

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE BIOMASA Y SU RELACIÓN CON EL PODER CALORÍFICO

Ana Álvarez Rodríguez; Consuelo Pizarro García; María Belén Folgueras Díaz
uo196984@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Este trabajo se desarrolla en el contexto de un estudio sobre energías renovables. La finalidad específica de este trabajo consiste en obtener la caracterización química de 9 residuos biomásicos (combustibles comerciales y residuos agroalimentarios) empleando el método de la extracción química tradicional.

Se ha correlacionado el análisis químico con los resultados del análisis calorimétrico encontrando una ecuación que depende de la cantidad de holocelulosa (% en peso y base seca y libre de extraíbles) y que presenta un error del 3.82 % DMA. Se han ensayado otro tipo de ecuaciones, todas ellas lineales, basadas en el contenido de los componentes estructurales expresado en % en peso, base seca y libre de extraíbles. Estas ecuaciones dependen de: un solo componente (lignina, holocelulosa o celulosa), dos componentes (lignina y holocelulosa, lignina y celulosa) o tres componentes (lignina, holocelulosa y celulosa). También se han comparado con 12 ecuaciones de distintos investigadores, observando que una de las propuestas por

Demirbas es la que mejor se adapta a los resultados experimentales aunque presenta un error superior a las propuestas en este artículo (12.23 % DMA).

Se ha encontrado que la celulosa es el componente mayoritario en este tipo de biomasa (25 - 67 %) seguido de la lignina (32 - 55 %) y la hemicelulosa (10 - 34 %).

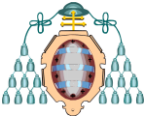
ABSTRACT

This paper is developed in the context of a study on renewable energy.

The specific aim of this paper is to obtain the chemical characterization of 9 biomass wastes (commercial and agricultural food waste fuels) using the method of traditional chemical extraction.

Chemical and calorimetric analyses are mathematically related. An equation that depends on the amount of holocellulose (wt% dry basis and extractable free) has been found, this equation has an error of 3.82% DMA.

Other equations have been tested. All these linear equations are based on the



amount of structural components in wt% dry basis and extractable free. These equations depend on: a single component (lignin, cellulose or holocellulose), two components (lignin and holocellulose or lignin and cellulose) or three components (lignin, holocellulose and cellulose). They have also been compared with 12 equations of different researchers, noting that one of the equations proposed by Demirbas is the equation that best fits the experimental results but has an error greater than those proposed in this paper (12.23% DMA).

Cellulose is the main component in this type of biomass (25-67%) followed by lignin (32 - 55%) and hemicellulose (10-34%).

INTRODUCCIÓN

La biomasa abarca un gran conjunto de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes. Según la especificación europea correspondiente, la biomasa es todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados

en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización [1].

Existen distintos tipos de biomasa según su origen, esta clasificación se recoge en la Tabla 1.

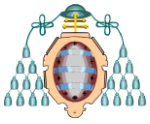
La biomasa está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (compuestos estructurales). Y como constituyentes minoritarios se encuentra la humedad, la materia inorgánica no extraíble y los extraíbles (no estructurales).

Los componentes mayoritarios están interrelacionados entre sí como se muestra en la Fig. 1 en la que se observa como la celulosa se encuentra en forma de fibras, alargadas, rodeada por la hemicelulosa que forma una especie de red en torno a ella. La lignina se sitúa entre las "cuerdas" formadas por la asociación de celulosa y hemicelulosa.

La celulosa es un homopolisacárido compuesto por unidades de D-glucosa que están unidas por enlaces glicosídicos, Fig. 2. La celulosa es la estructura básica de las

Tabla 1. Clasificación de los biocombustibles en función de su origen. [2]

		Origen	Especies
Tipos	Cultivos energéticos	Agrícolas	Cardo, sorgo, girasol, soja, maíz, etc.
		Forestales	Chopos, sauces, eucaliptos, robinias, etc.
	Restos de tratamientos silvícolas	Podas, claras, clareos, restos de cortas finales	Especies forestales de los montes
	Restos de industrias forestales	Industrias de primera transformación de la madera	Especies de madera española o importada utilizada por las industrias
		Industrias de segunda transformación de la madera	Especies de madera española o importada utilizada por las industrias



células de las plantas y el principal componente de la pared celular.

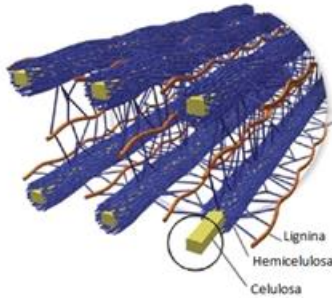


Fig. 1. Posible ordenación espacial de los componentes principales de la biomasa lignocelulósica [3].

Las moléculas de celulosa tienden a formar puentes de hidrógeno que tienen un efecto importante en la reactividad. Estos enlaces de hidrógeno permiten una estructura fibrilar de alta cristalinidad y son difíciles de penetrar por disolventes y reactivos. Sin embargo, las zonas amorfas, más desordenadas, son más reactivas.

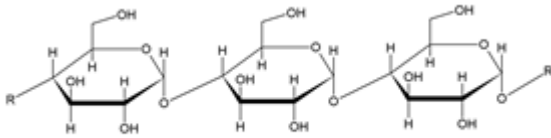


Fig. 2. Estructura de la celulosa.

Las hemicelulosas son heteropolisacáridos constituidos por unidades diferentes de monosacáridos (pentosas, hexosas y ácidos urónicos) unidos entre sí por enlaces glicosídicos. La estructura de las hemicelulosas es, en el caso general, amorfa. Estas moléculas se asocian con la celulosa mediante interacciones polisacárido-polisacárido.

La lignina es una molécula que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes

fenilpropílicos (cumarílico, sinapílico y coniferílico, Fig. 3). Estos radicales se acoplan de manera aleatoria dando origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo. Los ciclos aromáticos de la lignina están unidos entre ellos por ciclos furano o enlaces éter.

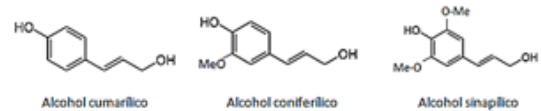


Fig. 3. Principales alcoholes fenilpropílicos presentes en la lignina.

Se conoce como extraíbles a un grupo de compuestos que pueden influir en las propiedades y calidad de la madera. Estos compuestos son de diferentes clases pudiendo dividirse de manera sencilla en compuestos orgánicos e inorgánicos. En los compuestos orgánicos extraíbles se incluyen, entre otros, los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos y compuestos nitrogenados [4].

Las sustancias extraíbles contribuyen a propiedades tales como: color, olor, durabilidad, adhesión, secado y decoloración.

La principal propiedad de cara a un uso energético de la biomasa es el poder calorífico. Como la biomasa siempre tiene un pequeño contenido en humedad, el correspondiente al equilibrio con el entorno circundante, siempre se utiliza el poder calorífico superior (PCS).

Existen numerosas ecuaciones para estimar el poder calorífico superior. Estas ecuaciones están basadas en los distintos tipos de análisis que se pueden realizar a la

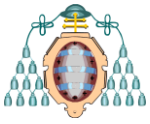


Tabla 2. Correlaciones utilizadas para el cálculo del poder calorífico superior.

Ecuaciones basadas en el análisis químico	
Shafizadeh y Degroot[9]	$PCS=0.17389[Ce]+0.26629[L]+0.32187[E]$
Tillman[10]	$PCS=0.19389[Ce]+0.26629(100-[Ce^*])$
White[11]	$PCS=17.9017+0.07444[L^*]+0.0661[E]^a$
	$PCS=17.6132+0.0853[L^*]^a$
	$PCS=17.4458+0.0907[L^*]^a$
	$PCS=18.0831+0.0637[L^*]^a$
	$PCS=17.7481+0.0800[L^*](100-[E])/100+0.0866[E]^a$
Jiménez y González[12]	$PCS=(1-[Cenizas])/([Ce]+[L]+[E])(0.17389[Ce]+0.26629[L]+0.32187[E])$
Demirbas[13] y[14]	$PCS^{**}=0.0889[L^{**}]+16.8218$
	$PCS=0.0893[L^{**}]+16.9742$
	$PCS=0.0877[L^{**}]+16.4951$
	$PCS^{**}=0.0864[L^{**}]+16.6922$
Ce: celulosa (celulosa y hemicelulosa) (% peso base seca); L: lignina (% peso base seca); E: extraíbles (% peso base seca); * indica composición en % en masa base seca y libre de extraíbles; ** indica composición en % peso base seca libre de cenizas y extraíbles. a Correlaciones convertidas a $MJ\ kg^{-1}$ con el siguiente factor de conversión: $1\ Btu\ lb^{-1} = 2.3261 \times 10^{-3}\ MJ\ kg^{-1}$.	

biomasa: elemental, inmediato, combinación de ambos y químico. Este artículo se centra en las ecuaciones basadas en el análisis químico debido a que son menos numerosas y ofrecen resultados poco precisos con márgenes de error de hasta un 50 %. Las ecuaciones basadas en el análisis elemental e inmediato se recogen en numerosos artículos [5-8]. Las ecuaciones relacionadas con el análisis químico se recogen en la Tabla 2.

En este trabajo se ha profundizado en las ecuaciones basadas en el análisis químico y se ha encontrado una correlación propia a partir de los datos experimentales que mejora las ya existentes.

MÉTODO DE TRABAJO

MUESTRAS

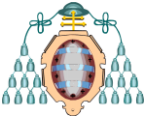
Las muestras de biocombustibles sólidos (biomasa lignocelulósica) utilizadas en los ensayos pertenecen a dos grupos de

biomasa, los combustibles comerciales y residuos agroindustriales. Todas las muestras seleccionadas proceden de cultivos de vid y olivo debido a la elevada cantidad de residuos obtenidos en estos cultivos y que son susceptibles de aprovechar energéticamente. Además, el uso de este tipo de biomasa no se encuentra aún muy extendido. En la Tabla 3 se recogen los datos de poder calorífico superior.

Tabla 3. Poder calorífico superior de las muestras de biomasa [15]

Muestra	PCS (kJ/g)
Harina de granilla de uva	18.809
Hueso almazara seco y sin pulpa	18.687
Hueso almazara tal cual	16.484
Hueso extractora	18.092
Orujillo extractado	18.186
Orujo de vid	17.019
Pellets orujillo extractado	18.182
Pellets de poda de olivo	18.720
Raspón de vid	16.467

Los análisis elemental e inmediato así como el análisis térmico han sido realizados con anterioridad por otro miembro del equipo de investigación [16-17], dicha caracterización es la base de los estudios



sobre combustión llevados a cabo. Con los ensayos y análisis realizados en este trabajo se pretende profundizar y completar algunos aspectos importantes de la caracterización en cuanto a su relación con el poder calorífico.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La composición química de la biomasa lignocelulósica se determina mediante el método de la extracción química, separando cada fracción de la que se compone la biomasa. En la Fig. 4 se muestra un esquema de todas las fracciones cuantificadas en este procedimiento así como el tratamiento requerido para su determinación.

Extraíbles

Determinados compuestos químicos presentes en la madera pueden interferir en el proceso de extracción química, por este motivo, son eliminados de la biomasa antes

de realizar cualquier otro ensayo.

Estos componentes se eliminan en dos fases de extracción siguiendo el procedimiento TAPPI T-264 cm-07 "Preparación de la madera para el análisis químico" [18]. Todas las muestras serán tamizadas previamente para que el tamaño de partícula esté en el intervalo 250-500 µm [18].

La primera fase de extracción se realiza con acetona, en esta fase se eliminan resinas, ácidos grasos, esteroides, ceras y grasas. En la segunda fase, que se realiza con agua caliente, se eliminan taninos, gomas, azúcares y materia coloreada.

Para llevar a cabo el análisis se toma una cantidad de biomasa suficiente para realizar todo el análisis químico y se introduce en un cartucho de extracción en el extractor Soxhlet. La extracción se realiza con 200 ml

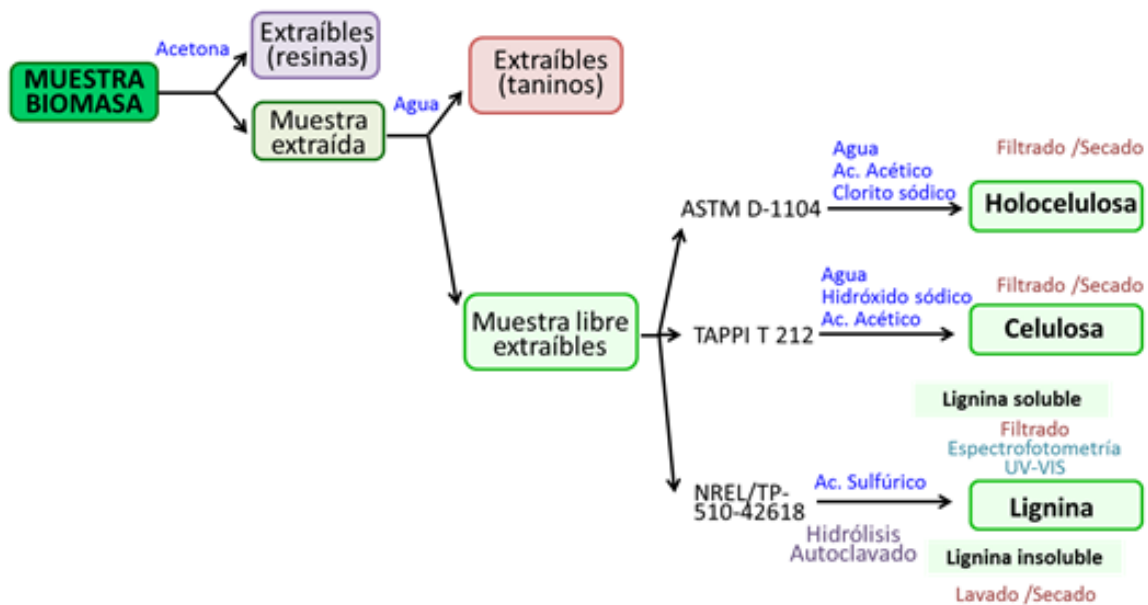
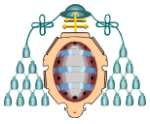


Fig. 4. Esquema de la determinación de la composición química según el método tradicional.



de acetona durante 7 horas, manteniendo el líquido en ebullición para que la desviación del extractor no sea inferior a 4 veces por hora. Una vez transcurridas las 7 horas de extracción con acetona, se lava la muestra con agua caliente con el objetivo de eliminar la acetona y se transfiere la muestra lavada a un Erlenmeyer de 1 l. Se añaden 500 ml de agua destilada hirviendo y se deja hervir durante 1 h. Transcurrido ese tiempo se filtra la muestra, se realizan lavados con agua caliente y se deja que seque completamente la muestra.

Sólo se realiza un único experimento para la determinación de extraíbles, debido a que se lleva a cabo la extracción de la cantidad necesaria de muestra en una sola vez.

Cenizas

El procedimiento utilizado para la determinación del rendimiento en cenizas de la biomasa es el NREL/TP-510-42622. Según este procedimiento se calcina 1 g de muestra de madera seca a 575 °C durante 24 h. Se dejan enfriar en un desecador y se pesan para determinar el porcentaje en cenizas [19].

Holocelulosa

La cuantificación de la holocelulosa se realiza siguiendo el método ASTM D-1104 [20].

Según este procedimiento, se pesan 2 g de muestra libre de extraíbles y se colocan en un frasco de 250 ml. Se tratan con 150 ml

de agua, 0.2 ml de ácido acético y 1 g de clorito sódico en un baño de agua a 70-80 °C. Además, cada hora, y durante 5 horas, se añaden 0.22 ml de ácido acético muy frío y 1 g de clorito sódico. Transcurridas las 5 horas, se coloca el frasco en un baño de hielo hasta que la temperatura del frasco alcance 10 °C.

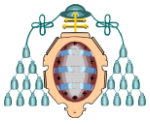
Finalmente se filtra el contenido del frasco, se lava con 500 ml de agua fría y se observa que el residuo, que estaba amarillo, pasa a ser de color blanco. Se secan los crisoles a 105 ± 3 °C hasta peso constante.

Se han realizado tres repeticiones de este experimento.

Celulosa

El contenido en celulosa de la biomasa se ha determinado según el procedimiento TAPPI T 212 [21]. El protocolo experimental consiste en tomar 1 g de muestra de holocelulosa que se coloca en un matraz de 100 ml en un baño de agua a 25°C. Se añaden 10 ml de hidróxido sódico del 17.5 %, se agita y se deja reposar 5 minutos. Se añaden 5 ml de hidróxido sódico al 17.5 %, se agita y se deja reposar 30 minutos. Se añaden finalmente 30 ml de agua, se agita y se deja reposar 1 hora.

Transcurrido ese tiempo, se filtra a vacío con papel de filtro y se realizan lavados con disolución de agua e hidróxido sódico (30 ml de agua y 25 ml de hidróxido sódico al 17.5 %). Posteriormente, se lava con 30 ml de agua. Se agregan 15 ml de ácido acético al 10 % sin aplicar vacío y se deja reposar durante 3 minutos, luego se añaden 50 ml de



agua y se aplica vacío. Se seca el material insoluble (celulosa) entre 60-85 °C hasta peso constante.

Al igual que en los experimentos realizados para la determinación de la holocelulosa y para comprobar la reproductibilidad de los experimentos se han llevado a cabo los experimentos por triplicado para cada biomasa ensayada, excepto en aquellos casos en que no se dispone de muestra suficiente de holocelulosa.

El contenido en hemicelulosa se obtiene por diferencia entre la holocelulosa obtenida y el contenido en celulosa de la misma.

Lignina

La cuantificación de la lignina se realiza según el procedimiento NREL/TP-510-42618 [22]. Este procedimiento consiste en una hidrólisis ácida en dos etapas para fraccionar la biomasa en productos más fácilmente cuantificables. La lignina se transforma de esta manera en materia ácida insoluble y soluble.

Para la determinación de la lignina se pesan 300.0 ± 10.0 mg de muestra en un tubo de presión tarado. Cada muestra se analiza por duplicado. Se añaden 3.00 ± 0.01 ml de ácido sulfúrico del 72 % a cada tubo de presión. Se dejan los tubos de presión en un baño de agua a 30 ± 3 °C e incubar la muestra durante 60 minutos.

Una vez completada la hidrólisis, se sacan los tubos de presión del baño y se diluye el ácido a una concentración del 4 % añadiendo 84 ml de agua destilada. Se

introducen los tubos de presión en un autoclave, se mantienen durante 1 hora a 121 °C. Una vez completado el ciclo se dejan enfriar lentamente las muestras hidrolizadas antes de retirar los tapones.

La determinación de la lignina ácida soluble se realiza filtrando a vacío las disoluciones de hidrólisis y se recoge el filtrado, siendo necesarias 6 horas de hidrólisis. Una vez transcurridas las 6 horas de hidrólisis de las alícuotas, se mide la absorbancia de cada una de ellas en el espectrofotómetro UV-VIS (PG Instruments T80 UV/VIS Espectrometer).

La lignina ácida insoluble se determina lavando los sólidos con agua destilada, se seca el residuo ácido insoluble a 105 ± 3 °C hasta alcanzar peso constante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los resultados de composición química obtenidos se recogen en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se observa que la celulosa es el componente mayoritario en casi todas las muestras de biomasa, seguido de la lignina y la hemicelulosa. El contenido en celulosa se encuentra en el intervalo comprendido entre 25 % y 67 %, mientras que el contenido en lignina es más homogéneo para todas las muestras con valores comprendidos entre 32 % y 55 %. En cuanto a la cantidad de extraíbles, las muestras con más cantidad de extraíbles son

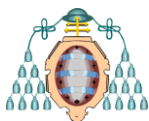


Tabla 4. Análisis químico de la biomasa

Muestra	% Extraíbles	%Holocelulosa	% Celulosa	% Hemicelulosa	%Lignina
Raspón de vid	39.34	37 ± 8	34.82	10.77	42.5 ± 0.3
Harina de granilla de uva	9.82	63 ± 3	45 ± 5	19 ± 4	55.1 ± 0.7
Hueso de almazara seco y sin pulpa	2.30	88 ± 1	61 ± 2	27 ± 2	33.2 ± 0.9
Hueso de extractora	36.84	73.4 ± 0.4	41 ± 5	32 ± 5	34 ± 3
Hueso de almazara (ar)	7.99	89 ± 1	55 ± 10	34 ± 10	34.7 ± 0.5
Orujillo extractado	67.79	53 ± 10	26 ± 5	33.2 ± 0.8	40 ± 1
Pellets de poda de olivo	13.51	81.5 ± 0.6	67.4 ± 0.4	14.2 ± 0.7	32 ± 1
Orujo de uva	26.06	42 ± 4	25.64	20.13	47 ± 2
Pellets de orujillo extractado	55.96	64 ± 4	32 ± 4	32 ± 3	38.1 ± 0.5

las de orujillo extractado (67.79 %), pellets de orujillo extractado (55.96 %), raspón de vid (39.34 %) y hueso de extractora (36.84 %).

ECUACIONES DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Los datos de PCS experimental se comparan con los obtenidos por las ecuaciones basadas en el análisis químico que se recogen en la Tabla 2, esta comparación se muestra en la Tabla 5.

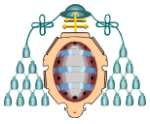
Como se puede observar en la Tabla 5, las ecuaciones propuestas por distintos autores (Tabla 2) no se adaptan muy bien a los resultados obtenidos, siendo las ecuaciones propuestas por Demirbas las que mejor predicen los resultados. Muchas de estas ecuaciones presentan errores superiores al 20 % respecto al PCS experimental, aunque estas ecuaciones no están desarrolladas específicamente para el

tipo de biomasa ensaya da en este artículo:

- Ecuación de Shafizadeh y Degroot: desarrollada para material lignocelulósico. Depende de los contenidos en celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles.
- Ecuación de Tillman: desarrollada para madera, depende del contenido en celulosa y hemicelulosa.
- Ecuaciones de White:
 - White (1): desarrollada para maderas con extraíbles, se utilizan los contenidos en lignina y extraíbles.
 - White (2): desarrollada para maderas sin extraíbles, se utiliza el contenido en lignina.
 - White (3): desarrollada para maderas blandas libres de extraíbles, utiliza el contenido en lignina.
 - White (4): desarrollada para maderas duras libres de extraíbles, utiliza el contenido en

Tabla 5. Comparación de PCS experimental y teórico.

Muestra	PCS (kJ/g)	Shaf. y Degroot	Tillman	White 1	White 2	White 3	White 4	White 5	Demirbas 1	Demirbas 2	Demirbas 3	Demirbas 4	Jiménez y González
Raspón de vid	16.467	30.355	23.412	23.663	21.236	21.297	20.788	23.294	20.597	20.766	20.219	20.361	26.948
Harina de granilla de uva	18.809	28.894	22.489	22.655	22.316	22.446	21.595	22.595	21.723	21.897	21.330	21.455	27.882
Hueso almazara seco y sin pulpa	18.687	24.902	20.991	20.527	20.447	20.459	20.199	20.549	19.775	19.941	19.409	19.563	24.619
Hueso extractora	18.092	33.722	22.832	22.880	20.528	20.545	20.260	22.738	19.860	20.026	19.492	19.644	32.321
Hueso almazara (ar)	16.484	27.272	21.521	21.010	20.570	20.590	20.291	21.008	19.903	20.070	19.535	19.687	24.889
Orujillo extractado	18.186	41.860	24.234	25.370	21.036	21.086	20.639	24.789	20.389	20.558	20.015	20.159	39.815
Pellets de poda de olivo	18.720	27.197	20.403	21.218	20.390	20.399	20.157	21.197	19.716	19.882	19.350	19.505	26.920
Orujo de uva	17.019	28.220	24.260	23.147	21.651	21.739	21.098	22.857	21.030	21.201	20.646	20.782	26.502
Pellets de orujillo extractado	18.182	39.213	23.711	24.433	20.860	20.898	20.508	24.047	20.205	20.373	19.833	19.981	36.900
DMA (%)		75.56	27.34	27.91	17.98	18.24	15.79	26.75	14.34	15.28	12.23	13.05	66.08



lignina.

- White (5): desarrollada para biomasa con extraíbles, utiliza el contenido en lignina.
- Jiménez y González: desarrollada para distintos tipos de biomasa, a saber, paja de trigo, ramas de olivo, madera de olivo, sarmientos, tallos de girasol, tallos de algodón, cáscaras de semillas de girasol, huesos de aceituna, orujo de oliva, residuos de encinas y restos de eucalipto. Los rendimientos en cenizas, celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles son los que se utilizan para realizar la estimación.
- Ecuaciones de Demirbas:
 - Demirbas (1): desarrollada para biomasa leñosa y no leñosa, sólo depende del contenido en lignina.
 - Demirbas (2): desarrollada para maderas, en concreto, madera de haya, madera dura, madera blanda, madera de abeto y cortezas de madera.
 - Demirbas (3): desarrollada para material no leñoso, a saber, tabaco en rama, mazorcas de maíz, paja de maíz, paja de trigo, material de desecho, tallo de tabaco y cáscaras de avellana.

- Demirbas (4): desarrollada para distintos tipos de biomasa, en concreto para cáscara de girasol, cáscara de almendra, cáscara de avellana, cortezas, hojas de olivo, cáscara de avellana y cáscara de nuez.

Por el motivo expuesto, se proponen otras ecuaciones, Tabla 6, basadas en análisis químico que se adaptan mejor a los resultados de laboratorio. Se han ensayado varias ecuaciones, todas ellas lineales, basadas en el contenido de los componentes estructurales expresados en % en peso, base seca y libre de extraíbles. Estas ecuaciones dependen de: un solo componente (lignina, holocelulosa o celulosa), dos componentes (lignina y holocelulosa o lignina y celulosa) o tres componentes (lignina, holocelulosa y celulosa). La ecuación que depende exclusivamente del contenido en holocelulosa es la que mejor se correlaciona presentando un error del 3.82 % DMA.

Estas nuevas ecuaciones propuestas se comparan de manera gráfica con el PCS experimental en la Fig. 5.

Tabla 6. Ecuaciones de estimación de PCS propuestas.

Tipo	Ecuaciones
L	$PCS = 18.0124 - 0.0041 L$
H	$PCS = 16.5917 + 0.0191 H$
C	$PCS = 16.9961 + 0.0198 C$
L-C	$PCS = 15.9391 + 0.0210 L + 0.0250 C$
L-H	$PCS = 14.2252 + 0.0424 L + 0.0295 H$
L-H-C	$PCS = 14.2193 + 0.0425 L + 0.0305 H - 0.0015 C$
<i>PCS en kJ/g; L, % peso lignina insoluble base seca; H, % peso holocelulosa base seca; C, % peso celulosa base seca.</i>	

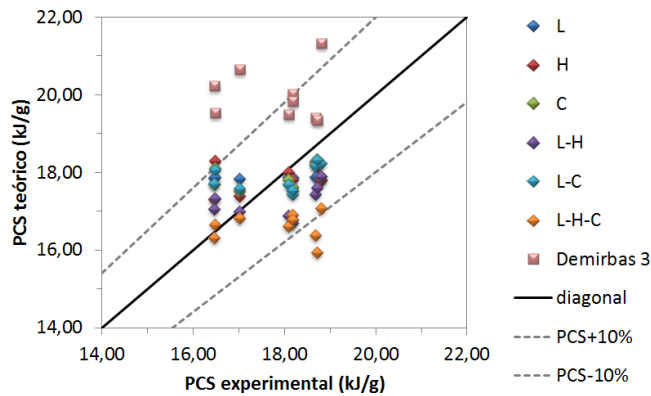
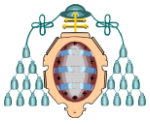


Fig. 5. Comparación de PCS experimental y ecuaciones propuestas.

En la Fig. 5 se observa que las ecuaciones propuestas en este trabajo se adaptan mejor a los resultados experimentales que las de otros autores. Se comparan con la ecuación que mejor se aproxima a los datos experimentales (Demirbas 3, 12.23 % DMA). El error máximo cometido utilizando cualquiera de estas ecuaciones es del 10% tanto por exceso como por defecto.

CONCLUSIONES

Algunas de las conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo son las siguientes:

El análisis químico realizado confirma que el componente mayoritario de la biomasa lignocelulósica es la celulosa, seguido de lignina y hemicelulosa.

El poder calorífico está relacionado con el contenido en componentes estructurales de la biomasa, especialmente con el contenido en lignina. Las ecuaciones existentes para estimar el poder calorífico superior presentan

un error considerable respecto al valor experimental obtenido.

De las distintas ecuaciones encontradas en la bibliografía, aquellas propuestas por Demirbas son las que mejor se adaptan a los resultados experimentales.

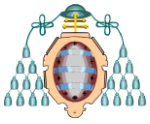
Las ecuaciones propuestas en este trabajo dependen de los componentes estructurales de la biomasa prediciendo el poder calorífico con un error máximo del 10 %. Obteniéndose la mejor correlación con el contenido en holocelulosa, con un error menor o igual del 3.83 %.

NOMENCLATURA

- ar: As received
- C: Celulosa
- DMA: Desviación Media Absoluta
- E: Extraíbles
- H: Holocelulosa
- L: Lignina
- PCS: Poder Calorífico Superior
- UV-VIS: Ultravioleta-Visible

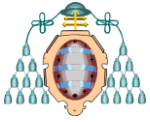
AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el contexto del Proyecto estratégico PSE-ARFRISOL (Plan Nacional de Investigación, Desarrollo y Difusión), cofinanciado con Fondos FEDER, y subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia (actual Ministerio de Ciencia e Innovación) y el FICYT.



REFERENCIAS

- [1] CEN/TS 14588, 2004.
- [2] X. d. Galicia, Manual para el aprovechamiento energético de la biomasa forestal, Geodem.
- [3] P. M. C. M. F. William O.S. Doherty, «Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers,» *Industrial Crops and Products*, pp. 259-276, 2011.
- [4] «manual de lombricultura,» [En línea]. Available: <http://www.manualdelombricultura.com>.
- [5] A. C.-F. J. P.-A. B. V.-M. J.M. Vargas-Moreno, «A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 3065– 3083, 2012.
- [6] E. P. H. R. K. V. A. Friedl, «Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition,» *Analytica Chimica Acta*, vol. 544, pp. 191-198, 2005.
- [7] P. A. S. Daya Ram Nhuchhen, «Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach,» *Fuel*, vol. 99, pp. 55-63, 2012.
- [8] J. L. N. M. C. Telmo, «Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood,» *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 3808-3815, 2010.
- [9] D. W. Shafizadeh F, «Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins.,» *New York: Academic Press*, 1976.
- [10] T. DA., «Wood as an energy resource,» *New York: Academic Press*, 1978.
- [11] W. RH., «Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood,» *Wood Fiber Science*, vol. 19, pp. 446-52, 1987.
- [12] G. F. Jiménez L, «Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels,» *Fuel*, vol. 70, pp. 947-950, 1991.
- [13] D. A., «Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products.,» *Energy Source A*, vol. 25, pp. 629-35, 2003.
- [14] D. A., «Relationships between lignin contents and heating values of biomass,» *Energy Convers Manage*, vol. 42, p. 183– 8, 2001.
- [15] A. G. L. C. P. R. G. Julio L. Bueno, «Biomasa. Caracterización de un recurso energético,» Universidad de Oviedo, 2012, pp. 68-73.
- [16] A. G. L. C. P. R. G. Julio L. Bueno, Biomasa. Caracterización de un recurso energético, Universidad de Oviedo, 2012, pp. 100-102.



- [17] A. G. L. C. P. R. G. Julio L. Bueno, Biomasa. Caracterización de un recurso energético, Universidad de Oviedo, 2012, pp. 94-98.
- [18] TAPPI T-264 cm-07, «Preparation of wood for chemical analysis,» 2007.
- [19] B. H. R. R. C. S. J. S. D. T. A. Sluiter, *Determination of Ash in Biomass*, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [20] Withdrawn, *Method of test for holocellulose in wood*, 1985.
- [21] TAPPI-T-212-om-12, *One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*.
- [22] B. H. R. R. C. S. J. S. D. T. D. C. A. Sluiter, *Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass*, National Renewable Energy Laboratory, 2008.