fue de cerca de 9 cm.

Como se ha indicado, sólo un 38% de la zona inventariada fue finalmente tratada. La pendiente media en la zona aclarada fue del 16% (intervalo de confianza al 95% entre 11 y 22%) mientras la zona no tratada tuvo una pendiente media significativamente distinta del 32% (Intervalo de confianza al 95% de probabilidad fiducial entre 27 y 36%). El área basimétrica (AB) inicial de pino en la zona aclarada fue de $23 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (intervalo de confianza al 95% entre 20 y 27), significativamente mayor que el correspondiente a la zona inventariada y no tratada ($7,6 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ - intervalo de confianza entre 5.0 y 10.3 -).

De acuerdo con la comparación de inventarios en las parcelas tratadas, en la zona aclarada la densidad arbórea se redujo de más de $6,200 \text{ pies}\cdot\text{ha}^{-1}$ hasta alrededor de $1,900$ – para un DAP medio después de la clara de 7.8 cm -, y el AB inicial se redujo en un 66%, desde $30.8 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ hasta $10.4 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$. La biomasa extraída en la superficie tratada se estimó en $45.4 \text{ ts}\cdot\text{ha}^{-1}$ (de las cuales un 76.5% de pinos, un 20.0 % de eucaliptos y un 3.5% de frondosas mediterráneas), sin contar la biomasa proveniente de los matorrales. La humedad de la biomasa arbórea extraída fue del 45.0 % en base húmeda.

La productividad media en la superficie forestal tratada se refleja en la Tabla 1.

Tabla 1: Productividad media registrada en la masa tratada.

Producción total, toneladas verdes (H=45%)	477.0
Número de pacas	1,232
Peso medio por paca, toneladas verdes	0.387
Productividad media, toneladas verdes·Hactividad ⁻¹	4.40
Productividad media, toneladas verdes·HtrabajoE15 ⁻¹	5.33
Productividad media, pacas·HtrabajoE15 ⁻¹	14.7
Tiempo medio por paca, min de Trabajo E15	4.08

La productividad media por hora de actividad (tiempo de presencia menos tiempo de mantenimiento e interrupciones, asimilable al concepto de *Scheduled Machine Hours*) fue de 4.40 toneladas verdes (tv). Alcanzó 5.33 tv por hora de trabajo efectivo E15 (incluyendo pausas de menos de 15 minutos, generalmente debidas a pequeñas reparaciones, liberación de cargas atascadas en la unidad de empacado y pausas del operario para pequeños descansos o planificación del trabajo sobre el terreno).

El peso verde extraído (pesado por el dinamómetro de la máquina) en toda la operación fue de 477 tv, muy similar al medido pesando la biomasa en la báscula de la empresa contratista (481,6 t) y también próximo al peso estimado por comparación de inventarios y aplicación de las ecuaciones de Montero *et al.* (2005), que fue de 505 tv con el 45% de humedad.

Para el ajuste de la ecuación de productividad, el número de puntos – productividades diarias sobre zonas representadas por dos o más parcelas) fue de 10. El ajuste de la regresión múltiple identificó como factores influyentes en la productividad por hora de actividad fueron el peso seco unitario medio (por árbol) y el porcentaje de AB extraída. La regresión múltiple inicial, con transformación logarítmica, fue reajustada mediante regresión no lineal para estimar de forma directa los exponentes de estas variables y obtener unos estadísticos referidos a las variables originales, que se presentan en la Tabla 2 junto con la propia ecuación; la representación gráfica de esta curva se muestra en la Figura 2.

Tabla 2: Resultados del análisis de regresión no lineal.

R-Cuadrada	73.2%
R-Cuadrada (ajustada por g.l.)	51.8%
Error típico de la estimación	0.48
Valor absoluto medio de los residuos	0.29 (tv-Hactividad ⁻¹)
Estadístico de Durbin-Watson	1.84
Autocorrelación residual	-0.025

La ecuación ajustada fue:

$$\text{Productividad (tv-Hactividad}^{-1}) = -21.04 + 4.96 \cdot \%ABExt^{0.233} + 8.97(\text{kgs}\cdot\text{pie}^{-1})^{0.124}$$

Donde Productividad (tv-Hactividad⁻¹) es la productividad en toneladas verdes (al 45% de humedad) por hora de actividad, %ABExt es el porcentaje de área basimétrica extraída y kgs·pie⁻¹ es el peso seco en estufa unitario, expresado en kg de materia seca por pie.

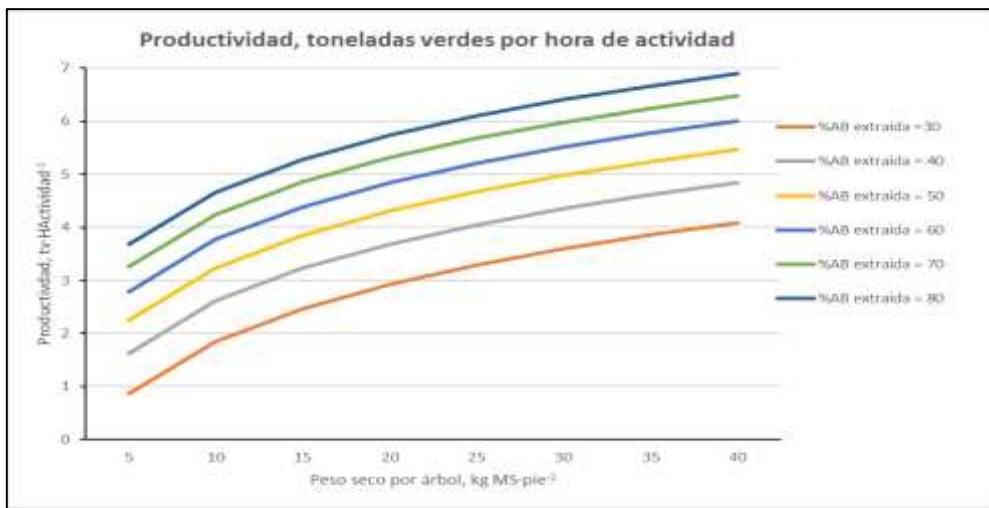


Figura 2. Representación gráfica de la ecuación de productividad ajustada.

Las superficies cubiertas cada día por el trabajo de la máquina, en diferentes colores o tramas para cada jornada, se representan en la Figura 3, a partir de los datos procedentes del GPS de alta precisión. El patrón de trabajo no parece sistemático, con movimientos frecuentes sobre zonas ya tratadas, reflejando, por un lado, cambios de criterio del propietario particular del monte, que obligaba al maquinista a volver sobre algunos rodales, y por otro por el modo tradicional de trabajar en el mediterráneo español, desde pistas temporales o trochas, sin abrir calles paralelas. Esto obligaba con frecuencia al maquinista a volver por los mismos caminos para continuar el trabajo donde se había finalizado el día anterior.

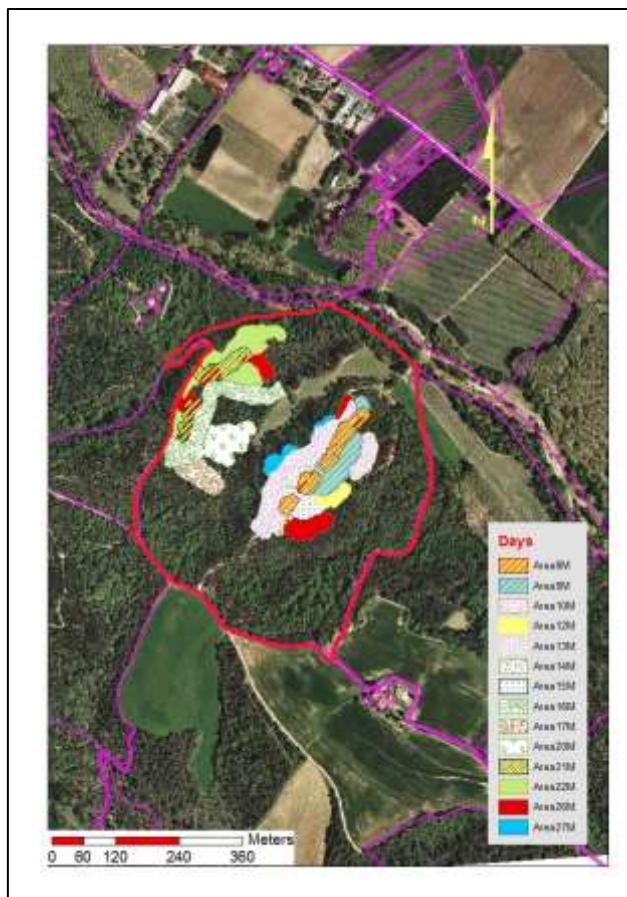


Figura 3. Áreas tratadas diariamente. El código corresponde con el día y la inicial con el mes (marzo de 2018).

Como resultado del estudio de tiempos detallado, se determinaron los coeficientes de utilización, del 89% de tiempo productivo sobre tiempo de trabajo y del 75% de tiempo productivo sobre tiempo de actividad.

Además, se extrajeron algunos resultados del análisis del vídeo y del estudio de tiempos, que aportan mayor detalle que pueden ser la base para futuros estudios científicos:

- La función multitaladora del cabezal dio lugar a que se cortaran 6,2 árboles por ciclo de multiapeo. La duración promedio de un ciclo de multiapeo, que incluye la aproximación del cabezal al árbol, los sucesivos cortes y acumulaciones y la alimentación, fue de 62 segundos de los cuales el 42% correspondió a la operación de corte y acumulación.
- El cabezal invirtió un 15% del tiempo productivo a alimentar la unidad empacadora pero además se producen tiempos de espera durante la carga de la bandeja de alimentación o la espera en el pesado de la paca. El cabezal colapsa la capacidad de admisión automática de la carga anterior a la unidad de empacado (estas esperas son difíciles de evitar con la tecnología empleada). Estos tiempos de espera se han estimado en un 13% de tiempo productivo, conforme a los resultados del cronometraje discontinuo. Simultáneamente el sistema de alimentación y la unidad empacadora estuvieron un 50% del tiempo de trabajo del cabezal parados. Esta cifra está sujeta a cierta incertidumbre, puesto que el cronómetro no tenía constancia del trabajo de estas dos máquinas salvo por un movimiento claro y el ruido producido. Es importante señalar que la demanda de potencia hidráulica de estos tres mecanismos trabajando a la vez superaba la capacidad de la máquina y tanto el conductor manualmente como el sistema de forma automática, priorizan una u otra función.
- El maquinista usó varias secuencias de trabajo, dejando en algunas ocasiones varios fardos de árboles en el suelo para agruparlos antes de la alimentación y en otras llevándolos directamente a la bandeja de alimentación. En ese sentido cabe lanzar las siguientes preguntas: ¿Cuántos árboles se pueden manipular de forma segura y efectiva antes de depositarlos en el suelo o alimentar la máquina? ¿Cuál es el número límite de árboles para alimentar directamente la tolva de entrada tras el apeo y acumulación? ¿Es preferible depositar parte en el terreno y cortar otros antes de juntarlos y alimentar la tolva? Un estudio más detallado, con ayuda de herramientas de simulación o sistemas de toma de decisión podría permitir esa optimización de los procedimientos de trabajo, mejorando la productividad.
- Se produjeron algunos fallos mecánicos infrecuentes en los brazos recolectores de biomasa que la comprimen y elevan hacia la cámara superior de empacado.
- Hubo pequeños problemas en el sistema de alimentación que obligaron al maquinista a bajar y liberar manualmente el material atascado.

En cuanto a la estimación de costes, la productividad media de la Fixteri, 5.33 tv-HTrabE15⁻¹, combinada con su coste horario de 120 €HTrab⁻¹, permite estimar el coste unitario directo de apeo y empacado en 22.51 €tv⁻¹.

Para una carga media estimada de 7.0 toneladas verdes y la distancia máxima de desembosque de 400 m, con un peso de corta equivalente de 53.1 m³ha⁻¹, la productividad estimada para el autocargador es de 11.14 m³HTrab⁻¹ (equivalente a 9.52 tv-HTrab⁻¹). Con el coste horario de 50.0 €HTrab⁻¹, el coste directo unitario del desembosque se puede estimar en 5.25 €tv⁻¹.

Considerando un 10% de costes generales (fijos, indirectos y de estructura), el coste final de las pacas en el terminal logístico sería de 30.54 €tv⁻¹ (con la humedad del 45% en base húmeda). Si

se supone que las pacas se dejaran secar hasta alcanzar un 30% de humedad, también en base húmeda, el coste por tonelada al 30% de H sería de 38.86 €.

Si las pacas se transportaran con esta humedad a la planta del consumidor final con un coste de transporte estimado en 6.0 €·tv⁻¹ (al 30% H) para una distancia (ida) de 35 km, el coste de las pacas puestas en planta sería de 44,86 €·tv⁻¹ (al citado 30% de H).

El precio que el suministrador debería obtener por las pacas con la citada humedad, para un beneficio industrial ligeramente superior al 10% de sus costes debería ser de 49.5 €·tv⁻¹, supuesto que el propietario no recibiera un precio en pie por la biomasa obtenida. Si el consumidor astillase las pacas con una astilladora o trituradora eléctrica fija, el coste para él de las astillas con H=30% ascendería a 52.5 €·tv⁻¹.

Los daños sobre la masa remanente fueron moderados, afectando sobre todo a árboles pequeños que fueron golpeados por la grúa o por los fajos de árboles que eran conducidos a la unidad de alimentación. El número total de árboles dañados fue, como media, de 159 pies·ha⁻¹, suponiendo un 8.3% del número de pies después de la clara.

Los daños edáficos fueron escasos, solamente se produjeron en zonas aisladas, básicamente partes bajas y húmedas de algunas pistas temporales donde la repetición de pasadas del autocargador dio lugar a rodadas poco profundas.

La altura de tocones fue adecuada a las prescripciones en terreno llano, algo más alta en zonas con pendiente. De hecho, el propietario forestal pagó a una cuadrilla de motoserristas para rebajar los tocones en esas pocas zonas.

Es de destacar la elevada eficiencia en la recolección. Con la excepción de pequeñas partes de árbol rotas, prácticamente no quedó ningún residuo sobre el terreno tras el tratamiento.

5. Discusión

En cuanto a la caracterización del tratamiento, se abrieron áreas cortafuegos – o al menos se redujo considerablemente la densidad y carga combustible – en las zonas más llanas y accesibles, a la vez que se favoreció a la especie más resistente y resiliente frente a los incendios, el alcornoque. Aunque en rigor no haya sido un tratamiento preventivo y no haya afectado a la mayor parte de la superficie del monte, su resultado facilitaría las tareas de extinción en caso de producirse un incendio en los próximos años y mitigaría sus efectos adversos.

Es de destacar la heterogeneidad de la masa y el patrón de trabajo no sistemático, sin trabajar desde calles y con movimientos frecuentes de la máquina sobre zonas ya tratadas.

La productividad media registrada (2.42 ts-HActividad⁻¹, 2.93 ts-HTrabE15⁻¹ o 14.7 pacas-HTrabE15⁻¹) corresponde con un peso por árbol de 10.56 kg de MS, equivalentes, aceptando los coeficientes de conversión de Nuutinen y Bjoherden (2015) a 27.4 dm³ de biomasa sólida.

Bergström et al (2016) registraron una productividad similar o ligeramente inferior (3.1 ts-HProd⁻¹, equivalente a 2.8 ts-HTrab⁻¹), si bien se trataba de una clara con pies de menor tamaño – 16.2 dm³ – y menos peso de la corta en número de pies – 3,554 pies·ha⁻¹ frente a 4,300 en el presente caso -. La productividad en número de pacas fue también ligeramente inferior a la registrada en el presente trabajo (15.1 pacas-HProd⁻¹; nótese que, aunque el valor numérico sea superior, la cifra se refiere a horas productivas, que fueron en el caso estudiado un 89% de las de trabajo, con lo que la cifra comparable sería de 13.4 pacas-HTrab⁻¹). Bergström et al (2016)

obtuvieron un menor retraso en el trabajo del cabezal por las esperas en la alimentación de la unidad empacadora y la expulsión y pesado de pacas, un 7% frente al 13% de este estudio. También se ha superado el número de pies por multiapeo, pasando de 4,1 a 6,2 y el tiempo por ciclo de apeo, pasando de 44,6 s a 49 s. En este sentido, Bergström *et al* (2016) no contabilizaron los pies menores de 2,5 cm de diámetro.

Nuutinen y Bjöherden (2015) registraron en una masa similar a la estudiada (masa de pino silvestre con abundante sotobosque, peso de la extracción en número de pies·ha⁻¹ inferior (3,216) y volumen unitario de biomasa similar (0.27 m³·pie⁻¹) una productividad ligeramente superior, 9.7 m³·HProd⁻¹ (3.7 tsHProd⁻¹, equivalentes a 3.3 tsHTrab⁻¹). En una masa densa sin sotobosque registraron una productividad de 11.9 m³·HProd⁻¹ (4.6 tsHProd⁻¹, equivalentes a 4.1 tsHTrab⁻¹) para una extracción de menos peso en número de pies pero de mayor tamaño medio (2,019 pies·ha⁻¹ de 44 dm³·pie⁻¹ de volumen medio). En otra primera clara con un volumen de biomasa unitario medio aún mayor (84 dm³·pie⁻¹) y una extracción mucho más reducida (1,266 pies extraídos·ha⁻¹) se obtuvo una productividad de 13.8 m³·HProd⁻¹ (5.3 tsHProd⁻¹, equivalentes a 4.7 tsHTrab⁻¹). Estas últimas cifras son superiores a las del presente estudio, probablemente por los tamaños mayores de los pies, las masas menos heterogéneas y el patrón de trabajo más sistemático. Nuutinen y Bjöherden (2015) apuntaron una ecuación para estimar el tiempo de apeo, aplicándola a este estudio daría lugar a 40 s, frente a los 49 s que se han obtenido. Aunque es importante señalar que el número de pies contabilizados aquí fue superior, aunque se han incluido todos los pies y Nuutinen y Bjöherden (2015) excluyeron los de <2.5 cm.

En cuanto a los modelos de productividad, en el estudio de Bergström *et al.* (2016) la variable explicativa fue el volumen unitario medio del fuste, con una R cuadrada del 67%. Esta variable coincide como descriptiva del tamaño medio unitario con una de las identificadas en el estudio actual, el peso seco unitario de biomasa por árbol.

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; Ghaffariany *et al.* 2019). En el presente estudio se ha encontrado también relación significativa con el peso de la extracción (peso por hectárea o área basimétrica extraídos, en este caso expresada en porcentaje), como en otros estudios (Spinelli *et al.* 2016; Tolosana *et al.* 2018).

Se ha comparado el modelo de productividad ajustado con otros, ajustados por el mismo equipo con la misma máquina en una corta a hecho de eucaliptos afectados por una plaga en Galicia (Coto Muiño) en 2019 y con los dos estudios mencionados sobre la misma máquina, en Suecia y Finlandia, en ambos casos sobre pinares con cierta proporción de abedul en Suecia (Bergström *et al.*, 2016) y distintas proporciones de sotobosque en Finlandia (Nuutinen y Bjöherden, 2016).

Para unificar unidades se ha supuesto que la densidad de los fardos de pino es de 385 kg de materia seca por metro cúbico sólido de biomasa (relación entre el peso de las pacas y el volumen sólido de pacas de pino producidas en el estudio de Nuutinen y Bjöherden), que los coeficientes de utilización son un 89 % (tiempo productivo sobre tiempo de trabajo) y un 83.7 % (estimados en el presente estudio y que los factores de expansión de biomasa para pino silvestre nórdico son los definidos por Lehtonen *et al.*, (2004). En la ecuación de Girona, que se refiere a cortas selectivas, se ha tomado como porcentaje de área basimétrica extraída el observado como media, del 66%. Para una comparación más homogénea, se ha ajustado a los datos proporcionados por los distintos autores un mismo modelo logarítmico. La representación gráfica de estas comparaciones se presenta en la Figura 4.

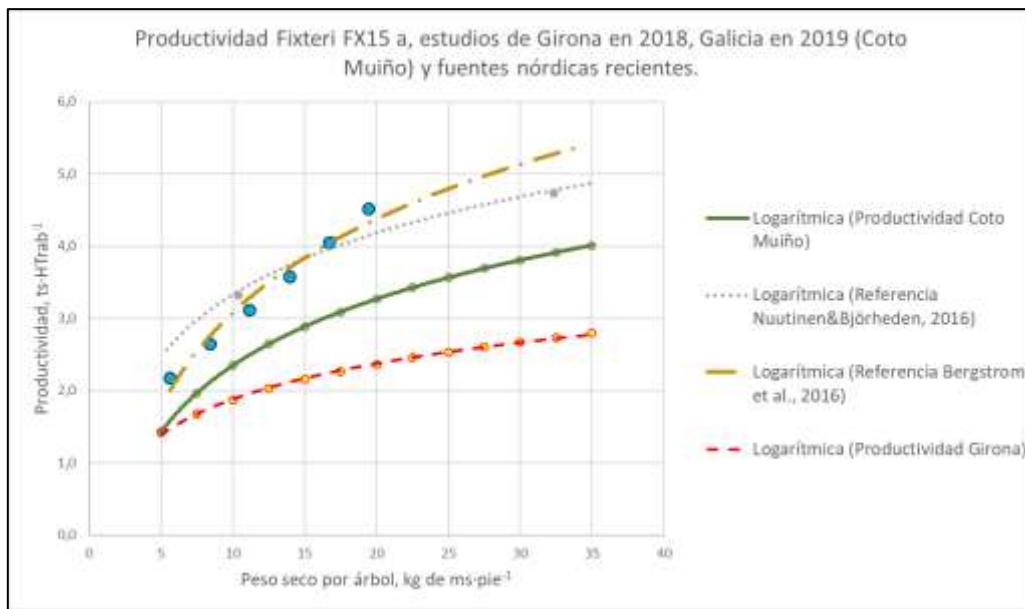


Figura 4. Comparación de la productividad de la Fixteri en Girona con otras referencias recientes.

Las productividades relativamente bajas podrían achacarse a la heterogeneidad de la masa estudiada, al carácter selectivo de la corta (en comparación con el caso gallego) y sobre todo a los factores organizativos y externos mencionados con anterioridad. Con un procedimiento de trabajo más sistemático sobre un monte menos heterogéneo, la máquina estudiada podría alcanzar valores sensiblemente mayores de productividad.

En cuanto a la tecnología de trabajo y la propia concepción de la máquina, su automatismo es simple y eficaz, la transmisión a la unidad trasera de empacado es robusta y sencilla, y trabaja generalmente con buena productividad, al menos en las zonas en que la pendiente no alcanza valores que comprometen su estabilidad, dada la altura elevada del semichasis trasero, especialmente durante la operación de formación de las pacas en la cámara superior de la unidad. Esta elevación de la altura del centro de gravedad durante el empacado y el consiguiente problema de falta de estabilidad en terrenos pendientes es una de las limitaciones operativas de la tecnología, que había sido ya puesto de manifiesto por Bergström *et al.* (2016).

El problema de las esperas por la unidad taladora-apiladora por la menor velocidad aparente del sistema de alimentación de la unidad empacadora contradice estudios previos que destacan la capacidad mayor de la unidad empacadora con respecto al cabezal (Bergström y Di Fulvio, 2014; Nuutinen and Björheden ,2016; Erber y Kuhmaier, 2017). Esto se puede deber a la utilización de una grúa LogmerC 140-11, de mayor alcance y más rápida que la usada en esos estudios (Loglift FT 100 en el estudio de Bergström *et al.* y sin especificar en el de Nuutinen y Bjoherden), así como a los diferentes maquinistas que trabajaron en los distintos estudios.

Acerca de esta limitación en la capacidad de corta, se ha sugerido que una posible mejora provendría del uso de cabezales y métodos de trabajo que permitan la acumulación de árboles durante movimientos continuos de la grúa (Bergström *et al.*, 2016), como el sistema llamado *boom corridor*, que permite una corta selectiva semisistématica con cabezales de sierra circular.

El coste unitario estimado no sería competitivo en las actuales condiciones del mercado español de la biomasa forestal para generación eléctrica – el más probable para consumir astillas de árbol completo -. El máximo precio esperable en destino para este tipo de astillas es de 45.0 €·tv⁻¹, lo que reduciría el coste de este tipo de tratamientos preventivos de incendios a alrededor de 265

€·ha⁻¹ en las condiciones del caso estudiado, frente a los costes de tratamientos de clareo dejando la biomasa en monte, que para árboles de DAP ≤ 12 cm es estimado por TRAGSA (2021) en 0.38 €·pie⁻¹, lo que dada la densidad de corta observada, conduciría a un coste por ha de la operación no mecanizada de más de 1,600 €. Los sistemas mecanizados alternativos (taladora apiladora acumuladora seguida de extracción con autocargador y astillado o empacado en cargadero o borde de pista) tampoco resultarían competitivos para este tamaño de árboles (Kärha et al., 2011; Bergström y Di Fulvio, 2014; Ala-Varvi y Ovaskainen, 2013).

6. Conclusiones

- El tratamiento fue una clara muy fuerte dirigida a ciertas especies (pino y eucalipto) en zonas de pendiente escasa o moderada dentro de un monte mixto mediterráneo, con el objeto de aprovechar la biomasa empacada de árboles completos y de crear áreas cortafuegos reduciendo fuertemente la densidad (para el DAP <10 cm) de 6,200 pies·ha⁻¹ a 1,900, favoreciendo a especies resistentes y resilientes a los incendios forestales, como el alcornoque.

- Bajo las condiciones muy limitantes de la masa y del método de trabajo (gran heterogeneidad, con muchas áreas de pendiente fuerte y abundante matorral, y con un método de trabajo poco sistemático en relación con los requerimientos de los sistemas mecanizados convencionales), la productividad media de la taladora empacadora de árboles completos Fixteri FX15a fue notable, alcanzando las 5.33 tvHTrabE15⁻¹ (4.4 tv-HActividad⁻¹).

- Como resultado del estudio de tiempos más detallado (por cronometraje y análisis de vídeos) los coeficientes de utilización fueron de 89% de tiempo productivo sobre tiempo de trabajo y de 75% de tiempo productivo sobre tiempo de actividad, valores bastante elevados para este tipo de máquinas combinadas.

- Se ajustó una ecuación predictiva de la productividad en tv-HActividad⁻¹, identificándose como factores explicativos el peso seco por pie y el porcentaje de área basimétrica extraída, de modo que la productividad aumenta con mayor peso de la clara y mayor peso unitario de los árboles.

- La adopción de un método de trabajo más sistemático – definiendo calles paralelas donde fuera posible – y la definición de criterios más claros de selección de los pies a cortar, habría permitido aumentar sensiblemente la productividad, reduciendo así los costes unitarios.

- Incluso en esas condiciones tan desfavorables, esta operación habría sido autofinanciable si un consumidor situado cerca de la masa (a una distancia de transporte de 35 km, ida) pagase 49.5 €·tonelada de pacas⁻¹ al 30% de humedad, en base húmeda – suponiendo que no se retribuyese a la propiedad por la biomasa en pie -. La operación estudiada estaría cercana a la rentabilidad en las actuales condiciones del mercado español, en que se podría pagar un precio máximo en planta de 45.0 €·tv⁻¹ por las astillas de árboles completos al 30% de humedad. Los medios empleados, incluso si, como en el caso estudiado, no se alcanza la autofinanciación, reducen considerablemente el coste de este tipo de tratamientos preventivos de incendios forestales. En mejores condiciones y con métodos de trabajo más adecuados, esta tecnología sería indudablemente rentable.

- En cuanto a los efectos ambientales, los daños en la masa remanente fueron leves, afectando al 8.3% de los pies, mientras que los daños sobre los suelos fueron aislados y de poca entidad. La calidad del tratamiento (eficacia de la selección, baja altura de tocones) fue mejor en las zonas de menor pendiente donde las especies objetivo eran dominantes y el matorral era menos denso. En cualquier caso, las condiciones sanitarias y de riesgo de incendio en las zonas aclaradas mejoraron claramente, y prácticamente no quedaron residuos de corta sobre el terreno.

7. Agradecimientos

Los autores manifiestan su agradecimiento a Minna Lapalainen, propietaria de Fixteri OY, a su representante en España Timo Merilainen, al responsable técnico de Lignia Biomassa SL Oriol Callol

y el resto de personal de la empresa, así como al maquinista de Forest Linna OY Teemu Kärkkäinen. También deseamos agradecer su participación en los trabajos de inventario a los Ingenieros de Montes Alejandro Pasamar y Gabriel de Pablo, así como, por su colaboración en los trabajos de análisis de vídeos de la máquina ensayada, al Máster en Ingeniería de Montes Mihail Bacescu.

8. Bibliografía

ALA-VARVI, T.; OVASKAINEN, H.; 2013. Kokopuun paalaauksen kilpailukyky [Competitiveness of whole-tree bundling]. *Metsäteho Report* 225. ISSN 1796-2374. 77 pág. En fines. Disponible en: <http://www.metsateho.fi/wpcontent/uploads/>

BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; NUUTINEN, Y.; JONNSEN, L.; 2015. Demo Report 15: Studies and demonstration on the use of a bundle-harvester system in early fuel wood thinnings. INFRES Project Report – Innovative and effective technology and logistics for forest residual biomass supply in the EU (311881). Ed. SLU. 14 pág. Umeå (Suecia).

BERGSTRÖM D.; DI FULVIO, F.; NUUTINEN, Y.; 2016. Effect of Forest Structure on Operational Efficiency of a Bundle-Harvester System in Early Thinnings. *Croat. Journal of Forest Eng.* 37 (1) 37-49.

BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F; 2014. Comparison of the cost and energy efficiencies of present and future biomass supply systems for young dense forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29:8 793-812.

BJÖRHEDEN, R.; THOMPSON, M. A.; 2000. An International Nomenclature for Forest Work Study. In FIELD, D. M., Ed.: Proceedings 1995 IUFRO 3.04 subject área. 20th World Congress 1995. Tampere, Finland. Misc. Rep. 422. Ed. Universidad de Maine. Pág. 190-215. Orono (Maine, USA).

BJÖRHEDEN, R.; NUUTINEN, Y.; 2014. Study of Fixteri FX15a small-tree bundling unit. *Swedish Forest Research Institute, Report* 819. 20 pág. En sueco con resumen en inglés.

CALLOL, O.; 2019. Comunicación personal del técnico responsable de las operaciones por la empresa LIGNIA Biomassa S.L.

CATRY, F. X.; MOREIRA, F.; CARDILLO, E.; PAUSAS, J. G.; 2012. Post-Fire Management of Cork Oak Forests. In F. Moreira et al. (eds.), Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests, Managing Forest Ecosystems. Pág. 195-222. Ed. COST Action Action: FP0701 y Springer Science+Business Media. 329 pag. Amsterdam (Holanda).

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.

CZUPY, I, K S. MÁTYÁS, A. L. HORVÁTH A. L.; HORVÁTH, B.; BESZÉDES, S.; VÁGVÖLGYI, A.; 2019. Operation of energy wood plantation with special regard to harvesting technology and timber logistics. 2019 5th International Conference on Environment and Renewable Energy.

IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 307 (2019) 012009 IOP Publishing.
doi:10.1088/1755-1315/307/1/012009

ERBER, G.; KÜHMAIER M.; 2017. Research Trends in European Forest Fuel Supply Chains: a Review of the Last Ten Years (2007–2017) – Part One: Harvesting and Storage. *Croat. j. for. eng.* 38 (2) 269-278.

FERNÁNDEZ-LACRUZ, R.; BERGSTROM, D.; 2015. Developing biomass supply systems for forested marginal land in Sweden. Pág. 189-196. In: Abstracts and Proceedings of the 48th Symposium on Forest Mechanization "Forest Engineering: Making a positive contribution" Linz (Austria). Ed. BOKU. 512 págs. Viena, Austria.

FRANCOS, M.; ÚBEDA, X.; TORTA, J.; PANAREDA, J. M.; CERDÀ, A.; 2016. The role of forest fire severity on vegetation recovery after 18 years. Implications for forest management of *Quercus suber* L. in Iberian Peninsula. *Global and Planetary Change* Volume 145: 11-16.

GHAFFARIYAN, M.R.; ACUÑA, M.; BROWN, M.; 2019. Machine productivity evaluation for harvesters and forwarders in thinning operations in Australia. *Silva Balcanica* 20(2) 13-25.

GONZÁLEZ, J. R.; PUKKALA, T; 2006. Characterization of forest fires in Catalonia (north-east Spain). *Eur J Forest Res.* 126(3) 421-429.

JYLHÄ, P.; LAITILA, J.; 2007. Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler. *Silva Fennica* 41(4) 763–779.

KÄRHÄ, K.; LAITILA, J.; JYLHÄ, P.; NUUTINEN, Y.; KESKINEN, S.; 2009. Kokopuun paalaus - tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset [Productivity and costs of the whole-tree bundling supply chain]. *Metsäteho Report* 211. ISSN 1459-773X. (En finés).

KÄRHÄ, K.; JYLHÄ, P.; LAITILA, J.; 2011. Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling. *Biomass Bioenergy* 35(8) 3389-3396.

KONS, K.; BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; 2015. Effects of sieve size and assortment on wood fuel quality during chipping operations. *Int JFor Eng.* 26 114–123.

LAITILA, G.; KÄRHÄ, K.; JYLHA, P.; 2009. Time consumption model and parameters for Off- and On-road transportation of whole-tree bundles. *Baltic Forestry* 15(1) 105-114.

LEHTONEN, A.; MÄKIPA, R.; HEIKKINENB, J.; SIEVÄNENA, R.; LISKIC, J.; 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188 211–224.

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)

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

MERILAINEN, T.; 2019. Comunicación personal del representante de Fixteri OY en España.

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Ed. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). 270 pág. Madrid (España).

MUNDET, R.; BAIGES, T.; BELTRÁN, M.; TORRELL, A.; 2018. Climate change measures and recommendations for cork oak forests. Life+Suber Project. Ed. Consorci Forestal de Catalunya (CFC), Centre de la Propietat Forestal (CPF), Centre Tecnologic Forestal de Catalunya (CTFC), Amorim Florestal, SA. 130 pag. Barcelona (España).

NUUTINEN, Y.; KÄRHÄ, K.; LAITILA, J.; JYLHÄ, P.; KESKINEN, S.; 2011. Productivity of whole tree bundler in energy wood and pulpwood harvesting from early thinnings, *Scandinavian Journal of Forest Research* 26:4 329-338.

NUUTINEN, Y.; BJÖRHEDEN, R.; 2015. Productivity and work processes of small-tree bundler Fixteri FX15a in energy wood harvesting from early pine dominated thinnings, *International Journal of Forest Engineering* 2015, 14 pág. DOI: 10.1080/14942119.2015.1109175

NUUTINEN, Y.; RYTKÖNEN, M.; BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; DAHLIN, B.; TIIHONEN, I.; PETTY, A.; 2015. Quality and productivity in comminution of small-diameter tree bundles. Pag. 203-209. In: Abstracts and Proceedings of the 48th Symposium on Forest Mechanization "Forest Engineering: Making a positive contribution" Linz (Austria). Ed. BOKU. 512 pág. Viena, Austria.

NUUTINEN, Y.; PETTY, A.; BERGSTRÖM, D.; RYTKÖNEN, M.; DI FULVIO, F.; TIIHONEN, I.; LAUREN, A.; DAHLIN, B.; 2016. Quality and productivity in comminution of small-diameter tree bundles. *International Journal of Forest Engineering*, 2016. 10 pág.

RAITILA, J.; KÄRHÄ, K.; JYLHÄ, P.; LAITILA, J.; 2014. New Harvesting Technology in Forest Fuel Procurement. VTT Project Report. Ed. VTT. 9 pág. Helsinki (Finlandia).

RODRÍGUEZ-CARRERAS, R.; ÚBEDA, X.; FRANCOS, M.; MARCO, C.; 2020. After the Wildfires: The Processes of Social Learning of Forest Owners' Associations in Central Catalonia, Spain. *Sustainability* 12, 6042. 25 pag.

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.

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.; 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.

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.; SPINELLI, R.; CACOT, E.; MIHELIC, M.; NESTOROVSKI, L.; MEDERSKI, P.; 2017. Factors affecting biomass and wood extraction from coppices in Europe: Productivity models and influence of technological changes. Conference: IUFRO 125th Anniversary Congress. 18-22 September 2017. Friburgo, Alemania.

TORRAS, O.; SAURA, S.; 2008. Effects of silvicultural treatments on forest biodiversity indicators in the Mediterranean. *For. Ecol. Manag.* 255 3322–3330.

TRAGSA, 2021. Tomo 1. Tarifas 2021. Grupo F. Trabajos forestales y medioambientales. Ed. Grupo Tragsa y SEPI. 111 pág. Madrid (España).

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