



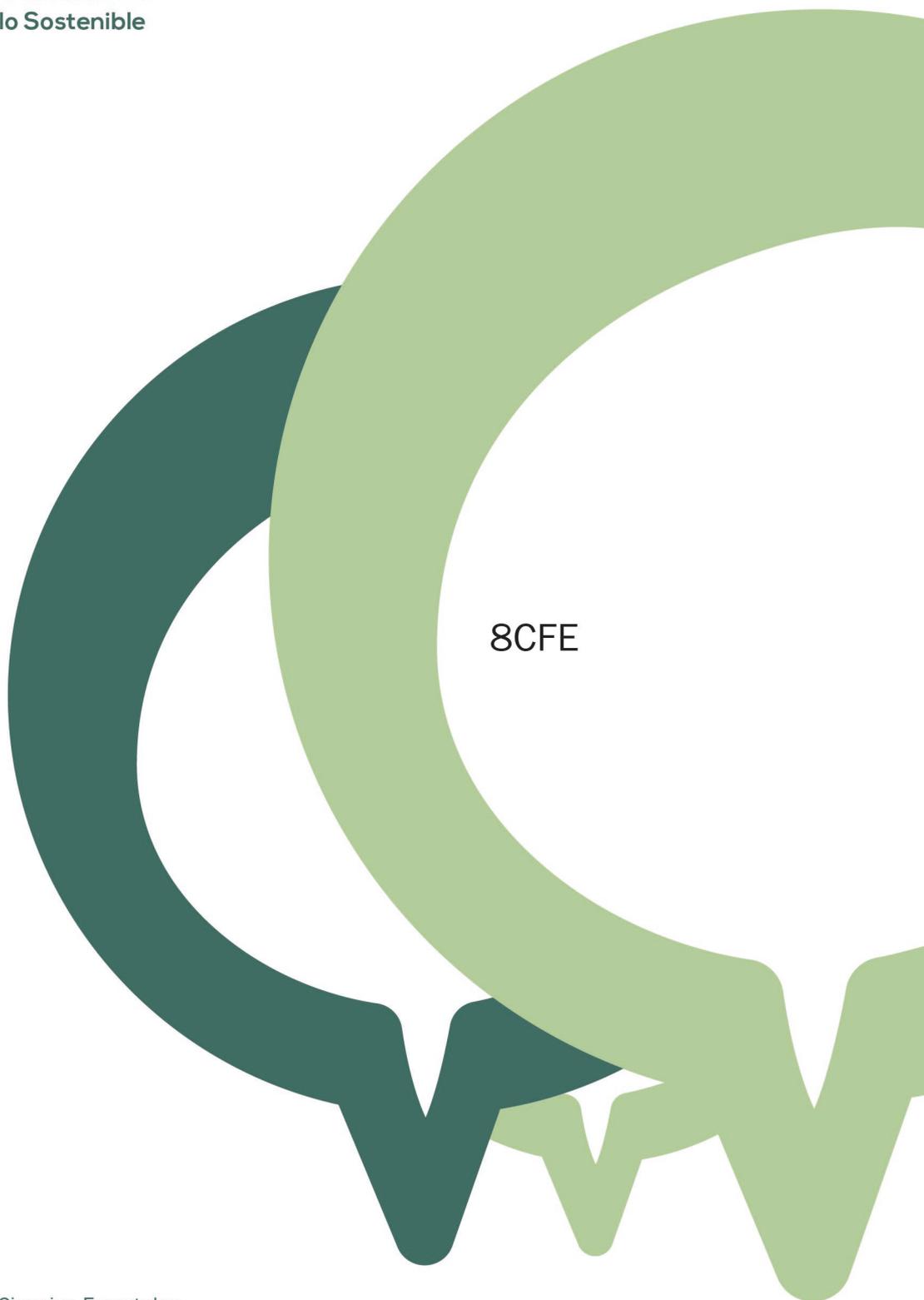
2022
Lleida

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



Los residuos del cultivo de *Moringa oleifera* como posible fuente de bioetanol.

GODINO, M.¹, Ballesteros M.² y Izquierdo, M.I.¹

¹Depto. Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. U. Politécnica de Madrid. España.

²Depto. Energía. CIEMAT

Resumen

La moringa (*Moringa oleifera*) es un árbol adaptado a condiciones de Trópico seco, de crecimiento rápido, con diferentes aprovechamientos, y gran productividad, que, está siendo introducido en las zonas mediterráneas templadas con escasas heladas. En Colombia, el Cambio Climático está propiciando cambio de usos de suelo de ganadería extensiva a otros fines, como el arbolado con moringa. El manejo del cultivo de la moringa proporciona, como residuos, maderas poco lignificadas y las cáscaras de sus frutos, unas vainas triangulares, que son ricas en celulosa. Ambos residuos son susceptibles de ser transformados en alcohol. La cuantificación de estos residuos y el análisis de su transformación a bioetanol permitirán valorar si la producción masiva de aceite de moringa en zonas tropicales puede representar una oportunidad para que estos subproductos sean puestos en valor. Estimado el potencial de producción de residuos por hectárea que puede proporcionar el cultivo aceitero de la moringa, se pueden llegar a generar unos 4.340 L·ha⁻¹·año⁻¹ de bioetanol. Actualmente, estos subproductos carecen de valor en el mercado.

Palabras clave

Moringa, cultivo energético, biocombustible líquido, bioetanol.

1. Introducción

El informe Colombia rural, del PNUD (2011), dice que cerca de 15 millones de hectáreas ocupadas por la ganadería extensiva deberían ser liberadas para usos agrícolas y forestales. En el documento Lost Crops of Africa (NCR, 2006) se propone la moringa como opción para muchos proyectos de plantación de árboles. Esta especie no es un árbol típico forestal, pero su capacidad para prosperar en tierras baldías y proporcionar una cobertura de sombra rápida podría convertirla en alternativa al cambio de usos propuesto por el PNUD.

El proyecto RedMoringa, que están llevando a cabo la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad del Tolima, propone la plantación de grandes superficies de moringa (*Moringa oleifera* Lam.), con fines aceiteros o para producir hoja seca, como alternativa a estos usos ganaderos. En el manejo de estos cultivos se generan, periódicamente, grandes cantidades de residuos en los que predominan la celulosa y la hemicelulosa, que son susceptibles de ser transformados en bioalcohol. Con esta premisa, se busca conocer la capacidad de producción de bioetanol que se obtendría por hectárea de cultivo aceitero de moringa.

Conocido este dato, se abriría la posibilidad de instalar una biorrefinería en una zona donde la concentración de estos residuos lo permita, aumentando la rentabilidad de los cultivos de moringa. Esto coincide con algunas de las opciones planteadas por GÓMEZ et al. (2012) para lograr el autoabastecimiento de materia prima para producir biocombustibles: crear cultivos y valorizar todos los coproductos procedentes las plantaciones creadas.

La moringa es una planta que, desde antiguo, ha sido introducida por todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo (BLENCH, 2003), tanto por su facilidad de cultivo y reproducción



(PARROTTA, 2000) como por el alto valor nutritivo de sus hojas, para las personas y para los animales, y por la calidad de su aceite. Puede ser cultivada como árbol aislado o, como forraje, en muy altas densidades (FOILD et al., 2001).

Tanto en el cultivo arbóreo de la moringa para la producción de fruto como de hoja, son muy abundantes los residuos procedentes de las podas que, cada año, se deben realizar. Esta operación de poda es necesaria para el adecuado crecimiento y desarrollo de los árboles y para una mejor recolección de vainas y hojas. Además, durante la obtención de semillas y del aceite también se generan unos residuos (vainas y cáscaras de semillas) que, hasta ahora, eran considerados como desperdicios. Estos residuos suelen eliminados mediante quema, como abono o añadido a la dieta del ganado.

Moringa oleifera es un árbol adaptado al clima denominado “Bosque seco Tropical” (Bs-T), y que se desarrolla bien en las zonas tropicales y subtropicales con temperatura media anual superior a los 24 °C (piso térmico cálido) y precipitaciones normales entre los 700 y 2.000 mm anuales, con uno o dos periodos marcados de sequía al año.

En su área de origen, y en las zonas donde ha sido introducida, la planta se desarrolla cuando la temperatura mínima es superior a 12,6 °C, soportando máximas de hasta 48 °C (ROLOFF et al., 2009 y FALASCA & BERBABÉ, 2009). Respecto a la tolerancia al frío, la moringa vive en zonas de rusticidad USDA 9b a 12 (GODINO et al., 2017a), resistiendo heladas ligeras de hasta -3 °C pero su crecimiento se ve seriamente afectado si las temperaturas descienden por debajo de -5 °C, incluso por una noche (NRC, 2006; BERTONI, 1927).

Es un árbol de crecimiento muy rápido y poco longevo, unos 20 años (PÉREZ et al., 2010). En el primer año, y buenas condiciones, puede crecer de tres a cinco metros (FUGLIE, 1999) alcanzando en poco tiempo su altura máxima de unos 10-12 m.

Su madera es blanda, ligera, suave y esponjosa, poco resistente y no posee las cualidades físicas mecánicas para que la moringa sea considerada especie maderable (GARCÍA ROA, 2003).

La mayoría de los autores citan para esta madera una densidad media de 600 kg/m³ (FOILD et al., 2001). Para F/FRED (1994), la densidad es de 0,32, KHIDER & ELSAKI (2012) la estimaron en 0,226 al 12 % de humedad (0,201 anhidra), mientras que para BENÍTEZ et al. (2014) la densidad básica resultó ser 0,19; y PROTA (2004) estimó este valor en 0,27.

La moringa está considerado un “árbol botella” por su capacidad de almacenar agua. Para LOYOLA et al. (2014) la madera recién cortada de moringa puede tener una densidad de 961,5 kg/m³. En dicho documento se cita que este valor es “superior al indicado por Palmero (2012), quien obtuvo 862 kg/m³ y cercano a los comunicados por Fors (1965) citado por Loyola et al. (2013), quienes obtuvieron valores de densidad de 1.120 kg/m³ para esta especie”.

Por un lado, la diferencia de densidades de la madera recién cortada y anhidra muestra la capacidad de absorción de agua de la planta y su capacidad para resistir amplios períodos de sequía. Un ejemplo de esta capacidad es lo ocurrido en Campohermoso (Almería), zona semidesértica del Sur de España. Plantas de dos años cultivadas en invernadero fueron arrancadas y apiladas al aire libre. Casi un año más tarde, a finales del verano siguiente, algunos troncos seguían verdes y de ellos emergían algunos brotes; varios de esos troncos se volvieron a plantar y arraigaron.

Como leña, aunque no es un gran combustible, es aceptable para cocinar, pero hay que reducir previamente la humedad de la madera. Arde con facilidad y es buena para iniciar el fuego (ALFARO, 2006), se quema limpiamente y desprende poco humo u olor (NRC, 2006).

En la bibliografía se encuentra poca información referente a la caracterización energética de su biomasa como biocombustible sólido, salvo alguna referencia al poder calorífico de su leña. En el trabajo realizado dentro del Forestry Fuelwood Research and Development Project, F/FRED (1994) aporta el dato de 4.600 kcal/kg como “potencial calorífico”, mientras que GODINO et al. (2017b) reportan un PCI₀ de 3.929 kcal/kg. Para KHIDER & ELSAKI (2012), la moringa no parece económicamente adecuada para la fabricación de leña y carbón.

La composición de la madera de moringa tiene un alto porcentaje de celulosas (aproximadamente el 38,4%) (BENÍTEZ et al., 2018). Y para BHARATHIRAJA et al. (2015), estos residuos regulares de poda, que no tienen otro uso mejor, pueden ser destinados para la producción de bioalcohol.

En la transformación de moringa en bioalcohol, el mayor o menor rendimiento dependerá del porcentaje de celulosa y hemicelulosa en las diferentes materias primas. La composición de los diferentes subproductos de moringa se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes de subproductos de la moringa.

%	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas
Madera de 3 años Benítez et al. (2018)	38,4	13,3	19,6	10,4
Residuos de cosechas 45 días Montaño (2014)	28,0	13,2	4,0	9,8
Vainas secas Akhtar et al. (2015)	15,6	11,1	10,7	
Vainas secas Hernández et al. (2013)	27,8	16,9	30,2	6,5
Cáscara de semillas Aziz (2013)	29,1	11,3	39,3	4,1
Torta Martín et al. (2010)	3,9	5,0	2,6	6,1

El alto contenido de celulosa de los diferentes subproductos de moringa, salvo el de la torta (subproducto resultante del procesado de semillas oleaginosas para obtener aceite), sugiere que estos subproductos podrían ser considerados como fuentes materia prima para la producción de bioetanol. Se observa que los valores de las vainas secas proporcionados por AKHTAR et al. (2015) y HERNÁNDEZ et al. (2013) difieren considerablemente.

Estos valores se pueden comparar con los proporcionados por otras fuentes de materias primas para bioetanol (Tabla 2).

La cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina presente en la moringa es inferior a la mayoría de materiales presentados en la Tabla 2, salvo para la cáscara de semillas, que es similar al valor de la cáscara de nuez (30-40 %) proporcionado por CUERVO et al. (2009). Los bajos valores de lignina darían a la moringa una ventaja frente al resto de materiales, pues el acceso de las enzimas a la celulosa puede ser más sencillo (MONTAÑO, 2014).

Tabla 2. Composición de algunos cultivos lignocelulósicos de interés industrial (Prinsen, P. 2010).

Cultivo	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas
Bagazo de caña de azúcar	39,01	24,92	23,09	3,66
Rastrojo de maíz	37,69	25,28	18,59	10,06
Paja de trigo	32,64	96,88	16,85	10,22
Pinus radiata	41,70	20,60	25,90	0,30
Alamo híbrido	39,23	16,65	25,18	2,03
Eucalyptus	48,07	12,69	26,91	1,22
Switchgrass	30,97	24,38	17,56	5,76
Sorgo dulce	34,01	16,51	16,09	5,04

Los primeros estudios exploratorios sobre la posibilidad de producción de etanol se realizaron con cáscaras de semillas de moringa (MARTIN et al., 2010). En 2013, AZIZ realizó estudios con cáscaras de vaina de moringa y cáscaras de semillas, concluyendo que los desechos agrícolas como las cáscaras de *Moringa oleifera* podrían considerarse como un material lignocelulósico potencial para la producción de azúcares fermentables relacionados con la producción de bioetanol (AZIZ, 2013). ALI & JAMALUDIN (2015) concluyeron que la posibilidad de producir bioetanol puede hacer que las vainas de moringa se conviertan en un buen recurso económico para cualquier país tropical en desarrollo, en los que este árbol se pueda cultivar fácilmente.

MONTAÑO (2014) y MONTAÑO et al. (2017) obtuvieron una producción de 0,13 gramos de etanol por cada gramo de moringa seca (0,16 L/kg m.s.). Y según FOILD et al. (2001), se pueden llegar a producir 0,20 litros de alcohol por kilo de materia seca.

Estos valores son inferiores a los de los residuos lignocelulósicos de cultivos industriales (Tabla 3) proporcionados por GAREA (2017), lo que implica que, para una misma capacidad de transformación en una biorrefinería, se requeriría más del doble de superficie que el de cualquiera de estos cultivos.

Tabla 3. Conversión de residuos lignocelulósicos a etanol (L/kg biomasa). Fuente: Garea (2017).

Bagazo de caña de azúcar	Rastrojo de maíz	Paja de trigo	Pinus radiata	Álamo híbrido	Eucalipto	Sorgo dulce
0,56	0,56	0,49	0,55	0,49	0,53	0,44

En el cultivo de la moringa, son muy abundantes los residuos procedentes de las podas que cada año se debe realizar; esta operación de poda es necesaria para el adecuado crecimiento y desarrollo de los árboles y para la producción óptima de hojas y vainas. Aunque no hay datos homologables de producción de leña en cultivos de moringa para semilla, sí se puede conocer algunas producciones de leña en cultivos de hoja o forraje (para consumo humano o animal) y, con ellos, hacer una similitud.

Según FOILD et al. (2001), la producción de moringa cultivada en altas densidades (1.000.000 plantas/ha) puede llegar a alcanzar una producción promedio de 580 toneladas métricas de materia fresca anuales por hectárea equivalente a unas 99 t de materia seca/ha/año. Si el objetivo de este cultivo es la producción de hoja seca, sólo se aprovechan los folíolos, dejando el resto como residuo o subproducto, que puede ir para alimento animal o ser aprovechado por su celulosa. OTERO & RODRIGUEZ (2014) estimó este residuo en el 66 % sobre la materia verde, con una humedad del 77 %, que entra en el secadero. Suponiendo que no existe gran diferencia de humedad entre tallos y hojas, el potencial de residuos, a esa densidad y en las condiciones



ideales de cultivo recomendado por FOILD et al. (2001), es de unas 65 t m.s./año, que equivalen a unos 13.000 L bioetanol/ha/año.

En árboles de un año plantados para forraje, a un marco de 1,5x1,5 m (4.444 plantas/ha), LOYOLA et al. (2014) obtuvieron un peso de 28,23 kg de leña verde/árbol, con una densidad de 961,5 kg/m³, equivalente a 0,0294 m³/árbol/año.

LOYOLA et al. (2015), en un estudio sobre cerca viva con árboles de 15 años y a una distancia de 1'5 m, obtuvieron 0'035 m³ de madera/año y 0'046 m³ de leña por corte y 4 cortes año, respectivamente. El total de madera acumulado por árbol fue 0,219 m³/árbol/año. En este estudio, el valor de la densidad fue el citado por FOILD et al. (2001): 600 kg/m³.

ESCOBAR et al. (2014), en plantaciones de 3x3 m, obtuvo que la producción de madera verde en árboles de 25 meses llegó a los 24 kg/árbol. Suponiendo una densidad de 600 kg/m³, la producción sería de unos 0,020 m³ de leña/árbol/año, sin considerar que el primer año se produce menos biomasa.

OTAVO (2011), en estudio para clasificar tipos de vainas de moringa, obtuvo que el peso medio de las vainas recolectadas con semillas fue de 13,45 g y el peso medio de las vainas vacías, 8,12 g. Lo que implica que el 60,4 % del fruto seco recolectado es cáscara y el 39,6 % semillas. Lo que quiere decir que, por cada tonelada de semilla que se obtenga, se generarán unas 1,53 t de residuos en forma de vaina.

Otro residuo que se puede obtener es el de la cáscara de las semillas que, según MARTÍN et al. (2010), representa el 28,3 % de su peso y contiene un 30 % de celulosa. Por cada tonelada de semilla se generan 1,8 t de residuos susceptibles de ser transformados en bioalcohol.

Considerando que una hectárea puede llegar a producir 4 toneladas de semilla, el potencial de residuos de cosecha es de 7,3 t/ha, sin incluir las podas.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es, estudiando la densidad de las distintas partes de la moringa y la composición de componentes estructurales y en base a la concentración de carbohidratos, estimar la cantidad de bioetanol que podría obtenerse de los distintos residuos para su aprovechamiento en una biorrefinería.

3. Metodología

Las muestras de madera proceden de ramas de diferentes tamaños y menores de 3 cm de diámetro, que se corresponden con las medidas normales de las ramas procedentes de las podas. Se obtuvieron en un cultivo experimental para el aprovechamiento de hoja en invernadero, sito en Campohermoso (Almería). La madera, de diferentes tamaños, se recogió ya cortada, en el propio vivero. Debido a que ya había perdido la humedad inicial y no se iba a poder obtener la densidad recién cortada, no se consideró realizar una pesada inicial en campo.

Las vainas proceden de un cultivo experimental para producción de frutos, en Santa María de Nieva (Almería). Las vainas, cerradas, se recogieron del almacén de esta finca. Tampoco se consideró realizar la pesada inicial en campo.

El material fue llevado al Laboratorio de Biocombustibles de la E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural (E.T.S.I.M.) de la Universidad Politécnica de Madrid, donde se estabilizó sus



humedades a las condiciones del laboratorio, se realizó el desvainado de las semillas y se prepararon las muestras.

La densidad básica se obtuvo en el Laboratorio de Biocombustibles de la E.T.S.I.M. y el análisis proximal y la caracterización como fuente de bioetanol, en el Laboratorio de biomasa del CIEMAT.

Una vez estabilizada la humedad de las piezas de madera, se prepararon 20 muestras de moringa de diferentes tamaños y formas: 7 prismáticas, para el tronco, y 13 cilíndricas, para las ramas. En las ramas no se quitó la corteza.

Las muestras se midieron con un calibre digital electrónico precisión. Las medidas de cada pieza se obtuvieron mediante medidas cruzadas y el volumen de cada pieza se estimó mediante cálculos geométricos.

La pesada de las muestras se realizó con una balanza Cobos de 0,1 mg de precisión antes de ser introducidas en estufa. El peso seco se obtuvo con la estabilización del mismo.

La densidad básica, o densidad anhidra de cada pieza, se obtuvo dividiendo su peso seco en estufa entre el volumen calculado.

Las vainas fueron desgranadas y las cáscaras vacías se introdujeron en un saco agrícola, donde se dejaron hasta la estabilización de la humedad. Una vez secas, se procedió a pesar el saco y a medir el volumen aparente ocupado por las vainas.

Para la obtención del bioalcohol se procedió a un pretratamiento, tanto de la madera como de las vainas, consistente en un astillado fino, que se realizó en el Laboratorio de Biocombustibles de la E.T.S.I.M. La preparación final se realizó en el Laboratorio de Biomasa del CIEMAT.

La composición química de la madera y vaina de moringa se determinó según los métodos analíticos estándar (LAP: "Laboratory Analytical Procedures") desarrollados por el "National Renewable Energy Laboratory" de EE.UU. (NREL, 2011). Esta metodología permite establecer los porcentajes relativos a los diferentes componentes: extractivos, carbohidratos estructurales, lignina y cenizas.

En primer lugar, los extractivos se determinan mediante una doble extracción con agua y etanol. Por otro lado, el contenido en carbohidratos se establece mediante una correlación de los azúcares monoméricos obtenidos tras una hidrólisis con ácido sulfúrico en dos fases: la primera con ácido concentrado al 72% (30 min a 30 °C) y la segunda con ácido diluido al 4% (1 h a 121 °C). Tras la hidrólisis se determina la lignina ácido soluble por espectrofotometría a 205 nm y los azúcares monoméricos mediante HPLC ("High-Performance Liquid Chromatography").

Asumiendo que toda la glucosa procede de la celulosa mientras que la xilosa, arabinosa, manosa y galactosa proceden de la hemicelulosa, se realizan los cálculos oportunos para establecer ambas fracciones. Para ello se aplica un factor de corrección de 1,1 para las hexosas (glucosa, galactosa y manosa) y de 1,13 para las pentosas (xilosa y arabinosa), de modo que se tenga en cuenta la molécula de agua que se desprende al formarse el enlace glucosídico. Asimismo, el residuo sólido insoluble generado tras la hidrólisis ácida, se emplea para determinar la lignina y cenizas ácido insolubles mediante gravimetría y calcinación respectivamente.

4. Resultados

Los resultados del cálculo de la densidad anhidra se exponen en la Tabla 4 y los del análisis proximal de la madera y las vainas, en la Tabla 5.



Tabla 4. Densidad básica.

	Prismas	Cilindros	TOTAL
Promedio	0,1736	0,1886	0,1823
Desv. estándar	0,0223	0,0253	0,0246
Máximo	0,2096	0,2420	
Mínimo	0,1544	0,1653	

Tabla 5. Análisis proximal de la madera y las vainas.

	Madera		Vainas	
	% sobre peso seco	Desviación standard	% sobre peso seco	Desviación standard
Extractivos	15,3	0,1	23,1	0,8
Celulosa	33,6	0,6	30,1	0,4
Hemicelulosa	14,5	0,2	14,4	0,5
Lignina	26,6		20,3	
Cenizas	7,3	0,1	8,8	0,2
Grupos acetilo	0,4	0,1	2,8	0
Otros	2,3		0,5	
Total	100,0		100,0	

La densidad básica o anhidra promedio de las piezas estudiadas fue de 0,1823 kg/m³. La humedad promedio en condiciones de laboratorio fue del 7,65 % en base húmeda.

El peso seco de las vainas contenidas en el saco fue de 2.768 g y el volumen aparente ocupado por ellas, 62,59 cm³. La densidad aparente obtenida fue 0,044 kg/dm³.

El azúcar mayoritario de la hemicelulosa fue el xilano: 10,4 % en madera y 9,9 % en vainas

5. Discusión

La densidad básica en las piezas de madera, 0,1736, fue similar a la obtenida en las ramas, 0,1886. En conjunto, la densidad básica promedio fue 0,1823 ± 0,0246 kg/dm³, ligeramente inferior a los 0,19 obtenido por BENÍTEZ et al. (2014).

No hay datos previos de la densidad aparente de las vainas, sin embargo los 0,044 kg/dm³ obtenidos, teniendo en cuenta las características de las mismas y la forma en que se encontraban dispuestas en el saco, parece razonable. Una opción para medir una densidad aparente más uniforme sería mediante el astillado de las vainas.

Debido a las bajas densidades tanto de la madera como de las vainas los costes de transporte del material serían altos. Para abaratarlos, sería conveniente proceder a su compactación. Teniendo en cuenta que tanto la madera como las vainas son unos materiales con poca tenacidad, una empacadora agrícola sería suficiente.

La composición química de la biomasa lignocelulósica es un factor muy importante en la elección del material para la producción de etanol. Como se observa en la Tabla 5, tanto en la madera como en la vaina de moringa la fracción mayoritaria corresponde a la celulosa (33,6% en la



madera y 30,1% en la vaina), siendo muy similares los contenidos en hemicelulosa (14,5%) y cenizas (7,3% y 8,8 en la madera y en la vaina respectivamente). El azúcar mayoritario de la hemicelulosa en ambos materiales es el xilano (alrededor del 10%). El alto contenido en azúcares potencialmente fermentables (celulosa y hemicelulosa) hace que, tanto la madera como la vaina, sean sustratos potencialmente interesantes para la producción de etanol.

La madera de moringa presenta un alto contenido en lignina (26,6 %), mientras que la vaina está menos lignificada (20,1 %). Debe destacarse el elevado contenido en material extraíble, especialmente extractivos acuosos, suponiendo el 15,3% del peso seco en la madera y del 23,1% en la vaina.

El porcentaje de celulosas obtenidos para las maderas, 48,1 %, es menor a los (38,4 %) obtenidos por BENÍTEZ et al. (2018); los de hemicelulosas, 14,5 % vs. (13,3 %), son similares; la lignina, 26,6 % vs. (19,6 %), son superiores; y las cenizas 7,3 % vs. (10,4 %), son menores. La diferencia entre los resultados puede ser debida a la edad de las muestras de origen y a la parte del árbol donde fueron tomados.

AKHTAR et al. (2007) recoge que las vainas contienen 15,6 % de celulosa, 11,1 % de hemicelulosa, y 10,7 % lignina. Estos valores difieren de los obtenidos en este trabajo, que son más parecidos a los obtenidos por Hernández et al. (2013): 27,8 %, 16,9 % y 30,2 %, respectivamente.

Considerando solo el contenido en celulosa, y asumiendo que el 40 % de esta puede ser transformada en bioetanol, y que los contenidos en celulosa en la madera es el 33,6% y en las vainas, el 30,1%; las cantidades de bioetanol que pueden obtenerse de los residuos de la moringa son: el 13,57 % de las leñas y el 12,16 % de las vainas. Estos valores coinciden con el 13% obtenido por MONTAÑO (2014).

Todavía no se han recogido datos fiables sobre podas en árboles productores de semillas. No obstante, se pueden considerar que las cantidades por poda serán similares a las obtenidas por LOYOLA et al. (2015) en podas sobre cerca viva con árboles de 15 años y a una distancia de 1'5 m, de 0'046 m³ de leña por corte. En zonas de clima bimodal se obtienen dos cosechas y sus respectivos cortes post-cosecha. El total de madera seca acumulada, considerando la densidad anhidra obtenida (0,1823 kg/dm³), será de 16'77 kg de leña/planta/año. Con el marco de plantación considerado, de 2 x 3 m o 1.667 plantas/ha, que la producción estimada de leñas es de 28 t/ha, lo que permitiría obtener unos 3.800 L de bioetanol/ha/año.

Con una producción de 4 t de semillas por hectárea se producen 3,6 t de residuos de vainas y cáscaras de semilla, lo que implica una producción de unos 540 L etanol/ha.

Sumando ambas cantidades, la cantidad potencial de etanol obtenida de los residuos de los cultivos aceiteros de moringa ascendería a 4.340 L/ha/año.

Construir una planta de bioetanol con el aporte de biomasa que proporcionan estos residuos es inviable. Por ejemplo, una planta de 100 millones de litros de bioetanol requeriría una superficie de unas 25.000 ha, equivalente al área de un círculo de más de 80 km de radio. Pero sí es un material con calidad suficiente para ser llevado a alguna biorrefinería que se encuentre en las inmediaciones de los cultivos.

6. Conclusiones

Una vez analizados los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:



- Los residuos de la moringa tienen un buen potencial para su transformación en bioetanol, por lo que la gestión energética de los residuos de moringa pasaría por producir etanol en biorrefinerías.
- Debido a la baja densidad de los residuos, el volumen ocupado por estos es alto, lo que encarecería los costes de transporte. Para reducir estos costes se requeriría de algún medio de compactación, que podría ser una empacadora agrícola.
- No es viable plantear una biorrefinería específica para los residuos de moringa.
- Convendría estudiar la opción de valorizar el almacenamiento de carbono que pueden proporcionar estos residuos que, a la vez, pueden ayudar a la mejora del suelo y el rendimiento de los cultivos arbóreos.

7. Bibliografía

AKHTAR, M.; MOOSA HASANY S.; BHANGER, M.I.; IQBAL, S.; 2007. Sorption potential of *Moringa oleifera* pods for the removal of organic pollutants from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials* 141, 546–556.

ALFARO, N.C.; 2006. Rendimiento y uso potencial de Paraíso Blanco, *Moringa oleifera* Lam, en la producción de alimentos de alto valor nutritivo para su utilización en comunidades de alta vulnerabilidad alimenticia-nutricional de Guatemala. Informe final, proyecto FODECYT, n° 26. 150 p. Guatemala (Guatemala).

ALI, E. N.; JAMALUDIN, MZ.; 2015. Possibility of producing ethanol from *Moringa oleifera* pod husk. *Journal of Advanced Research Design*, 5(1), 1-9.

AZIZ, N. M. S. B. A.; 2013. Investigating the potential of using *Moringa oleifera* husks for bioethanol production. Doctoral dissertation. Universiti Malaysia Pahang. 24 p. Pahang (Malaysia).

BENITEZ, J.B.; VALLEJOS, M.E.; AREA, M.C; FELISSIA; F.E.; 2014. Caracterización química y morfológica de *Moringa oleifera* para su aprovechamiento en biorrefinerías. 1. Aptitud Papelera Proceedings of the VIII CIADICYP The VIII IberoAmerican Congress on Pulp and Paper Research November, 26-28. Medellín (Colombia).

BERTONI, M.S; 1927. Agenda y Mentor Agrícola. Guía del agricultor y colono. 4ª edición. Ed. Ex sylvis. Puerto Bertoni. Alto Paraná (Paraguay).

BHARATHIRAJAA, B.; SUDHARSANAAA, T.; BHARGHAVIA, A.; SRI SOWMEYAA, G.; YUVARAJA, D.; PRAVEENKUMARB, R.; CHOZHAVENDHANBAND, C.; VINOTHARULRAJB, J.; 2015. Biobutanol production from cellulose rich agricultural waste using *Clostridium* species. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(3):2463-2469.

BLENCH R. M.; 2003. The movement of cultivated plants between Africa and India in prehistory. In K. Neumann, A. Butler, S. Kahlheber (Eds.), *Food, Fuel and Fields: Progress in African Archaeobotany* (pp. 273-292). Heinrich Barth Institut. Colonia (Alemania).

CUERVO, L., FOLCH, J.L., QUIROZ, R. E.; 2009. Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología*. 2009; 13(3): 11–25.



ESCOBAR, M.; MARTÍNEZ SALCEDO, P.; GONZÁLEZ, F.; SUÁREZ, C.A.; 2014. Adaptación y producción de biomasa de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) en tres localidades del Departamento de Santander. Ponencia 6º Simposio Nacional Forestal. Colombia Forestal Vol. 17 (Supl. 1)/Octubre 9-10. Medellín (Colombia).

FALASCA, S; BERNABÉ, M.A.; 2009. Zonificación agroclimática de la moringa (*Moringa oleifera*) en Argentina para producir biodiesel y bietanol. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Salta (Argentina) Vol. 13 pp. 117-122.

F/FRED (Forestry/Fuelwood Research and Development Project); 1994. *Growing Multipurpose Trees on Small Farms*. (2nd Ed.). Winrock International. 320 pp. Bangkok (Thailand).

FOIDL N., MAKKAR H.P.S., BECKER K.; 2001. The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses. In: Proceedings of International Workshop What development potential for Moringa products? Oct 29th to Nov 2nd. Dar Es Salaam (Tanzania).

FUGLIE, L.J; 1999. "The miracle tree" *Moringa oleifera*. Natural Nutrition for the tropics. Church World Service. pp 1-31. Dakar (Senegal).

GARCÍA ROA, M.; 2003. Producción de semillas forestales de especies forrajeras enfatizados en sistemas silvopastoriles. INAFOR. 37 p. Managua (Nicaragua).

GAREA, A.; 2017. Estudio de la obtención de bioetanol a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica. Matriz de reacciones y optimización. TFG Ingeniero de los Recursos Energéticos. Escuela Politécnica de Minas y Energía. Universidad de Cantabria. Torrelavega.

GODINO, M., ARIAS, C.; IZQUIERDO, M.I.; 2017a. *Moringa oleifera*: potential areas of cultivation on the Iberian Peninsula. Acta Hort. 1158, 405-412.

GODINO, M.; VILLEGAS, S.; IZQUIERDO, M.I.; 2017b. Evaluación del uso energético de la madera de *Moringa oleifera*, 7º Congreso Forestal de España. Plasencia, Cáceres. 26-30 junio 2017. Documento 7CFE01-550.

GÓMEZ, E.A, RÍOS, L.A.; PEÑA, J.D.; 2012. Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. Información tecnológica, 23(6), 73-86.

HERNANDEZ, E.; GARCIA, A.; LOPEZ, M.; PULS, J.; PARAJO, J.C.; MARTIN, C; 2013. Dilute sulphuric acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of *Moringa oleifera* empty pods. Ind. Crops Prod., 44, pp. 227-231.

KHIDER, T. O., ELSAKI, O. T; 2012. Heat value of four hardwood species from Sudan. Journal of Forest Products and Industries, 1(2), 5-9.

LOYOLA, O.; PÉREZ, I.; TRIANA, D.; VALIDO, A.; YERO, I.; GONZÁLES, D.C; 2014. Evaluación



agropecuaria de *Moringa oleifera* Lam en cercas vivas en condiciones edafoclimáticas. Revista de Producción Animal, 26 (2): 2014. Universidad de Camaguey Ignacio Agramonte Loynaz. Cuba.

LOYOLA, O.; VALIDO, A.; TRIANA, D.; PÉREZ, I.; YERO, I.; GONZÁLES, D.C; 2015. Evaluación de la retención de carbono y la fauna edáfica en asocio con *Moringa oleifera* Lam. en cercas vivas. Revista Centro Agrícola, 42(1):75-81; enero-marzo, 2015. Universidad Central Marta Abreu. Cuba.

MARTÍN, C.; MOURE, A.; MARTÍN, G.; CARRILLO, E.; DOMÍNGUEZ, H.; PARAJÓ, J.C.; 2010. Fractional characterisation of jatropha, neem, moringa, trisperma, castor and candlenut seeds as potential feedstocks for biodiesel production in Cuba. Biomass and Bioenergy. 34: 533-538.

MONTAÑO, H.F; 2014. Producción de Bioetanol a Partir de Material Lignocelulósico de *Moringa oleifera*. Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Universidad Nacional de Colombia. Bogotá (Colombia).

MONTAÑO, H.F.; RINCÓN, S.L.; SERRATO, J.C.; 2017: Study of the influence of dilute acid pre-treatment conditions on glucose recovery from *Moringa oleifera* Lam. for fuel-ethanol Production, International Journal of Green Energy.

NREL (National Renewable Energy Laboratory); 2011. Chemical Analysis and Testing Laboratory Analytical Procedures. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado (EE.UU.). Available from: http://www.nrel.gov/biomass/analytical_procedures.html.

NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL); 2006. Lost crops of Africa. Volume II: vegetables. The National Academies Press. 352 p. Washington. (EE.UU.)

OTAVO, J.P; 2011. Medición de Fruto y Semilla de Moringa en Finca Puerto Japón. Coello-Tolima-Colombia. Trabajo de campo. Inédito. Ibagué (Colombia).

OTERO, J.A.; RODRIGUEZ, J; 2014. Elaboración de suplemento vegetal en polvo a partir de *Moringa oleifera* como sustituto en raciones balanceadas para animales de granja. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Guayaquil. Ecuador. 85p.

PARROTTA, J.A; 2000. *Moringa oleifera*. En: Francis, J. K., Lowe, C. A., Trabanino, S. Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales (pp. 366-370). Río Piedras, Puerto Rico: US Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry.

PÉREZ, A, SÁNCHEZ, T., ARMENGOL, N., REYES, F; 2010. Características y potencialidades de *Moringa oleifera*, Lamark: Una alternativa para la alimentación animal. Pastos y Forrajes, 33(4), 11 p.

PÉREZ, R; 2011. *Moringa oleifera*: una alternativa forrajera para ovinos. Fundación Produce Sinaloa. Universidad Autónoma de Sinaloa. 11 p. México.



PNUD; 2011. Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011. Colombia rural. Razones para la esperanza Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 440 p.

PRINSEN, P; 2010. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. TFM Estudios avanzados en Química. Universidad de Sevilla y CSIC. 92 p. Sevilla.

PROTA; 2004. *Moringa oleifera* Lam. En: GRUBBEN, G.J.H., DENTON, O.A. (Editors): Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables, 392-395. PROTA Foundation/Backhuys Publishers/CTA. Wageningen, Netherlands.

ROLOFF A., WEISGERBER H., LANG U., STIMM B; 2009. *Moringa oleifera* Lam. 1796. En: Enzyklopädie der Holzgewächse, Handbuch und Atlas der Dendrologie. 8 p. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

