Peletización de tusa y fibra de palma africana torrefacta: evaluación del efecto de la temperatura de peletización y de torrefacción en la peletización y la calidad de los pélets*

Pelletizing Torrefied Oil Palm Empty Fruit Bunches and Mesocarp Fiber: Evaluation of the Effect of the Pelletizing and Torrefaction Temperatures on the Pelletizing Process and the Quality of Pellets

CITACIÓN: Zapata, A., Talero, G., Rincón, S., & González, A. (2017). Peletización de tusa y fibra de palma africana torrefacta: evaluación del efecto de la temperatura de peletización y de torrefacción en la peletización y la calidad de los pélets. *Palmas*, *38*(2), 64 - 82.

PALABRAS CLAVE: torrefacción, peletización, pélets torrefactos, densidad energética, densidad a granel, tusa y fibra de palma.

Keywords: Torrefaction, pelletizing, torrefied pellets, energy density, bulk density, empty fruit bunch, fiber, oil palm.

RECIBIDO: febrero de 2017.

APROBADO: marzo de 2017.

*Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

ANDRÉS J. ZAPATA S.

Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá ajzapatas@unal.edu.co

GABRIEL F. TALERO ROJAS

Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá gftaleror@unal.edu.co

Sonia Rincón Prat

Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá slrinconp@unal.edu.co

ANDRÉS GONZÁLEZ HASSIG Regeneración Ltda. andres.gonzalez@regeneracion.com.co

Resumen

El cultivo de palma africana en Colombia genera cerca de 1,5 millones t/año de residuos sólidos. Estos residuos pueden aprovecharse para la producción de energía. Sin embargo, la alta humedad de la tusa y la fibra induce a ineficiencias en los procesos de transporte y almacenamiento. El proceso de torrefacción de estos residuos ha presentado resultados prometedores al optimizar las propiedades fisicoquímicas de la tusa y la fibra, sin embargo, la densidad a granel del material torrefacto es baja comparada con de la biomasa virgen. La integración de las tecnologías de torrefacción y posterior peletización busca garantizar la producción de un material con un poder calorífico mayor al de la biomasa virgen y una densidad a granel adecuada para optimizar el transporte de fibra y tusa torrefacta. A la fecha no se cuenta con información previa de peletización de tusa o fibra torrefacta de variedades colombianas. El presente artículo expone los resultados preliminares del estudio y la experimentación en laboratorio de la peletización de tusa y fibra torrefacta proveniente de cultivos localizados en la región de los Llanos Orientales de Colombia. El proceso de torrefacción de las muestras de tusa y fibra se realiza en un horno eléctrico por bache, mientras que el de peletización se lleva a cabo en una peletizadora de pistón con dado extrusor. Por otra parte, la torrefacción de tusa y fibra se realiza entre 220 y 270 °C, mientras que la peletización del material torrefacto se realiza con tamaños de partícula entre 0,560 y 0,230 mm y con temperaturas de peletización de 25, 100 y 150 °C. En la experimentación se concluye que es posible realizar pélets de material torrefacto de tusa y de fibra con características adecuadas para cumplir con los estándares internacionales y aumentando casi 10 veces la densidad energética con respecto al material virgen. Es posible obtener pélets de excelente calidad a temperatura de peletización de 100 °C.

Abstract

Oil palm crops in Colombia generate almost 1.5 million t/year of wastes. Those wastes can be used for energy generation. Nevertheless, the high moisture content of empty fruit bunches (EFB) and mesocarp fiber causes inefficiencies on transport and storage. Torrefaction of biomass has presented extraordinary results by optimizing physical and chemical properties of EFB and fiber. Besides, bulk density of torrefacted material still been low compared with raw biomass. The integration of torrefaction and pelletizing awards the production of a material with a higher heating value than raw biomass and a bulk density appropriated for optimizing EFB and fiber transportation. No previous study has been published about the pelletizing of torrefied EFB and fiber of Colombian oil palm species. In that sense, this paper exposes preliminary results of pelletizing torrefied EFB and fiber on laboratory scale. Torrefaction of EFB and fiber are made in an electric furnace in batch mode, while pelletizing of torrefied material is made with 0,560 and 0,230 mm particle size and three pelletizing temperatures: 25, 100 y 150 °C. Experimental results indicate the possibility of pelletizing torrefied Colombian EFB and fiber with the accurate performance awarded by international standards and by increasing energy density over 10 times compared with raw biomass. In brief, it is possible to produce excellent quality pellets with pelletizing temperatures near 100 °C.

Introducción

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una de las especies de palma que más se cultiva en Colombia para la producción de aceite. El área cultivada ha aumentado de 111.380 ha en 1990 (Fedepalma & Cenipalma, 2013) a 466.185 ha en 2015 (Fedepalma, 2016a), consolidándose como el cuarto cultivo de mayor extensión del país después del café, el plátano y la caña de azúcar. La producción de aceite de palma en el 2015 fue de 1.272.523 toneladas (Fedepalma, 2016b), generando cerca de 97,5 millones de toneladas de biomasa residual sólida (Arevalo, Ramirez, & Garcia-Nunez, 2015), la cual se divide en tres tipos de residuos principales: tusa o racimos vacíos (20 %), fibra de mesocarpio (13 %) y cuesco (6 %).

El uso energético de esta biomasa se perfila como una alternativa de aprovechamiento. Sin embargo, este se ve en muchos casos limitado por condiciones técnicas y operativas de los procesos de transformación (Talero, Rincón & González, 2017). Por esta razón, la evaluación de alternativas tecnológicas que permitan lograr un procesamiento adecuado de esta

biomasa residual constituye un aspecto determinante para su aprovechamiento.

Uno de los actuales interrogantes sobre el uso energético de subproductos del sector palmicultor corresponde a los métodos de almacenamiento y transporte (Talero *et al.*, 2017). Estos subproductos presentan un alto contenido de humedad y son altamente higroscópicos, por lo que el almacenamiento de biomasa húmeda por largos periodos compromete su calidad debido al proceso de degradación biológica (Weiland, Guyonnet & Vera, 2003). Adicionalmente, el transporte de biomasa virgen resulta ser un proceso ineficiente debido a su alto contenido de humedad y a su baja densidad a granel, parámetros que aumentan los costos de transporte.

La cosecha de palma africana en Colombia es estacionaria, ocasionando que se cuente con un potencial energético variable durante el año, lo cual hace necesario implementar un sistema de almacenamiento que garantice un abastecimiento continuo de los subproductos, conservando las características adecuadas para su posterior transformación. De acuerdo con estudios realizados por Fedepalma (2016c), es posible estimar un tiempo de almacenamiento de biomasa cercano a dos meses, con el fin de garantizar un abastecimiento continuo de energía en una planta de extracción durante todo el año.

Es en este punto donde procesos como la torrefacción y la peletización se convierten técnica y económicamente interesantes. Con estos procesos, los subproductos reportan una considerable reducción en la descomposición biológica (Weiland *et al.*, 2003), así como un aumento en su poder calorífico y densidad (Tumuluru *et al.*, 2011), lo cual posibilita el almacenamiento de residuos durante largos periodos (en muchos casos del orden de años).

La torrefacción es un proceso termoquímico similar al utilizado en el tostado de café, donde se calienta la biomasa en ausencia de oxígeno a una temperatura entre 200-300 °C por un lapso entre 30 minutos y 1 hora y con una tasa de calentamiento inferior a 50 °C/min a presión atmosférica (Tumuluru *et al., 2011*). Este calentamiento ocasiona la pérdida del agua contenida en la biomasa y modifica la estructura química de los azúcares presentes en ella (principalmente la hemicelulosa), generando un producto parcialmente carbonizado (Bergman, Boersma, Zwart & Kiel, 2005). De acuerdo con estudios de Tumuluru *et al.* (2011) y Stelte *et al.* (2011a), la torrefacción aumenta el poder calorífico de la biomasa al modificar químicamente su estructura celular (aumenta su contenido de carbono).

Por su parte, la peletización es un proceso de densificación donde la biomasa incrementa su densidad a granel mediante el uso de presión mecánica. Este incremento de la densidad a granel es acompañado de mecanismos de aglomeración de partículas, los cuales permiten consolidar una geometría cilíndrica característica de un pélet. Los contenidos de humedad y de lignina en la biomasa afectan directamente el proceso de peletización, ya que favorecen la formación de puentes de Van der Walls y puentes de hidrógeno entre las partículas, lo cual se traduce en una aglomeración más efectiva (Kaliyan & Vance-Morey, 2009). De acuerdo con Kaliyan & Vance-Morey (2009), la peletización requiere de un bajo tamaño de partícula (generalmente menor a 1 mm) para garantizar una mayor compactación y aglomeración. Por esta razón un proceso de peletización siempre es precedido de un proceso de molienda.

Durante un proceso convencional de peletización se presenta una pérdida considerable de humedad de la biomasa debido al incremento de temperatura ocasionado por la fricción entre las partículas. Autores como Serrano et al. (2011) reportan que la temperatura de la biomasa al salir de los canales de la máquina peletizadora oscila entre 70 y 80 °C. La pérdida de humedad en el proceso de peletización reduce principalmente las fuerzas de interfase y la presión de capilaridad entre las partículas y los líquidos presentes en la biomasa (humedad y extractivos), reduciendo de esta manera la aglomeración entre partículas. Por esta razón, peletizar biomasa con un contenido de humedad inferior a 15 % ocasiona problemas de baja durabilidad y baja resistencia mecánica de los pélets (Samuelsson, Larsson, Thyrel & Lestander, 2012).

El contenido de lignina en la biomasa es otro parámetro importante en la peletización, ya que la lignina actúa como agente aglomerante y mejora las propiedades mecánicas de los pélets. La lignina es un polímero fenólico complejo que penetra los espacios de la pared celular entre la celulosa, la hemicelulosa y la pectina presente en la biomasa (Tumuluru et al., 2011). De acuerdo con Stelte et al. (2011b), el proceso de calentamiento, extrusión y enfriamiento de la biomasa durante la peletización suaviza, fluidiza y endurece la lignina, mejorando la aglomeración entre partículas. La temperatura a la cual un polímero se suaviza y pasa de un estado vítreo a plástico es llamada "temperatura de transición vítrea - T_{g} ". Este proceso es efectivo solo si la temperatura de peletización es cercana a la temperatura de transición vítrea. Sin embargo, la temperatura de transición vítrea es altamente dependiente del contenido de humedad y de la presión de peletización. De acuerdo con Stelte et al. (2011b), la temperatura de transición vítrea - T_{a} para peletización de biomasa con 8 % de humedad, oscila entre 60 y 95 °C, pero para biomasa seca el valor de $T_{\scriptscriptstyle \sigma}$ puede estar próximo a 160 °C (Bouajila, Dole, Joly & Limare, 2006).

Debido a los mecanismos de devolatilización de gases, en el proceso de torrefacción se generan estructuras porosas en las partículas del material torrefacto, las cuales reducen considerablemente su densidad a granel (comparada con la densidad de la biomasa). Autores como Bergman *et al.* (2005) han afrontado esta problemática al "peletizar material torrefacto", lo cual no solo permite aumentar el poder calorífico de la biomasa sino también aumentar considerablemente su densidad a granel.

La integración de las tecnologías de peletización y torrefacción ha sido investigada en la última década por autores como Bergman *et al.* (2005), Stelte *et al.* (2011a), Peng, Bi, Sokhansanj & Lim (2013) y Mobini *et al.* (2014). En estos estudios se reportan dificultades técnicas al peletizar el material torrefacto mediante procesos tradicionales de peletización. El secado agresivo de la biomasa en la torrefacción reduce considerablemente la humedad y su capacidad de absorber agua, afectando con ello los procesos de aglomeración entre partículas. Una baja aglomeración entre partículas durante la peletización ocasiona una inadecuada calidad de los pélets fabricados para su almacenamiento y transporte, es decir, una baja durabilidad o resistencia mecánica de los pélets de material torrefacto (Stelte *et al*, 2011a). De acuerdo con Bergman *et al* (2005), aunque la torrefacción reduce el contenido de humedad de la biomasa, también aumenta el contenido de lignina del material a peletizar lo que puede favorecer el proceso de peletización, siempre y cuando se cuente con la temperatura de peletización adecuada para alcanzar la transición vítrea de la lignina.

Propósito de la investigación

La peletización de material torrefacto ha ganado interés en la última década debido a las propiedades de la biomasa descritas anteriormente. Aunque autores como Na *et al.* (2013), Peng *et al.* (2013) y Uemura *et al.* (2011) han reportado trabajos sobre la peletización de material torrefacto de residuos maderables y de palma africana, no se cuenta con información del proceso en variedades colombianas, así como tampoco se tiene certeza sobre parámetros del proceso tales como la temperatura de peletización o el tamaño de partícula.

El propósito del proyecto desarrollado por el Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Proceso (BIOT), de la Universidad Nacional de Colombia, en conjunto con la empresa Regeneración Ltda. y Fedepalma, es realizar una evaluación de la factibilidad técnica de fabricación de pélets de tusa y fibra de palma de aceite torrefactos, así como determinar la temperatura de peletización y tamaño de grano más adecuados para su procesamiento.

Materiales y métodos

Materia prima y preparación de material torrefacto

Dos tipos de residuos de la extracción de aceite de palma son evaluados en este estudio: racimo vacío o tusa y fibra de mesocarpio del fruto de la palma de aceite. Estos residuos son recolectados en una planta de beneficio localizada en el departamento del Meta, Colombia. El material virgen es sometido a un proceso de adecuación seguido de torrefacción, molienda y caracterización fisicoquímica y granulométrica. A continuación se realiza una descripción de cada una de estas etapas.

Adecuación del material virgen

Se seleccionan 4 kg de tusa y fibra de palma africana virgen. Las muestras se secan en un horno eléctrico a 105 °C durante 18 h y son molidas en un molino de martillo marca Agico CF420 con una malla de 2 mm y en un molino de cuchillas marca *Retsch SM-100 NEU* con malla de 1 mm. Posteriormente, las muestras son tamizadas con un tamaño de partícula entre 250 y 1000 μ m (ASTM E11-87 No. 16 y No. 60). Las muestras son almacenadas en recipientes sellados y luego refrigeradas para su posterior torrefacción.

Torrefacción

Se realiza torrefacción a muestras de 500 g de tusa o fibra a temperaturas de 220-270 °C durante 30 ± 10 min de tiempo de residencia a la temperatura especificada para cada biomasa. La torrefacción se realiza en un horno cilíndrico horizontal (14 cm de diámetro interno y 94 cm de largo) calentado por medio de resistencias eléctricas. La temperatura del horno se controla por medio de un controlador marca Watlow EZ-ZO-NE. Las muestras son calentadas con una rampa de calentamiento de 10 \pm 3 K/min hasta la temperatura de torrefacción: 220 ± 15 °C y 270 ± 20 °C, dependiendo del tratamiento de torrefacción a realizar. La muestra de material seco y molido es introducida en el horno de torrefacción y se inicia la rutina de calentamiento hasta la temperatura de torrefacción deseada. Se utiliza nitrógeno grado industrial como gas de arrastre con un flujo volumétrico de 5 l/min. Los gases y compuestos orgánicos generados por las reacciones de pirolisis son succionados con una bomba y pasan a través de un ducto de acero inoxidable el cual es calentado mediante resistencias eléctricas a una temperatura de 350 °C.

Los compuestos orgánicos de torrefacción son condensados utilizando intercambiadores de calor

y filtros de aserrín. Los gases no condensados son quemados y dispuestos al ambiente mediante una chimenea. Se controla la presión antes de la bomba peristáltica en un rango de 5 a 10 PSI por encima de la presión atmosférica. Al finalizar la rutina de calentamiento se deja enfriar el horno de torrefacción con la muestra hasta alcanzar la temperatura ambiente con flujo de nitrógeno. La muestra es luego extraída del horno de torrefacción y pesada nuevamente con el fin de determinar el rendimiento másico.

Molienda y caracterización de material torrefacto

Las muestras de material torrefacto son inicialmente caracterizadas por medio de la determinación de su análisis próximo y su poder calorífico. La caracterización próxima de las muestras de material torrefacto consiste en la determinación del contenido de humedad, el contenido de ceniza y el contenido de material volátil de acuerdo con las normas EN 14774-3, EN 14775 y EN 15148, respectivamente; por su parte, el contenido de carbono fijo se determina por diferencia. El poder calorífico de las muestras sólidas se determina de manera experimental por medio de una bomba calorimétrica de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D 240 -14.

Para cada tratamiento de torrefacción se realizan dos moliendas en un molino de cuchillas marca Retsch SM-100 NEU con dos mallas, una de 1 mm y otra de 0.25 mm, tras lo cual se obtienen dos niveles de tamaño de partícula para cada tratamiento de torrefacción: tamaño de partícula grande (G) y tamaño de partícula pequeño (P). Para los niveles de tamaño de partícula G y P de tusa y fibra torrefacta a 270 °C se realiza una caracterización de tamaño de partícula de acuerdo con la norma ASTM E11 – 78. La determinación del tamaño medio de partícula del material torrefacto para peletización se realiza utilizando la metodología de la norma ISO 9276-2.

Al finalizar la preparación de las muestras para peletización se cuenta con 8 tipos de muestras obtenidas, variando el tipo de material virgen (tusa o fibra), la temperatura de torrefacción (220 °C o 270 °C) y el tamaño de partícula de material torrefacto (G y P). Las muestras son almacenadas en recipientes sellados y refrigeradas para su posterior uso en la labor experimental.

Montaje experimental para peletización

En la Figura 1 se presenta un esquema de la máquina peletizadora junto con un detalle del dado de extrusión utilizado en el presente trabajo. Esta consta de un émbolo superior que produce una fuerza máxima de 186 kN. La posición y presión del émbolo se registran cada 0,025 s por medio de un Arduino UNO. La posición se mide utilizando un sensor de resistencia marca Thermosystems PL250 T6 y la presión utilizando un sensor piezo-eléctrico marca VEGABAR 17 conectado a la línea de aceite que alimenta el émbolo superior.

El sistema de adquisición de datos registra la presión de la línea de aceite con una precisión de más o menos un bar. Para calcular la presión que ejerce el émbolo que empuja la biomasa se hace una relación de las áreas del embolo superior y el émbolo que presiona el material a peletizar. Esta última es la que se reporta en los experimentos. El émbolo que empuja la biomasa tiene un diámetro de 29 mm y obliga a la biomasa a fluir por un dado con 7 agujeros de 6 mm de diámetro (Figura 1, derecha). La temperatura de la camisa se eleva utilizando un sistema de resistencias eléctricas.

Plan y procedimiento experimental

En la Tabla 1 se presenta el plan experimental desarrollado. Se utilizó un diseño de experimentos factorial 2^3 , con dos réplicas para cada material (M), cuyos parámetros son temperatura de torrefacción (Tt = 220 °C y 270 °C), tamaño de grano (Tg = G y P) y temperatura de peletización (Tp = 100 °C y 150 °C). Como se puede observar, se plantea un nivel a una temperatura de 25 °C con el objetivo de complementar el análisis del efecto de la temperatura de peletización en las propiedades de los pélets. Dicho nivel de temperatura adicional solo se realiza para

69

Figura 1. Esquema de la máquina peletizadora. Izquierda: diagrama general de la máquina peletizadora. 1) Recámara con émbolo superior; 2) columnas de apoyo; 3) émbolo; 4) camisa; 5) base; 6) bomba de aceite; 7) entrada de aceite al émbolo superior; 8) salida de aceite al émbolo superior; 9) tanque de aceite. Derecha: zona detalle A: Zona de compresión y extrusión de pélets (dimensiones en mm.). 1) Placa inferior; 2) base brida unión placa inferior y cámara de compresión; 3) dado extrusor; 4) cámara de compresión; 5) pistón de peletizadora; 6) placa superior.



Tabla 1. Plan ex	perimental de	peletización
------------------	---------------	--------------

Material	Temperatura de torrefacción / °C	Temperatura de peletización / °C)	Tamaño de grano	
		100	Р	
	220	100	G	
	220	150	Р	
Fibra		150	G	
FIDIA		100	Р	
	270	100	G	
		150	Р	
		150	G	
		100	Р	
	220	100	G	
		150	Р	
		150	G	
Ture		100	Р	
Tusa	270	100	G	
	270	150	Р	
		150	G	
	220	Ambiente (25 °C)	A	
	270	Ambiente (25 °C)	A	

la tusa torrefacta a 220 y 270 °C con un tamaño de partícula de material torrefacto para peletización obtenido al mezclar en partes iguales el tamaño de grano pequeño y el grande. Este nivel de tamaño de grano se denomina A.

Para la realización de las pruebas se sigue el siguiente protocolo: se pesa una muestra de 40 g de material torrefacto, el cual se introduce en un horno durante el tiempo requerido para llegar a la temperatura de la muestra deseada (100 o 150 °C), previamente la camisa de la máquina peletizadora se ha precalentado. La muestra precalentada se carga a la máquina y se acciona el émbolo que obliga al material a fluir por los canales del dado, tomando como pélets el material que queda en el dado al final de la prueba. Durante la peletización se registra el desplazamiento del pistón y la presión ejercida por el sistema hidráulico. La presión de peletización máxima corresponde al valor medido 2 mm antes de llegar al final de la carrera del émbolo.

Caracterización de pélets

Los pélets se caracterizan por medio de la determinación del contenido de humedad, la densidad a granel, la durabilidad y la densidad energética. A continuación se describen los procedimientos utilizados.

El contenido de humedad se determina utilizando el procedimiento descrito en la norma EN 14774-3 *Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis.* Se tomaron tres muestras de 1g de pélets de fibra y tusa al azar, los cuales fueron luego pulverizados hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 1 mm. Las muestras se introducen en un horno a 105 °C hasta que la masa se estabiliza. Se mide la masa final e inicial y se reporta el porcentaje de masa perdido en el proceso como el porcentaje de humedad de la muestra; este método es el mismo usado para determinar la humedad de la muestra de material torrefacto sin peletizar.

Para determinar la densidad a granel de los pélets se utilizó un recipiente de aluminio con diámetro interno de 52,50 mm y una altura de 72,15 mm que cumple la relación de diámetro altura de la norma EN 15103 – *Solid biofuels -Determination of bulk density.* Debido a que en el montaje experimental se producen solo 7 pélets por prueba no se puede llenar por completo el recipiente con un solo bache, por lo que se ejecutan varios baches de pélets hasta que se producen los suficientes para llenar el recipiente por completo. Luego, se determina manualmente el número de pélets que caben en el recipiente de aluminio. Para el análisis se asume que el volumen entre pélets no varía de manera significativa con los parámetros de fabricación. Por lo tanto, independientemente de las condiciones de fabricación de los pélets, siempre cabrán la misma cantidad de estos en el recipiente.

Para verificar si la geometría de los pélets no varía de manera significativa con los parámetros de elaboración, se midió el diámetro y la longitud de todos los pélets elaborados en el presente trabajo, mediante un pie de rey con precisión de 0,05 mm. Tras esta labor se encontró que, independientemente del material o parámetros de elaboración, los pélets tuvieron un diámetro dentro del rango de 6,05 \pm 0,05 mm, y una longitud de 21,15 \pm 0,45 mm. Estos resultados confirman la suposición de que la geometría no se ve afectada por los parámetros de elaboración de los pélets.

Para determinar el número de pélets que caben en el recipiente, este fue llenado con pélets provenientes de todos los experimentos, siguiendo el procedimiento descrito en la norma (procedimiento realizado en triplicado). Luego de esto se determinó que en promedio el recipiente contiene 153 ± 1 pélets (verificados manualmente). Para calcular la masa que tendrían 153 pélets elaborados con las condiciones de un bache determinado, se pesan los 7 pélets de un bache y se divide entre el número de pélets, con lo cual se obtiene el peso promedio de un pélet para ese bache, luego, este valor se multiplica por 153 y se obtiene la masa de pélets que ocuparía el volumen del recipiente. De esta manera se llegó a la Ecuación 1, con la que se estima la densidad a granel Dar de los pélets producidos en un bache, donde m_u es la masa promedio en kg de un solo pélet del bache a evaluar. Para estas mediciones se utilizó una balanza referencia Ohaus Adventurer con una precisión de 1 mg. El volumen del recipiente Var es de 0.000157 m³. Este volumen se determina llenando el recipiente de agua, midiendo la masa de agua contenida en el recipiente y calculando el volumen asumiendo una densidad del agua de 1 kg/dm3.

$$D_{ar} = \frac{153m_u}{V_{ar}}$$
(Ec. 1)

Por otra parte, la durabilidad es la capacidad de los pélets de ser transportados sin detrimento a su integridad física. Esta variable se determina calculando un porcentaje de masa de pélets con calidad aceptable, después de someter una muestra de pélets a un proceso que simula las cargas a las que se someterán los pélets durante las etapas de transporte, carga y descarga. El procedimiento utilizado para determinar la durabilidad se describe en el trabajo de Zapata (2016). Los pélets se hacen pasar por una malla de 5 mm donde se remueven finos que puedan estar adheridos; lo que queda en la malla se pesa utilizando una balanza Ohaus Adventurer con una precisión de 1 mg, este valor se toma como la masa inicial. Los pélets se introducen en una bolsa de tela de dimensiones 35 mm por 35 mm y se dejan caer 5 veces desde una altura de 4 m sobre un piso de cerámica. Posteriormente, se hace pasar el contenido de la bolsa por la misma malla de 5 mm y se pesa lo que queda en esta. El valor obtenido corresponde a la masa final de pélets. La durabilidad se calcula determinando el porcentaje de masa que queda al final del proceso con respecto al inicial.

La densidad energética de un combustible (*DE*) es un indicador que permite cuantificar el contenido energético liberado en la combustión por unidad de volumen y relaciona la densidad a granel y el poder calorífico inferior de los pélets de material torrefacto. Esta se calcula de acuerdo a la Ecuación 2.

$$DE_{hs} = D_{ar}X PCI_{pellet,bs}$$
 (Ec. 2)

Debido a que el poder calorífico del material torrefacto no cambia durante el proceso de peletización (la peletización es un proceso mecánico y no ocurre una degradación térmica en este proceso), se asume que el poder calorífico inferior de los pélets de material torrefacto es igual al reportado para el material torrefacto sin peletizar.

Los resultados de la caracterización de los pélets son posteriormente analizados con una prueba estadística de análisis de varianza – ANOVA, la cual es ejecutada con el programa estadístico *R*. Para la ejecución de la prueba ANOVA, se consideran como variables respuesta la durabilidad y la densidad a granel de los pélets. Adicionalmente, se utilizan los siguientes parámetros experimentales: Material (M), Temperatura de torrefacción (Tt), Tamaño de grano (Tg), temperatura de peletización (Tp) y sus interacciones.

Energía consumida durante la peletización

La energía consumida en el proceso de peletización se determina a partir de la relación entre el desplazamiento y la presión ejercida en el pistón. Una curva característica de variación de presión de peletización con el desplazamiento del pistón se presenta en la Figura 2, donde se identifican tres zonas principales del proceso: compactación, compresión y extrusión. La compactación es la zona donde se reacomodan las partículas presentes en la muestra pero no sufren una deformación plástica, ocasionando un comportamiento principalmente lineal. La zona de compresión es la región en la que las partículas sufren una deformación plástica debida a la presión ejercida pero el material no fluye por los agujeros del dado extrusor. La zona de extrusión es la región donde el material de prueba comienza a fluir por el dado extrusor y se visualiza una caída de presión por dicho flujo. Entre la zona de compresión y extrusión se observa un máximo de presión ocasionado por la caída de presión en la última etapa del proceso.

Con la curva presión en función del desplazamiento es posible estimar la demanda de energía mecánica de peletización de acuerdo con la Ecuación 3.

$$\Delta E_{peletización} = \int_{x=0mm}^{x=228mm} P_x A_{piston} dx = \sum_{x=0mm}^{x=228mm} P_x A_{piston} \Delta x \text{ (Ec. 3)}$$

Donde $\Delta E_{peletización}$ corresponde a la energía de peletización en MJ; P_x corresponde a la presión de peletización en una posición *x* de la carrera de desplazamiento; Δx corresponde al ancho de desplazamiento utilizado en la integración numérica; *A*_{piston} corresponde al área del pistón, la cual equivale a 674 mm².

Resultados y discusión

Caracterización de material virgen y torrefacto

Los resultados de la caracterización de la tusa y fibra virgen y torrefacta utilizados en el presente estudio son resumidos en la Tabla 2. Al comparar los resultados ob-





Figura 3. Distribución de tamaño de partícula de tusa y fibra torrefacta a 220 y 270 °C. Distribución de tamaño de partícula para tratamientos "Tamaño de grano - G" (izquierda); distribución de tamaño de partícula para tratamientos "Tamaño de grano - P" (derecha).





tenidos en la caracterización de los residuos en este estudio respecto a los valores reportados por Talero *et al.* (2017), Uemura *et al.* (2011) y Vassilev *et al.* (2010), se resalta que los valores se encuentran dentro de los rangos reportados. El poder calorífico de la tusa y de la fibra virgen es casi 1 MJ/kg menor al reportado en la literatura. El contenido de material volátil de la fibra es 8 % mayor al reportado por Talero. Adicionalmente, el contenido de ceniza en la tusa es mayor para las especies reportadas por Uemura o Talero. En todos los tratamientos presentados en la Tabla 2 se observa un aumento en el poder calorífico inferior y un contenido de carbono fijo al aumentar la temperatura de torrefacción. La torrefacción de tusa a 270 °C presenta el mayor valor de poder calorífico de todos los tratamientos experimentales.

En la Figura 4 se presenta la distribución de tamaño de partícula para los tratamientos de tusa y fibra "Tamaño de grano - G" y "Tamaño de grano – P", con

73

Código	Piemese	Composició	n próxima (base se	Poder calorífico (base seca)		
	DIOMASA	Material volátil [%]	Carbono fijo [%]	Ceniza [%]	ннv [мյ/kg]	ьнv** [мյ/kg]
тν	Tusa seca a 105 °C	81,34	16,52	2,14	17,62	16,51
TT220	Tusa torrefacta 220 °C	71,17	23,21	5,63	19,09	18,43
TT270	Tusa torrefacta 270 °C	49,43	41,79	8,78	23,07	22,41
FV	Fibra seca a 105 °C	80,34	13,17	6,50	16,43	15,96
FT220	Fibra torrefacta 220 °C	70,94	23,45	5,61	19,99	19,42
FT270	Fibra torrefacta 270 °C	62,51	29,66	7,83	21,83	21,41

Tabla 2. Resultados de caracterización inicial de tusa y fibra virgen y torrefacta en base seca.

** Calculado a partir de contenido de humedad y porcentaje de hidrógeno en la biomasa.

las temperaturas de torrefacción de 220 y 270 °C. Se observa que al aumentar la temperatura de torrefacción de 220 a 270 °C aumenta la cantidad de finos presentes en la muestra (eq. para el tratamiento F220-G la fracción másica de muestra entre 100 y 150 μ m es cercana a cero; para el tratamiento F270-G aumenta a 18 %).

Al comparar los tamaños de grano (G y P), se observa que el valor promedio y la dispersión del tamaño de partícula de los tratamientos "Tamaño de grano -G" son mayores a los reportados para los tratamientos "Tamaño de grano - P". En la Figura 4 se presenta el tamaño medio de partícula volumétrico (*volume mean diameter*) para los niveles experimentales, calculado de acuerdo con la norma 1so 9276-2 y la distribución de tamaño de partícula.

Para los tratamientos "Tamaño de grano - P" y "Tamaño de grano - G" de tusa, se reporta un valor promedio de 250 y 441 μ m, respectivamente. Para los tratamientos "Tamaño de grano - P" y "Tamaño de grano - G" de fibra se reporta un valor promedio de 220 y 601 μ m, respectivamente.

Resultados experimentales de peletización - Presión y energía de peletización

En la Figura 5 se observa que la presión máxima de peletización aumenta al disminuir la temperatura de peletización de 100 °C a temperatura ambiente. No

se observa una variación significativa de la presión máxima de peletización entre las temperaturas de peletización 100 °C y 150 °C.

Al comparar los escenarios de temperatura de torrefacción a 220 y 270 °C, se evidencia una mayor demanda mecánica al peletizar material torrefacto a 270 °C. La presión máxima de peletización de tusa torrefacta a 270 °C es ligeramente mayor a la observada para la peletización de tusa torrefacta a 220, 100 y 150 °C. Este comportamiento puede deberse a los diferentes compuestos orgánicos y azúcares presentes en la hemicelulosa, los cuales han sido mayormente degradados con la torrefacción a 270 °C, reduciendo así la capacidad de aglomeración del material torrefacto (Nalladurai & Vance, 2010); solo cuando se calienta el material torrefacto a temperaturas superiores a 100 °C es posible evidenciar una reducción significativa en la presión máxima de peletización.

En la Figura 6 se presenta la demanda de energía mecánica en la peletización, de acuerdo con la Ecuación 3. La energía de peletización disminuye considerablemente al peletizar material torrefacto por encima de 100 °C (se reporta una reducción en la energía de peletización entre 32 y 43 % respecto a la peletización a temperatura ambiente). Aunque la demanda de energía mecánica al peletizar material torrefacto a 150 °C tiende a aumentar respecto a la peletización a 100 °C, este incremento es cer-

Figura 4.

Tamaño medio volumétrico de partícula para tratamientos según norma ISO 9276-2.



cano al error de medición de la experimentación (inferior a 5 %).

Es posible concluir que un aumento en la temperatura de peletización por encima de 100 °C no reduce significativamente la demanda mecánica del proceso (presión de extrusión). Sin embargo, reducir la temperatura de peletización por debajo de 100 °C aumenta considerablemente la demanda mecánica del proceso (casi el doble para el caso de tusa torrefacta a 270 °C).

Resultados experimentales de peletización - caracterización de pélets

Los resultados de la caracterización de los pélets (combinación de niveles de los parámetros y sus réplicas) se pueden ver en la Tabla 3, en la que se incluye la presión máxima de peletización. Se toma el dato de presión en esta posición ya que es la última en la que la presión de peletizado ha alcanzado el nivel de estabilización (lo cual se verificó observando las gráficas de presión vs.

Figura 5. Curva presión de peletización - desplazamiento para los tratamientos de peletización tusa torrefacta con temperaturas de peletización temperatura ambiente, 100 y 150 °C. Peletización tusa torrefacta a 220 °C (izquierda); peletización tusa torrefacta a 270 °C (derecha).





Peletización de tusa y fibra de palma africana torrefacta: evaluación del efecto de la temperatura de peletización y de torrefacción en la peletización y la calidad de los pélets • Zapata, A., Talero, G.,Rincón, S. & González, A.

75

Tabla 3.	Resultados	de las pr	uebas de	peletización	de tusa	y fibra torrefact	ta.
----------	------------	-----------	----------	--------------	---------	-------------------	-----

Material	Temperatura de torrefacción (°C)	Tamaño de grano	Temperatura de peletización (°C)	Presión de peletizado (мра)	Durabilidad (%)	Densidad a granel _{bs} (kg/m³)	Densidad energética _{bs} (GJ/m³)
				152.76	95.98	721.15	13,93
		C	100	162.10	98.25	687.81	13,29
		G	150	158.84	95.36	704.21	13,61
	220		150	145.76	97.42	710.22	13,72
			100	147.15	95.58	719.92	13,91
		D	100	140.15	90.41	629.62	12,17
		г	150	160.24	97.34	729.62	14,10
Fibra			150	124.73	97.78	710.76	13,73
			100	150.90	92.75	674.97	14,28
		G	100	159.77	93.47	708.31	14,99
		G	150	154.16	94.85	681.39	14,42
	270		150	155.10	93.76	676.75	14,32
	270		100 -	143.42	96.03	704.62	14,91
		P -		147.62	96.02	707.35	14,97
			150 -	153.70	95.06	690.96	14,62
				175.19	96.69	651.20	13,78
	220		100 -	113.99	94.81	700.52	12,91
		G		115.86	87.51	702.02	12,93
		G	150	113.52	94.35	686.31	12,64
				114.92	86.77	702.98	12,95
		P	100 -	102.77	91.00	720.60	13,28
				103.72	92.33	711.04	13,10
			150	99.04	93.83	701.47	12,92
Tusa			150	106.98	94.95	708.85	13,06
lusu			100	114.46	96.09	734.53	16,46
		c L	100	115.39	95.16	714.45	16,01
		G	150	120.07	93.01	727.29	16,29
	270		150	111.66	88.22	759.53	17,02
	2/0		100	101.84	96.11	709.12	15,89
		Р	100	97.17	96.40	717.87	16,08
		I	150 -	114.92	94.85	729.75	16,35
				98.57	97.12	692.60	15,52

posición). Además, en esta posición se tiene certeza de que la presión observada no se debe a una falsa lectura debido a que el émbolo haya llegado al final de carrera, puesto que el sensor de posición tiene una precisión de más o menos 1 mm.

Los datos presentados en la Tabla 3 son comparados mediante un análisis de varianza utilizando la herramienta *R*. Un resumen de este análisis es presentado en la Tabla 4. Por otra parte, se observa en los resultados que de todos los parámetros evaluados individualmente solo el tipo de material (M) presenta una verdadera significancia estadística, tanto para la durabilidad como para la densidad a granel en base seca. Así mismo, el tamaño de grano (Tg) muestra evidencia de tener una posible influencia significativa sobre la durabilidad de los pélets. En cuanto a los demás factores, solo se encontró una significancia estadística para la interacción de parámetros, como es el caso de la interacción Material:Temperatura de torrefacción, tanto para la durabilidad como para la densidad a granel. Se encuentra además que la interacción del tamaño de grano y la temperatura de peletización tiene una leve significancia estadística sobre la durabilidad de los pélets. De acuerdo con Kaliyan & Vance-Morey (2009), la interacción entre material, temperatura de torrefacción y temperatura de peletización tiene una significancia estadística moderada, lo que hace pensar que la combinación de efectos de las temperaturas solo se encuentra en uno de los dos materiales.

En la Figura 7 se presentan los pélets de tusa torrefacta a diferentes niveles de temperatura de peletiFigura 7. Pélets torrefactos de tusa a 270 °C con diferentes temperaturas de peletización (25 y 150 °C).



Figura 8. Densidad a granel en base seca de pélets de tusa torrefacta en función de temperatura de torrefacción y peletización para tamaño de partícula G (izquierda); durabilidad en base seca de pélets de tusa torrefacta en función de temperatura de torrefacción y peletización, tamaño de grano A (1-0,25 mm) (derecha).



Figura 9. Densidad energética de pélets de tusa torrefacta en función de la temperatura de torrefacción y peletización y tamaño de grano A (1 - 0.25 mm).



77

zación. Se observa una superficie rugosa y fracturada en los pélets sometidos a un proceso de peletización a 25 °C, comparados con los pélets de tusa torrefacta que fueron peletizados a 150 °C. Este efecto es comprobado experimentalmente al evaluar la durabilidad de pélets de acuerdo con lo representado en la Figura 8.

En la Figura 8 se observa que peletizar material torrefacto a temperatura ambiente reduce súbitamente la durabilidad de los pélets, puesto que los pélets de tusa torrefacta a 220 °C y peletizados a 100 °C reportan una durabilidad de 91,16 %, mientras que en los productos peletizados a temperatura ambiente la durabilidad se reduce a 32,72 %.

Como se observa en las Figuras 7 y 8, la calidad superficial y la contextura de los pélets con este tratamiento comprometen la calidad final de los pélets producidos. Este efecto se debe nuevamente a la baja aglomeración que se observa en los pélets, ya que no es posible alcanzar la temperatura de transición vítrea en el proceso y, como resultado, las partículas no logran aglomerarse de forma adecuada o mantener la forma final deseada.

Al comparar el efecto de la temperatura de peletización en la densidad a granel de los pélets, es posible observar una disminución significativa al peletizar tusa torrefacta a temperatura ambiente (los pélets de tusa torrefacta a 220 °C y peletizados a 100 °C presentan una densidad cercana 724 kg/m³, mientras que los peletizados a temperatura ambiente presentan una densidad cercana a 422 kg/m³). Este comportamiento indica una baja compactación de las partículas cuando se utiliza una temperatura de peletización baja, aun cuando la presión de peletización fue considerablemente mayor a la observada con temperaturas de peletización superiores a 100 °C. La Figura 9 muestra el efecto de la temperatura de peletización en la densidad energética de los pélets en base seca para las tres temperaturas de peletización evaluadas.

Debido a que la densidad a granel de los pélets de tusa torrefacta a 220 y 270 °C obtenidos a temperatura ambiente es considerablemente menor a la obtenida para pélets producidos 100 °C y 150 °C, se observa una menor densidad energética (aproximadamente 37 % menos para la tusa torrefacta a 270 °C y peletizada 100 °C).

Por otra parte, la densidad energética de los pélets de tusa torrefacta a 270 °C es 25 % mayor a la observada para la tusa torrefacta a 220 °C; esto debido esencialmente al mayor poder calorífico de la tusa torrefacta a 270 °C. En contraste, para la temperatura de peletización superior a 100 °C no se evidencia un aumento significativo de la densidad energética para ninguno de los niveles de torrefacción evaluados.

		Tusa		Fibra		
	Sin torrefacción*	Torrefacta a 220 °C**	Torrefacta a 270 °C **	Sin torrefacción*	Torrefacta a 220 °C **	Torrefacta a 270 °C **
Humedad de pélet _{ad} *** / %	12,8	1,25	1,25	6,1	1,62	1,62
Densidad aparente _{bs} / kg/m³	318	700	720	551	680	680
Durabilidad _{bs} / %	93	91	96	79	97	93
Densidad energética _{bs} / GJ/m³	5,9	12,8	16,2	9,8	13,9	14,9

Tabla 5. Tabla comparativa de pélets sin torrefacción con pélets de material torrefacto.

* Datos tomas de Talero et al. (2017).

** Temperatura de peletización de 100 °C y tamaño de grano A (1 – 0,25 mm).

*** Humedad de los pélets de material torrefacto absorbida del ambiente después de la peletización.

Finalmente, se comparan los resultados experimentales encontrados en el presente estudio con experimentación previa de peletización con material sin torrefactar (Talero *et al.*, 2017). Dicha información se presenta en la Tabla 5.

La humedad de los pélets de material torrefacto reportados en la Tabla 5 es resultado del proceso de absorción de la humedad ambiente posterior a la peletización. Se observa una disminución drástica en el contenido de humedad de los pélets de material torrefacto con respecto a pélets de material virgen. Este fenómeno se debe a que al realizar el calentamiento durante el proceso de torrefacción la humedad de la biomasa es retirada y disminuye su capacidad para capturar humedad ambiente (Xu, Linnebur & Wang, 2014). Se evidencia que la humedad de los pélets torrefactos tiene un valor muy inferior al exigido por la normatividad internacional, es decir 10 %.

Al comparar la densidad de los pélets sin torrefacción con los pélets torrefactos se observa un mayor valor de densidad a granel para los pélets de tusa y fibra torrefacta (para la tusa más del doble de la densidad a granel de los pélets sin torrefacción). Este comportamiento puede ser ocasionado por el mayor contenido de carbono fijo en el material torrefacto, el cual posee una mayor densidad verdadera y favorece una mayor densidad aparente de los pélets de material torrefacto. Los pélets de tusa torrefacta presentan los mayores valores de densidad de todos los tratamientos evaluados. El valor de durabilidad de los pélets torrefactos es mayor al reportado para los pélets sin torrefacción (a excepción los pélets convencionales de tusa con pélets de tusa torrefacta a 220 °C).

Por su parte, la densidad energética es el parámetro que más diferencia presenta con los pélets sin torrefacción, puesto que en todos los escenarios observados la densidad energética de los pélets torrefactos es considerablemente superior a la de los pélets sin torrefacción.

De acuerdo con Talero *et al.* (2017), se identifica una densidad energética de la fibra torrefacta sin peletizar a 270 °C igual a 4.3 GJ/m³, comparado con los pélets de fibra torrefacta a 270 °C encontrados en este trabajo que reportan una densidad energética igual a 14.9 GJ/m³. Así mismo, la densidad energética de tusa torrefacta a 270 °C es igual 1.5 GJ/m³, comparado con la de los pélets de tusa torrefacta a 270 °C que es de 16.2 GJ/m³ (incremento de casi 10 veces el valor sin peletización). Estos resultados indican que es posible almacenar casi 10 veces más energía por unidad de volumen al peletizar material torrefacto.

Tales incrementos son principalmente ocasionados por el aumento en la densidad aparente del material, los cuales permiten optimizar considerablemente un proceso de transporte o de almacenamiento. Al respecto, es fundamental evaluar la viabilidad técnica de la peletización de material torrefacto a escala industrial y estimar el correspondiente costo de producción de pélets torrefactos comparado con la producción de pélets convencionales.

Conclusiones

Es posible producir pélets de tusa y de fibra torrefacta bajo rangos de 220 y 270 °C con características comparables a los estándares internacionales. Referente al efecto de la temperatura de peletización, la mejor calidad de los pélets (densidad a granel, durabilidad y densidad energética) de tusa y fibra torrefacta se observa con una temperatura de peletización cercana a 100 °C.

De acuerdo con la experimentación realizada, no se evidencian mejoras significativas en la calidad de los pélets al utilizar una temperatura de peletización de 150 °C frente a la peletización a 100 °C. Esto indica que la temperatura de transición vítrea de la lignina es más cercana a 100 °C, puesto que la calidad de los pélets no mejora significativamente al aumentar la temperatura de peletización. A partir de lo anterior, es pertinente establecer con mejor precisión la utilidad de peletizar material torrefacto a temperaturas superiores a 100 °C.

Debido a que no se cuenta con información acerca del proceso de peletización entre 100 °C y temperatura ambiente, se recomienda validar experimentalmente las condiciones del proceso de peletización y las características de los pélets dentro de este rango.

Los resultados de la experimentación señalan que se pueden elaborar pélets de material torrefacto con una alta densidad a granel y lograr aumentos considerables en la densidad energética de los pélets de material torrefacto, en comparación con pélets convencionales. Así mismo, se logra aumentar considerablemente la densidad energética del material torrefacto comparado con material torrefacto sin peletizar (aproximadamente 10 veces la densidad energética del material virgen).

Si bien el efecto de los parámetros de elaboración no es claro, debido a la variabilidad de los datos, se puede concluir que se puede alcanzar una mayor durabilidad en los pélets de material torrefacto utilizando los rangos establecidos por los parámetros de elaboración evaluados.

La perspectiva más relevante corresponde a evaluar el proceso de peletización de material torrefacto con una tecnología de mayor tamaño, la cual permita cuantificar los posibles costos de producción de dicho material y concluir parte de la viabilidad técnica y económica del proceso para el sector. Se recomienda integrar en esta viabilidad la comparación de la tecnología propuesta con los usos actuales de estos residuos, tanto en la industria (calderas y compostaje) como el proceso de retorno a campo; lo anterior, con el ánimo de proponer la estrategia más económica y ambientalmente adecuada para disponer de estos recursos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte y la financiación del proyecto al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, y a Regeneración Ltda., por la participación conjunta en el proyecto. Adicionalmente se reconoce el apoyo en el proyecto a la planta de beneficio Unipalma S.A., al suministrar el material de tusa y fibra utilizado en la experimentación y a la Universidad Nacional de Colombia (Hermes 19133). Finalmente, se agradece a la asignatura Proyecto Aplicado de Ingeniería del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, a los estudiantes ejecutores del proyecto: Diego Fernando Camacho Urrea, Juan Felipe Escobar Huertas, Cristian Javier Mejía Burbano y Luis Eduardo Rodríguez Jaime, y a los profesores evaluadores del proyecto Néstor Arzola de la Peña y Ricardo Ramírez.

Referencias bibliográficas

- Arévalo, A. P., Ramírez, N. E., & Garcia-Nunez, J. A. (2015). Diagnóstico de generación, aprovechamiento y disposición actual de biomasa en plantas de beneficio de Colombia. En: *Congreso CONICCA 2015* (pp. 269-277). Medellín, Colombia.
- Bergman, P. C., & Boersma, A. R. (2005). *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations Report ECN-C--05-013, ECN, Petten.* (1st ed.). Petten, The Netherlands: Energy research Center of the Netherlands.
- Bergman, P. C., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., & Kiel, J. H. (2005). Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. Energy Research Centre of the Netherlands Working Paper ECNC05013.
- Bouajila, J., Dole, P., Joly, C., & Limare, A. (2006). Some laws of a lignin plasticization. Journal of Applied *Polymer Science*, *102*(2), 1445-1451.

Fedepalma (2016a). Minianuario Estadístico 2016. Bogotá: Fedepalma.

Fedepalma (2016b). Anuario Estadístico 2015. Bogotá: Fedepalma.

- Fedepalma (2016c). Estudio de consumo y demanda interna Estudio de prefactibilidad técnica y económica de peletización y torrefacción de biomasas residuales del proceso de extracción de palma de aceite, para su uso como combustible. Informe de proyecto. Documento interno.
- Fedepalma & Cenipalma. (2013). *Reporte Síntesis del Proyecto GEF Conservación de la Biodiver*sidad en las Zonas de Cultivos de Palma. Bogotá: Fedepalma.
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, *33*(3), 337-359. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005.
- Mobini, M., Meyer, J. C., Trippe, F., Sowlati, T., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2014). Assessing the integration of torrefaction into wood pélet production. *Journal of Cleaner Production*, *78*, 216-225. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.071.
- Na, B., Kim, Y., Lim, W., Lee, S., Lee, H., & Lee, J. (2013). Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing. *Biomass and Bioenergy*, 52, 159-165. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.041.
- Nalladurai, K., & Vance-Morey, R. (2010). Densification characteristics of corn cobs. *Bioproducts* and *Biosystems Engineering*, 91(5), 559-565.
- Peng, J. H., Bi, X. T., Sokhansanj, S., & Lim, C. J. (2013). Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel*, *111*, 411-421. doi: 10.1016/j.fuel.2013.04.048.
- Samuelsson, R., Larsson, S. H., Thyrel, M., & Lestander, T. (2012). Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy*, 99, 109-115. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.05.004.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699-706. doi: 10.1016/j.fuproc.2010.11.031.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011a). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285-3290. http://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B., & Sanadi, A. R. (2011b). Fuel pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on pelletizing Properties. *BioEnergy Research*, 5(2), 450-458. doi: 10.1007/s12155-011-9169-8.
- Talero, G. F., Rincón, S., & González, A. (2017). Torrefacción de tusa y fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) procedente de los Llanos Orientales de Colombia. Determinación del efecto de la temperatura de torrefacción en las características de los productos. *Palmas*, 38(1), 27-47.
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass terrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 5(October), 384-401. doi: 10.1089/ind.2011.0014.

- Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T., & Yusup, S. B. (2011). Torrefaction of oil palm wastes. Fuel, 90(8), 2585–2591. http://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.021.
- Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748-3762. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.06.023.
- Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, *89*(5), 913-933. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.
- Weiland, J. J., Guyonnet, R., & Vera, C. (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 61(3), 216-220. doi: 10.1007/s00107-003-0364-y.
- Xu, F., Linnebur, K., & Wang, D. (2014). Torrefaction of Conservation Reserve Program biomass: A techno-economic evaluation. Industrial Crops and Products, 61, 382–387. http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.030.
- Zapata-Saad, A. J. (2016). *Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pélets de cuesco de palma en el proceso de pirólisis* (Tesis de Maestría, Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.



VISUALICE SU PLANTACIÓN DESDE CUALQUIER LUGAR

ClickPalm es una solución tecnológica de palmicultura de precisión que incrementa la productividad, la eficiencia de la mano de obra y la competitividad en cultivos de palma de aceite.

