



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
julio · 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

Evaluación de un sistema de desbroce y empacado de biomasa sobre matorral de jara (*Cistus laurifolius* L.)

BADOS SEVILLANO, R.^{1,2}, TOLOSANA ESTEBAN, E.² y ESTEBAN PASCUAL, L.S.¹

¹ CEDER-CIEMAT. Centro de Desarrollo de Energías Renovables – Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, Autovía A-15, salida 56, 42290 Lubia, Soria, España.

² UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural, C/ José Antonio Nováis 10, Campus Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España.

Resumen

Para estudiar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de matorral con fines energéticos, contribuyendo a la prevención de incendios forestales y a la economía circular, se ha estudiado una desbrozadora-empacadora marca Biobaler WB55 trabajando sobre 21 ha de jara (*Cistus laurifolius* L.), con el fin de evaluar la influencia de los útiles de corte (cuchillas y martillos) sobre la productividad y los costes, así como determinar la influencia de la carga de biomasa en pie sobre la productividad y la eficiencia de recolección. Mediante un estudio de tiempos de trabajo, superficie diaria de recolección, consumo de combustible y pesaje de pacas, se recolectaron con cuchillas una media de 2.6 t_{MS}/ha (toneladas de materia seca por hectárea), con una productividad de 1.9 t_{MS}/hora productiva y un rendimiento de 0.7 ha/hora productiva, obteniéndose mejores resultados que con martillos (35% más de biomasa recolectada, 42% más de productividad y 61% más de eficiencia de recolección). Los costes con cuchillas se estimaron en 53.9 €/t_{MS} (51% menos que con martillos). Se observó una disminución logarítmica de la eficiencia de recolección (% biomasa recolectada/biomasa en pie) al aumentar la biomasa en pie, siendo la eficiencia media del 31%. Todo ello sugiere posibles mejoras mecánicas en los sistemas de recolección y empacado.

Palabras clave

Biomasa, matorral, desbroce, empacado, bioenergía, jara, aprovechamiento, producto no maderable.

1. Introducción

Desde mediados del siglo pasado, la frecuencia de incendios forestales ha aumentado en la Península Ibérica y en el conjunto de la cuenca mediterránea (MAYOR *et al*, 2016; KOVATS *et al*, 2014; PAUSAS y FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012). Este cambio en el régimen de incendios se ha atribuido principalmente a la acumulación de combustible, al abandono de tierras agrícolas, a la disminución de la ganadería y la forestación natural extensiva, combinada con eventos de sequía extrema (KOUTSIAS *et al*, 2012; CARVALHO *et al*, 2011; CAMIA Y AMATULLI, 2009; HOINKA *et al*, 2009). El paulatino abandono de los sectores agrícola y ganadero conduce con frecuencia a que antiguas zonas de pastizales y cultivos se cubran de arbustos, principalmente jaras (*Cistus laurifolius* L.) y brezos (*Cytisus* sp.) (PÉREZ Y ESTEBAN, 2008).

Según la Encuesta Marco sobre el Uso y Cobertura del Suelo (LUCAS, 2012), seis países mediterráneos tienen más del 50% de los matorrales de la UE28 (21 Mha), estando ubicados la mitad de ellos (10,6 Mha) en España (MEDIIVILLA *et al*, 2017; ESTEBAN *et al*, 2018). En este país, se han quemado en la última década más de 100,000 ha/año de superficie forestal, siendo el 57% de matorral (MAPAMA, 2015).

La recolección de biomasa puede disminuir el riesgo de incendios forestales y contribuir a la reducción de los costes de prevención de incendios. Integrar el desbroce y la cosecha en una sola máquina es un concepto interesante que se ha desarrollado en algunas máquinas y prototipos

comerciales. Biobaler WB55 es un sistema de desbroce y empacado que corta vegetación leñosa con tallos de hasta 150 mm de diámetro basal y comprime la biomasa en pacas redondas ($\varnothing=1,2$ m, ancho=1,2 m). En Canadá y Estados Unidos, este equipo se ha utilizado para desbrozar vegetación arbustiva silvestre, sotobosque forestal y pequeño árboles invasores, con el fin de mejorar la gestión del territorio en lugares como Quebec, Ontario y Minnesota (SAVOIE *et al*, 2012), Tennessee (LANGHOLTZ *et al*, 2011), Florida (DO CANTO *et al*, 2011), o para empacar biomasa leñosa en una explotación forestal en Georgia, Alabama (KLEPAC & RUMMER, 2009) y Saskatchewan (SAVOIE *et al*, 2010). Otros estudios se basaron en la cosecha de cultivos leñosos de turno corto en plantaciones en Quebec (SAVOIE *et al*, 2013) o Polonia (STOLARSKI *et al*, 2015). Sin embargo, esta desbrozadora-empacadora no ha sido suficientemente probada en formaciones arbustivas mediterráneas. Además, el uso de martillos en el rotor de corte de este equipo no ha sido evaluado, y su uso puede ser una alternativa interesante en zonas forestales, donde el terreno rara vez es llano y uniforme y a menudo hay piedras y afloramientos rocosos que estropean fácilmente las cuchillas.

Los desbroces realizados en la zona de estudio, dos años después de finalizar los trabajos de empacado de biomasa, supusieron una reducción del 79% en la velocidad de propagación del fuego, del 73% en el calor por unidad de superficie, del 72% en la intensidad de la línea de fuego y hasta un 82% en la longitud de llama (GONZÁLEZ *et al*, 2017). Estas cifras muestran la eficiencia de desbrozar el matorral en las labores de prevención de incendios forestales, contribuyendo al mismo tiempo a la generación de una fuente alternativa de biocombustibles.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es evaluar el rendimiento del equipo de desbroce y empacado de marca Biobaler WB55 para la recolección de biomasa de matorral de jara estepa (*Cistus laurifolius* L.), determinar la influencia de los útiles de corte (cuchillas o martillos) en los rendimientos de recolección y estimar los costes de operación, así como conocer la influencia de la carga de biomasa en pie sobre la productividad y la eficiencia de recolección de biomasa.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El estudio se realizó sobre 21.43 ha de pastizal abandonado cubierto de jara estepa (*Cistus laurifolius* L.) en Navalcaballo, Soria (España) (Figura 1), a una altitud de 1050 m sobre el nivel del mar, con una precipitación media anual de 520 mm y una temperatura media anual de 10.5 °C. Según muestreo en campo realizado antes del desbroce (BADOS *et al*, 2021), la masa de matorral tenía una altura media de 1.1 m, una edad media de 11 años, una cobertura del 55% y una carga de matorral de 19.2 t_{MH}/ha (11.5 t_{MS}/ha). Las condiciones del terreno fueron similares en toda la zona: pendiente suave, poca rugosidad, escasa pedregosidad y textura franco-arenosa.



a) b) c)
 Figura 1: (a) Localización de la zona de estudio; (b) Localización de las parcelas del muestreo sistemático; (c) Polígonos diarios desbrozados

3.2. Sistema de desbroce y empacado

La cosecha y recolección de biomasa se llevó a cabo en el marco del proyecto Life+ ENERBIOSCRUB. Para la prueba se utilizó un sistema de desbroce y empacado modelo Biobaler WB55 (Figura 2). Este equipo, propulsado por un tractor de 154 kW (Valtra T194D), incluye una desbrozadora y una empacadora. A medida que avanza el tractor, la desbrozadora, provista de 48 dientes (martillos o cuchillas fijas) insertados en un rotor horizontal, inciden sobre la vegetación en pie en sentido ascendente. Posteriormente, la biomasa desbrozada es impulsada al depósito cilíndrico de la empacadora para su posterior compactación en pacas de $\varnothing=1,2$ m.



Figura 2. Desbrozadora-empacadora Biobaler WB55 trabajando sobre matorral de jara (*Cistus laurifolius* L.)

3.3. Recopilación de datos

3.3.1. Estudio de tiempos

La prueba de recolección de biomasa fue diseñada para estimar la productividad en peso ($t_{MS}/HProd$) (toneladas de materia seca por hora productiva) y superficial ($ha/HProd$), los costes de los trabajos ($\text{€}/t_{MS}$) y la eficiencia de recolección de biomasa ($ER, \%$) (relación entre el peso de biomasa recolectada y el peso de biomasa en pie) con dos herramientas de corte diferentes en la desbrozadora (cuchillas y martillos). La productividad del proceso se midió mediante el monitoreo

continuo del ciclo completo de empacado individual, incluyendo el tiempo de desbroce, empacado, atado y descarga de la paca, separando el tiempo productivo de los retrasos operativos.

3.3.2. Distancias y superficies

Se consideraron como replicaciones para el análisis estadístico las superficies diarias de desbroce (ha/día). Esta superficie fue delimitada y medida sobre ortofotografías (PNOA, 2010) para definir los polígonos diarios de desbroce. En la cabina del tractor se colocó un teléfono móvil con GPS y cobertura 3G, provisto de la aplicación Android OruxMaps (versión 6.5.0), que se configuró para registrar una medición de GPS por cada 10 m de distancia de avance del tractor, identificando así la distancia y el tiempo de formación de cada paca, la velocidad del tractor y la superficie diaria de desbroce. La productividad del proceso se analizó teniendo en cuenta los útiles de corte del rotor en cada polígono desbrozado: a) cuchillas ó b) martillos fijos con puntas de widia (carburo cementado) (Figura 3).



Figura 3. (a) Rotor de corte de la desbrozadora-empacadora; (b) Útiles de corte: cuchillas (izquierda) y martillos fijos (derecha)

3.3.3. Pacas

El diez por ciento de las pacas se pesaron en campo con una balanza digital (1 tonelada \pm 0,05%) para estimar el peso medio por paca en cada polígono desbrozado. Multiplicando este valor por el número de pacas recolectadas en cada polígono, se estimó la biomasa recolectada por polígono diario. Por otro lado, se recolectaron muestras de biomasa de pacas (4 kg de biomasa fresca por polígono) y se enviaron al Laboratorio de Caracterización de Biomasa del CEDER-CIEMAT para la determinación de humedad. Las muestras analíticas se prepararon según la norma UNE 14780:2011. El método analítico, secado a 105° C, se realizó siguiendo la norma EN 14774-2.

3.3.4. Biomasa de matorral

Para determinar la eficiencia de recolección de la desbrozadora-empacadora, se realizó un muestreo sistemático previo para estimar la carga de biomasa en pie. Se muestrearon 35 parcelas circulares (ϕ 4 m) georreferenciadas en el área de estudio para obtener los valores de altura de matorral (m) y de cobertura de la vegetación (%). Los valores medios correspondientes a las parcelas ubicadas en cada polígono desbrozado se introdujeron en un modelo de estimación de biomasa de matorral de jara (BADOS *et al*, 2021) para estimar el peso seco de la biomasa arbustiva por hectárea (t_{MS}/ha) en cada polígono desbrozado. La biomasa no recolectada se estimó por la diferencia entre la carga de biomasa en pie, estimada utilizando las ecuaciones de peso seco mencionadas, y el peso de biomasa seca recolectada por polígono. Esta biomasa no recolectada incluía tanto la vegetación no desbrozada por la máquina, como las pérdidas de material fino, que una vez desbrozado, no llegaba a la unidad de empacado y caía al suelo.

3.3.5. Análisis de costes

Los costes horarios del equipo se estimaron siguiendo la metodología de ACKERMAN *et al.* (2014), en base en los supuestos de la Tabla 1. Este procedimiento clasificó los costes netos del equipo en tres clases: costes fijos, variables y de operario. Los costes netos se calcularon combinando los costes productivos horarios con las tasas de producción registradas en la prueba. El precio de compra del tractor (154 kW) y de la desbrozadora-empacadora, menos el coste de los neumáticos correspondientes, fue de 107,000 € y 111,200 €, respectivamente, según el precio de adquisición actualizado pagado por el CEDER-CIEMAT en 2015. La vida útil de funcionamiento del tractor y la desbrozadora-empacadora se estimó en 12,000 h. Los costes de reparación y mantenimiento se estimaron en un 50% del precio de compra. El resto de los costes variables (combustible, aceite y lubricantes, cuchillas, portacuchillas, martillos y cuerda de empacado) se basaron en los costes reales registrados durante la prueba. Los costes del operario se calcularon tomando los costes de empresa que paga el CEDER-CIEMAT a una persona que realiza este tipo de trabajo (27,130 €/año). Las dietas y el transporte del operario se estimaron teniendo en cuenta que tienen que trabajar fuera de casa el 75% de los días y necesitan alojamiento y pensión completa. Los costes brutos incluyen: los costes netos (el coste total de operación de la máquina - costes fijos, variables y de operario), los gastos generales y de administración de la empresa (15% sobre los costes netos) y el beneficio industrial (6% sobre la suma de las dos cantidades anteriores).

Tabla 1. Parámetros básicos y supuestos para estimar los costes fijos, variables y del operario de un tractor de 154 kW con Biobaler WB55, trabajando sobre matorral de jara en Navalcaballo (Soria).

HProd: Hora productiva; SMH: Hora de actividad; t_{MS}: toneladas de materia seca; EPIs: equipos de protección individual.

Parámetro	Unidad	Tractor T194D 200 HP	Desbrozadora- empacadora Biobaler WB55
Precio de compra (P)	€	107,000.00	111,200.00
Valor residual (% de P)	%	10	10
Horas previstas de trabajo (SHD)	SMH/año	1760	1760
Horas productivas de trabajo (HProd)	HProd/año	1496	1496
Esperanza de vida	HProd	12,000.00	12,000.00
Tasa de interés	%	4.0	4.0
Impuestos de máquinas y registros	€		200.00
Seguros	€		2,300.00
Transferencias de máquinas	€		5,000.00
Garaje	€		720.00
Gasto de combustible (F)	€/l	0.80	-
Consumo medio de combustible	l/h	20.00	-
Aceite y lubricantes, (% de F)	%	10	10
Reparación y mantenimiento (% de P)	%	50	50
Neumáticos	unidad	4	2
Coste por neumático	€/neumático	3,250.00	2,000.00
Vida útil estimada de neumáticos (HProd)	h	3,000.00	1,000.00

Coste del juego de neumáticos	€	13,000.00	4,000.00
Cuchillas (unidad)	€	-	25.00
HProd entre cambio de cuchillas	h	-	5.00
Portacuchillas (unidad)	€	-	70.00
HProd entre cambio de portacuchillas	h	-	50.00
Martillos (unidad)	€	-	53.00
HProd entre cambio de martillos	h	-	100.00
Rollo de cuerda de empacar	€/rollo cuerda	-	20.50
HProd entre cambio de rollo de cuerda	h	-	4.00
Operarios por turno	unidad	1	-
Salario medio neto (coste/hora)	€/h	12.47	
Dietas	€/año	2,750.00	
Otros gastos de los operarios	€/año	900.00	
Coste social anual del operario	€/año	5,180.21	
EPIs	€/año	100.00	
Coste de formación del operario	€/año	200.00	
Gastos de teléfono	€/año	360.00	
Seguros (responsabilidad civil)	€/año	1,000.00	
Transporte del operario	€/año	7,260.00	
Días de trabajo al año	día		220.00
Turnos por día	turno/día		1
Horas de trabajo por turno	h/turno		8
Producción de pacas con cuchillas	pacas/HProd		6.5
Producción de pacas con martillos	pacas/HProd		4.3
Peso medio por paca hecha con cuchillas (peso seco)	t _{MS} /paca		0.29
Peso medio por paca hecha con martillos (peso seco)	t _{MS} /paca		0.26
Productividad con cuchillas	t _{MS} /HProd		1.85
Productividad con martillos	t _{MS} /HProd		1.13
Tasa de utilización de la máquina, Biobaler con cuchillas	%		85
Tasa de utilización de la máquina, Biobaler con martillos	%		82

4. Resultados

4.1. Estimación de carga de biomasa de matorral

En base a los resultados del muestreo sistemático (Tabla 2), la altura media de la masa de jara (*Cistus laurifolius* L.) fue de 1.09 m y la cobertura de vegetación del 56%. La carga de biomasa seca de matorral se estimó en 9.6 t_{MS}/ha, equivalente a 13.17 t_{MH}/ha de biomasa húmeda, con un contenido medio de humedad de 37.2%.

4.2. Resultados de la prueba de desbroce-empacado

En el ensayo se registraron siete polígonos desbrozados diarios (cinco cosechados con cuchillas y dos con martillos) (Figura 1c). Contratiempos mecánicos impidieron realizar el mismo número de polígonos de desbroce con cada elemento de corte.

Se recolectaron un total de 80.4 t de materia húmeda (t_{MH}), equivalentes a 50.5 t_{MS} (toneladas de materia seca), durante 30.7 horas productivas en 21.43 ha. El número total de pacas fue de 181 con un peso promedio de 444 $kg_{MH}/paca$ (279 $kg_{MS}/paca$). La biomasa recolectada fue de 2.6 t_{MS}/ha (4.16 t_{MH}/ha) con cuchillas y 1.7 t_{MS}/ha (2.66 t_{MH}/ha) con martillos. La eficiencia de recolección fue del 31% con cuchillas y del 12% con martillos. La productividad media fue de 6.5 pacas/hora productiva (HProd) con cuchillas y 4.3 pacas/HProd con martillos. El ciclo desbroce-empacado tuvo una duración media de 10 min 31 s por paca. En base al peso medio de cada paca y el contenido de humedad, la productividad media en peso fue de 1.9 $t_{MS}/HProd$ (3.0 $t_{MH}/HProd$) con cuchillas y 1.1 $t_{MS}/HProd$ (1.7 $t_{MH}/HProd$) con martillos. Las productividades superficiales fueron similares con ambas herramientas de corte: 0.7 ha/HProd con cuchillas y 0.6 ha/HProd con martillos. Utilizando cuchillas en el rotor de corte, se recogió un 35% más de biomasa por hectárea, la eficiencia de recolección fue un 61% mayor, la productividad en peso un 42% superior y la productividad superficial un 14% mayor que utilizando martillos. En las Tablas 2 y 3 se muestran los resultados de desbroce-empacado, tanto con cuchillas como con martillos fijos en la desbrozadora, así como valores medios ponderados por el área de cada polígono diario recolectado. Durante las pruebas el tractor trabajó a una velocidad constante (5 km/HProd), fluctuando a criterio del operario dentro de un rango estrecho entre 4,5 y 5,4 km/HProd, sin tener influencia significativa en la productividad y la eficiencia de recolección.

Tabla 2. Estimación de la carga de biomasa de matorral, biomasa recogida por hectárea y eficiencia de recolección con Biobaler WB55.

PN: número de polígono desbrozado; A: superficie (ha); SB: carga de biomasa arbustiva en pie (t_{MS}/ha); BN: número de pacas recolectadas; BWW: peso húmedo medio por paca ($kg_{MH}/paca$); M: contenido de humedad (%); BDW: peso seco medio por paca ($kg_{MS}/paca$); CB: biomasa recolectada (t_{MS}/ha); BL: pérdidas de biomasa (t_{MS}/ha); CE: eficiencia de recolección (%); t_{MS} : toneladas de materia seca; kg_{MH} : kg de materia húmeda.

Parámetro	PN	A	SB	BN	BWW	M	BDW	CB	BL	CE
CUCHILLAS	1	2.53	11.2	29	446	37.0	281	3.2	8.0	28.8
	2	3.44	8.7	30	446	39.3	271	2.4	6.2	28.9
	3	1.78	13.9	13	441	37.0	278	2.0	11.9	14.5
	4	3.29	2.7	25	441	39.3	268	2.1	0.6	79.4
	5	5.01	8.3	48	483	35.8	310	2.9	5.4	34.8
Total/Media	-	16.05	8.3	145	456	37.5	285	2.6	5.7	39.3
Desviación estándar			3.4					0.4	3.3	21.2
Polígonos desbrozados			5					5	5	5
MARTILLOS	6	3.43	10.9	17	441	35.0	287	1.4	9.5	12.6
	7	1.95	18.1	19	350	37.0	221	2.1	15.9	11.9
Total/Media	-	5.38	13.5	36	408	36.1	263	1.7	11.8	12.3
Desviación estándar			3.4					0.4	3.1	0.4
Polígonos desbrozados			2					2	2	2
CUCHILLAS Y MARTILLOS										

Total/Media	1-7	21.43	9.6	181	444	37.2	279	2.4	7.3	32.5
Desviación estándar			4.1					0.6	4.2	21.7
Polígonos desbrozados			7					7	7	7

Tabla 3. Resultados de productividad de las pruebas de desbroce-empacado con Biobaler WB55.

PN: número del polígono desbrozado; CB: biomasa recolectada (t_{MS}/ha); PT: tiempo productivo (h); WP: productividad en peso ($t_{MH}/HProd$); SP: productividad superficial ($ha/HProd$); t_{MH} : toneladas de materia húmeda; t_{MS} : toneladas de materia seca; HProd: hora productiva.

Parámetro	PN	CB	PT	Pacas/HProd	WP, $t_{MH}/HProd$	WP, $t_{MS}/HProd$	SP, $ha/HProd$
CUCHILLAS	1	3.2	5.67	5.1	2.3	1.4	0.5
	2	2.5	4.78	6.3	2.8	1.7	0.7
	3	2.0	1.87	7.0	3.1	1.9	0.9
	4	2.1	4.05	6.2	2.7	1.6	0.8
	5	2.9	5.92	8.1	3.9	2.5	0.9
Total/Media	-	2.6	22.30	6.5	3.0	1.9	0.7
Desviación estándar		0.4		1.1	0.6	0.4	0.2
Polígonos desbrozados		5		5	5	5	5
MARTILLOS	6	1.4	5.13	3.3	1.5	1.0	0.7
	7	2.1	3.23	5.9	2.1	1.3	0.6
Total/Media	-	1.7	8.36	4.3	1.7	1.1	0.6
Desviación estándar		0.4	1.0	1.2	0.3	0.2	0.0
Polígonos desbrozados		2		2	2	2	2
CUCHILLAS Y MARTILLOS							
Total/Media	1-7	2.4	30.66	5.9	2.6	1.6	0.7
Desviación estándar		0.6		1.5	0.8	0.5	0.2
Polígonos desbrozados		7		7	7	7	7

La figura 4 muestra la influencia de la carga de biomasa en pie sobre la productividad del equipo, expresada en toneladas por hora productiva, tanto con cuchillas como con martillos en el rotor de corte. La productividad de biomasa no aumentó con el incremento de la carga de matorral. Con cuchillas, se observó una reducción leve, pero no significativa, en la productividad ($R^2=0,09$) a medida que aumentaba la carga de biomasa en pie. No se ajustó una curva de regresión con los dos datos de productividad disponibles utilizando martillos.

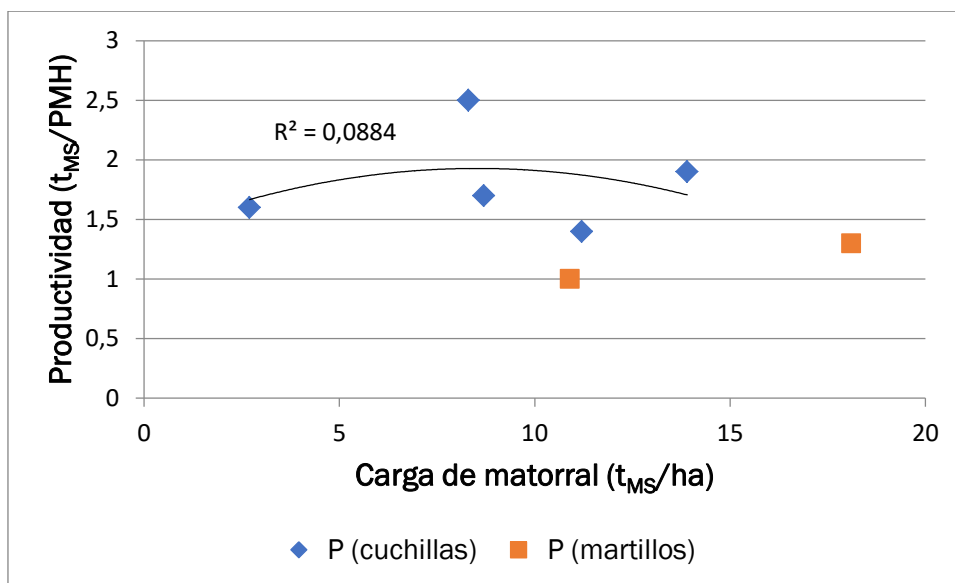


Figura 4. Influencia de la carga de matorral (t_{MS}/ha) sobre la productividad de biomasa de la desbrozadora-empacadora.

La figura 4 muestra la influencia de la carga de biomasa arbustiva en pie sobre la eficiencia de recolección, tanto con cuchillas como con martillos. Se observó una disminución de la eficiencia de recolección al aumentar la carga de matorral, siguiendo una ecuación logarítmica ($R^2=0.98$).

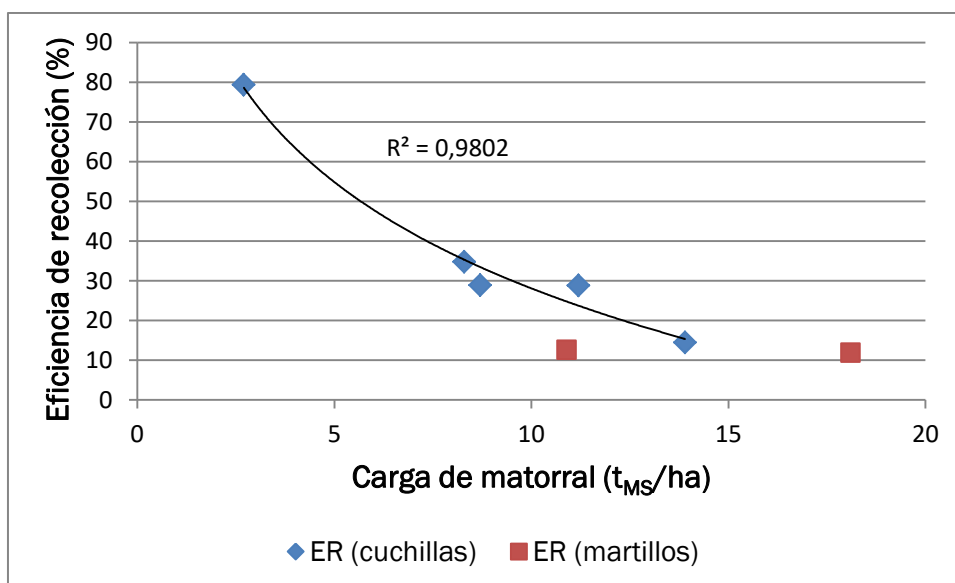


Figura 5. Influencia de la carga de matorral (t secas/ha) sobre la eficiencia de recolección de la desbrozadora-empacadora.

4.3. Costes de operación

Los costes netos totales del tractor con la desbrozadora-empacadora, se estimaron en 99.48 €/HProd y 53.93 €/t_{MS} (33,98 €/t_{MH}) con cuchillas, y 91.52 €/HProd y 81.10 €/t_{MS} (51.09 €/t_{MH}) con martillos, es decir, el coste neto por HProd con martillos fue un 8.0% inferior que con cuchillas, pero el coste neto por t_{MS} con cuchillas fue un 50.4% inferior que con martillos. Esto se debe a que la productividad superficial con martillos es un 42.1% inferior que con cuchillas (1.1 t_{MS}/HProd

frente a 1.9 t_{MS}/HProd con cuchillas), con diferentes valores medios a un nivel de significación del 87% ($t = 1.8076$; P-valor = 0.1305).

Considerando productividades de paca de 6.5 pacas/HProd con cuchillas y 4.3 pacas/HProd con martillos, el coste neto ascendió a 15.30 €/paca con cuchillas y 21.28 €/paca con martillos. Los costes por hectárea, según las productividades superficiales obtenidas en el ensayo (0.7 ha/HProd con cuchillas y 0.6 ha/HProd con martillos), ascendieron a 142.11 €/ha con cuchillas y 152.53 €/ha con martillos (Tablas 4 y 5).

Tabla 4. Costes fijos, variables y de operario de un tractor de 154 kW con Biobaler WB55, provisto de cuchillas en el rotor de corte de la desbrozadora, trabajando sobre matorral de jara en Navalcaballo (Soria).

Parámetro	€/año	€/HProd	€/t _{MS}
COSTES FIJOS			
Amortización (tractor)	11,581.68	8.03	4.33
Amortización (Biobaler)	12,036.29	8.34	4.50
Coste financiero anual (tractor)	2,585.63	1.79	0.97
Coste financiero anual (Biobaler)	2,687.13	1.86	1.01
Seguros	2,300.00	1.59	0.86
Garaje de las máquinas	720.00	0.50	0.27
Impuestos / Registro de máquinas	200.00	0.14	0.07
Traslado de máquinas	5,000.00	3.34	1.87
Total costes fijos	37,110.73	25.71	13.88
COSTES VARIABLES			
Combustible	23,091.20	16.00	8.64
Aceite y lubricantes	2,309.12	1.60	0.86
Coste de reparación y mantenimiento del tractor	6,434.27	4.46	2.41
Coste de reparación y mantenimiento de la Biobaler	6,686.83	4.63	2.50
Neumáticos del tractor	6,253.87	4.33	2.34
Neumáticos de la Biobaler	5,968.26	4.00	2.23
Cuchillas	7,216.00	5.00	2.70
Porta cuchillas	2,020.48	1.40	0.76
Rollos de hilo	7,396.40	5.13	2.77
Total costes variables	67,376.42	46.55	25.20
COSTES DE OPERARIO			
Salario de los operarios	21,947.20	15.21	8.91
Otros costes del operario (horas extras, compensaciones, etc.)	900.00	0.34	0.34
Beneficios y gastos generales del operario	16,850.21	11.68	6.30
Costes directos totales del operario	39,697.41	27.22	14.85
COSTES NETOS			
Costes netos totales (excluido beneficio industrial)	144,184.55	99.48	53.93
Gastos generales y de gestión de la empresa	21,627.68	14.92	8.09
Beneficio industrial, antes de impuestos	9,948.73	6.86	3.72

Total costes brutos	175,760.97	121.27	65.74
---------------------	------------	--------	-------

Tabla 5. Costes fijos, variables y de operario de un tractor de 154 kW con Biobaler WB55, provisto de martillos en el rotor de corte de la desbrozadora, trabajando sobre matorral de jara en Navalcaballo (Soria).

Parámetro	€/año	€/HProd	€/t _{MS}
COSTES FIJOS			
Amortización (tractor)	12005,4	8.03	7.10
Amortización (Biobaler)	12,476.64	8.34	7.37
Coste financiero anual (tractor)	2,594.11	1.73	1.53
Coste financiero anual (Biobaler)	2,695.93	1.80	1.59
Seguros	2.300.00	1.54	1.36
Garaje de las máquinas	720.00	0.48	0.43
Impuestos / Registro de máquinas	200.00	0.13	0.12
Traslado de máquinas	5,000.00	3.34	2.96
Total costes fijos	37,992.08	25.40	22.46
COSTES VARIABLES			
Combustible	23,936.00	16.00	14.15
Aceite y lubricantes	2,393.60	1.60	1.41
Coste de reparación y mantenimiento del tractor	6,669.67	4.46	3.94
Coste de reparación y mantenimiento de la Biobaler	6,931.47	4.63	4.10
Neumáticos del tractor	6,482.67	4.33	3.83
Neumáticos de la Biobaler	6,183.68	4.00	3.66
Martillos	792.88	0.53	0.47
Rollos de hilo	6,133.60	4.10	3.63
Total costes variables	59,523.56	39.66	35.18
COSTES DE OPERARIO			
Salario de los operarios	21,947.20	14.67	12.97
Otros costes del operario (horas extras, compensaciones, etc.)	900.00	0.53	0.53
Beneficios y gastos generales del operario	16.850,21	11.26	9.96
Costes directos totales del operario	39,697.41	26.47	23.46
COSTES NETOS			
Costes netos totales (excluido beneficio industrial)	137,213.05	91.52	81.10
Gastos generales y de gestión de la empresa	20,581.96	13.73	12.17
Beneficio industrial, antes de impuestos	9,467.70	6.31	5.60
Total costes brutos	167,262.71	111.56	98.86

Para estimar el coste medio de la biomasa empacada en destino, se consideraron los costes medios de extracción de pacas a pie de pista, la carga de pacas al camión y el transporte por carretera a una distancia media de 70 km. Para ello se utilizaron datos recogidos en el marco del proyecto Life+ ENERBIOSCRUB. El coste unitario de la extracción de pacas a pie de pista con autocargador se estimó en 10.73 €/t_{MS} (BLASCO et al, 2018), y la carga y transporte mediante remolque con grúa, a una distancia media de 70 km, se valoró en 12.1 €/t_{MS} (ESTEBAN et al, 2018).

Los citados costes no incluyen gastos generales, beneficio industrial de la empresa de transportes, pago de biomasa a los propietarios, impuestos ni posibles ingresos por servicios de desbroce o venta de biomasa. En la tabla 6 se muestran los costes medios de biomasa empacada obtenidos tanto para biomasa anhidra como para biomasa húmeda (37% de contenido de humedad) en destino (70 km).

Tabla 6. Costes medios de biomasa de jara empacada puesta en destino (70 km), expresados en material anhidro y material húmedo (37% de humedad).

t_{MS}: toneladas de materia seca; t_{MH}: toneladas de materia húmeda

Operación	Biobaler con cuchillas		Biobaler con martillos	
	€/t _{MS}	€/t _{MH}	€/t _{MS}	€/t _{MH}
Desbroce y empacado con Biobaler	53.93	33.98	81.10	51.09
Acopio de pacas	10.73	6.74	10.73	6.74
Carga de pacas y transporte a destino (70 km)	12.10	7.60	12.10	7.60
Costes netos totales	76.76	48.32	103.93	65.43
Gastos generales y de gestión de la empresa	11.51	7.25	15.59	9.81
Beneficio industrial, antes de impuestos	5.30	3.33	7.17	4.51
Costes brutos totales	93.57	58.90	126.69	79.76

5. Discusión

Según los resultados del muestreo, la estimación de la carga de biomasa arbustiva (9.6 t_{MS}/ha (13.17 t_{MH}/ha) fue ligeramente inferior a la determinada por TRAGSA (10.9 t_{MS}/ha) con su propio procedimiento de cálculo (BLASCO *et al*, 2018). La altura media del matorral (1.09 m) fue similar a la obtenida por el grupo de trabajo del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) para el inventario de la vegetación en Navalcaballo (Soria), que estimó para el matorral una altura media de 1.02 m, una edad media de 11.2 años y una abundancia de especies del 80% de *Cistus laurifolius* L. y un 20% de *Rubus* spp. (GONZÁLEZ *et al*, 2018).

Comparando los resultados de estos trabajos con otros ensayos de recogida de jara en Soria (España) (Tabla 7), la eficiencia de recolección con cuchillas (31.3%) fue ligeramente superior a la de Torretartajo (28.5%) y un 35% superior a la de CEDER (20.4%) (BLASCO *et al*, 2018). La edad media de la vegetación en la zona de estudio fue menor que en las otras dos zonas (11 años frente a 16 y 29 años respectivamente) así como una menor cobertura de matorral (55% frente a 60% y 64% respectivamente) (GONZÁLEZ *et al*, 2018; BADOS *et al*, 2021). Ambos factores pueden influir en la eficiencia de recolección porque las plantas más jóvenes, flexibles y menos lignificadas son más fáciles de cosechar y empacar con este equipo. Por otro lado, la eficiencia de recolección tiende a disminuir cuando aumenta la carga de matorral (Figura 5). Se observó que las plantas más lignificadas ofrecían mayor resistencia al corte y tenían más facilidad para ser desarraigadas, quedando extendidas en el suelo sin ser recogidas por la desbrozadora-empacadora.

Comparando los resultados de recolección de jara con otras pruebas realizadas con Biobaler sobre otras especies de matorral mediterráneo (BLASCO *et al*, 2018), la eficiencia de recolección con cuchillas (31%) fue similar al valor reportado con retama (*Genista cinerascens*) (32.5%) en Las Navas del Marqués (Ávila); dos veces superior a los resultados obtenidos con matorral mixto de brezo (*Erica* sp.) y retama (*Genista* sp.) (15.0%) en Figueruela (Zamora) y un valor comprendido

entre las cifras ofrecidas con tojo (*Ulex europaeus*) en La Coruña (12,4% en Merlán y 51,0% en Invied). Por otro lado, la eficiencia de recolección con cuchillas fue del mismo orden que con vegetación natural mixta compuesta por *Serenoa* sp. e *Ilex* sp. en Florida (EE. UU.), cuyos valores oscilaron entre el 30 % y el 22 % (DO CANTO *et al*, 2011), o con matorrales compuestos por *Ilex* sp. y *Morella* sp. en Alabama (EE.UU.), donde se obtuvieron valores del 34% (KLEPAC & RUMMER, 2009). Sin embargo, la eficiencia de recolección fue menor que en matorrales mixtos compuestos por plantas leñosas más flexibles y blandas, como *Salix* sp. y *Populus* sp. en Quebec-Ontario y Saskatchewan, con valores de 53.5% y 62.0%, respectivamente (SAVOIE *et al*, 2012; SAVOIE *et al*, 2010), y tres veces menor que en plantaciones de *Salix*, debido principalmente a que la recolección se ve favorecida por la preparación previa del terreno en las zonas de cultivo frente a las irregularidades del suelo forestal, así como a la productividad más uniforme en las plantaciones de biomasa (SAVOIE *et al*, 2013).

Tabla 7. Experiencias previas publicadas con Biobaler WB55 utilizando cuchillas como herramienta de corte en la desbrozadora.

Referencia	Lugar	Vegetación	Productividad superficial (tMS/PMH)	Biomasa recolectada (t _{MS} /ha)	Pérdidas de biomasa (t _{MS} /ha)	Eficiencia de recolección (%)
Savoie <i>et al</i> , 2012	Quebec, Ontario	Mezcla (<i>Salix</i> , <i>Populus</i>)	9.4	8.2	6.5-9.8	53.5
Savoie <i>et al</i> , 2012	Minnesota	Mezcla (<i>Cornus</i> , <i>Rhamnus</i> , <i>Salix</i>)	8.8	3.4	n.a.	n.a.
Langholtz <i>et al</i> , 2011	Tennessee	Mezcla	n.a.	1.9-3.3	n.a.	n.a.
Do Canto <i>et al</i> , 2011	Florida	Mezcla (<i>Serenoa</i> , <i>Ilex</i>)	1.1-1.4	2.6-4.9	9.1-10.2	30.2-22.3
K. & R., 2007-2010	Alabama	Mezcla (<i>Ilex</i> , <i>Morella</i>)	6.2	4.7	12.1	33.8
Savoie <i>et al</i> , 2013	Saskatchewan	<i>Salix</i> (nat. veg.)	2.0-3.9	6.7-26.9	4.1-17.0	62.0
Savoie <i>et al</i> , 2013	Quebec	<i>Salix</i> (plantación)	19.4	7.7	2.3	88.0
Stolarski <i>et al</i> , 2015	Poland	<i>Salix</i> (plantación)	18.5	4.1	1.2	93.5
Blasco <i>et al</i> , 2018	N. del Marqués (A)	<i>Genista cinerascens</i> (veg. nat.)	2.1	8.5	17.7	32.5
Blasco <i>et al</i> , 2018	Figueruela (ZA)	Mix (<i>Erica</i> , <i>Genista</i>) (veg. nat.)	1.2	1.9	10.8	15.0
Blasco <i>et al</i> , 2018	Invied (C)	<i>Ulex europaeus</i> (veg. nat.)	2.0	18.1	17.3	51.0
Blasco <i>et al</i> , 2018	Merlán (C)	<i>Ulex europaeus</i> (veg. nat.)	0.6	2.2	15.7	12.4
Blasco <i>et al</i> , 2018	CEDER (SO)	<i>Cistus laurifolius</i> (veg. nat.)	1.9	2.8	10.9	20.4
Blasco <i>et al</i> , 2018	Navalcaballo (SO)	<i>Cistus laurifolius</i> (veg. nat.)	1.5	2.7	8.2	75.1
Blasco <i>et al</i> , 2018	Torretartajo (SO)	<i>Cistus laurifolius</i> (veg. nat.)	2.0	3.2	7.9	28.5

n.a.: no disponible; nat. veg.: vegetación natural; A: Ávila; C: La Coruña; ZA: Zamora; SO: Soria

En el ensayo con jara estepa, la eficiencia de recolección con cuchillas fue 61% mayor que con martillos (31.3% vs. 12.2%). Además, se observó un mejor acabado del desbroce con cuchillas debido a que parte de las plantas, especialmente las más jóvenes y flexibles, fueron golpeadas por los martillos sin llegar a cortarse, o fueron cortadas a mayor altura que con cuchillas. Dado que el soporte de las herramientas de corte permite que las cuchillas y los martillos sean intercambiables, se podría considerar la opción de colocar los martillos en los extremos de la desbrozadora dejando cuchillas en el resto del rotor. De esta forma se conseguiría una mayor duración de las cuchillas, que suelen ser las de mayor desgaste, con una ligera reducción de la eficiencia de recolección.

La biomasa recolectada por hectárea (2.4 t_{MS}/ha) fue similar a los valores proporcionados por TRAGSA S.A. con su propio procedimiento de cálculo (BLASCO *et al*, 2018) sobre otros jarales de Soria (2.8 t_{MS}/ha en el CEDER de Lobia y 3.2 t_{MS}/ha en Torretartajo). Resultados similares se obtuvieron recolectando tojo (*Ulex europaeus*) en Merlán (La Coruña) (2.2 t_{MS}/ha) o en un matorral compuesto por brezo (*Erica*) y retama (*Genista* sp.) en Figueruela (Zamora) (1.9 t_{MS}/ha) utilizando cuchillas como herramienta de corte. Sin embargo, la biomasa recolectada fue menor que en

matorrales compuestos por retama (*Genista cinerascens*) en Las Navas del Marqués (Ávila) (8.5 t_{MS}/ha) o por tojo (*Ulex europaeus*) en Invied (La Coruña) (18.1 t_{MS}/ha), utilizando cuchillas en todos los casos.

La productividad superficial de la desbrozadora-empacadora trabajando en matorrales mediterráneos fue menor que en zonas de matorral de América del Norte, debido principalmente a las diferentes condiciones climáticas, que conllevan la existencia de vegetación menos xerófila y arbustos menos lignificados (8.2 t_{MS}/ha en matorrales mixtos de *Salix* y *Populus* en Quebec y Ontario (Canadá); 3.4 t_{MS}/ha en vegetación mixta compuesta por *Cornus*, *Rhamnus* y *Salix* en Minnesota (SAVOIE *et al*, 2012) y 4.7 t_{MS}/ha en vegetación mixta compuesta por *Ilex* y *Morella* en Alabama (KEPLAC & RUMMER, 2009). Sin embargo, los resultados de la prueba de recolección fueron similares a los obtenidos en otros ensayos con vegetación natural mixta: 1.9-3.3 t_{MS}/ha en Tennessee (LANGHOLTZ *et al*, 2011); 2.6-4.9 t_{MS}/ha en Florida (DO CANTO *et al*, 2011) y 2.4-3.9 t_{MS}/ha en Saskatchewan (SAVOIE *et al*, 2013). La productividad de la cosechadora-empacadora fue mayor en las plantaciones de *Salix*: 7.7 t_{MS}/ha en Quebec (SAVOIE *et al*, 2013) y 4.1 t_{MS}/ha en Polonia (STOLARSKI *et al*, 2015).

En cuanto a las pérdidas de biomasa durante el desarrollo de los trabajos, se observaron dos problemas. Por un lado, pérdidas continuas de material triturado que caían al suelo conforme avanzaba desbrozando el equipo, durante el trasiego de biomasa desde la desbrozadora a la cámara de compresión. Por otro lado, atascos de los extremos de la boca de entrada de cámara de empacado, especialmente al comienzo del día, cuando el contenido de humedad de la vegetación era mayor, lo que producía que parte de la vegetación desbrozada no entrase en la empacadora. La cantidad de biomasa no recolectada y la tendencia decreciente en la eficiencia de recolección de biomasa al aumentar la carga de matorral, sugieren la necesidad de mejoras mecánicas en el equipo para aumentar la eficiencia y, por tanto, la productividad de recolección de la biomasa. Posibles mejoras en la boca de alimentación de la unidad de empacado para evitar obstrucciones podrían ser: la instalación de un vibrador hidráulico que facilite el tránsito de la biomasa; la instalación de transportadores de rodillos accionados por un motor hidráulico, o la instalación de un sistema de aire comprimido para limpiar la entrada periódicamente (MARTÍNEZ, 2018).

En cuanto a los costes netos del proceso de desbroce-empacado, fueron un 9% superiores con cuchillas que con martillos (99.48 €/HProd vs. 91.52 €/HProd). Sin embargo, la menor productividad con martillos (1.7 t_{MS}/ha vs. 2.6 t_{MS}/ha) hizo que el precio de la biomasa empacada fuera un 50.3% superior al de cuchillas (81.10 €/t_{MS} vs. 53.93 €/t_{MS}).

Los costes de la recolección con cuchillas, incluyendo desbroce-empacado y recolección (64.66 €/t_{MS} con una productividad de 1.9 t_{MS}/HProd), fueron superiores a los de otras experiencias de recolección de matorral mediterráneo dentro del proyecto Life+ ENERBIOSCRUB (BLASCO *et al*, 2018): 58.94 €/t_{MS} (2.02 t_{MS}/HProd) para jara (*Cistus laurifolius*) en Lobia (Soria); 52.5 €/t_{MS} (2.1 t_{MS}/HProd) para retama (*Genista cinerascens*) en Ávila y 55.48 €/t_{MS} (1.97 t_{MS}/HProd) para tojo (*Ulex europaeus*) en La Coruña. Sin embargo, los costes resultaron inferiores a los de recolección de matorral mixto de brezo (*Erica sp.*) y retama (*Genista florida*) en Zamora: 82.97 €/t_{MS} (1.22 t_{MS}/h).

La venta de la biomasa recolectada puede contribuir a la reducción de los costes de limpieza de matorral. Considerando un precio de venta en destino de 35 €/t_{MH} de biomasa arbustiva empacada, similar al precio de mercado de la biomasa de eucaliptos en fardos, [RENTERÍA, A., Gestamp Biomass (comunicación personal, 15 de enero de 2019)], los costes brutos de desbroce con cuchillas (173.24 €/ha), incluyendo la recogida de pacas y el transporte por carretera a planta (70 km), recogiendo 4.16 t_{MH}/ha de biomasa húmeda, se podrían reducir con la venta de biomasa (145.60 €/ha) un 84%. Para que los trabajos sean rentables, considerando el precio de venta de la

biomasa de 35 €/t_{MH} y una distancia de transporte de 70 km, la eficiencia de recolección debería aumentar del 31.3% al 37.2%, es decir, pasar a ser de 4.95 t_{MH}/ha.

Según las tarifas forestales de TRAGSA (TRAGSA 2019), utilizadas de referente en España, el coste neto del desbroce mecanizado con desbrozadora de cadenas o martillos, en una zona similar a la del ensayo, con poca piedra, sin afloramientos rocosos y pendiente inferior al 10%, oscila entre 166.64 €/ha para zonas con cobertura inferior al 50%, y 361.01 €/ha para zonas con cobertura entre el 50% y el 80%. Los costes de desbroce con cuchillas (142.11 €/ha) y con martillos (152.53 €/ha), en una zona de matorral con un 56% de cobertura, son un 15% y un 8% inferiores a las tarifas de TRAGSA para zonas con cobertura de copa inferior 50%. Una tarifa de 145.00 €/ha por el desbroce mecanizado de matorral con desbrozadora-empacadora puede ser razonable en escenarios similares a los de la zona de estudio, teniendo en cuenta que el efecto del desbroce sobre la reducción del riesgo de incendios forestales es similar al realizado utilizando desbrozadoras de cadenas o martillos convencionales. Sin embargo, si el equipo de desbroce-empacado se utiliza para un posterior aprovechamiento ganadero, sería conveniente pasar después una desbrozadora de cadenas o martillos para reducir la altura de los tallos cortados y optimizar dicho aprovechamiento.

El creciente coste del suministro de energía y el aumento de la necesidad de biomasa para las industrias de base biológica, refuerzan el interés por la biomasa arbustiva, que normalmente no se recolecta debido al elevado coste de los trabajos y el bajo valor de su uso final. Sin embargo, las mejoras mecánicas en los equipos de recolección, el creciente interés del matorral para la obtención de sustancias precursoras de bioproductos con alto valor añadido y, lo más importante, la necesidad de continuar con los trabajos de prevención de incendios forestales, hacen que la recolección y el transporte de la biomasa de matorral resulte cada vez más interesante.

6. Conclusiones

Se operó de manera satisfactoria un sistema de desbroce-empacado (Biobaler WB55) para recolectar una formación típica de matorral mediterráneo (*Cistus laurifolius*). El resultado del desbroce del matorral fue aceptable, pero la eficiencia de recolección de biomasa (31% de la carga de matorral usando cuchillas como herramienta de corte en la desbrozadora, y 12% con martillos) podría mejorarse. La producción media de biomasa recolectada con cuchillas fue de 2.6 t_{MS}/ha con una productividad de 1.4 t_{MS}/HProd, y con martillos de 1.7 t_{MS}/ha y 1.1 t_{MS}/HProd. La superficie desbrozada a la hora fue similar con ambas herramientas de corte (0.7 ha/HProd con cuchillas y 0.6 ha/HProd con martillos).

El aumento de la carga de biomasa arbustiva no tuvo una influencia significativa en la productividad de biomasa recolectada. Sin embargo, se observó una disminución en la eficiencia de recolección de biomasa al aumentar la carga de matorral, siguiendo una tendencia logarítmica.

Los costes medios de desbroce y recolección se estimaron en 99.5 €/HProd, 142.1 €/ha y 53.9 €/t_{MS} (34.0 €/t_{MH}) con cuchillas, y 91.5 €/HProd, 152.5 €/ha y 81.4 €/t_{MS} (51.1 €/t_{MH}) con martillos.

El sistema de desbroce-empacado evaluado puede contribuir a la reducción de los costes de prevención de incendios forestales al disminuir los costes de desbroce hasta un 15% respecto a las tarifas de TRAGSA en escenarios similares (142.11 €/ha vs. 166.64 €/ha), y un 84% con la venta de biomasa arbustiva para la producción de biocombustibles.

Sería interesante evaluar la influencia de la velocidad de trabajo del equipo y la edad y flexibilidad de la vegetación sobre la productividad de la biomasa y la eficiencia de recolección.

Un desbroce de matorral debidamente planificado puede ser una herramienta de gestión ambiental adecuada para reducir el riesgo de incendios forestales mediante la obtención de biocombustibles sólidos sostenibles a partir de matorrales de alto riesgo de inflamabilidad. Es necesario utilizar métodos innovadores de gestión y recolección de biomasa arbustiva que actualmente no se aplican en el sur de Europa por falta de conocimientos técnicos y análisis de su rentabilidad económica.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto LIFE+ ENERBIOSCRUB “Gestión sostenible de formaciones arbustivas para uso energético (LIFE 13/ENV/ES/000660)”, cofinanciado por el Programa LIFE de la UE. Para su realización, se han utilizado dos equipos cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional: un equipo de desbroce y empacado Biobaler WB55 (proyecto CIEM13-3E-2505) y un equipo de tracción (proyecto CIEM15-EE-3378).

8. Bibliografía

ACKERMAN, P.; BELBO, H.; ELIASSON, L.; JONG, A.; LAZDINS, A.; LYONS, J.; 2014. The COST model for calculation of forest operations costs. *Int. J. For. Eng.* 25(1): 75–81. <https://doi.org/10.1080/14942119.2014.903711>

BADOS, R.; ESTEBAN, L.S.; ESTEBAN, J.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; SÁNCHEZ T.; TOLOSANA, E.; 2021. Biomass equations for rockrose (*Cistus laurifolius* L.) shrublands in North-central Spain. *For Syst* 30(3): 1-14. <https://doi.org/10.5424/fs/2021303-17997>

BLASCO, I.; VELASCO, H.; CALERO, R.; CARRASCOSA, A.; 2018. Demonstrative trials of harvesting scrub biomass. *Techno-Economic Assessment. Project LIFE13 ENV/ES/000660, Deliverable B1 (TRAGSA).*

CAMIA, A.; AMATULLI, G.; 2009. Weather factors and fire danger in the Mediterranean. *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*, 71–82. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4_6

CARVALHO, A.; MONTEIRO, A.; FLANNIGAN, M.; SOLMAN, S.; MIRANDA, A.I.; BORREGO, C.; 2011. Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. *Atmos. Environ* 45: 5545–5553. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.010/>

DO CANTO, J.L.; KLEPAC, J.; RUMMER, B.; SAVOIE, P.; SEIXAS, F.; 2011. Evaluation of two round baling systems for harvesting understory biomass. *Biomass and bioenergy* 35: 2163–2170. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.006>

ESTEBAN, L.S.; BADOS, R.; MEDIAVILLA, I.; 2018. Gestión sostenible de formaciones arbustivas para uso energético, p. 57. Disponible on line: <http://enerbioscrub.ciemat.es/documents/210922/222403/Manual+Gesti%C3%B3n+Arbustos/9c8c61bc-2792-497c-a0d3-2433d0b84ac7/> (consultado: 3 de enero de 2021).

GONZÁLEZ, B.D.; CAÑELLAS, I.; GONZÁLEZ, I.; VÁZQUEZ, A.; SIXTO, H.; 2017. Manual de evaluación ambiental de los aprovechamientos de matorrales para uso biomásico, p. 49. Disponible on line:

http://enerbioscrub.ciemat.es/documents/210922/222403/Manual_Evaluacion_INIA.pdf/7de4c938-e507-4be8-9641-1a5b7e50ee5b (consultado: 23 de diciembre de 2021).

GONZÁLEZ, B.D.; SIXTO, H.; GONZALEZ, I.; CAÑELLAS, I.; 2018. Environmental impact assessment of shrub mechanical harvesting for energy purposes. PROJECT LIFE13 ENV/ES/000660, Deliverable B5-1 (INIA).

HOINKA, K.P.; CARVALHO, A.; MIRANDA, A.I.; 2009. Regional-scale weather patterns and wildland fires in central Portugal. *Int J Wildland Fire* 18: 36–49. <https://doi.org/10.1071/WF07045>

KOUTSIAS, N.; ARIANOUTSOU, M.; KALLIMANIS, A.S.; MALLINIS, G.; HALLEY, J.M.; DIMOPOULOS, P.; 2012. Where did the fires burn in Peloponnisos, Greece the summer of 2007? Evidence for a synergy of fuel and weather. *Agric For Meteorol* 156: 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.006/>

KLEPAC, J.; RUMMER, B.; 2009. Evaluation of the WB55 bio-baler for baling woody biomass in a forest application. Proceedings of SAF 2009 National Convention [CD-ROM]. Orlando, FL: Society of American foresters. 1–13. Disponible on line: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/36336> (consultado: 20 noviembre de 2021).

KOVATS, R.S.; VALENTINI, R.; BOUWER, L.M.; GEORGOPOULOU, E.; JACOB, D.; MARTIN, E. et al; 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: regional aspects. Disponible on line: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap23_FINAL.pdf/ (consultado: 27 de diciembre de 2021).

Land Use and Cover Area frame Survey (LUCAS), 2012. Disponible on line: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas/> (consultado: 15 de diciembre de 2021).

LANGHOLTZ, M.; CAFFREY, K.; BARNETT, E.; WEBB, E.; BRUMMETE, M.W.; DOWING, M.; 2011. Demonstration of the Biobaler harvesting system for collection of small-diameter woody biomass. Oak Ridge National Laboratory. Disponible on line: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub34055.pdf/> (consultado 20 de noviembre de 2021).

MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente), 2015: Estadísticas de Incendios Forestales en España. Disponible on line: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendios_default.aspx/ (consultado: 27 de noviembre de 2021).

MARTÍNEZ, D.; 2018. Estudio de la alimentación de empacadora de biomasa Biobaler WB-55
Fuentelsaz, J. y Peña, D. Trabajo fin de grado. Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Ingeniería Mecánica.

MAYOR, A.G.; VALDECANTOS, A.; VALLEJO, V.R.; KEIZER, J.J.; BLOEM, J.; BAEZA, J. et al; 2016. Fire-induced pine woodland to shrubland transitions in Southern Europe may promote

shifts in soil fertility. Sci. Total Environ. 573: 1232–1241.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.243/>

MEDIAVILLA, I.; BORJABAD, E.; FERNÁNDEZ, M.J.; RAMOS, R.; PÉREZ, P.; BADOS, R., et al; 2017. Biofuels from broom clearings: Production and combustion in commercial boilers. Energy 141: 1845–1856. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.112/>

PAUSAS, J.G.; FERNÁNDEZ-MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. Clim. Change 110: 215–226. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6>

PÉREZ, P.; ESTEBAN, L.S.; 2008. Evaluación de diferentes alternativas de recolección del matorral de *Cistus laurifolius* para la producción de biomasa con fines energéticos. CIEMAT. Disponible on line: https://www.researchgate.net/publication/309391515_Evaluacion_de_diferentes_alternativas_de_recoleccion_del_matorral_de_Cistus_laurifolius_para_la_produccion_de_biomasa_con_fines_energeticos (consultado: 7 de enero de 2021).

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) 2010. Disponible on line: <http://pnoa.ign.es/> (consultado: 30 de noviembre de 2021).

SAVOIE, P.; LAVOIE, F.; D'AMOURS, L.; SCHROENDER, W.; KORT, J.; 2010: Harvesting natural willow rings with a bio-baler around Saskatchewan prairie marshes. Can. Biosyst. Eng 52. Disponible on line: <http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/52/C0825.pdf/> (consultado: 15 de diciembre de 2021).

SAVOIE, P.; CURRENT, D.; ROBERT, F.S.; HEBERT, P.L.; 2012: Harvest of natural shrubs with a Biobaler in various environments in Quebec, Ontario and Minnesota. Appl Eng Agric. 28(6): 795–801. <https://doi.org/10.13031/2013.42473/>

SAVOIE, P.; HÉBERT, P.L.; ROBERT, F.S.; SIDDEERS, D.; 2013: Harvest of short-rotation woody crops in plantations with a biobaler. Energy and Power Engineering 5: 39–47. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.52A006/>

STOLARSKI, M.J.; KRZYZANIAK, M.; SZCZUKOWSKI, S.; TWORKOWSKI, J.; GRYGUTIS, J.; 2015. Changes of willow biomass quality as a renewable energy feedstock harvested with Biobaler. Journal of Elementology 20: 717–730. <https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.3.769/>
 Disponible on line: <http://www.tragsa.es/es/grupo-tragsa/regimen-juridico/tarifas/> (consultado: 15 de enero 2021).