

Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia*

Inventory of Available Biomass in Oil Palm Mills and Physicochemical Characterization of Empty Fruit Bunches (EFB) in Colombia

CITACIÓN: Ramírez, N., Arévalo, A. y García-Nunez, J. A. (2015). Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia. *Palmas*, 36(4), 41-54.

PALABRAS CLAVE: tusa, fibra, cuesco, efluentes, palma de aceite.

KEY WORDS: Empty fruit bunches (EFB), fiber, shell, palm oil mill effluent (POME), oil palm.

RECIBIDO: junio de 2015.

APROBADO: septiembre de 2015.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

NIDIA ELIZABETH RAMÍREZ CONTRERAS

Asistente de Investigación.
Programa de Procesamiento,
Cenipalma.
nramirez@cenipalma.org

ANGÉLICA ARÉVALO S.

Auxiliar de Investigación. Programa
de Procesamiento, Cenipalma
(Hasta diciembre de 2014)

JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ

Coordinador del Programa de
Procesamiento, Cenipalma
jgarcia@cenipalma.org

Resumen

En la agroindustria de la palma de aceite, además del aceite de palma y de palmiste, se genera una gran cantidad de biomasa conformada principalmente por materiales lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) que tienen un gran potencial de uso como materia prima para la elaboración de nuevos productos. Los usos de la biomasa dependen de su disponibilidad y de la competencia con los usos actuales. Con el fin de cuantificar la generación, uso y disposición de la biomasa proveniente de las plantas de beneficio se realizó, a finales del año 2014, una encuesta en 27 plantas de beneficio que representan el 72,2 % (3.604.319 toneladas) de los racimos de fruta fresca (RFF) procesados en Colombia durante 2013. Adicionalmente, se hizo una caracterización fisicoquímica de las tusas por ser el mayor componente de la biomasa producida. A partir del diagnóstico, se obtuvo que del total de la fruta procesada, el 40 % corresponde a biomasa sólida (base húmeda) compuesta por: 20,22 %, de tusas; 13,65 % de fibra de mesocarpio; 5,63 % de cuesco; 0,53 % de ceniza de caldera y 0,20 % de lodo de tricanter. En la tusa se encontró un contenido promedio de 25,5 % extractivos totales, 18,27 % de lignina, y 32,58 % de glucano, entre otros. Se estima que el procesamiento de 5.000.000 t de RFF tienen un potencial de biomasa húmeda (tusa, fibra y cuesco) de 1.975.357 t y una biomasa potencial de 979.000 t, lo que hace necesario dar mayor valor agregado a esta biomasa, a través de la evaluación de diferentes opciones de biorrefinería.

Abstract

Besides palm oil and kernel, the oil palm agribusiness generates a significant amount of biomass, including lignocellulosic materials (cellulose, hemicellulose and lignin) which have a high potential as raw material for new products. New uses of biomass will depend both on the availability and the competition with existing applications. In order to quantify the generation, use and disposal of biomass from the palm oil mills (POM), we performed a survey to 27 POM. These mills account for 72.2% (3,604,319 tons) of total fresh fruit bunches (FFB) processed in 2013 in Colombia. Additionally, a physicochemical characterization of empty fruit bunches (EFB) was conducted, since EFB are the most abundant type of biomass produced at POM.

Results reported a total production of solid biomass of approximately 40% FFB with respect to the total FFB processing. The biomass was composed by: 20.22% EFB, 13.65% fiber, 5.63% shell, 0.53% ash, and 0.20% sludge. Characterization of EFB reported 25.5% average content of total extractives, 18.27% lignin and 32.58% glucan among others. It is estimated that processing 5,000,000 tons of FFB, have the potential of generating 1,975,357 tons EFB, fiber, and shell and total available biomass potential of 979,000 tons. The huge amount of residual biomass makes necessary to explicit alternative ways of adding value to the oil palm agroindustry (biorefinery).



Introducción

Biomasa es un término dado a todo el material orgánico que se deriva de los vegetales, incluyendo algas, árboles y cultivos (McKendry, 2002), (Kumar, Kumar, Baredar, & Shukla, 2015). El cultivo de la palma de aceite en el mundo genera grandes cantidades de biomasa. En Malasia, en 2013, se procesaron 95 millones de toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) (Tarmezee, Noriznan, Samsu, & Sulaiman, 2014), con un estimado de 41 % de biomasa por cada t de RFF (22 % tusa, 5 % cuesco y 14 % fibra de mesocarpio), que equivale a cerca de 39 millones de toneladas de biomasa producidas. Para el caso de Colombia, en el mismo año, se procesaron 4.99 millones de toneladas de RFF (Fedepalma, 2014), que equivalen a cerca de 2 millones de toneladas de biomasa en base húmeda (tusa, cuesco y fibra de mesocarpio).

Una biorrefinería es un sistema que integra los procesos de conversión de la biomasa para producir combustibles, energía y productos químicos (NREL, 2014), (Van Ree & Annevelink, 2007). Dadas las cantidades de biomasa generada en las plantas de beneficio, durante el proceso de extracción de aceite, es necesario explorar opciones para incrementar el va-

lor agregado de la agroindustria, con la fabricación de nuevos productos a través de procesos de transformación físicoquímicos, biológicos o térmicos (Figura 1). A través de procesos como combustión, compactación, digestión anaerobia y pirólisis, se pueden generar productos con mayor valor agregado como energía eléctrica, energía calórica, compost, pellets, biocarbón, biogás, entre otros (NREL, 2014; Kamm & Kamm, 2004; Schuchardt, Darnoko, & Guritno, 2002; Prasertsan & Sajjakulnukit, 2006; Abnisa, Daud, Husin, & Sahu, 2011; Arrieta, Teixeira, Yañez, Lora, & Castillo, 2007; García-Pérez & Garcia-Nunez, 2013). Estas transformaciones de la biomasa han sido implementadas en algunos sitios alrededor del mundo, aunque aún no se han masificado completamente. Sin embargo, se cuenta con algunos procesos que han abanderado el tema del aprovechamiento de la biomasa desde la visión de una biorrefinería.

En un trabajo sobre los usos de la biomasa generada por las plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia (Garcia-Nunez, Cardenas M, & Yañez A, 2010), se encontró que el porcentaje de biomasa en base húmeda obtenida durante el proceso de ex-

tracción de aceite de palma es de 41 % en peso de RFF, representada por 21 % de tusa, 13 % de fibra y 5 % de cuesco. En cuanto a los usos de la biomasa, se identificó que la tusa es utilizada en 83 % como acondicionador de suelos, la fibra se utiliza en su mayoría como combustible de calderas (80 %), así como el 67 % del cuesco. El 20 % de la fibra y el 15 % de la tusa se utilizan para compostaje, y el 16 % del cuesco es vendido a otras industrias para diferentes usos.

En cuanto al uso de la tusa como acondicionador de suelos, si bien es una práctica común en Colombia, presenta algunos inconvenientes en la zona palmera Oriental, debido a que la disposición de la tusa en las plantaciones genera la proliferación de la mosca de los establos (*Stomoxys calcitrans*). Esta mosca ataca al ganado cercano a las plantaciones ocasionándole problemas sanitarios (ICA-Cenipalma, 2002). Con el fin de dar cumplimiento a prácticas de manejo y disposición de la tusa en las plantaciones, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) emitió la Resolución 2828 de 1995, que posteriormente fue ajustada con la emisión del Plan de Manejo de la mosca de los establos, adoptado por la Resolución 1706 de 2002, “por la cual se adoptan medidas de carácter fito y zoonosanitario tendientes a incentivar e implementar las campañas encaminadas a llevar a niveles bajos la presencia de

la mosca hematófaga (*Stomoxys calcitrans*) en lo que compete a su control y manejo técnicoeconómico” (ICA-Cenipalma, 2002).

El uso de la biomasa generada en las plantas de beneficio en el país es considerado por el sector palmero como una estrategia de aprovechamiento, que permitiría obtener beneficios adicionales para la empresa, creación de nuevas fuentes de ingreso, acceso a nichos de mercado especializado y mejorar aspectos de la disposición de residuos de esta agroindustria.

El objetivo de este trabajo fue realizar un inventario de la producción de tusa, fibra, cuesco, efluentes y cenizas de caldera, provenientes de las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite en Colombia en 2013, además del uso que se da a esta biomasa. Adicionalmente, se muestra una caracterización de las tusas por ser la mayor biomasa generada en las plantas de beneficio.

Metodología

Encuesta

En 2013, se procesó un total de 4.991.241 t de RFF en Colombia. Para establecer el número de plantas de

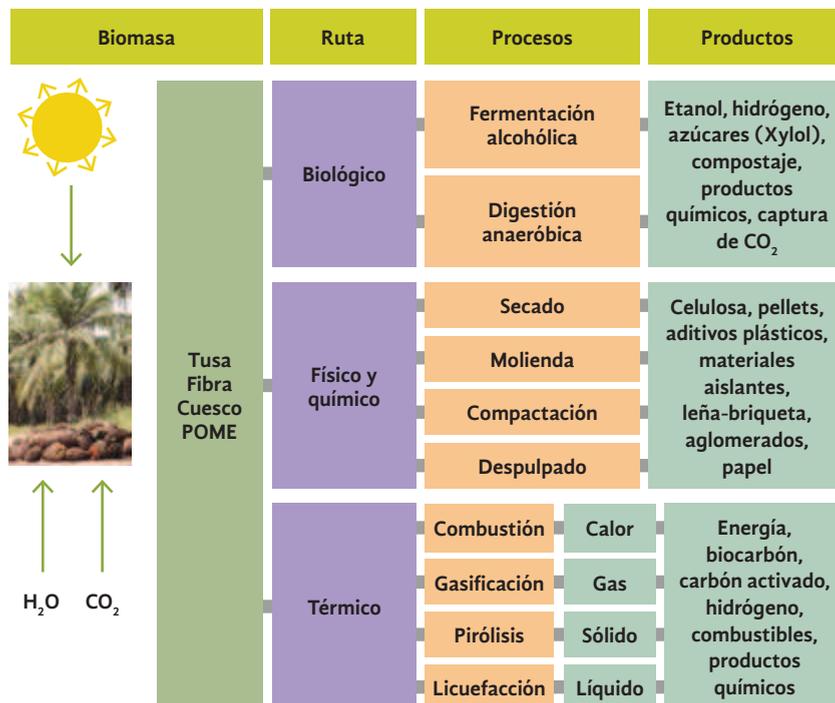


Figura 1. Rutas de aprovechamiento de la biomasa de palma de aceite (García *et al.*, 2013).

beneficio a encuestar, se tuvo en cuenta el número de plantas cuya cantidad de producción fuera mayor o igual a 50.000 t de RFF para 2013 y que como grupo aportaran más del 70 % del total de la producción en Colombia. Como resultado se seleccionaron 27 plantas de beneficio, que representaron el 72,2 % de la producción (3.604.319 t) para dicho año. Estas plantas de beneficio se encuentran ubicadas en tres zonas palmeras, así: 11 en la Zona Norte (Magdalena, Cesar y Bolívar), 9 en la Zona Central (Santander y sur del Cesar) y 7 en la Zona Oriental (Meta). En cada una de las plantas de beneficio, se aplicó una encuesta relacionada con la generación, el aprovechamiento y la disponibilidad de la biomasa, enfocándola en los siguientes temas:

- Generación y aprovechamiento de la biomasa
- Generación de energía eléctrica, compost y biogás
- Venta y comercialización de biomasa

Caracterización de la tusa

Se tomaron 48 muestras de tusa entre las 27 plantas censadas. Las muestras fueron estudiadas en el marco del convenio realizado entre Cenipalma y el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) con el fin de evaluar los usos potenciales de la tusa de acuerdo con sus características. La caracterización se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y en los laboratorios del NREL (National Renewable Energy Laboratory) en Estados Unidos. Para realizar la toma de muestras se hicieron las siguientes consideraciones:

- Muestreo de tusa (1 unidad/hora durante un turno de proceso)
- Cuarteo de muestras (por separado espigas y pedúnculo)
- Acondicionamiento de muestras (picado, homogenización y secado)
- Empaque y envío de muestras a laboratorios

Se realizó análisis de caracterización fisicoquímica con respecto a: cantidad de sólidos, cenizas, inorgánicos estructurales y no estructurales, proteína, agua, extractivos de etanol, extractivos de hexano, extractivos totales, glucano, xilano, galactano, arabinano,

fructano y sacarosa. Adicionalmente, se presentan los resultados del inventario en comparación con el trabajo realizado por Cenipalma en 2010 (García-Núñez *et al.*, 2010), con el objetivo de identificar los cambios en la generación, uso y aprovechamiento de la biomasa de plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia, en los últimos cinco años.

Resultados y discusión

Como base para la comparación entre el presente estudio y el publicado por García *et al.*, 2010, se tiene que la biomasa sólida en base húmeda generada en las plantas de beneficio, fue casi igual a la obtenida en el estudio anterior, pasando de tener 1.121.528 t de biomasa (41 % en peso de RFF) en 2008 a 1.443.847 t (40 % en peso de RFF) en 2013. El total de la biomasa líquida, representada por los efluentes que se generan del proceso de extracción de aceite de palma, en 2013 asciende a los 2.497.359 metros cúbicos.

Consolidado nacional

En la Tabla 1 se muestra la generación de biomasa sólida producida y el potencial estimado para otros usos, consolidada para 2008 y 2013; de acuerdo con esta información se puede mencionar que los porcentajes de tusa, fibra de mesocarpio y cuesco generados en planta de beneficio por cada tonelada de RFF procesado, se han mantenido en el mismo margen. También, en la información recolectada para 2013, se cuenta con tres tipos de biomasa adicional, generada en plantas de beneficio: ceniza de las calderas, residuos de tolva y lodo generado en el tricanter. La biomasa potencial para nuevos usos corresponde a la cantidad de biomasa que se dejó de utilizar de alguna forma; por ejemplo, la fibra y el cuesco que no se usó en las calderas o la tusa que se dejó de utilizar en compost. Adicionalmente a la cantidad de tusa estimada, se le suma la tusa que se utilizó como acondicionador de suelos.

De la biomasa potencial para nuevos usos se resalta que, a pesar de que el porcentaje de tusa/t RFF se redujo en 2013 (pasó de 17,36 a 15,21 %), la cantidad de tusa reportada en toneladas fue mayor (548.354 t de tusa disponible en 2013). Por otro lado, el cuesco disponible para ser utilizado en otras formas de

Tabla 1. Biomasa sólida producida y potencial estimado para otros usos, consolidado nacional años 2008 y 2013 (base húmeda).

Año de toma de datos en Planta de beneficio		2008*		2013	
Fruto procesado (t) evaluado		2.858.868		3.604.318	
Unidades		% RFF	Cantidad (t)	% RFF	Cantidad (t)
Biomasa sólida generada	Tusa	20,94	598.785	20,22	728.847
	Fibra	13,02	369.745	13,65	492.142
	Cuesco	5,35	152.998	5,63	202.974
	Ceniza	...	...	0,53	19.126
	Residuos de tolva	...	...	0,02	689
	Lodo del tricanter	...	...	0,2	6.561
Biomasa potencial para nuevos usos	Tusa	17,36	496.225	15,21	548.354
	Fibra	1,57	44.953	2,78	100.152
	Cuesco	3,07	87.719	1,59	57.468
	Ceniza	...	...	0,28	10.020
	Residuos de tolva	...	...	0,02	689
	Lodo del tricanter	...	...	0,002	69

* (García *et al.*, 2010)

aprovechamiento se redujo, pasando de 87.719 t en 2008 a 57.468 t en 2013. La biomasa total disponible para 2013, teniendo en cuenta solamente tusa, fibra y cuesco, fue de cerca de 705.000 t, que es mayor a la reportada en 2008 (628.000 toneladas - base húmeda).

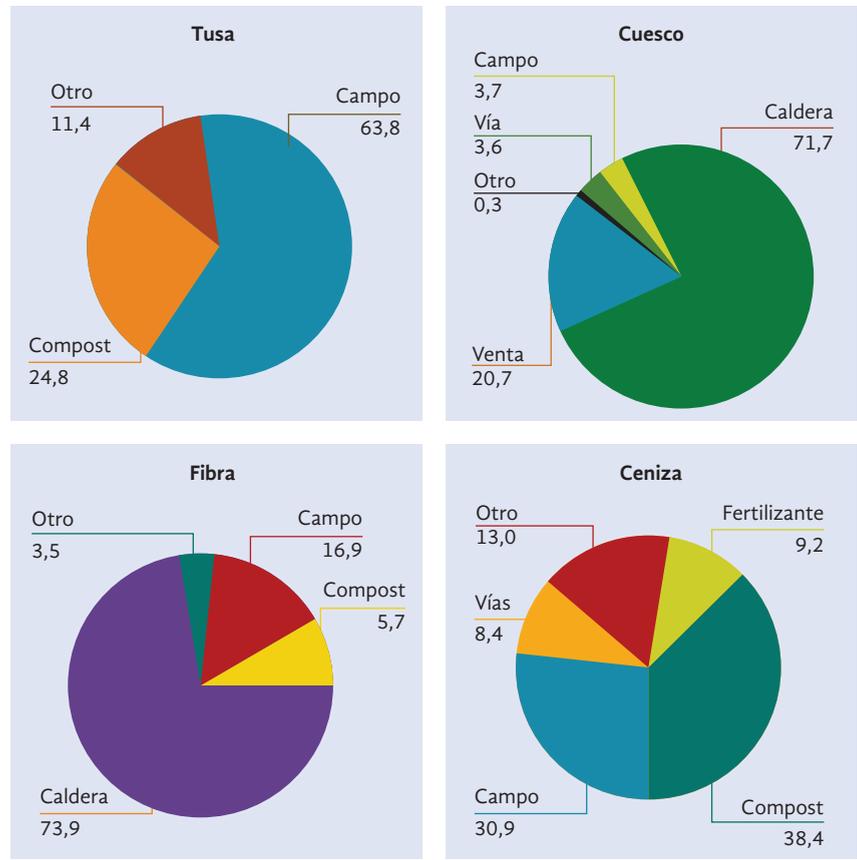
En la Figura 2 se presentan los porcentajes de uso de tusa, fibra, cuesco y ceniza (base húmeda) en las plantas de beneficio para 2013. De la información más representativa se observa que el primer uso dado a la tusa es como acondicionador de suelos en el campo con el 63,8 % del total producido (465.277 t). Las plantas de beneficio reportan que el costo de disponer (transportar y aplicar en campo) una tonelada de tusa oscila entre \$ 1.100 y \$ 58.000, para distancias entre 5 y 60 kilómetros desde la planta de beneficio hasta la plantación.

El principal uso de la fibra es como combustible para calderas con el 73,9 % equivalente a 363.703 t, seguido del uso en campo y para compost. Del total de cuesco generado en las plantas de beneficio encuestadas en 2013, el 71,7 % (145.506 t) es usado como combustible en las calderas para generación

de vapor, seguido de un 20,7 % (41.967 t) dispuesto para la venta, a un costo que oscila entre \$ 30.000 y \$ 52.200 por tonelada puesta en el punto de acopio de la planta.

Adicionalmente, en 2013 se recolectaron datos de generación de ceniza en las calderas, resultado de la quema de la fibra y del cuesco utilizados como combustible. En la Figura 2 se observa la distribución en el uso de la ceniza, de la cual un 38,4 % (7.352 t) es utilizada para la fabricación de compost, seguida de un 30,9 % (5.919 t) de ceniza dispuesta en campo. Es de resaltar que el uso de la biomasa en los últimos cinco años ha tenido algunas variaciones respecto a las cantidades dispuestas en campo, es decir, en el uso como acondicionador de suelos en las plantaciones. Para el caso de la tusa, en el año 2008 representó un 83 % equivalente a 496.991 t, mientras que en 2013, el porcentaje se redujo a 63,8 %. Sin embargo, en términos de cantidad, ese porcentaje equivale a 465.277 t, es decir 31.714 t de tusa que dejaron de ser enviadas directamente a campo por las plantas de beneficio y pasaron a otros usos. Adicionalmente, se observa un

Figura 2. Porcentaje total de uso de tusa, fibra, cuesco y ceniza en plantas de beneficio en 2013.



incremento en el uso de biomasa para la producción de compost, que es una de las opciones de biorrefinería que se ha implementado en Colombia para el aprovechamiento de la biomasa de palma de aceite.

Además de la biomasa sólida generada en las plantas de beneficio, también se produce biomasa líquida denominada efluente, conformado por los flujos de condensados de esterilización, descarga de centrifugas y tricanter, aguas de lavado, entre otros. En la información recolectada en 2013, se obtuvo un total de 2.497.359 m³ de efluente, que corresponden aproximadamente a 0,69 m³ por cada tonelada de fruta fresca procesada. Todas las

plantas encuestadas tratan sus efluentes en lagunas anaeróbicas y facultativas, sin embargo, para efectos de este artículo, se hace una diferencia cuando además del sistema de tratamiento se usan parte de estos efluentes para la producción de compost o para la captura y uso de biogás.

En la Tabla 2 se observa el uso dado al efluente, donde la mayor cantidad es enviada al sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) sin ningún uso posterior, en total 1.590.014 m³; seguido del uso para producción de compost con 499.097 m³. Mientras que para la captura de biogás, en las plantas encuestadas se utiliza 408.249 m³ de efluente.

Tabla 2. Biomasa líquida generada en plantas de beneficio en 2013.

Biomasa líquida		Uso	Cantidad (m ³)	% de uso
Efluente	2.497.359 m ³	Compost	499.097	19.98
		Biogás	408.249	16.35
		Solo STAR	1.590.014	63.67

Consolidado por zonas

A continuación se analizan los resultados obtenidos para cada una de las zonas, donde se localizan las plantas de beneficio encuestadas en 2013, y se comparan con los datos del estudio de 2008. Según la Tabla 3, para 2013 en las tres zonas palmeras estudiadas, la tusa es usada en su mayoría para disponerla directamente en campo como acondicionador de suelos, pero se observa una marcada diferencia en la Zona Central, ya que en 2008 la totalidad de la tusa se usó en campo; mientras que en 2013, se reportan usos adicionales como compost y donación a proveedores (posiblemente usada también como aplicación en campo). En la Zona Oriental ya no se reporta uso de tusa como combustible para caldera, ni como cama para cerdos. En adelante, el uso denominado como “otros”, hace referencia a la donación de biomasa a proveedores de fruto, envío a almacenamiento, vivero de la plantación o envío a botaderos en los alrededores de la planta de beneficio.

La Tabla 4 muestra que en las tres zonas palmeras, la fibra es usada principalmente como combus-

tible para calderas, seguido del uso como acondicionador de suelos en campo y producción de compost. En la Zona Central no se reporta uso de fibra en la producción de compost, únicamente donación a proveedores de fruta.

En lo referente al uso de cuesco en las plantas de beneficio encuestadas en las tres zonas palmeras durante 2013, se reportan variaciones con respecto a la información de 2008 (Tabla 5). Aunque su uso como combustible para calderas continúa siendo el principal en las tres zonas, se observa que aumentó la cantidad de cuesco vendido, también en las tres zonas. En 2013 se redujo el uso de cuesco para acondicionamiento de vías y no se reportó uso en prensas, ni para producción de compost. Como se comentó anteriormente, en 2013 se reportó la generación y uso de la ceniza producida en las calderas por la quema de fibra de mesocarpio y cuesco. En la Tabla 6 se muestran los usos y cantidad de ceniza reportados por cada zona palmera. El mayor uso dado en las zonas Norte y Oriental es la producción de compost. En la Central se observa que el mayor uso es como fertilizante, es decir dispuesto directamente en campo.

Tabla 3. Usos y cantidades de tusa en diferentes zonas palmeras encuestadas. Consolidado años 2008 y 2013 (base húmeda).

Año toma de datos en Planta beneficio	2008*		2013	
Zona	Usos	Cantidad (t)	Usos	Cantidad (t)
Norte	Campo	135.605	Campo	151.170
	Compost	38.247	Compost	75.555
	...	...	Otros	54.070
	Total	173.852	...	280.798
Central	Campo	264.935	Campo	208.924
	...	...	Compost	17.648
	...	...	Otros	25.475
	Total	264.935	...	252.047
Oriental	Campo	121.613	Campo	105.183
	Compost	34.985	Compost	87.290
	Caldera	8.330	Otros	3.528
	Cama para cerdos	1.666	...	...
	Total	166.593	...	196.001

* (García *et al.*, 2010)

Tabla 4. Usos y cantidades de fibra en las diferentes zonas palmeras encuestadas. Consolidado años 2008 y 2013 (base húmeda).

Año toma de datos en Planta beneficio	2008*		2013	
Zona	Usos	Cantidad (t)	Usos	Cantidad (t)
Norte	Caldera	82.622	Caldera	130.536
	Campo	11.945	Campo	18.859
	Compost	4.977	Compost	17.352
	...	...	Otros	15.996
	Total	99.545	...	182.744
Central	Caldera	110.996	Caldera	105.896
	Campo	42.813	Campo	47.092
	Compost	4.757	Otros	1.100
	Total	158.565	...	154.088
Oriental	Caldera	98.329	Caldera	127.271
	Campo	5.651	Campo	17.104
	Compost	9.042	Compost	10.935
	Total	113.022	...	155.309

* (Garcia *et al.*, 2010)

Tabla 5. Usos y cantidades de cuesco en las diferentes zonas palmeras encuestadas en 2013 (base húmeda).

Año toma de datos en Planta beneficio	2008*		2013	
Zona	Usos	Cantidad (t)	Usos	Cantidad (t)
Norte	Caldera	25.592	Caldera	58.230
	Venta	2.327	Venta	15.903
	Vías	7.367	Vías	3.634
	Prensas	1.939	Otros	463
	Compost	1.551	...	...
	Total	38.775	...	78.230
Central	Caldera	38.083	Caldera	47.680
	Venta	24.053	Venta	18.538
	Vías	4.677	Vías	3.539
	...	...	Otros	3.874
	Total	66.813	...	73.631
Oriental	Caldera	35.342	Caldera	39.596
	Venta	3.299	Venta	7.527
	Vías	471	Vías	113
	Compost	4.241	Otros	3.877
	Prensa	3.770	...	...
	Total	47.122	...	51.113

* (Garcia-Nunez *et al.*, 2010)

Tabla 6. Usos y cantidades de ceniza en las diferentes zonas palmeras encuestadas en 2013 (base húmeda).

Zona	Usos	Cantidad (t)	Total
Norte	Compost	2.125	4.878
	Otros	1.690	
	Vías	1.063	
Central	Otros	2.726	4.684
	Fertilizante	1.413	
	Vías	546	
Oriental	Compost	5.227	9.565
	Otros	3.996	
	Fertilizante	341	

Los usos dados al efluente generado en planta de beneficio para cada una de las tres zonas en 2013, se observan en la Tabla 7. Para las tres zonas el mayor uso es el sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) sin ningún uso posterior. En la Zona Norte y la Central, el segundo uso dado al efluente es la producción de compost, para el riego de las pilas de biomasa sólida y el tercero, es la captura de biogás. En la Zona Oriental, el segundo uso del efluente es la captura de biogás, seguido de la producción de compost.

Proyección de biomasa potencial

Teniendo en cuenta que en 2013 se procesó un total de 4.991.241 t de RFF en Colombia, y que las cantidades de biomasa mencionadas en este artículo corresponden al 72,2 % del total de esa producción, en la Tabla 8 se presenta una proyección de la cantidad de biomasa

potencial para otros usos, que se podría tener al estimar un total de 5.000.000 t de RFF procesadas en un año. Los porcentajes de cada flujo de biomasa sólida generada y el potencial para nuevos usos, obtenida durante el diagnóstico de 2013, se dejan fijos para la estimación (tusa, fibra de mesocarpio y cuesco).

En general, se estima que en 2013 se tuvo cerca de 979.000 t de biomasa potencial (base húmeda) para nuevos usos en Colombia. Esta cantidad de biomasa expresada en base seca equivale a un total de 424.895 t.

Biorrefinería (usos de biomasa de palma de aceite)

Una biorrefinería representa la diversificación de las agroindustrias existentes actualmente dando uso a la biomasa como alternativa para la producción de combustibles, productos químicos y energía (NREL,

Tabla 7. Usos y cantidades de efluente en las diferentes zonas palmeras encuestadas en 2013.

Zona	Usos	Cantidad (m ³)	Total
Norte	STAR	519.867	958.230
	Compost	348.777	
	Biogás	89.586	
Central	STAR	709.676	841.769
	Compost	76.073	
	Biogás	56.020	
Oriental	STAR	360.470	697.360
	Biogás	262.643	
	Compost	74.247	

Tabla 8. Biomasa potencial estimada para 5.000.000 toneladas RFF/año (base húmeda).

Fruto procesado (t) Estimado		5.000.000	
Unidades		%/RFF	Cantidad (t)
Biomasa sólida generada	Tusa	20,22	1.011.075
	Fibra	13,65	682.711
	Cuesco	5,63	281.571
Biomasa potencial para nuevos usos	Tusa	15,21	760.500
	Fibra	2,78	139.000
	Cuesco	1,59	79.500

2014). El desarrollo de una biorrefinería requiere la integración de módulos tecnológicos dentro de una estrategia clara para diversificar los productos, reducir el impacto ambiental y los costos de los sistemas existentes. Una estrategia para desarrollar una biorrefinería en una industria existente consiste en la adición gradual de módulos o tecnologías (térmicas, químicas, biológicas o agentes de conversión mecánicos), para diversificar los productos de biomasa (García-Pérez & Garcia-Nunez, 2013).

Uno de los factores importantes dentro del diseño de una biorrefinería es el tamaño de escala, ya que esto permite identificar el modelo de negocio que se puede implementar. Por ejemplo, para biorrefinerías que se están planeando en Estados Unidos, con biomasa proveniente del maíz, el NREL (National Renewable Energy Laboratory) estimó que el tamaño mínimo para una planta de etanol, requiere de 1.750 toneladas de biomasa seca/día (Aden *et al.*, 2008). De igual forma, en un estudio realizado por García *et al.*, (Garcia-Nunez, Pelaez-Samaniego, & Wensel, 2011), para una planta de ácido succínico, se planteó un requerimiento de 2.500 toneladas/día de biomasa seca.

Para el caso colombiano, en la Tabla 9 se presenta un estimativo de biomasa seca de acuerdo con el fruto de palma procesado en 2013. Para los cálculos se tuvo en cuenta el porcentaje en masa y la humedad de cada una de las biomásas en el total de un racimo de fruta (RFF). Adicionalmente, se estableció un supuesto de trabajo de 5.000 h/año por cada planta (dato nacional). Como puede verse, la biomasa seca total que se produciría en las cuatro zonas palmeras es de 2.039 t/día, que en comparación con

la cantidad de biomasa seca para fabricar etanol o ácido succínico en U.S.A correspondería a una sola biorrefinería en Colombia. De igual forma, en la Tabla 10 se plantea la conformación de un clúster hipotético de cinco plantas de beneficio de 30 t RFF/h cada una, con el fin de identificar la cantidad de biomasa que se podría generar en dicho clúster. Esta cantidad corresponde a 306 t/día (base seca). Para el caso de una planta individual de 30 t RFF/h, la cantidad de biomasa seca es de 86 t/día. Estas cantidades en los diferentes escenarios mostrados confirman la necesidad de tener en cuenta un modelo de negocio particular para cada uno de los casos de acuerdo con el producto final que se quiera obtener.

Por ejemplo, en un estudio que se realizó entre Cenipalma y la Universidad del Estado de Washington (wsu), a través de la tesis de Doctorado “*Evolution of palm oil mills into biorefineries*” (Garcia-Nunez, 2015), se evaluaron seis opciones de biorrefinería para una planta de 30 t RFF/h, teniendo en cuenta criterios ambientales, económicos y sociales. Como ejemplo, en la Figura 3 se observa la representación esquemática de una de esas opciones de biorrefinería, en la cual se integra a la planta de beneficio la producción de pellets y biogás. En este caso, la densificación de la biomasa a través de la producción de pellets se hace necesaria debido a que transportar sólidos de baja densidad, como la biomasa húmeda, es más costoso que el movimiento de los combustibles líquidos y gaseosos (petróleo y gas natural) (Garcia-Nunez *et al.*, 2011), (Aden *et al.*, 2008). Por lo tanto, se justifica que la compactación de la biomasa en pellets es una buena opción para el transporte y distribución de biomasa sólida, la cual será usada como combustible

fósil. En caso de que la planta de pellets sea tipo clúster, es indispensable que se evalúe la distancia entre plantas, que no debe ser mayor a 25 kilómetros, ya que se podría ver afectada la economía de las empresas (Aden *et al.*, 2008), (García-Núñez *et al.*, 2011).

Adicional al módulo de pellets, se incluyó en este concepto la captura y uso del biogás del STAR para generación de energía (García-Núñez, 2015). En la Figura 3 se observa que el generador que utiliza el biogás produce 52,7 kWh/t RFF y que el requerimiento de energía durante la captura de biogás es de 6,1 kWh/t RFF (García-Núñez, 2015). Todo el excedente de biomasa después de la producción de vapor

fue usado en la producción de pellets, que requiere de un pretratamiento y secado de la biomasa antes de iniciar la producción. Para esto se requiere una energía térmica para el secado de la biomasa hasta 10 % de humedad. Se verificó que el calor de los gases de escape del generador de biogás y el calor de los gases en la chimenea de la caldera fueran suficientes para secar la biomasa hasta el 10%. La energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de las plantas de pretratamiento y pellets fue aproximadamente 19 kWh/t RFF para cada uno de ellos (García-Núñez, 2015). Por lo tanto, la cantidad de electricidad que puede ser utilizada para la venta fuera de la planta de beneficio

Tabla 9. Estimativo potencial de producción de biomasa en base seca (toneladas).

Casos	RFF/año	Tusa (bs)	Fibra (bs)	Cuesco (bs)	Total año (bs)	Total día
Total Nacional	5.000.000	266.175	90.350	68.370	424.895	2.039
5 PB (30 t RFF/h)	750.000	39.926	13.553	10.256	63.734	306
1 PB (30 t RFF/h)	150.000	7.985	2.711	2.051	12.747	61

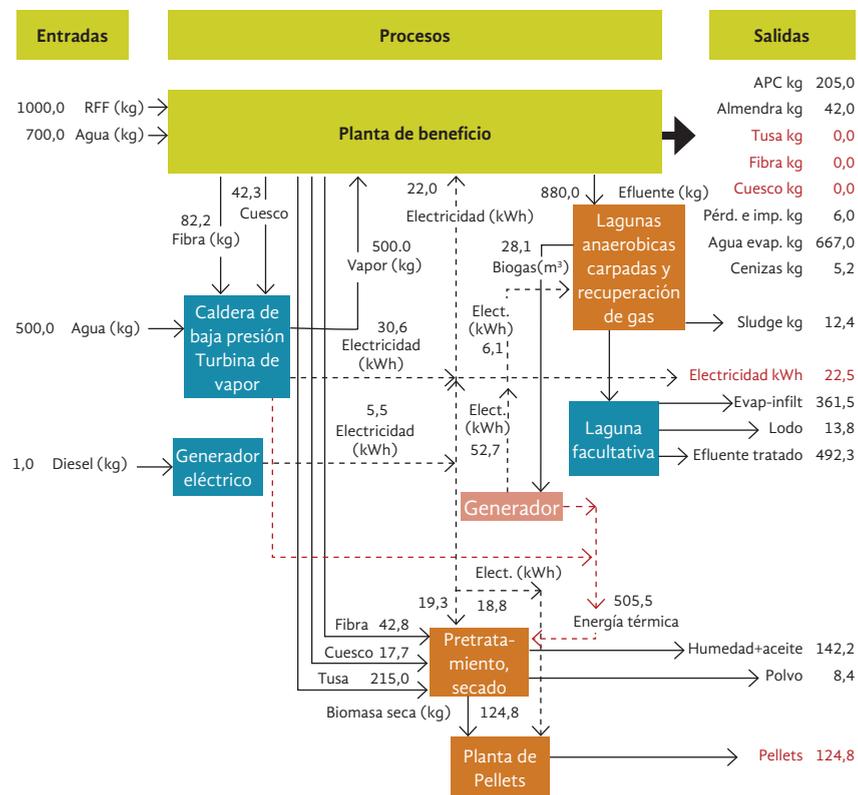


Figura 3. Representación esquemática de una biorrefinería de palma de aceite con producción de pellets y biogás.

Fuente: García-Núñez (2015).

fue de 22,5 kWh/t RFF. Se debe tener en cuenta que si no hay producción de electricidad a partir de la planta de biogás, la energía necesaria para el proceso de peletización y las plantas de pretratamiento y secado sería insuficiente. La cantidad de pellets que se pueden producir es de alrededor de 125 kg/t RFF. Detalles específicos sobre esta opción de biorrefinería se pueden encontrar en Garcia-Nunez (2015).

Caracterización fisicoquímica de la tusa

Las características y composiciones de la biomasa son los factores que determinan su uso potencial

en diferentes opciones de biorrefinería. La Tabla 10 muestra el promedio de los datos obtenidos. Al realizar una comparación con otros datos reportados en literatura, se tiene que Garcia-Nunez, 2015, realizaron una revisión bibliográfica donde identificaron que la tusa tiene 5,70 % de cenizas (3.53 D.S), este dato es menor al identificado por el presente estudio que arrojó un 7,37 % de cenizas totales en la tusa muestreada.

Con la información de la Tabla 10 es posible contar con datos nacionales de las características de la tusa obtenida en planta de beneficio, lo que permite la búsqueda de nuevas alternativas de uso como la

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica de la tusa para 2013.

Análisis	Promedio	Desviación estándar
% Sólidos	92,11	5,27
% Cenizas totales	7,37	1,35
% Cenizas estructurales	3,69	2,82
% Proteína total	3,34	0,43
% Proteína estructural	2,93	0,58
% Extractivos totales	25,23	3,66
% Extractivos en agua	15,01	3,81
% Extractivos en etanol	5,55	4,96
% Extractivos en hexano	1,35	0,51
% Sacarosa	0,25	0,15
% Sacarosa estructural	0,25	0,15
% Glucosa libre	0,09	0,07
% Fructosa libre	0,37	0,11
% Inorgánicos estructurales	2,91	0,89
% Lignina total	18,12	2,24
% Lignina insoluble en ácido	15,28	1,91
% Lignina soluble en ácido	3,11	0,28
% Lignina estructural	19,15	1,76
% Glucano	32,58	4,19
% Glucano estructural	37,86	1,22
% Xilano	20,41	1,83
% Xilano estructural	21,97	0,48
% Galactano	1,24	0,18
% Galactano estructural	1,32	0,14
% Arabinano	2,32	0,86
% Arabinano estructural	3,07	0,67
% Acetato	4,42	0,97
% Acetato estructural	4,12	0,87
Balance de masa	102,58	5,60

producción de etanol, dado su contenido de azúcares; sin embargo, se tiene una limitación por la cantidad de material fibroso (celulosa y lignina), donde están contenidos los azúcares y que requiere de la adición de un coctel de enzimas para descomponer dicho material en sus unidades de azúcar para posteriormente ser convertidos en etanol.

El contenido de lignina en la tusa fue de 18,12 %, mayor que el reporte de la literatura descrito por García-Núñez *et al.*, 2015, que es de 15,45 %. El contenido de celulosa y hemicelulosa se puede evidenciar en los polisacáridos provenientes de los mismos como son glucano, xilano y arabinano, los cuales fueron promediados respectivamente así: 30,38; 20,12 y 1,56 %.

Conclusiones

En Colombia anualmente se cuenta con más de 424.000 toneladas de biomasa seca (tusa, fibra de mesocarpio y cusco) y más de 1,5 millones de metros cúbicos de efluentes para ser utilizados como materia prima en tecnologías innovadoras (pellets, compost, biocarbón, energía eléctrica, entre otras), amigables con el ambiente y que además sean económicamente viables. La selección de nuevas tecnologías dependerá del tamaño de escala que se requiera de acuerdo con el producto

final deseado y competencia con los usos convencionales de la biomasa en las plantas de beneficio.

La caracterización fisicoquímica de la biomasa permite identificar los principales componentes y definir su potencial uso en diferentes productos. En el caso de la tusa, por su bajo contenido de lignina (18,12 %), sus cantidades de celulosa y hemicelulosa y su bajo poder calorífico podría emplearse en procesos fermentativos (etanol).

Las tecnologías de conversión deben ser planeadas teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa para pensar en conformación de clúster o trabajo individual por planta de beneficio, además de requerimientos adicionales como pretratamientos de la biomasa, producto final, logística de transporte, distancias, cantidad de biomasa seca, entre otros.

Agradecimientos

A todos los directores, jefes, ingenieros y personal de las plantas de beneficio de las zonas palmeras Norte, Oriental y Central que hicieron posible la recolección de la información y de las muestras de tusa. Al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, y al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) por cofinanciar este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Abnisa, F., Daud, W. M., Husin, W. N. W., & Sahu, J. N. (2011). Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1863-1872. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.033>
- Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., ... Lukas, J. (2008). *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover* (Vol. 8). National Golden, CO: Renewable Energy Laboratory.
- Arrieta, F., Teixeira, F., Yáñez, E., Lora, E., & Castillo, E. (2007). Cogeneration potential in the Colombian palm oil industry: Three case studies. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 503-511. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.016>
- Fedepalma. (2014). *Anuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo*. Bogotá: Fedepalma.
- García-Núñez, J. A., Cárdenas M, M., & Yáñez A, E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 31(2), 41-48.

- García-Pérez, M., & Garcia-Nunez, J. A. (2013). Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. *Palmas*, 34(Especial, Tomo 2), 66-84.
- Garcia-Nunez, J. A., Pelaez-Samaniego, M. R., & Wensel, P. C. (2011). *Succinic Acid Plant Design*. Pullman, WA.
- Garcia-Nunez, J. A. (2015). *Evolution of palm oil mills into biorefineries*. (Ph.D. Thesis). Washington State University, USA.
- ICA-Cenipalma. (2002). *Plan de manejo de la mosca de establo Stomoxys Calcitrans*. Bogotá: ICA-Ceinpalma.
- Kamm, B., & Kamm, M. (2004). Principles of biorefineries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 64(2), 137-45. <http://doi.org/10.1007/s00253-003-1537-7>
- Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P., & Shukla, A. (2015). A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45(MAY), 530-539. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.007>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Nilsson, D., Bernesson, S., & Hansson, P. A. (2011). Pellet production from agricultural raw materials - A systems study. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 679-689. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.016>
- NREL. (2014). *What is a biorefinery?* US Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
- Prasertsan, S., & Sajjakulnukit, B. (2006). Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers. *Renewable Energy*, 31(5), 599-610. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.005>
- Salomon, M., Gómez, M. F., Erlich, C., & Martin, A. (2013). Pelletization: an alternative for polygeneration in the palm oil industry. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), 213-229. <http://doi.org/10.1007/s13399-013-0075-5>
- Schuchardt, F., Darnoko, D., & Guritno, P. (2002). Composting of empty oil palm fruit bunch (EFB) with simultaneous evaporation of oil mill waste water (POME). In *International Oil Palm Conference, nusa Dua, Bali, Indonesia* (pp. 1-9).
- Tarmezee, A., Noriznan, M., Samsu, A., & Sulaiman, A. (2014). Effects of aeration rate on degradation process of oil palm empty fruit bunch with kinetic-dynamic modeling. *Bioresource Technology*, 169, 428-438.
- Van Ree, R., & Annevelink, B. (2007). *Status Report Biorefinery 2007* (Agrotechno). Wageningen.