

LA RECOLECCIÓN MECÁNICA DE LA CAÑA COMÚN CULTIVADA PARA BIOMASA

Ensayos realizados en Alcalá de Henares (Madrid)

Resultados de los ensayos de cosecha mecánica de biomasa de arundo desarrollados por iniciativa conjunta del Grupo de Agroenergética de la Universidad Politécnica de Madrid (GA-UPM) y dos empresas interesadas en el sector de la agroenergía, con la colaboración del Departamento de Investigación Agroambiental del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural Agrario y Alimentario. Los ensayos de campo se realizaron en la finca El Encín, en Alcalá de Henares (Madrid) y los trabajos de laboratorio y gabinete se efectuaron en los Campos de Prácticas de la E.T.S. Ingenieros Agrónomos de Madrid.

**M.D. CURT, M. SANZ,
F.M. OSQUERA, P.L. AGUADO Y
J. FERNÁNDEZ**

GRUPO DE AGROENERGÉTICA DE
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
MADRID

EN COLABORACIÓN CON:
P.V. MAURI, A. PLAZA
INSTITUTO MADRILEÑO DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
RURAL, AGRARIO Y ALIMENTARIO

La agroenergética es una reciente orientación de la agricultura que pretende la producción, utilización y/o transformación de biomasa en productos energéticos. En la actualidad, el desafío de la agroenergética es el de conseguir que los cultivos energéticos, es decir, los cultivos específicamente desarrollados para

la obtención de energía, sean una realidad.

■ Especies vegetales

La versatilidad de la biomasa posibilita la generación de una amplia gama de productos a partir de las especies vegetales, razón por la que las especies de interés energético se clasifiquen

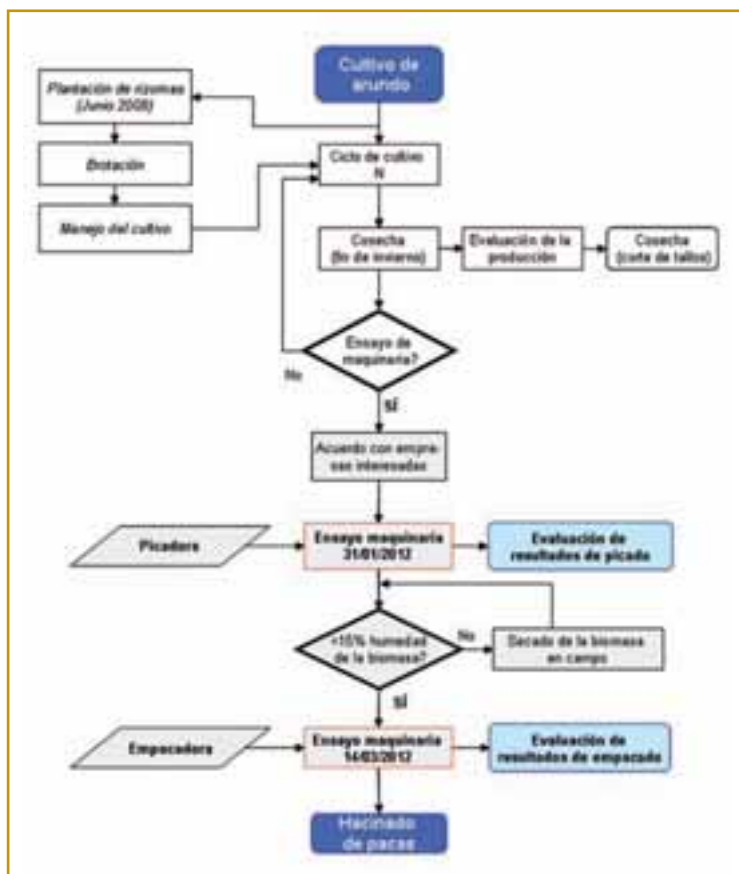


Figura 1: Diagrama de flujo del ensayo

en función de su utilización. Genéricamente, se distinguen tres grandes grupos de especies de interés energético. Por una parte, está el grupo de las especies cultivadas para la producción de biomasa lignocelulósica, la cual comprende la mayor parte de la biomasa que producen; el destino de esta biomasa es la producción de biocombustibles sólidos para usos térmicos y eléctricos, y en un futuro también servirá como materia prima para las biorrefinerías y para la producción de los biocarburantes de 2ª generación.

Por otra parte, se distingue el grupo de las especies cultivadas para la producción de biocarburantes por métodos convencionales (bioetanol, biodiesel de 1ª generación), cuyo producto de interés (grano, semilla) es una fracción menor de la biomasa del cultivo.

En foros nacionales e internacionales, tanto institucionales como científicos, la tendencia es a considerar que, entre los dos grupos, el de mayor potencial es el de la biomasa lignocelulósica, ya sean especies leñosas o herbáceas.

Por último, el tercer grupo reconocido es de naturaleza acuática y comprende las algas (macro y microalgas); su interés es emergente en el sector de los bioproductos y energía, aunque aún no bien caracterizado,

La mecanización de los cultivos energéticos, y en particular, la mecanización de la cosecha, es un punto clave para su promoción y desarrollo. Su importancia radica no sólo en la viabilidad técnica y económica del cultivo, sino también en el balance energético y medioambiental.

Así pues, los cultivos energéticos son cultivos extensivos en cuanto a que hacen falta grandes superficies de cultivo para producir energía de manera significativa; su mecanización



Figura 2: Cultivo energético de caña común en El Encín, Alcalá de Henares (Madrid).

es crucial, sobre todo para el caso de cultivos de reciente desarrollo, para los que hay que diseñar y desarrollar maquinaria apropiada.

Una característica intrínseca a los cultivos energéticos es que se les debe exigir que su balance energético sea positivo, es decir, que produzcan más energía de la que se emplea en su producción. Como se sabe, la mecanización es costosa energéticamente y de ahí que deba ser optimizada. Además, la mecanización afecta al balance medioambiental del cultivo, tanto por el balance de emisiones de gases de efecto invernadero como por su efecto sobre la protección del suelo.

■ La caña común

La caña común (*Arundo donax* L.) –también denominada abreviadamente ‘arundo’– es una planta herbácea perenne, rizomatosa, con ciclo anual de crecimiento y excepcional talla, ampliamente conocida en toda la región Mediterránea. Ocasionalmente se utiliza como barrera cortaviento, pero sus tallos (cañas) –de naturaleza lignocelulósica– tienen múltiples usos tradicionales, ya sea como

tutores en horticultura, para la confección de cañizos y cestas, fabricación de instrumentos musicales, u otros.

En los últimos años, y a razón de su rusticidad y alta capacidad productiva, esta especie se está estudiando como un potencial cultivo energético para la producción de biomasa lignocelulósica, recibiendo la atención tanto de investigadores como de empresas del sector.

En este artículo se presentan los resultados de los ensayos de cosecha mecánica de biomasa de arundo desarrollados por iniciativa conjunta del Grupo de Agroenergética de la Universidad Politécnica de Madrid (GA-UPM) (www.upm.es), participante de un proyecto europeo (www.optimafp7.eu) sobre el cultivo energético de gramíneas perennes, y dos empresas interesadas en el sector de la agroenergía, Biothek (www.cultivosenergeticos.es) y Serrat Trituradoras (www.serrat.es), y con la colaboración del Departamento de Investigación Agroambiental del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural Agrario y Alimentario (IMIDRA) (www.imidra.org). Se tratan dos ámbitos de trabajo: campo y laboratorio.

Los ensayos

Los ensayos de campo se realizaron en la finca El Encín (Alcalá de Henares) de IMIDRA, en donde se ubicaba una plantación experimental de caña común en producción, que había sido establecida para el desarrollo de proyectos de investigación en el marco de colaboración GA-UPM e IMIDRA. En otro ámbito, los trabajos de laboratorio y gabinete se efectuaron en las instalaciones del GA-UPM, ubicadas en los Campos de Prácticas de la E.T.S. Ingenieros Agrónomos de Madrid (ETSIA).

El cultivo y la recolección

• La plantación de la caña

El cultivo se estableció a partir de rizomas en 2008, en una parcela de 1 ha de superficie de textura arcillo-arenosa, que se dotó de instalación de riego por goteo. Los rizomas para la plantación procedieron de un cultivo de plantas madre del GA-UPM, ubicado en la ETSIA. El diseño de la plantación incluía 9 sub-parcelas de idéntico tamaño. Cada sub-parcela comprendió 5 líneas de plantación de 110 m de longitud, con una separación de 1.6 m entre líneas y 1 m entre puntos de plantación.

Se siguió un sistema de cultivo perenne con cosechas anuales de la biomasa aérea, de acuerdo con el ciclo anual de desarrollo de esta especie. Todos los años el manejo del cultivo fué similar: la plantación se regó de junio a septiembre y se cosechó al término del periodo de reposo vegetativo, antes de la brotación, al final del periodo invernal.

• La recogida mecanizada del cultivo

En el año 2012 se contactó con un consorcio de dos empresas radicadas en Aragón, Bio-

La estrategia de mecanización que se siguió implica dos etapas; la primera tiene por objeto el corte y fragmentado de tallos, y la segunda, la recogida y el empacado de la biomasa

thek y Serrat Trituradoras, que promovían el cultivo de la caña común, y que estaban interesadas en ensayar en una plantación de tamaño significativo su propuesta de mecanización para la cosecha de biomasa del arundo. El área de interés de Biothek es la promoción de la bioenergía, y entre sus actividades se incluye la comercialización de una variedad seleccionada de arundo para la producción de biomasa. Por su parte, el área de interés de Serrat es el desarrollo de maquinaria agrícola y forestal para la cosecha de biomasa lignocelulósicas, particularmente, trituradoras.

A través de un acuerdo de colaboración, se desarrollaron dos jornadas de demostración de mecanización en enero-marzo de 2012 en la plantación establecida en el Encín. La estrategia de mecanización que se siguió implica dos etapas; la

primera etapa tiene por objeto el corte y fragmentado de tallos, y la segunda, la recogida y el empacado de la biomasa.

La maquinaria fue la seleccionada por las dos empresas, que se ocuparon de la logística del ensayo (desplazamiento y retirada de la maquinaria, operadores de la maquinaria) para la realización de los ensayos en el Encín. IMIDRA complementó los medios materiales para el ensayo (personal propio, hacinado de pacas, control de instalaciones), y GA-UPM evaluó el comportamiento de los ensayos (medidas en campo) y realizó las determinaciones analíticas.

• Corte y troceado de tallos

El ensayo de corte y fragmentado de tallos de la plantación del Encín se realizó el 31/01/2012. Se utilizó una picadora autopropulsada John Deere de 430 CV equipada con



Figura 3: Picadora John Deere de 430 CV equipada con cabezal Kemper Champion 450.



Figura 4: Empacadora Claas Quadrant 2100 con cabezal astillador T-2400 de Serrat

cabezal Kemper Champion 450, de 4.5 m de anchura de trabajo. La maquinaria había sido adaptada por Serrat con el objetivo de que los tallos resultaran más bien troceados y chascados que picados, y para que la biomasa quedara depositada en hileras sobre el terreno. Entre las modificaciones, se destaca que las cuchillas del tambor picador habían sido retiradas.

• **Recogida y empacado**

El ensayo de recogida y empacado de biomasa se realizó después de que la humedad de la biomasa de las hileras descendiera al 15%, el 14/03/2012. Se utilizó una macroempacadora (pacas prismáticas) Claas Quadrant 2100, en la que el dispositivo elevador era el cabezal astillador T-2400 de Serrat, que es intercambiable con el pick-up convencional de la empacadora. La empacadora estaba acoplada un tractor Fendt 916 de 197 CV.

• **Mediciones en campo**

A fin de calcular la capacidad de trabajo de la maquinaria utilizada en campo, se midieron los tiempos netos de operación en las líneas de cultivo. También se estimó la altura de corte de

la picadora midiendo la altura de las bases de las cañas dejadas. Al acabar el ensayo de la picadora, la biomasa de las hileras se muestreó para estimar el tamaño de partícula (longitud de fragmento de tallo) y determinar su contenido en humedad en laboratorio.

La biomasa en las hileras se dejó secar en campo (secado pasivo). Se estableció un objetivo de humedad de la biomasa para el empacado del 15%. Con el fin de establecer la fecha de dicha operación, la biomasa se muestreó periódicamente en

dos hileras que habían sido realizadas a diferente velocidad, y que por tanto, habían resultado con distinto tamaño de partícula (picado grueso, picado fino). Para relacionar el proceso de secado con las condiciones meteorológicas, se compilaron los datos diarios de temperatura, precipitación, radiación, velocidad del viento y evapotranspiración.

Durante los ensayos de empacado se midieron los tiempos entre descarga de pacas. Asimismo, se contaron el número de pacas hechas, y de 6 pacas se determinó su peso unitario para conocer el rendimiento real en biomasa del cultivo. Las pacas se dejaron apiladas en campo raso durante 8 meses; al término de este tiempo se muestrearon para determinar sus características químicas y energéticas.

• **Análisis de la biomasa**

Diez días antes de la fecha de corte y durante el período de secado de la biomasa en hileras al aire, se determinó el contenido en humedad de la biomasa en muestras aleatorias de biomasa total -incluye fragmentos de caña y hojas-, de aproximadamente 0.5 kg de peso fres-



Figura 5: Hileras de biomasa de caña común en proceso de secado natural

co (determinado exactamente con precisión de la centésima de gramo), mediante secado forzado en estufa a 105°C. Los resultados se expresaron en base fresca (porcentaje de peso de agua sobre peso fresco de biomasa).

Para los análisis energético, inmediato y elemental, se tomaron muestras aleatorias en distintas posiciones (10) y distintas pacas de biomasa (5). Las muestras se llevaron a laboratorio y se preparó una muestra compuesta, que se trituro en dos etapas para reducir el tamaño de partícula a <1 mm. Sobre esta muestra compuesta se realizaron todos los análisis, por triplicado (n=3).

El análisis energético consistió en determinar el poder calorífico superior (PCSo, en base a materia seca) en calorímetro LECO, mod. AC-350. El análisis inmediato comprendió la determinación del contenido en materias volátiles por incineración a 900°C en mufla PYRO Milestone (véase UNE-CEN/TS 15148 EX), contenido en cenizas por incineración a 450°C (UNE-CEN/TS-14775:2004), y

La picadora John Deere utilizada era de 430 CV, y la longitud de fragmento de caña predominante deseada, de 10-40 cm

carbono fijo (diferencia en peso porcentual respecto a la suma de los contenidos en cenizas y volátiles). Respecto al análisis elemental, se determinaron los contenidos en carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre en analizador elemental VARIO El III (véase CEN/TS 15104), y los contenidos en potasio (espectrofotometría de emisión), cloro (método Volhard) y fósforo (método del vanadato-molibdato).

■ Los resultados obtenidos

• Ensayo de corte y troceado de cañas

El corte y troceado de cañas constituyó la primera etapa de la operación de cosechado de biomasa de arundo. El cabezal Champion 450 trabajó a 20-25 cm por encima del nivel

de suelo, como promedio; los valores mínimos y máximos medidos fueron 17 cm y 28 cm, no ocasionando daños en las tuberías de goteo. La biomasa quedó dispuesta en hileras, de 1.4 m de anchura y 46 cm de alto, por término medio. Una vez que se concluyó el ensayo, se determinó que la biomasa de las hileras tenía un contenido medio en humedad del 43.8%.

Dado que la velocidad de recogida debe adaptarse a la producción, a la potencia de la picadora y al tamaño del picado previsto, los ensayos se realizaron con distintas velocidades de trabajo. El rendimiento del cultivo esperado se estimó en 50 t materia fresca/ha aproximadamente, la potencia de la picadora John Deere utilizada era de 430 CV, y la longitud de fragmento de caña predominante deseada, de 10-40 cm (tamaño que los expertos de Biothek y Serrat habían determinado en experiencias previas como más adecuado para el secado, recogida y empaçado de la biomasa de arundo).

Al comienzo del ensayo, la picadora se llevó a una velocidad muy lenta. Así pues, trabajando a 1.53 km/h (velocidad medida en campo con cronómetro, sin considerar tiempos muertos ni giros de la maquinaria), se obtuvo un picado demasiado fino, con un rango de tamaños de fragmentos dominantes de caña de entre 5 y 10 cm (mínimo: 4 cm; máximo: 28 cm), según el muestreo realizado en las hileras. Finalmente, se ajustó como velocidad de régimen la



Figura 6: Picadora con cabezal Champion 450 trabajando en la plantación de caña común.

que se consideró más adecuada según las observaciones hechas en campo sobre el tamaño de los fragmentos de caña depositados en hileras. Esta velocidad resultó ser 3 km/h (velocidad medida con cronómetro, sin considerar tiempos muertos ni giros de la maquinaria). Con esta velocidad se consiguieron fragmentos dominantes de caña de entre 40 y 43 cm (mínimo: 8 cm, máximo: 83 cm). El rendimiento medio equivalente (valor calculado) sería de 1.35 ha/h (0.74 h/ha); el consumo de carburante se estimó en el rango de 25-30 l/h.

• Secado pasivo de la biomasa

Diez días antes del ensayo de corte se determinó en muestras de plantas completas que el contenido medio en humedad de los tallos era del 50.2%. En las muestras cogidas de la biomasa hilerada, justo al finalizar el corte de la plantación, se observó un contenido muy similar (49.6%) en las correspondientes al picado grueso; en cambio, en las tomadas de la hilera con picado fino (menor tamaño de partícula), la humedad ya había descendido al 38%, debido al tiempo transcurrido entre la realización de las hileras mues-



Figura 7: Empacadora Claas Quadrant 2100 liberando una paca de biomasa de caña común.

treadas y la toma de muestra (4 h, aproximadamente) y a las favorables condiciones meteorológicas en el día del ensayo (día despejado y soleado, con 12.9°C a las 16.30 h locales, 1.3 m/s velocidad del viento, 67% humedad relativa, 11.31 MJ/m² radiación global).

A lo largo del periodo de seguimiento de la humedad de la biomasa hilerada, se observó una tendencia de descenso paralela en los dos tipos de hile-

ras. En las condiciones meteorológicas de la zona del ensayo (6°C temperatura media diaria, con máxima absoluta de 25.8°C y mínima absoluta de 4.8°C), el tiempo necesario para alcanzar menos del 15% de humedad resultó ser de 20 días.

• Empacado

La maquinaria utilizada resultó muy eficaz en el empacado de la biomasa, ya que todas las pacas estuvieron bien conformadas, y resultaron de características homogéneas. Sin embargo, debido a la altura de trabajo y a la robustez de los dientes elevadores, se produjeron daños en las tuberías de goteo, siendo éste un aspecto a mejorar en futuros ensayos.

La velocidad de régimen de la empacadora, trabajando en continuo, resultó ser de 2 km/h. El tiempo medio utilizado en preparar y liberar las pacas fue de 1 min 48 s por paca. El tamaño medio de las pacas medidas fue de 2.30 x 0.80 x 0.60 m, teniendo un peso medio de 264 kg/paca. La densidad media calculada fue, por tanto, de 239 kg/m³.

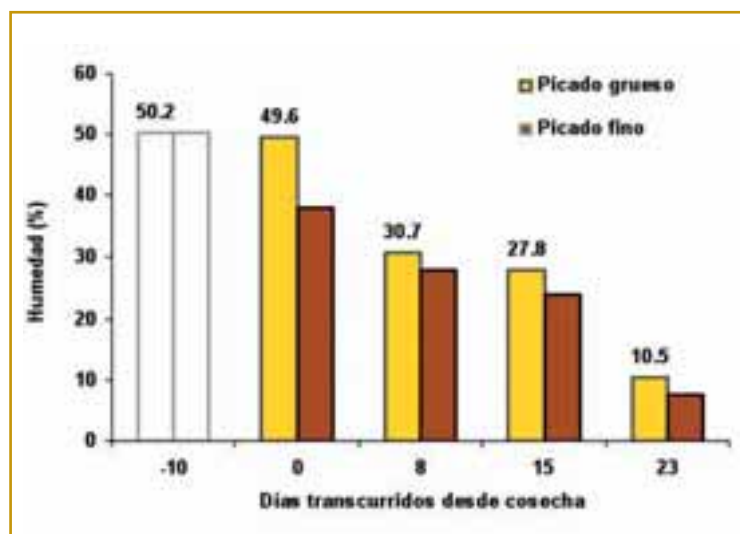


Figura 8: Seguimiento de la humedad de la biomasa hilerada, a lo largo del periodo de secado natural



Figura 9: Pacas de biomasa de caña común almacenadas en campo.

• Rendimiento del cultivo y características de la biomasa empacada

El rendimiento del cultivo, calculado a partir del número de pacas obtenidas, peso medio de paca y área cosechada, fue de 22.1 t (11 % humedad de equilibrio) por hectárea.

Las características de la biomasa empacada, después de haber sido almacenadas las pacas 8 meses al aire libre, eran muy similares a las indicadas en la bibliografía para la biomasa de arundo, de lo que se deduce que no hubo cambios sustanciales en las propiedades de la

biomasa, y por tanto, la biomasa empacada de arundo es estable. Para las aplicaciones térmicas (combustión), las propiedades más positivas a destacar son su poder calorífico (18.3 MJ/kg) y su bajo contenido en nitrógeno (0.38%); en el otro extremo, el contenido en cenizas (5.5%), si bien hay que mencionar que este valor está dentro los valores habituales que se obtienen para las biomasa de cultivos energéticos herbáceos perennes.

■ Conclusiones

A partir de los resultados de los ensayos realizados en una

En la segunda etapa se utilizó una macroempacadora de pacas prismáticas Claas Quadrant 2100 con cabezal T2400 Serrat

plantación de *A. donax* L. de 4 años de edad, situada en Alcalá de Henares (Madrid), se deduce que la estrategia de dos etapas para la cosecha de la biomasa producida en el ciclo anual del cultivo, es viable, observándose buen comportamiento de la maquinaria utilizada.

En la primera etapa se utilizó una picadora autopropulsada John Deere 430 CV equipada con cabezal Kemper Champion 450 (anchura de corte 4.5 m), determinándose que la velocidad de régimen más adecuada era de 3 km/h.

En la segunda etapa se utilizó una macroempacadora de pacas prismáticas Claas Quadrant 2100 con cabezal T2400 Serrat, que mostró buen comportamiento trabajando a una velocidad de régimen de 2 km/h, aunque también se puso de manifiesto que habría que mejorar los aspectos relativos a la elevación de la biomasa para no afectar al sistema de riego.

Se obtuvo un buen rendimiento en biomasa cosechada, 22.1 t/ha (biomasa en pacas, a humedad de equilibrio), y la calidad de la biomasa empacada se demostró estable tras 8 meses de almacenamiento en campo. ■

TABLA 1: PROPIEDADES DE LA BIOMASA DE LAS PACAS, DESPUÉS DE 8 MESES DE ALMACENAMIENTO FRENTE A VALORES EN BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE; CV = COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Parámetro	Media	cv (%)	Valores en bibliografía
PCSo (MJ/kg)	18.3	0.6	19.8 ^[1] , 17.7 ^[2]
Volátiles (%)	76.2	0.4	76.0 ^[2]
C fijo	18.3	1.3	18.5 ^[2]
Cenizas (%)	5.5	2.8	6.1 ^[1] , 5.3 ^[2] , 4.8 ^[3]
N (%)	0.38	38.6	0.71 ^[1] , 0.44 ^[2] , 0.73 ^[3]
C (%)	45.5	2.3	43.1 ^[3]
H (%)	6.28	4.8	--
S (%)	0.37	19.4	0.14 ^[3]
Cl (%)	0.42	1.5	0.22 ^[1] , 0.59 ^[3]
P (%)	0.02	0.3	0.04 ^[3]
K (%)	0.86	4.0	0.65 ^[1] , 0.55 ^[3]

Fuentes bibliográficas: [1] = Monti et al (2008), Biomass&Bioenergy 32: 216-223; [2] = Christou et al (2002), Proc. 12th EU Conf Biomass for Energy, Ind. & Clim., 127-130; [3] = Dahl & Obernberger (2004), Proc. 2nd World Conf. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Vol. II: 1265-1270.