

# Los residuos de las agroindustrias como biocombustibles sólidos (I)

Residuos generados en las almazaras, en las bodegas y otros residuos agroindustriales

Los residuos de las agroindustrias, tales como los generados en las almazaras, bodegas, cáscaras de frutos secos y la cascarilla de arroz tienen un claro interés económico y medioambiental para su uso como biocombustible sólido. Estos residuos tienen un poder calorífico cercano a 4.000 kcal/kg, frente a los 10.000 kcal/kg de los combustibles fósiles habiendo una diferencia de precio de los 0,6 euros/kg que supone el gasóleo de calefacción, frente a los 0,06 euros/kg de estos residuos en los centros de producción.



**Jesús Fernández.**  
Catedrático de Producción Vegetal.  
ETS de Ingenieros Agrónomos.  
Universidad Politécnica de Madrid.

Los biocombustibles sólidos están formados por materiales orgánicos de tipo lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza. Tanto materias de tipo residual como la paja, restos de poda o los residuos de agroindustrias, como la biomasa producida mediante cultivos específicos para fines térmicos, constituirían las materias primas para la fabricación de este tipo de combustibles y tienen la consideración de biomasa primaria, siempre que no hayan sufrido transformaciones en su composición, respecto a la originaria. Otro grupo de biocombustibles

sólidos estaría constituido por el carbón vegetal, que resulta de un tratamiento térmico con bajo contenido en oxígeno de la biomasa leñosa, pero por ser el resultado de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, debe ser considerado de naturaleza secundaria.

## Naturaleza de los biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos lignocelulósicos, están formados principalmente por celulosa (40-50%), hemicelulosas y pectinas (15-25%) y lignina (25-35%), procedente de las paredes de las células vegetales. Estos tres componentes poseen un contenido parecido en hidrógeno (alre-

dedor del 6%) pero difieren en su contenido en carbono, siendo el de la lignina del orden del 70%, 45% el de la celulosa y 40% el de la hemicelulosa. El componente celulósico, que es el mayoritario, está constituido por un conjunto de fibras formadas a su vez por diversas subunidades (fibrillas, microfibrillas y micelas) cuya base estructural son las cadenas de celulosa formadas por numerosas moléculas de glucosa anhidra, unidas mediante el enlace  $\beta$  1-4. Las hemicelulosas y las sustancias pécticas son moléculas complejas formadas por hexosas, pentosas y ácidos urónicos principalmente, y se depositan en los espacios libres que dejan entre sí las microfibrillas. La lignina es un polímero

muy complejo formado a base de compuestos fenólicos con base de fenil propano, siendo sus componentes elementales los alcoholes cumárico, ferúlico y sinápico. La lignina se deposita también en los espacios que dejan las fibras, fibrillas y microfibrillas de celulosa y dan resistencia mecánica a la madera y resistencia química a la celulosa asociada.

Los biocombustibles procedentes de biomasa herbácea cortada en fresco, como por ejemplo el heno (hierba segada y desecada), contiene además de las paredes celulósicas de las células que forman los diferentes tejidos vegetales, todos los componentes del protoplasma que estaban en la célula en el momento del corte, por lo que tienen un relativamente alto contenido en sales minerales y nitrógeno procedente de las proteínas celulares. Los tejidos conductores de la savia bruta (xilema) y los tejidos de resistencia mecánica (colenquima y esclerenquima), formados por células muertas profundamente modificadas, son los que proporcionan el mayor aporte de lignina.

Cuando la biomasa herbácea procede del secado natural de las plantas, al final de su ciclo vital (por ejemplo, la paja), el contenido normal en proteínas y sales minerales (origen de las cenizas) suele ser bastante menor, ya que antes de producirse la senescencia de los órganos del vegetal se ha producido una emigración de nutrientes hacia los órganos de reserva o hacia los frutos y semillas.

En el caso de las biomásas leñosas procedentes de troncos o ramas de árboles o arbustos, una gran parte de las células pertenecen a la madera que forma el cuerpo central de las ramas y troncos, que son en su gran mayoría células y fibras muertas con una fuerte lignificación, por lo que este tipo de biomásas producen biocombustibles sólidos con bajo contenido en minerales, y por tanto dan pocas cenizas en la combustión.

**CUADRO I.**

**COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA.  
VALORES EN PORCENTAJE SOBRE BASE SECA.**

COMPONENTE	BIOMASA HERBÁCEA	BIOMASA LEÑOSA
Celulosa	35-50	55-65
Hemicelulosa	20-30	10-20
Lignina	10-20	20-30
Extractivos y otros	20-30	10-20
Cenizas	5-20	0,1-0,5

**CUADRO II.**

**PODERES CALORÍFICOS DE ALGUNOS TIPOS DE BIOMASA UTILIZABLES COMO  
BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO EN HUMEDAD  
(H%). PCS: PODER CALORÍFICO SUPERIOR; PCI: PODER CALORÍFICO  
INFERIOR, AMBOS EXPRESADOS EN KCAL/KG.**

TIPO DE BIOMASA	PCI			PCS
CONTENIDO EN HUMEDAD (%)	0	10	15	0
<b>RESTOS DE CULTIVOS HERBÁCEOS</b>				
Paja de cereales	4060	3630	3300	4420
Tallos de girasol	3700	3310	3090	4060
<b>CONTENIDO EN HUMEDAD (%)</b>				
<b>RESTOS DE CULTIVOS LEÑOSOS</b>				
Sarmientos de vid	4200	3280	2310	4560
Ramas de poda del olivo	4240	3190	2135	4600
<b>CONTENIDO EN HUMEDAD (%)</b>				
<b>RESIDUOS FORESTALES</b>				
<b>Leñas y ramas</b>				
Coníferas	4590	3590	2550	4950
Frondosas	4240	3310	2340	4600
<b>Cortezas</b>				
Coníferas	4670	3650	2650	5030
Frondosas	4310	3370	2380	4670
<b>CONTENIDO EN HUMEDAD (%)</b>				
<b>RESTOS DE AGROINDUSTRIAS</b>				
Cáscara de Almendra	4400	3940	3690	4760
Cáscara de Avellana	4140	3710	3470	4500
Cáscara de Piñón	4570	4090	3830	4930
Cáscara de Cacahuete	3890	3480	3260	4250
Cascarilla de arroz	3770	3370	3150	4130

### Características energéticas de los biocombustibles sólidos

En términos energéticos, se denomina poder calorífico superior (PCS) a la energía total que puede producir un combustible al quemarse completamente. Es el que se obtiene en una bomba calorimétrica (la combustión se realiza en el interior de una cámara a volumen constante) y se expresa en unidades energéticas por unidad de masa de combustible (normalmente kJ/kg o kcal/kg). Puede obtenerse tanto en bio-

combustibles completamente secos como en combustibles con una cierta humedad, debiéndose referir en cada caso el contenido en humedad del biocombustible.

En los casos en que la combustión se realice al aire libre (caso de calderas con chimeneas abiertas a la atmósfera), tiene más importancia el Poder Calorífico Inferior (PCI), que es el que se puede obtener realmente del combustible, y que resulta de restar al PCS la energía que se emplea en la evaporación del agua que se forma en la combustión

(como consecuencia del contenido en hidrógeno del biocombustible), y la necesaria para evaporar el agua que contuviera el biocombustible en el caso de que éste tuviera una cierta humedad.

El valor del PCS para la celulosa y hemicelulosa es del orden de las 4.100 kcal/kg y para la lignina de 6.370 kcal/kg, lo que indica que cuanto mayor sea el contenido en lignina de un biocombustible, mayor será su poder calorífico superior, como ocurre en los materiales leñosos (**cuadro I**). Además, en la biomasa leñosa el contenido en cenizas es inferior que en la biomasa herbácea, lo que aumenta la calidad energética de los biocombustibles leñosos. En el **cuadro II** se indican los poderes caloríficos de los principales biocombustibles sólidos, en función de su contenido en humedad.

### Residuos de agroindustrias

Los residuos derivados de las industrias agrícolas (agroindustrias) tienen la ventaja, para su aprovechamiento, de que se producen en una cuantía y con una cadencia previsibles, en función de la producción de la industria y, además, se encuentran concentrados al final de la cadena evaluadora. Los principales residuos agroindustriales que tienen aplicación como biocombustibles sólidos son los generados en almazaras bodegas e industrias de frutos secos.

### Residuos generados en las almazaras

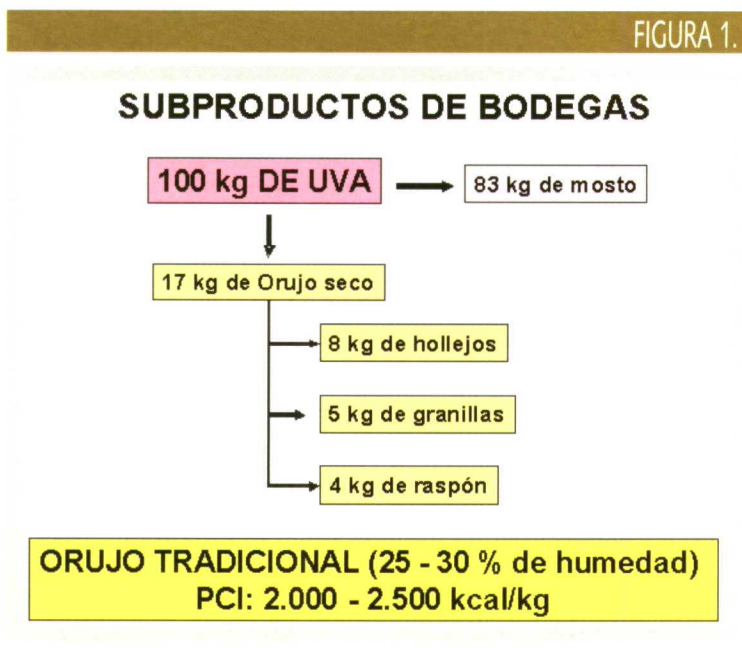
Aproximadamente el 20% del peso de la aceituna es aceite y el resto lo constituye hueso, pulpa, piel (35%) y agua (45%). La extracción del aceite de oliva ha ido evolucionando desde los primitivos sistemas de triturado, prensado y decantación natural, de los que quedan muy pocos en España, hasta los sistemas modernos de decantación de dos fases, pasando por el sistema de separación de tres fases, que empezó a aplicarse en España sobre los años setenta.

En la extracción del aceite por el método de tres fases se obtiene además del aceite, una fracción líquida (alpechín), formada por el agua de constitución de las aceitunas, el agua añadida y los productos extractados y una fracción sólida denominada orujo que todavía contiene algo de aceite y una humedad del orden del 50%. De 1.000 kg de aceituna, a los que se añaden 510 kg de agua tras el proceso de molturación, se obtienen 600 kg de orujo, 733 kg de alpechín y 177 kg de aceite. La composición de cada una de estas tres fases se muestra en el **cuadro III**.

En el sistema de dos fases, se utiliza un decantador especial para separar el aceite del resto de los componentes de la aceituna (agua y sólidos), produciéndose, además de aceite, un producto semipastoso con un 60-65% de humedad que se ha venido a denominar alperujo y que contiene todavía algo de aceite. La clarificación del aceite se realiza por medio de una centrífugadora agregando muy poca agua (unos 10 kg por cada 1.000 kg de aceituna molturada). En un balance típico de la producción de aceite por el sistema de dos fases, de 1.000 kg de aceituna se producen 176 kg de aceite, 819 kg de alperujo y unos 15 kg de agua que salen del proceso de limpieza del aceite con la composición mostrada en el **cuadro IV**, según el autor citado anteriormente (A. Sancho Ros). El poder calorífico superior del orujo seco sin extracción del aceite se estima en unas 5.000 kcal/kg.

Lo normal en la práctica almarazera es enviar el orujo o el alperujo a extractoras que, tras secar el producto, extraen el resto del aceite que quedaba, dando como subproducto el denominado orujillo, que es un producto sólido con un 10-12% de humedad y un PCI aproximado de 3.650 kcal/kg (base húmeda). Una práctica que se va imponiendo cada vez más, es separar por procedimientos físicos (densidad) los fragmentos de hueso del resto del orujo antes de desecar. Se obtiene así un

FIGURA 1.



hueso de color claro, cuyo precio como biocombustible se ha triplicado en los tres últimos años (el precio actual al por mayor, en las plantas extractoras, supera los 55 €/t) ya que existe una fuerte demanda de este producto en diversos países europeos (Italia,

Reino Unido y Suecia, principalmente). El resto del orujo deshuesado en su gran mayoría, se deseca y se extrae su aceite mediante un solvente orgánico (hexano) y el producto resultante (orujillo deshuesado) contiene abundante pulpa además de res-

tos de hueso que también se emplea para fines energéticos, aunque a un precio algo menor que el hueso (40-45 €/t). Este orujillo se exporta en su gran mayoría a Italia, Reino Unido, Suecia, Bélgica y Holanda. El uso principal de estos productos es la generación de electricidad en co-combustión con el carbón en las plantas termoeléctricas. El interés de estas plantas en consumir biomasa es el ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub>. La diferencia entre ambos productos es su resistencia a la molienda (tenacidad), medida por el Índice de Hardgrove, que hace que en algunos molinos de carbón no se pueda utilizar el hueso y prefieran el orujillo.

El orujillo tiene un color negrozco debido a la carbonización parcial de los restos de hueso y a la pulpa que se produce en la fase de secado. En algunos casos, el resto de hueso del orujillo extraído se puede separar de la pulpa, dando como resultado un producto leñoso de color oscuro (más o menos carbonizado), que se vende en las mismas condiciones que el hueso separado inicialmente, y la pulpa se peletiza para su venta como combustible o como pienso para el ganado.

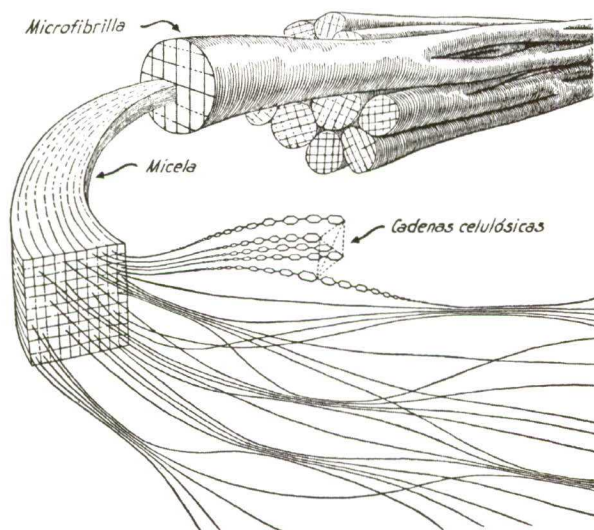
En un balance global de la producción de aceite, por cada tonelada de aceite obtenido se producen 4 t de alperujo, del que se puede obtener 2 t de orujillo.

**Residuos generados en las bodegas**

En el prensado de las uvas se produce el mosto, que es el producto principal del que saldrá el vino, y un residuo sólido, denominado orujo, formado por los hollejos (pieles y pulpa), raspónes (restos de las ramificaciones de los racimos) y las granillas o pepitas. El orujo contiene del 60 al 70% de humedad que, tras el prensado, se reduce al 45-55%. Con respecto al peso de la uva, el orujo representa un 17% aproximadamente, y dentro de éste: los hollejos serían el 8%, las granillas el 5% y el raspón el 4%.

FIGURA 2.

**ULTRAESTRUCTURA DE LAS FIBRAS DE CELULOSA**



- (a) Cadenas de celulosa
- (b) Micelas - 100 x (a) - Ø 3nm
- (c) Microfibrillas - 20 x (b) - Ø 10-20 nm
- (d) Fibrillas - 250 x (c) - Ø 0,22 micras
- (e) Fibras - 1500 x (d) - Ø 10 micras

Fuente del dibujo: Principios de Fisiología Vegetal de Bonner y Galdston, Editorial Aguilar 1960.

# 72 FERIA Internacional de Muestras de Valladolid

## CUADRO III.

### COMPOSICIÓN DEL ORUJO Y EL ALPECHÍN

ORUJO (600 KG)	ALPECHÍN (733 KG)
Agua 300 kg (50%)	Agua 660 kg (90%)
Sólidos 283 kg (47%)	Sólidos 67 kg (9%)
Aceite 17 kg (3%)	Aceite 6 kg (1%)

## CUADRO IV.

### COMPOSICIÓN DEL ALPERUJO Y RESTO ACUOSO QUE SALEN DEL PROCESO DEL LIMPIEZA.

ALPERUJO (819 KG)	RESTO ACUOSO (15 KG)
Agua 447 kg (54,5%)	Agua 13 kg (86,7%)
Sólidos 348 kg (42,5%)	Sólidos 2 kg (13,3%)
Aceite 24 kg (3%)	Aceite 0 kg

Los orujos pueden utilizarse para diversas finalidades, tales como: enmienda orgánica de suelos agrícolas, obtención de etanol, alimentación animal, extracción de colorantes, extracción de aceite o para fines energéticos. Por cada 100 kg de orujo fermentado se obtienen 5 l de etanol y de 2 a 4 kg de tartrato cálcico. Las granillas con el 12% de humedad contienen alrededor del 13-14% de un aceite muy rico en ácido linoléico.

La aplicación energética tradicional del orujo es en las calderas de las destilerías después de extraído el alcohol y de secado hasta un 25-30% de humedad, con un PCI variable entre las 2.000 y las 2.500 kcal/kg.

En las bodegas también se producen aguas residuales con alta carga orgánica cuya eliminación podría realizarse mediante digestión anaerobia, con producción de biogás, pero desde un punto de vista práctico esto no debería considerarse como una fuente productora de energía neta.

#### Otros residuos agroindustriales

Entre los residuos de agroindustrias que se pueden utilizar como biocombustibles sólidos, además de los citados anteriormente destacan por su interés las cáscaras de frutos secos (almendra, avellana, piñones y cacahuetes, principalmente) y la

cascarilla de arroz. En el **cuadro II** se indican los poderes caloríficos de estos productos.

Los residuos de frutos secos se encuentran localizados en las zonas cercanas a los centros de producción y transformación. Así, las cáscaras de almendras abundan en la zona de Levante, las cáscaras de avellana en Cataluña y las de piñones en Segovia y Valladolid. En las comarcas donde se producen estos residuos es frecuente su utilización desde hace bastante tiempo, tanto para fines domésticos como para fines industriales (hornos cerámicos y secaderos de grano, por ejemplo). La cascarilla de arroz se acumula en las instalaciones arroceras y se puede utilizar para fines energéticos por combustión o gasificación, lo que permite proporcionar energía y calor a las propias industrias arroceras, aunque todavía este uso no está generalizado.

#### Interés económico y medioambiental

Teniendo en cuenta que el PCI (poder calorífico inferior) de los residuos de las agroindustrias que hemos comentado anteriormente tienen un poder calorífico cercano a las 4.000 kcal/kg y que el PCI del petróleo está cercano a las 10.000 kcal/kg, se deduce fácilmente que 2,5 kg de estos residuos equivalen a 1 kg de

Una puerta abierta al mundo agrario



## Feria de Valladolid

Avda. Ramón Pradera, s/n  
47009 Valladolid (España)

Tel. (+34) 983 429 304 - (+34) 983 429 300

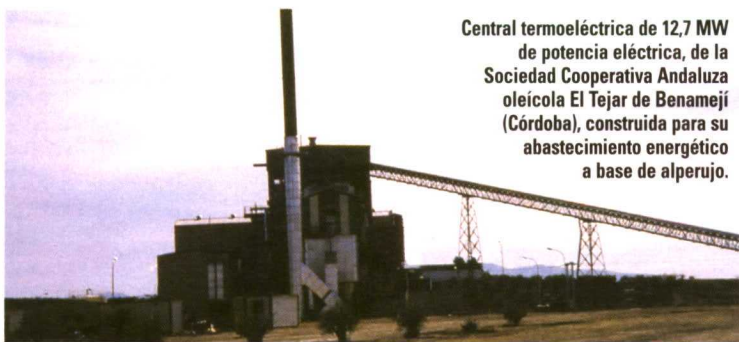
Fax (+34) 983 355 935

comercial@feriavalladolid.com

www.feriavalladolid.com

petróleo. Así, mientras que el precio del gasóleo de calefacción está en la actualidad cercano a 0,6 €/kg, el precio de estos residuos en los centros de producción está alrededor de los 0,06 €/kg (unas 10 veces menos), lo que indica la ventaja que representa para el consumidor el utilizar este tipo de residuos, que puede permitir la amortización de la inversión del cambio de caldera, en un tiempo relativamente corto (depende del tiempo de utilización).

Por otro lado, aunque es indudable que la utilización de combustibles de origen biológico produce CO<sub>2</sub> al igual que los combustibles de origen fósil, la principal diferencia estriba en que el carbono presente en la biomasa y que se convierte en CO<sub>2</sub> en el proceso de combustión, forma parte del ciclo natural del carbono en la Naturaleza, siendo reciclado a través del proceso fotosintético de los vegetales.



Central termoelectrica de 12,7 MW de potencia eléctrica, de la Sociedad Cooperativa Andaluza oleícola El Tejar de Benamejí (Córdoba), construida para su abastecimiento energético a base de alperujo.

FIGURA 3.

**BIOCOMBUSTIBLES QUE SE PUEDEN OBTENER A PARTIR DEL ORUJO DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE OLIVA**



**HUESO DE ACEITUNA**  
13% de humedad



**ORUJILLO**  
15% de humedad



**PULPA PELETIZADA**  
10% de humedad

El carbono de los combustibles fósiles, que en su día también tuvo un origen fotosintético, está normalmente inmovilizado en los yacimientos, pero al quemarlo de forma masiva produce

un desequilibrio en ciclo natural del carbono aumentando considerablemente el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, por incapacidad de los vegetales para fijarlo totalmente.

En la utilización de biomasa residuales hay que tener en cuenta que éstas se han producido con independencia de su futura utilización, por lo que el coste energético de su producción forma parte del consumo energético global. Por este motivo, su utilización con fines energéticos no implica un incremento en la producción de CO<sub>2</sub> respecto de la situación convencional. Por otra

parte, la materia orgánica de la biomasa residual se degrada naturalmente por acción de los microorganismos, que devuelven el carbono a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> principalmente, con lo que cierran el ciclo del carbono en la naturaleza. La combustión de los residuos acelera en cierta medida la producción de CO<sub>2</sub>, pero ello no supone una distorsión significativa del balance de carbono ya que todo el CO<sub>2</sub> producido había sido previamente fijado de la atmósfera por los vegetales productores de la biomasa inicial (materia prima). Según lo establecido anteriormente se puede considerar a los residuos en cuanto a la generación de CO<sub>2</sub>, por lo que su influencia en el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico reside en el ahorro de combustibles fósiles y por tanto en la disminución equivalente del CO<sub>2</sub> que producen.

Actualmente, con la aplicación del Protocolo de Kyoto y la puesta en marcha del mercado de emisiones de CO<sub>2</sub>, se ha disparado el consumo de biocombustibles sólidos en algunos países, y una buena parte de los producidos como residuos o subproductos en las industrias agrarias, que han hecho aumentar considerablemente el precio de éstos. ■

FIGURA 4.

**2 kg. DE CÁSCARA DE ALMENDRA (4.760 kcal/kg) O DE PIÑÓN (4.930 kcal/kg) TIENEN MÁS CONTENIDO ENERGÉTICO QUE 1 LITRO DE GASÓLEO DE CALEFACCIÓN (8.350 kcal).**

