

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

Torrefaction of Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Empty Fruit Bunches and Fiber from the Colombian Eastern Plains. Measuring the Effect of Torrefaction Temperature on the Characteristics of Products

CITACIÓN: Talero, G., 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.

PALABRAS CLAVE: torrefacción, rendimiento másico y energético, análisis próximo, tusa y fibra de palma de aceite.

KEYWORDS: Torrefaction, mass and energy yield, proximate analysis, oil palm empty fruit bunch, oil palm fiber.

RECIBIDO: septiembre de 2016

APROBADO: noviembre de 2016

*Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica

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 H.

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 que pueden ser aprovechados en la producción de energía. Sin embargo, la alta humedad de la tusa y la fibra de la palma de aceite induce a problemas de combustión y limita la eficiencia en la generación eléctrica. Adicionalmente, la estacionalidad en la cosecha de RFF restringe una producción constante de energía en el año (surge la necesidad de implementar almacenamiento de residuos). Estos aspectos pueden afrontarse utilizando un proceso de torrefacción del cual se obtiene un producto con baja humedad y lenta descomposición biológica, posibilitando así su almacenamiento por largos periodos de tiempo. El presente artículo estudia el efecto de la temperatura de torrefacción de tusa y fibra de

palma africana en las características fisicoquímicas de sus productos. La experimentación se realiza en dos montajes: termobalanza y retorta. La torrefacción se realiza entre 220 y 270 °C. Los productos son caracterizados evaluando su composición última, próxima y poder calorífico. Además, se realiza un balance energético y se evalúa el rendimiento energético a diferentes temperaturas. En la experimentación se concluye que es posible realizar torrefacción de tusa y de fibra generando un material torrefacto con características adecuadas para aplicaciones en transformación termoquímica. El poder calorífico del material torrefacto de tusa y fibra oscila entre 19 y 23 MJ/kg con una humedad final cercana a cero. Desde el punto de vista del rendimiento energético se concluye que el mejor escenario de torrefacción se encuentra entre 220 y 250 °C.

Abstract

Oil palm crops represent a growing market in Colombia that generates almost 1.5 million t/year of solid waste. These wastes are usable for energy production. Nevertheless, the high moisture content of oil palm EFB and fiber induces to low efficiency in energy production due to combustion problems. Besides, EFB seasonality in Colombia limits constant energy production during the year, leading to the need of waste storage. These issues can be faced through the use of a torrefaction process in which a product with low moisture content and a slow biological decomposition is obtained, enabling the storage of wastes for long periods. This paper studies torrefaction of EFB and fiber and the effect of temperature on the properties of products. Experimentation is carried out in two set ups: thermobalance and retort. Torrefaction is performed at 220 and 270 °C. Torrefaction products are then characterized by ultimate and proximate analysis and heating value. Additionally, products are energy-and-mass-balanced and energy yield is determined for each temperature level. Experimental results indicate that torrefaction of EFB and fiber can be performed preserving the attributes of products for thermochemical processing. The high heating value of the torrefied EFB and fiber varies between 19 and 23 MJ/kg. From the perspective of energy yield, it was possible to conclude that 220-250 °C are the best torrefaction temperatures.

Simbología

<i>c</i>	Fracción másica de carbono (%)	<i>Subíndices</i>	
<i>C</i>	Carbono	<i>0</i>	Valor inicial
<i>FC</i>	Fracción másica de carbono fijo (1)	<i>ad</i>	Base como se determina
<i>h</i>	Fracción másica de hidrógeno (%)	<i>BM</i>	Biomasa
<i>H</i>	Hidrógeno	<i>carb</i>	Material sólido torrefacto
<i>HHV</i>	Poder calorífico superior (MJ/kg)	<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>H₂O</i>	Agua	<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>LHV</i>	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	<i>db</i>	Base seca
<i>m</i>	Masa (g)	<i>daf</i>	Base seca libre de ceniza
<i>M</i>	Humedad (1)	<i>gas</i>	Gases de torrefacción
<i>MW</i>	Peso molecular (g/mol)	<i>H₂O,pir</i>	Agua de pirólisis
<i>o</i>	Fracción másica de oxígeno (%)	<i>liq</i>	Líquidos condensados de torrefacción
<i>O</i>	Oxígeno	<i>org</i>	Compuestos orgánicos de torrefacción
<i>T</i>	Temperatura (°C)	<i>solido</i>	Biomasa o material sólido
<i>VM</i>	Fracción másica de material volátil (1)	<i>tor</i>	Torrefacción
<i>w</i>	Fracción másica (1)	<i>M</i>	Másico
<i>Y_M</i>	Fracción másica de carbono fijo (1)	<i>E</i>	Energético

Introducción

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una de las especies de palma que más se cultiva en Colombia para la producción de aceite. En las últimas dos décadas, el cultivo de palma africana ha aumentado de 111.380 ha en 1990 (Fedepalma & Cenipalma, 2013) a 466.185 ha en 2015 (Fedepalma, 2016), consolidándose como el cuarto cultivo de mayor extensión del país después del café, el plátano y la caña de azúcar. Según datos del Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma (Fedepalma, 2016), en 2013 la producción de Racimos de Fruto Fresco (RFF) fue cercana a 6,2 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente 40,1 % corresponde a biomasa sólida residual. Este porcentaje se divide en tres residuos principales: 20 % de tusa o racimos vacíos, 14 % de fibra de mesocarpio y 6 % de cuesco; el restante corresponde a cenizas, residuos de tolva y lodos del tridecanter. De acuerdo con dicho estudio, cerca del 15 % de estos residuos son devueltos a los proveedores de fruto, mientras el 85 % restante es utilizado en planta. En cuanto a la tusa, el 64 % es dispuesto en campo, mientras que el 24,8 % es utilizado en procesos de compostaje (Ramírez & García-Núñez, 2015). La fibra y el cuesco son frecuentemente utilizados en procesos de combustión para las calderas (cerca del 72 %) y en menor proporción en procesos de compostaje, disposición en campo o venta. Particularmente, de 2008 a 2013 el sector palmicultor logró aumentar el aprovechamiento de sus residuos de 78 a 94 % a causa de un mejor manejo de la tusa. Sin embargo, se reporta un aumento del 5 % de tusa y fibra dispuesta en botaderos o rellenos sanitarios (Fedepalma, 2015).

De las estadísticas previamente presentadas se estima que el sector palmicultor cuenta con un recurso cercano a 97,5 millones de t/año de biomasa residual sólida (Arevalo, Ramírez, & García-Núñez, 2015). No obstante, en muchos casos su aprovechamiento se ve limitado por condiciones técnicas y operativas de los procesos propuestos. Por ejemplo, en procesos de compostaje se han presentado dificultades relacionadas con la calidad final del producto, debido a que el contenido final de nitrógeno y de carbono suele reducirse considerable-

mente por la formación de amoníaco y dióxido de carbono (Casta & Romero, 2012). Por esta razón, se perfila como necesidad la evaluación de alternativas tecnológicas que permitan lograr un aprovechamiento adecuado de esta biomasa residual. Dentro de estas alternativas, su aprovechamiento como fuente energética renovable juega un papel primordial, tanto para la generación energética como desde el punto de vista ambiental.

Contexto legal del proyecto

En 2014 el Congreso de la República de Colombia promulga la Ley 1715 de 2014 por medio de la cual se establece el marco legal para la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta ley incentiva el uso de energías renovables, fomentando la inversión, la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias, con el objetivo de contribuir a la solución de problemas de energía en zonas rurales y zonas no interconectadas. La Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, ve en esta ley una oportunidad para incentivar el uso de los subproductos de la extracción del aceite de palma con fines energéticos como la generación de energía eléctrica para autoconsumo y comercialización. Sin embargo, dicha implementación requiere superar múltiples retos tecnológicos, tanto en las etapas de acondicionamiento, como en lo que respecta a transporte, almacenamiento y transformación energética.

Uno de las actuales interrogantes sobre el aprovechamiento energético de subproductos de las plantas de beneficio corresponde al método de almacenamiento. De acuerdo con datos reportados por Fedepalma sobre la cosecha de racimos de fruta fresca (RFF), en el primer semestre del año el volumen de RFF mensual procesado es en promedio 30 % mayor que en el segundo semestre (Fedepalma, 2013). Para 2014 se reporta un máximo de 624.272 t en el mes de marzo y un mínimo de 394.258 t en noviembre. Este comportamiento indica que la cosecha de palma africana en Colombia es esta-

cionaria, ocasionando que se cuente con un potencial energético variable durante el año. Esta variación puede causar sobredimensionamiento de los equipos de transformación energética, ya que en los periodos pico se debe contar con la capacidad de procesar los subproductos disponibles, pero durante los periodos valle este proceso se subutilizaría. Una alternativa para disminuir este efecto es contar con un sistema de almacenamiento que garantice un abastecimiento de los subproductos sin comprometer la eficiencia del proceso, lo cual implica el almacenamiento de subproductos como tusa o fibra en términos de meses.

No obstante, el almacenamiento de tusa y fibra por largos periodos de tiempo compromete su calidad debido a la degradación biológica de este compuesto (formación de hongos y volatilización de gases con potencial energético). Adicionalmente, estos residuos cuentan con un alto contenido de humedad, una baja densidad a granel y absorben la humedad del medio con facilidad. Estos parámetros vuelven ineficiente y costoso el almacenamiento de tusa y fibra, además de reducir la calidad final de combustible.

Torrefacción de residuos

Es en este punto donde procesos como la torrefacción son técnica y económicamente interesantes. El secado a altas temperaturas característico de la torrefacción ocasiona una considerable reducción en la descomposición biológica de la biomasa y un aumento de su poder calorífico, generando un producto con características más parecidas a un carbón tipo lignito o turba. Esto posibilita el almacenamiento de residuos durante largos periodos, en muchos casos en el orden de años (Tumuluru, Sokhansanj, Hess, Wright & Boardman, 2011).

La torrefacción es un proceso termoquímico similar al utilizado en el tostado de café, en el cual se calienta la biomasa en ausencia de oxígeno, a una temperatura entre 200-300 °C por un lapso de 30 minutos a 1 hora con una tasa de calentamiento inferior a 50 °C/min a presión atmosférica (Tumuluru *et al.*, 2011). Este calentamiento ocasiona no solo la pérdida del agua contenida en la biomasa, sino que además modifica la estructura química de los azúcares presentes en ella (principalmente la hemicelulosa), generando un producto parcialmente carbonizado (Bergman, Boersma, Zwart &

Kiel, 2005). A causa de la descomposición térmica de la materia prima se generan productos en fases sólida, líquida y gaseosa. La Figura 1 presenta el balance de masa del proceso de torrefacción mediante un diagrama Sankey. Al proceso de torrefacción ingresa biomasa con humedad y cenizas. Posteriormente, a medida que se lleva a cabo el calentamiento de la biomasa con las condiciones de torrefacción, se generan los productos en diferentes fases.

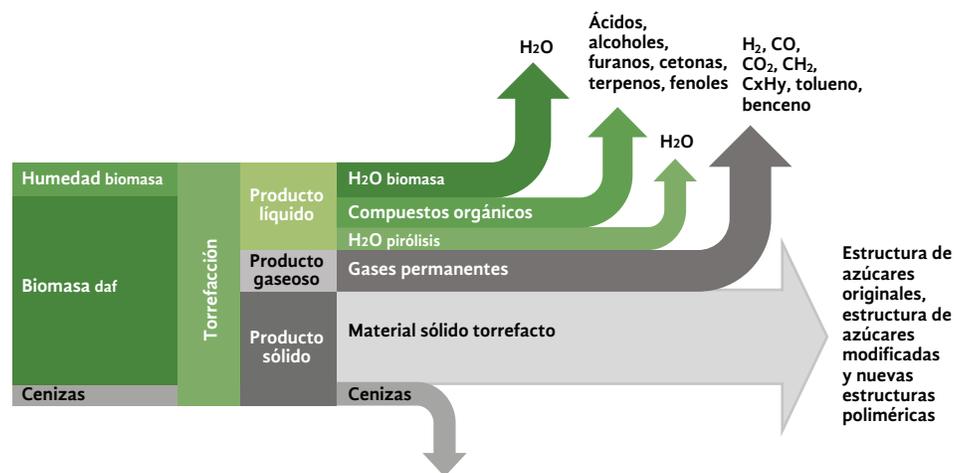
Los productos en fase sólida corresponden al *material sólido torrefacto y ceniza*; se considera que esta última no reacciona en el proceso. El material sólido torrefacto está compuesto por estructuras de azúcares modificados y nuevas estructuras poliméricas libres de agua (Tumuluru *et al.*, 2011). Los productos en fase líquida corresponden a la *humedad de la biomasa* ($H_2O_{biomasa}$), *compuestos orgánicos* y *agua generada en las reacciones de pirólisis* ($H_2O_{pirólisis}$). Los compuestos orgánicos generados en la torrefacción son principalmente hidrocarburos oxigenados, tales como ácido acético ($C_2H_4O_2$), ácido fórmico (CH_2O_2), furfural ($C_5H_4O_2$), metanol (CH_4O), ácido láctico ($C_3H_6O_2$) y fenol (C_6H_6O) (Prins, Ptasinski & Janssen, 2006). Los productos en fase gaseosa corresponden a compuestos químicos no condensables a temperatura ambiente tales como *dióxido de carbono* CO_2 , *monóxido de carbono* CO y, en menores proporciones, hidrógeno H_2 , metano CH_4 , tolueno y benceno (Tumuluru *et al.*, 2011).

El material sólido torrefacto cuenta con una serie de beneficios y atributos: es hidrofóbico y presenta una baja tasa de descomposición biológica, lo cual posibilita su almacenamiento por largos periodos de tiempo; así mismo, tiene una mayor densidad energética que la materia prima inicial, lo cual se traduce en un mayor poder calorífico; es un material altamente pelletizable por su alto contenido de lignina; además, su menor contenido de material volátil disminuye la producción de humos en la combustión (comparado con una biomasa) (Tumuluru *et al.*, 2011).

De acuerdo con Tumuluru *et al.* (2011), los parámetros del proceso de torrefacción se dividen en dos grandes grupos: los parámetros referentes al proceso, como la temperatura de reacción, el tiempo de residencia, la tasa de calentamiento y la presencia de un agente de reacción; y los parámetros referentes a las características iniciales de la biomasa, como su humedad,

Figura 1. Balance de masa en forma de diagrama de Sankey para la torrefacción de biomasa

Fuente: elaborada a partir de información presentada en Prins *et al.* (2006) y datos propios.



composición química y tamaño de partícula. De acuerdo con estos autores, la temperatura de torrefacción es el parámetro de mayor importancia, puesto que define el grado de descomposición térmica de la biomasa.

Propósito de la investigación

La torrefacción ha ganado interés en la última década debido a las propiedades presentes en la biomasa descritas anteriormente. Aunque autores como Uemura han reportado trabajos sobre la torrefacción de residuos de palma africana, no se cuenta con información del proceso sobre variedades colombianas.

El propósito del proyecto desarrollado por el Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Proceso – BIOT de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, en conjunto con la empresa Regeneración Ltda., y Fedepalma, es realizar una evaluación preliminar del comportamiento de la torrefacción de tusa y fibra de especies colombianas de palma africana (*Elaeis guineensis*) provenientes del oriente del país. Para ello se determina el efecto de la temperatura de torrefacción en los productos del proceso y se estima en qué escenarios es técnicamente viable torrefactar tusa y fibra utilizando el rendimiento energético como indicador del proceso.

Materiales y métodos

Muestras de biomasa

Dos tipos de residuos son evaluados en este estudio: racimo vacío (o tusa) y fibra de mesocarpio. Estos re-

siduos son recolectados en una planta de beneficio localizada en la región de los Llanos Orientales en el departamento del Meta, Colombia. En la planta de extracción se selecciona una muestra de 500 kg de cada uno de los residuos, la cual es transportada inmediatamente al Laboratorio de Transmisión de Calor de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. De esta se separan 3 kg de muestra al azar. Estas muestras son secadas hasta alcanzar un nivel de humedad de 30 % y posteriormente molidas en un molino de martillos marca Agico CF420 con una malla de 4 mm. Para los experimentos de torrefacción se seleccionan 500 g de tusa y fibra. Las muestras se secan en un horno eléctrico a 105 °C durante 18 h hasta que alcanzan una humedad inferior al 5 % y son molidas en un molino de cuchillas marca Retsch SM-100 NEU con una malla de 1 mm. Posteriormente, las muestras son tamizadas para obtener un tamaño de partícula entre 250 y 1.000 µm (ASTM E11-87 No. 16 y No. 60). Las muestras son luego almacenadas en recipientes sellados y refrigeradas para su posterior uso en la labor experimental.

El presente estudio no toma en cuenta variaciones en las propiedades fisicoquímicas de la biomasa (poder calorífico, composición elemental o próxima) durante el año o por zona de recolección de las muestras. De acuerdo con datos reportados por Uemura *et al.* (2011), Vassilev *et al.* (2010) y Granados, Velásquez & Chejne (2014), la variación en la composición elemental y el poder calorífico de residuos de palma para especies de Malasia y de Colombia son inferiores al 5,7 y 8,2 %, respectivamente.

Montaje experimental

La torrefacción de las muestras se lleva a cabo utilizando dos equipos: una termobalanza y una retorta de aluminio. Ambos equipos se encuentran instalados en el Laboratorio de Transmisión de Calor de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Las Figuras 2 y 3 presentan el montaje experimental de cada equipo.

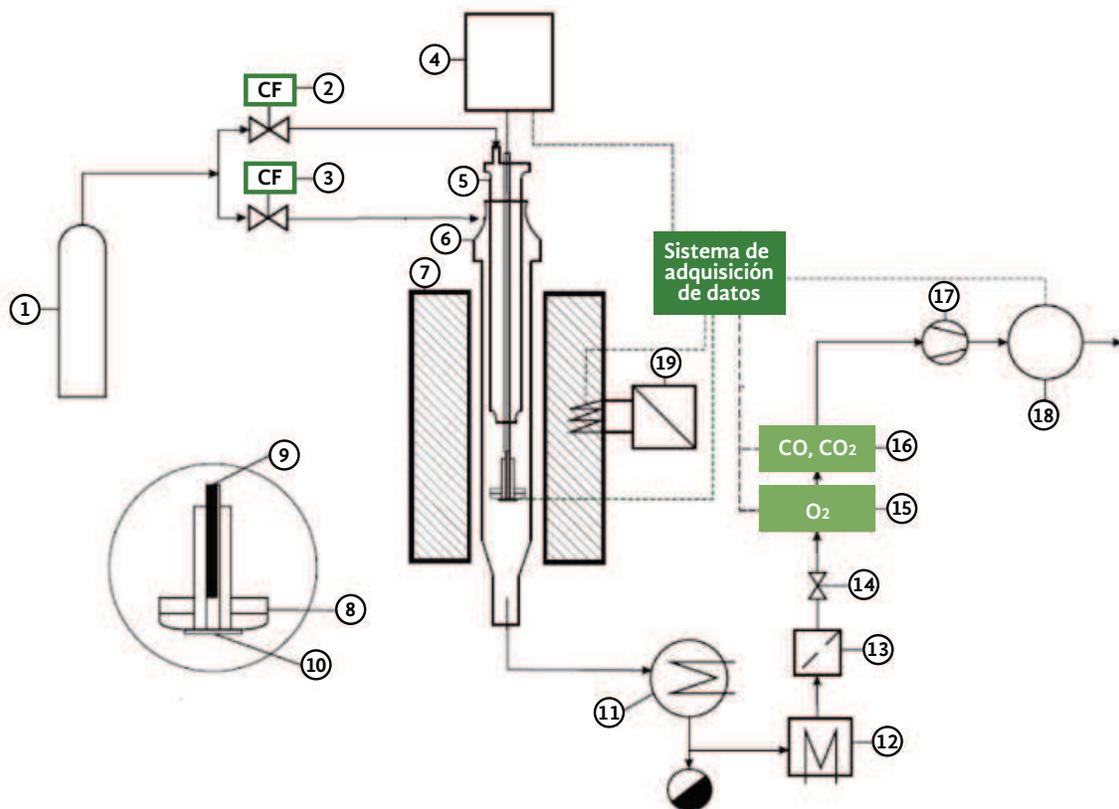
La termobalanza presentada en la Figura 2 cuenta con un reactor vertical (6) en el cual se calienta controladamente una muestra de masa inferior a (3 g) utilizando un horno eléctrico (7 y 19); este equipo permite medir variaciones de masa y la generación de gases de manera continua. Las mediciones se rea-

lizan utilizando una balanza analítica marca Ohaus Adventurer TB009 de precisión 0,1 mg (4) y un analizador de gases en continuo marca Emerson X-Stream X2GC Ref. IR TCD (16) (para la determinación de dióxido de carbono CO_2 y monóxido de carbono CO), junto con un medidor de caudal de gas marca Ritter TO3 (18), respectivamente. Adicionalmente se registra la concentración de oxígeno (O_2) con un equipo marca Emerson X-Stream X2GC Ref. EO2 (15), con el objetivo de asegurar condiciones de atmósfera inerte en el reactor.

El montaje de retorta presentado en la Figura 3 se compone de una retorta de aluminio, donde se aloja y calienta una muestra de masa de 20 g; un Erlenmeyer sumergido en un baño de agua fría, donde se lleva a cabo la condensación del producto líquido; un filtro

Figura 2. Esquema de montaje de la termobalanza: 1) bala de nitrógeno grado 5; 2 y 3) reguladores de flujo másico de nitrógeno; 4) balanza; 5) tapa superior reactor; 6) reactor; 7) horno circular eléctrico; 8) crisol; 9) termopar tipo K; 10) soporte crisol; 11) intercambiador de calor I; 12) intercambiador de calor II; 13) rotámetro; 14) válvula reguladora de caudal; 15) analizador O_2 ; 16) analizador CO y CO_2 ; 17) bomba de diafragma; 18) medidor de flujo volumétrico; 19) controlador de temperatura.

Fuente: adaptado de Ospina (2014).



de lana de vidrio y un depósito de gas. El equipo permite controlar la presión del proceso en rangos próximos a la presión atmosférica. El calentamiento de la retorta se realiza con una resistencia eléctrica y es controlada mediante un controlador de temperatura Autonics TZN4S. El monitoreo de la temperatura del proceso se realiza en continuo mediante la instalación de una termocupla tipo K en la retorta.

Diseño de experimento

El diseño experimental en la termobalanza contempla como factores experimentales o variables independientes el tipo de biomasa (tusa y fibra) y la temperatura de torrefacción (220 y 270 °C). Los parámetros experimentales o valores fijos son: tamaño de la muestra, tamaño de partícula, tasa de calentamiento, flujo de nitrógeno, tiempo de torrefacción y humedad de la muestra. El diseño experimental utilizado en la termobalanza se resume en la Tabla 1 (izquierda).

El programa de calentamiento al que se somete la materia prima se presenta en la Tabla 1 (derecha). La prueba inicia a temperatura ambiente introduciendo una muestra de 1g con humedad entre 8 y 14 %

y con un flujo de nitrógeno de 1,5 L/min. Se realiza un secado previo a las muestras a una temperatura de 105 °C durante 30 min, con el objetivo de eliminar la humedad presente en la biomasa. Este secado previo garantiza que la masa perdida y monitoreada en la torrefacción sea el producto de las reacciones de pirólisis y no por evaporación de la humedad presente en la biomasa. Posteriormente, se inicia la rutina de torrefacción calentando la muestra con una tasa de 10 K/min hasta la temperatura T_{tor} . La muestra se mantiene a esta temperatura durante 30 minutos, momento en el que inicia la etapa de enfriamiento natural. Los datos de masa y gases de torrefacción son monitoreados hasta que la temperatura de la muestra es inferior 150 °C (se supone que a temperaturas inferiores no hay reacciones químicas en el proceso), instante en el que se suspende el suministro de nitrógeno al reactor.

Dentro de las variables respuesta más importantes del diseño experimental para la termobalanza se tiene la curva de pérdida de masa, el balance másico de los productos (el producto líquido se estima por diferencia) y el rendimiento másico del material sólido, todos determinados en continuo.

Figura 3. Esquema de montaje de retorta.

Fuente: Gómez, Klose & Rincón (2008).

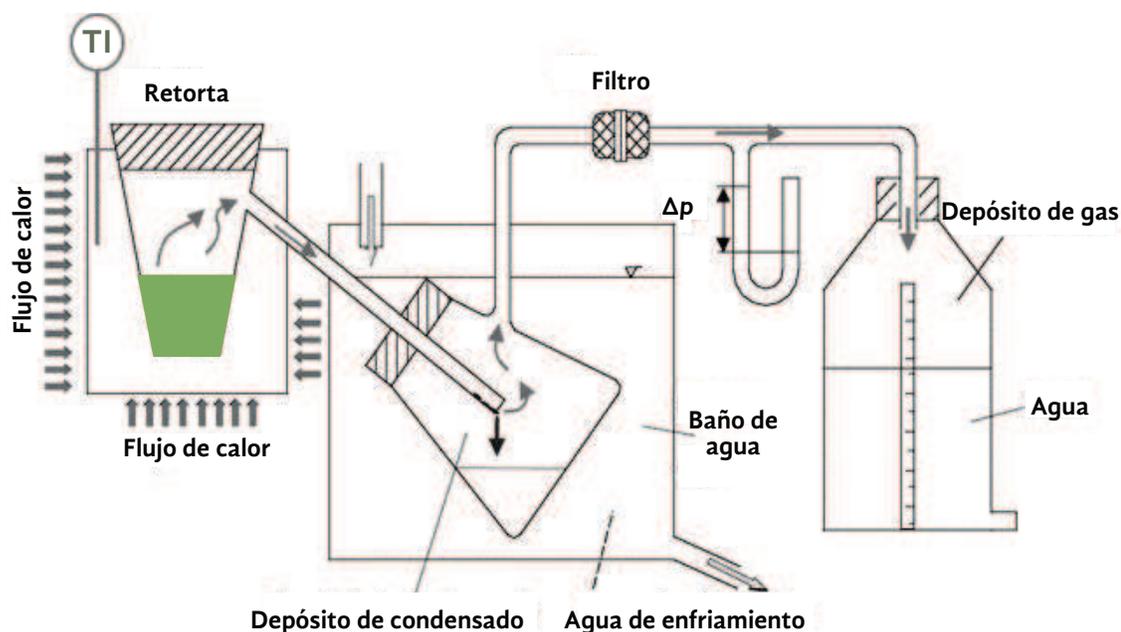


Tabla 1. Condiciones del diseño experimental de torrefacción de tusa y fibra de palma de aceite en termobalanza.

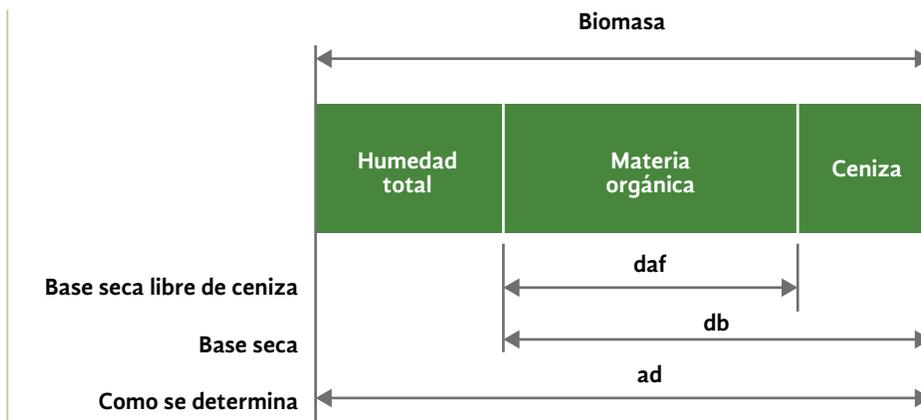
Parámetros experimentales	
Masa de muestra/g	1 ± 0,01
Tamaño de partícula/mm	0,25 - 1
Tiempo de torrefacción/min	30 ± 0,1
Tasa de calentamiento/K/min	10 ± 1
Humedad de la muestra/% w/w	8-14
Flujo de nitrógeno/L/min	1,5 ± 0,1
Presión del proceso/atm	0,72
Factores experimentales	
Tipo de biomasa	Tusa/ Fibra
Temperatura de torrefacción / °C	220-270
Variables respuesta	
Curva de pérdida de masa	
Balance másico de productos	
Rendimiento másico	

Curva de calentamiento de torrefacción a 250 °C

Tabla 2. Condiciones del diseño experimental de torrefacción de tusa y fibra de palma de aceite en retorta.

Parámetros experimentales	
Masa de muestra /g	20 ± 0,01
Tamaño de partícula/mm	0,25 - 1
Tiempo de torrefacción/min	30 ± 0,1
Tasa de calentamiento/K/min	10 ± 1
Humedad de la muestra/% w/w	10 ± 2
Presión del proceso/atm	0,72
Factores experimentales	
Tipo de biomasa	Tusa/ Fibra
Temperatura de torrefacción /°C	220 – 250 – 270
Variables respuesta	
Rendimiento másico de productos	
Composición próxima sólido	
Composición química de gases	
Contenido de agua en alquitranes	
Poder calorífico superior	
Rendimiento energético	

Figura 4. Esquematización de las bases utilizadas en los resultados experimentales: (ad) – Como se determina, (db) – Base seca, (daf) – Base seca libre de ceniza.



El diseño experimental utilizado en la retorta se resume en la Tabla 2. La rutina de calentamiento realizada en la retorta es igual a la presentada en la termobalanza (Tabla 1 - derecha). El tiempo de torrefacción de 30 min se fija con base en los resultados obtenidos en la experimentación en la termobalanza. El diseño experimental en la retorta contempla como factores experimentales o variables independientes el tipo de biomasa (tusa y fibra) y la temperatura de torrefacción (220, 250 y 270 °C). Los parámetros experimentales o valores fijos son el tamaño de la muestra, el tamaño de partícula, el tiempo de torrefacción y la humedad de la muestra. Debido a que el tamaño de la muestra en la retorta es mayor al utilizado en la termobalanza, es posible realizar la caracterización de los productos del proceso.

Caracterización de materias primas y productos

Los datos reportados en los resultados se presentan en las bases como se determina (ad), base seca (db) y base seca libre de ceniza (daf), las cuales se esquematizan en la Figura 4. La base como se determina (ad) corresponde a las características de la biomasa o los productos de la torrefacción, incluyendo todos los componentes presentes en el momento del análisis. La base seca (db) corresponde a la composición de la biomasa original o del respectivo producto eliminando su humedad. Finalmente, la base seca libre de ceniza (daf) corresponde a la composición sin humedad y ceniza.

La caracterización próxima de las muestras consiste en la determinación del contenido de humedad, el contenido de ceniza y el contenido de material volátil de acuerdo a las normas EN 14774-3, EN 14775 y EN

15148, respectivamente; el contenido de carbono fijo se determina por diferencia. Para el análisis elemental CHN se determina el contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno de acuerdo con la norma ASTM D5373, el contenido de oxígeno se calcula por diferencia. De acuerdo con Uemura *et al.* (2011) y Vassilev *et al.* (2010), el contenido de azufre presente en los residuos es inferior al 1 %, por lo tanto se asume como cero en el presente trabajo. El contenido de agua en los alquitranes se determina de acuerdo con lo establecido en la norma DIN 12420. La composición de gases de la torrefacción obtenidos en la retorta se determina en un cromatógrafo de gases marca Shimadzu GC2010 PLUS.

El poder calorífico de las muestras sólidas se determina de manera experimental de acuerdo con la norma ASTM D 240 -14 y a partir de las correlaciones experimentales reportadas por Demirbas (1997) y Sheng & Azevedo (2005), las cuales se presentan en las Ecuaciones 1 y 2. Dichas correlaciones permiten determinar el poder calorífico superior en base seca (db) a partir de la composición próxima de la materia prima, las cuales, de acuerdo con Demirbas (1997) tienen entre el 0,1 y el 4 %. Con los resultados experimentales para las muestras de tusa y fibra virgen y torrefacta reportados en las Tabla 3 y 5, se determina un error máximo del 3,6 % al utilizar las aproximaciones experimentales de las Ecuaciones 1 y 2. Los valores de poder calorífico para las muestras restantes se determinan a partir de dichas aproximaciones.

Para la determinación del poder calorífico de los gases generados se utiliza la Ecuación 3 (Gómez, Klose & Rincón, 2008), donde HHV_{gas} es el poder calorífico del gas en MJ/kg (el valor 10,100 corresponde al poder calorífico superior del CO). El producto líquido

$$HHV_{solido,db} = 0,312 FC_{db} + 0,1534 VM_{db} \quad (1) \quad HHV_{gas} = 10,100 W_{co} \quad (3)$$

$$HHV_{solido,db} = -3,0368 + 0,2218 VM_{db} + 0,2601 FC_{db} \quad (2) \quad HHV_{org} = 340,95 C_{org} + 1322,98 h_{org} + 119,860 o_{org} \quad (4)$$

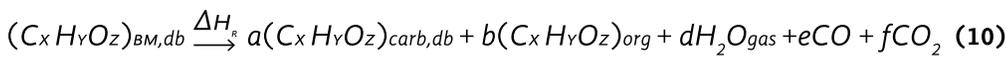
$$C_{org} = \frac{m_{BM,db} C_{BM,db} - m_{carb,db} C_{carb,db} - m_{gas} \left(\frac{MWC}{MW_{CO}} W_{co} + \frac{MWC}{MW_{CO_2}} W_{co_2} \right)}{m_{liq} = (1 - M_{liq})} \quad (5)$$

$$h_{org} = \frac{m_{BM,db} h_{BM,db} - m_{carb,db} h_{carb,db} - \frac{1}{9} m_{cond} W_{H_2O,pir}}{m_{liq} = (1 - M_{liq})} \quad (6)$$

$$O_{org} = 100 - C_{org} - h_{org} \quad (7)$$

$$y_M = \left(\frac{m_{carbonizado}}{m_{inicial}} \right)_{daf} \quad (8)$$

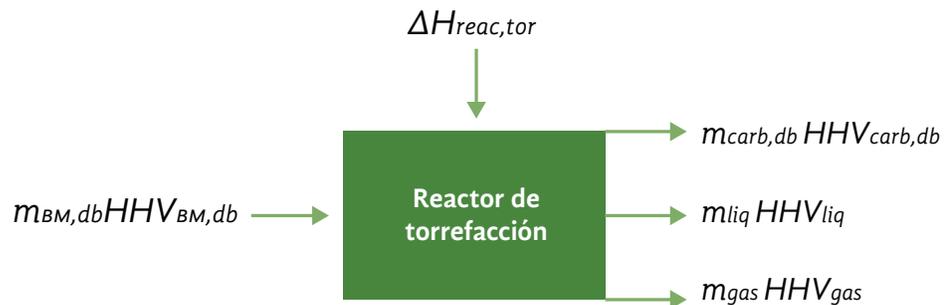
$$y_E = y_M \left(\frac{LHV_{carbonizado}}{LHV_{inicial}} \right)_{daf} \quad (9)$$



$$\frac{\Delta H_{reac, tor}}{m_{BM,db}} = Y_{M,carb,db} HHV_{carb,db} + Y_{M,liq} HHV_{liq} + Y_{M,gas} HHV_{gas} - HHV_{BM,db} \quad (11)$$

Figura 5. Volumen de control para balance de energía de torrefacción.

Fuente: Basu (2013).



obtenido se compone de agua y un conjunto de compuestos orgánicos. Para determinar el poder calorífico de los orgánicos se utiliza la Ecuación 4, la cual corresponde a una correlación experimental para alquitranes propuesta por Li & Suzuki (2010).

Para determinar las fracciones másicas del carbono, el hidrógeno y el oxígeno presentes en los compuestos orgánicos de los productos líquidos (Figura 1) se utilizan las Ecuaciones 5, 6 y 7, formuladas a partir del balance de masa de los elementos C, H y O presentes inicialmente en la materia prima y su distribución en los productos obtenidos de acuerdo con la Figura 1. Para el balance se supone que los

compuestos presentes en los orgánicos de torrefacción son hidrocarburos oxigenados que contienen solamente los elementos químicos C, H y O. Para la composición química de gases se supone la presencia de los elementos C, H, N y O como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y, en menor proporción, ácido cianhídrico (HCN); para especies como cascarilla de arroz o paja de algodón se reporta la producción de ácido cianhídrico después de 250 °C, pero su concentración es tan baja que en ocasiones es posible despreciarlos (Fu *et al.*, 2010). De esta manera, se considera que las especies de nitrógeno que no se encuentran en el carbonizado y en el producto sólido están presentes en el gas.

Parámetros de rendimiento del proceso de torrefacción

Los parámetros de rendimiento del proceso más utilizados en la torrefacción son el rendimiento de masa (*mass yield*) y el rendimiento de energía (*energy yield*). Estos se presentan en las Ecuaciones 8 y 9, respectivamente (Bergman *et al.*, 2005).

Balance de energía del proceso de torrefacción

Para determinar el balance de energía del proceso de torrefacción es necesario formular una reacción de torrefacción global a partir del balance de masa planteado en la Figura 1. De acuerdo con Granados *et al.* (2014), dicha reacción corresponde a la presentada en la Ecuación 10.

Para el balance de energía de la reacción de torrefacción se toman las siguientes consideraciones: los productos orgánicos y el agua son agrupados en los productos líquidos; el dióxido de carbono y el monóxido de carbono son agrupados en los productos

gaseosos; la entalpía de formación de los reactivos y los productos corresponde a la suma del poder calorífico de la especie (diferentes productos y reactantes presentados en la Figura 1) y el calor latente ocasionado por la variación de temperatura en el proceso; el poder calorífico de la especie es significativamente mayor al calor latente. Se define el volumen de control para el balance de energía de la reacción de torrefacción de acuerdo a lo mostrado en la Figura 5.

A partir de esta figura se formula el balance de energía de la reacción de torrefacción presentada en la Ecuación 11. La entalpía de reacción se define como la diferencia entre la energía de los productos menos la energía de los reactivos.

El signo de la entalpía de reacción indica si el proceso de torrefacción es endotérmico o exotérmico. Si el término $\Delta H_{\text{reac, tor}}$ es negativo, los reactivos contienen más energía que los productos y la reacción libera calor en el proceso, considerando la torrefacción como exotérmica. Por el contrario, si $\Delta H_{\text{reac, tor}}$ es positivo, la energía contenida en los productos es mayor a la presente en la biomasa y la reacción requiere de calor, indicando la torrefacción como endotérmica.

Tabla 3. Resultados de caracterización inicial de tusa y fibra.

Biomasa	Base	Composición próxima				Composición elemental				Poder calorífico	
		Humedad [%]	Material volátil [%]	Carbono fijo [%]	Ceniza [%]	Carbono [%]	Hidrógeno [%]	Nitrógeno [%]	Oxígeno [%]	wHHV [MJ/kg]	LHV [MJ/kg]
Tusa	db	0	80,35	16,46	3,19	48,19	5,19	1,04	42,4	18,52	18,51
	ad	65,46	27,75	5,69	1,1	15,73	1,89	0,16	15,67	5,89	4,28
	Literatura **db	57,2 (ad*)	n.i.	n.i.	5,1	45,53	5,89	0,45	43,4	17,02	15,82
Fibra	db	0	76,03	18,52	5,45	49,49	5,87	0,01	39,18	20,66	20,65
	ad	36,95	47,94	11,68	3,44	31,2	3,7	0,01	24,7	11,2	10,29
	Literatura **db	37,2 (ad*)	n.i.	n.i.	3,2	46,92	5,89	1,12	42,66	19,61	18,31

n.i. – Dato no indicado en literatura.

* Reportado en base como se determina

** (Uemura *et al.*, 2011)

Figura 6. Torrefacción de tusa y fibra en termobalanza a 220 y 270 °C.

Tiempo de torrefacción 30 min. Las líneas naranja y amarilla corresponden a las curvas de temperaturas (eje izquierdo temperatura de muestra), líneas verde, verde punteada, marrón y marrón punteada corresponden a las curvas de pérdida de masa en base seca ad (eje derecho, rendimiento másico).

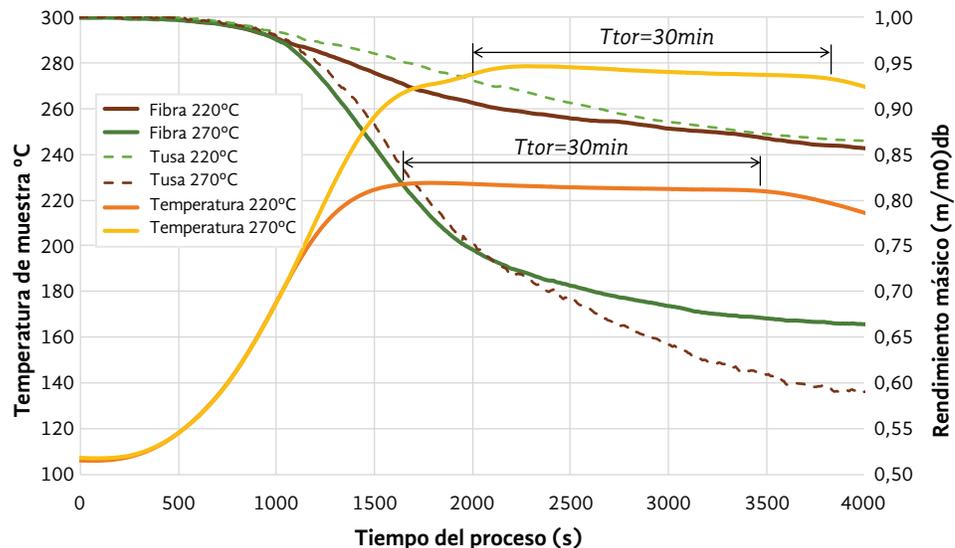
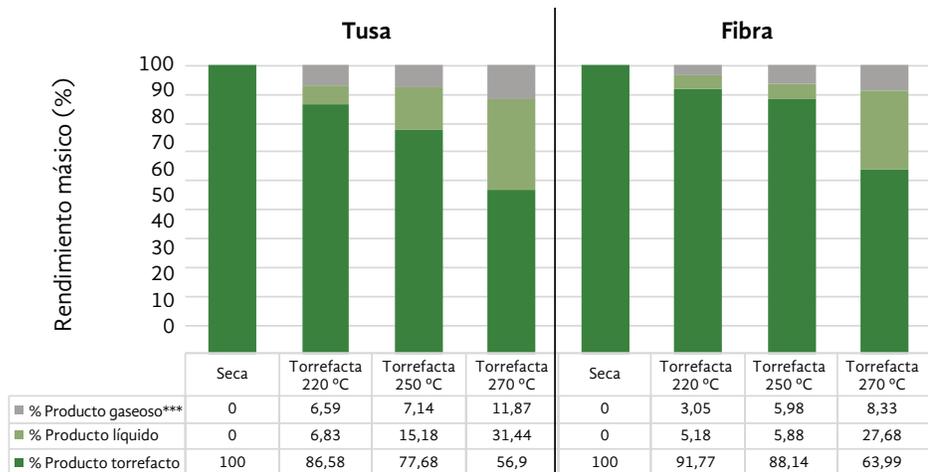


Figura 7. Rendimiento másico de productos de torrefacción: torrefacción de tusa (izquierda) y torrefacción de fibra (derecha).

***Fracción másica de gases determinados por diferencia



Resultados y discusión

Caracterización inicial de biomasa

Los resultados de la caracterización de la tusa y fibra utilizados en el presente estudio son resumidos en la Tabla 3.

Se resalta un bajo poder calorífico de la tusa y de la fibra en base húmeda debido a que estos residuos presentan un contenido de humedad considerablemente alto. Para posteriores análisis se utiliza el poder calorífico de los residuos en base seca.

Al comparar los resultados obtenidos en la caracterización de los residuos respecto a los valores reportados por Uemura *et al.* (2011) y Vassilev *et al.* (2010), se resalta que el contenido de humedad de la tusa y la

fibra en base como se recibe es similar al encontrado en este trabajo. El contenido de ceniza en la tusa es mayor para las especies reportadas por Uemura, mientras que para la fibra es menor. Referente al análisis elemental, se observa que el contenido de carbono en los resultados de este trabajo es mayor a los reportados en la literatura. El poder calorífico de las especies de este trabajo también presenta un valor más alto.

Torrefacción en termobalanza

El resultado del análisis termogravimétrico para la torrefacción de tusa y fibra a 220 y 270 °C es presentado en la Figura 6, donde se muestran las curvas de pérdida de masa $(m/m_0)_{db}$ en función del tiempo de torrefacción. Adicionalmente, se reportan las curvas de temperatura utilizadas en los experimentos y se

evidencia una reducción del rendimiento másico al aumentar el tiempo de torrefacción. La mayor tasa de pérdida de masa se presenta al inicio del periodo de calentamiento constante. Así mismo, al aumentar la temperatura del proceso aumenta la pérdida de masa en ambos residuos.

A una temperatura de 220 °C la fibra y la tusa reportan un rendimiento másico similar. Sin embargo, al aumentar la temperatura del proceso hasta 270 °C la tusa reporta un menor rendimiento másico. En la Figura 6 se observa que aunque la fibra a 270 °C presenta una rápida pérdida de masa al principio de la torrefacción, después de 2300 segundos esta velocidad disminuye considerablemente. Este comportamiento no se observa con la tusa a 270 °C, ya que durante toda la torrefacción la velocidad de la pérdida de masa disminuye de forma continua. Al finalizar las pruebas de termogravimetría se observa que los rendimientos másicos de la tusa a 220 y 270 °C son respectivamente 87 y 58 %, comparados con los rendimientos másicos de la fibra próximos a 85 y 65 %, respectivamente.

En la misma figura se observa que al aumentar el tiempo de torrefacción disminuye la tasa de pérdida de masa, ya que la pendiente observada en la rampa de calentamiento es mayor a la presentada en la zona de temperatura constante. Según la literatura (Bergman *et al.*, 2005), el aumento del tiempo de torrefacción ocasiona un aumento poco significativo en el poder calorífico del material torrefacto comparado con el consumo energético requerido para mantener el calentamiento de la materia prima.

Debido a que la tasa de pérdida de masa disminuye a medida que aumenta el tiempo de torrefacción y a que el aumento en el poder calorífico es poco significativo, no es recomendable aumentar el tiempo de torrefacción fuera del tiempo evaluado en este trabajo. Para futuras investigaciones se recomienda evaluar el efecto del tiempo de torrefacción en el poder calorífico y el consumo energético del proceso, con el fin de encontrar las condiciones más adecuadas de torrefacción referentes al tiempo de residencia.

Torrefacción en retorta

La Figura 7 presenta el rendimiento másico de los productos de torrefacción para tusa y fibra en los

diferentes tratamientos. Así mismo, en esta figura se puede observar que al aumentar la temperatura del proceso aumenta la formación de producto líquido y gases para ambos residuos, siendo el producto líquido el de mayor proporción. Además, se evidencia que el contenido de material sólido disminuye al aumentar la temperatura de torrefacción para ambos residuos y que la fracción de sólido torrefacto es considerablemente mayor que la de producto líquido y producto sólido. Debido a las bajas temperaturas en la torrefacción (comparada con otros procesos como pirólisis o gasificación), no se suministra la energía necesaria para romper todos los enlaces de carbono de la biomasa hasta moléculas más sencillas. Por esta razón, la mayor parte de los productos permanece en fase sólida (cadenas de carbono largas), en una menor proporción en fase líquida (cadenas de carbono más cortas) y una pequeña fracción en fase gaseosa (moléculas de carbono sencillas). Para la fibra y la tusa se reporta una diferencia de 4 y 6 % referente a la literatura, respectivamente.

Los resultados del análisis próximo y análisis elemental CHN-O se reportan en la Tabla 5. La torrefacción de tusa y fibra ocasiona un aumento en el contenido de carbono, mientras elementos como el hidrógeno, nitrógeno y oxígeno disminuyen porcentualmente. Este comportamiento concuerda con estudios previos sobre la torrefacción de tusa y fibra (Uemura *et al.*, 2011). Particularmente, la torrefacción de fibra a 250 °C ocasiona un mayor aumento en el contenido de carbono comparada con la tusa.

El poder calorífico del material sólido aumenta al incrementar la temperatura del proceso. Este comportamiento es causado por el aumento en el porcentaje de carbono presente en el material torrefacto, ya que durante la descomposición térmica los principales elementos que reaccionan son el oxígeno y el hidrógeno, aumentando ampliamente la cantidad de carbono dispuesta en el material sólido torrefacto.

El poder calorífico más alto se observa para la tusa torrefacta a 270 °C (cerca a 23 MJ/kg). Sin embargo, también se reporta un menor rendimiento másico de sólido remanente a esta temperatura. Con una temperatura de torrefacción de 250 °C la fibra presenta un mayor poder calorífico comparado con la tusa.

Tabla 5. Caracterización del producto sólido obtenido de la torrefacción de tusa y fibra en retorta para diferentes tratamientos.

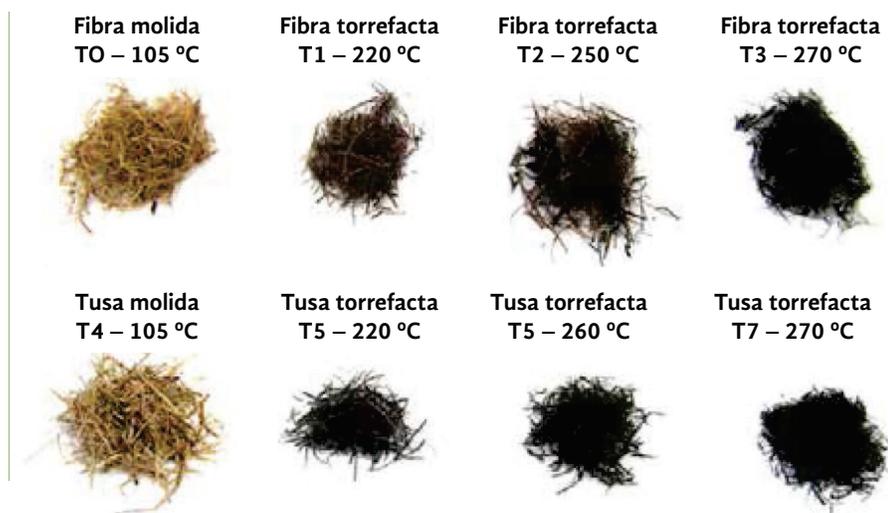
Biomasa	Tratamiento	Poder calorífico		Composición próxima			Composición elemental (db)				
		HHV _{ad} [MJ/kg]	LHV _{ad} ** [MJ/kg]	Humedad _{ad} [%]	Material volátil _{ad} [%]	Carbono fijo _{ad} [%]	Ceniza _{ad} [%]	Carbono [%]	Hidrógeno [%]	Nitrógeno [%]	Oxígeno [%]
Tusa	Sin tratar	17,94	17,07	8,65	73,39	15,05	2,91	48,19	5,19	1,04	42,4
	Torrefacción 220 °C	19,09*	18,43	0	73,45	22,72	3,82	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Torrefacción 250 °C	20,04*	19,38	0	66,37	27,98	5,65	53,27	5,49	0	34,3
	Torrefacción 270 °C	23,07	22,41	0	47,61	46,41	5,98	56,22	4,55	0,76	32,5
Fibra	Sin tratar	17,77	16,75	14,68	64,87	15,8	4,64	49,49	5,87	0,01	39,18
	Torrefacción 220 °C	19,99	19,33	0	75,92	17,98	6,1	55,92	5,08	0	30,36
	Torrefacción 250 °C	21,01*	20,35	0	64,63	26,9	8,47	56,22	4,55	0,76	32,5
	Torrefacción 270 °C	21,83*	21,17	0	59,66	31,5	8,84	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

* Valor calculado mediante correlaciones experimentales de Ecuaciones 1 y 2.

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

n.d. – No determinado.

Figura 8. Apariencia de muestras de tusa y fibra torrefacta a diferentes temperaturas: 220, 250 y 270 °C. Las muestras T0 y T4 corresponden a muestras secadas a 105 °C. Tiempo de torrefacción de 30 minutos.



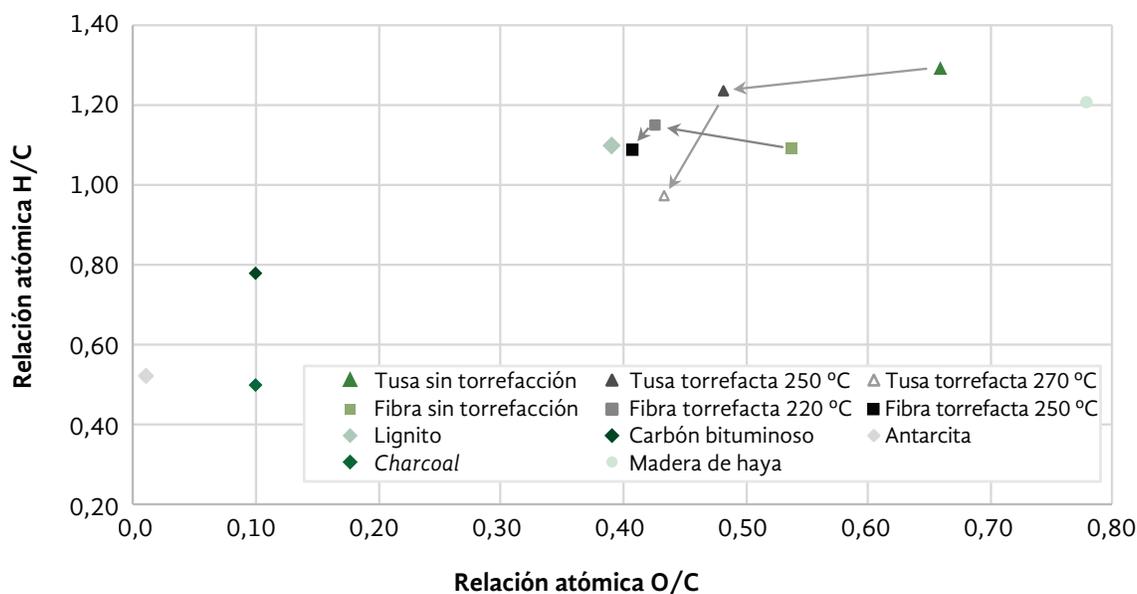
Apariencia de las muestras torrefactas

En la Figura 8 se puede observar la apariencia de las muestras de material torrefacto de tusa y de fibra obtenidas en la retorta a diferentes temperaturas comparadas con las muestras secas a 105 °C durante 3 h. El color de la tusa y la fibra tiende a oscurecerse a medida que aumenta la temperatura de torrefacción. En este estudio la tusa torrefacta a 270 °C presenta la coloración más oscura. Este comportamiento ha sido reportado en trabajos previos (Tumuluru *et al.*, 2011; Uemura *et al.*, 2011).

Relaciones H/C y O/C

La evaluación de las relaciones atómicas H/C y O/C permite comparar los resultados obtenidos en la torrefacción de tusa y fibra con la biomasa sin tratar y con otros combustibles. Este análisis se desarrolla en el diagrama de Van Krevelen de la Figura 9, donde se reportan las relaciones O/C y H/C tanto de las muestras de esta investigación como de los valores típicos de otros carbones como lignito, carbón bituminoso, antracita y carbón vegetal (*charcoal*).

Figura 9. Diagrama de Van Krevelen para la torrefacción de tusa y fibra: triángulos para muestras de tusa; cuadrados para muestras de fibra; rombos para muestras de carbones reportadas por Uemura *et al.*, (2011); y círculo para madera de haya (Tumuluru *et al.*, 2011).



Al comparar la fibra y la tusa con la madera de haya (madera dura proveniente del *Fagus sylvatica*, que presenta una alta disponibilidad en Europa y ha sido estudiada por varios autores que estudian los procesos termoquímicos) se observa que la relación atómicas O/C de las especies de este estudio son menores, lo cual indica un mayor contenido de carbono con respecto al contenido de oxígeno de la tusa y la fibra. Sin embargo, se resalta que dicha relación es mucho mayor en carbones minerales como la antracita o el carbón bituminoso, los cuales tienen contenidos de carbono entre 75 y 95 %. El comportamiento observado durante la torrefacción de tusa y fibra indica que las relaciones atómicas H/C y O/C se aproximan a las reportadas para otros carbones. Particularmente, la torrefacción de fibra a 250 °C durante 30 min presenta relaciones atómicas similares a las del lignito.

Durante la torrefacción disminuyen las relaciones H/C y O/C, lo cual resulta en una menor producción de humos durante la combustión, una menor formación de vapor de agua y una reducción en las pérdidas de energía durante procesos de combustión, debido a que el contenido de humedad es casi nulo

y se dispone de menos energía en la evaporación de esta (Tumuluru *et al.*, 2011). Adicionalmente, en la torrefacción de tusa a 250 °C se obtiene una mayor variación de la relación O/C (de 0,75 antes a 0,51 después de la torrefacción con una variación igual a 0,24) comparada con la presentada con la fibra en las mismas condiciones (de 0,55 antes a 0,43 después de la torrefacción con una variación igual a 0,12), indicando una mayor degradación térmica en la tusa.

Caracterización de productos líquidos y gaseosos

En la Figura 10 se presenta la caracterización de los productos líquidos y gases de la torrefacción de tusa y fibra en función de la temperatura; en la parte de arriba se presenta la composición del producto líquido y abajo la composición del producto gaseoso. El principal producto líquido corresponde al agua y en la fase gaseosa el principal compuesto es el dióxido de carbono.

El contenido de agua en el producto líquido oscila entre 80 y 63 %, del cual entre 77 y 38 % corresponde a la humedad inicial de la biomasa y entre 3 y 26 % co-

responde al agua producida en las reacciones de pirólisis de la torrefacción. A medida que aumenta la temperatura de torrefacción aumenta la proporción de agua de pirólisis y de orgánicos presentes en los productos líquidos. Algunos autores reportan un alto contenido de ácido acético y ácido fórmico (Fu *et al.*, 2010).

Del contenido de CO y CO₂ en los gases se observa que al aumentar la temperatura de torrefacción se fomenta la producción de monóxido de carbono tanto en la tusa como en la fibra. En la cromatografía de gases no se reportan concentraciones apreciables de otras especies como hidrógeno o metano.

Figura 10. Caracterización del producto líquido y el producto gaseoso de torrefacción de tusa (derecha) y fibra (izquierda). Composición de producto líquido (arriba) y composición de producto gaseoso (abajo).

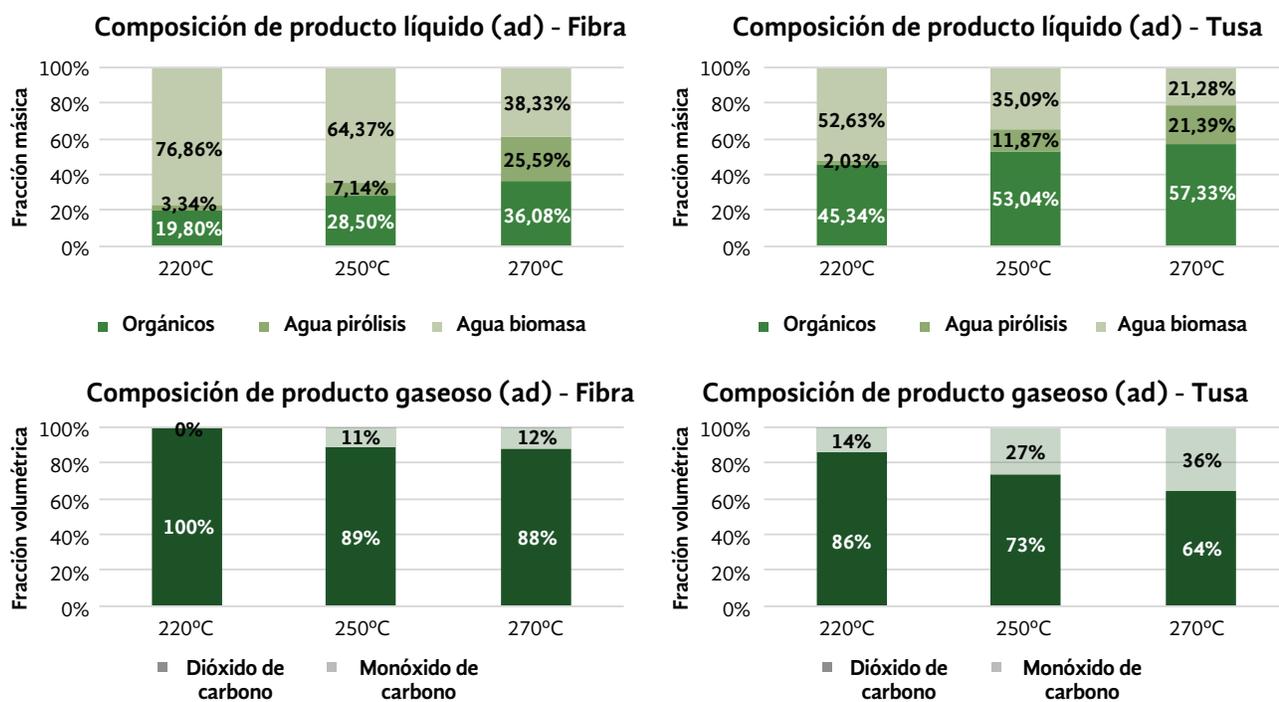


Tabla 6. Análisis elemental y poder calorífico de orgánicos, producto líquido y producto gaseoso según Ecuaciones 3-7.

Biomasa	Tratamiento	Producto líquido						Producto gaseoso	
		%C	%H	%O	HHV (MJ) ^{grg} / (kg)	% Agua en productos líquidos	HHV (MJ) ^{ljq} / (kg)	Fracción másica CO	HH _{v,gas} (MJ/kg)
Fibra	220°C – 30 min	31,78	0,34	67,88	3,15	80,20	0,62	0	0,00
Fibra	250°C – 30 min	44,96	3,95	51,08	14,44	71,51	4,11	7	0,71
Tusa	250°C – 30 min	40,68	5,65	53,68	14,90	46,96	7,90	19	1,92
Tusa	270°C – 30 min	58,80	7,37	33,83	25,74	42,67	14,75	26	2,63

Figura 11. Rendimiento másico y rendimiento energético de tusa y fibra para diferentes temperaturas de torrefacción, secado y pirólisis a 520°C. Valores reportados en base seca libre de ceniza.

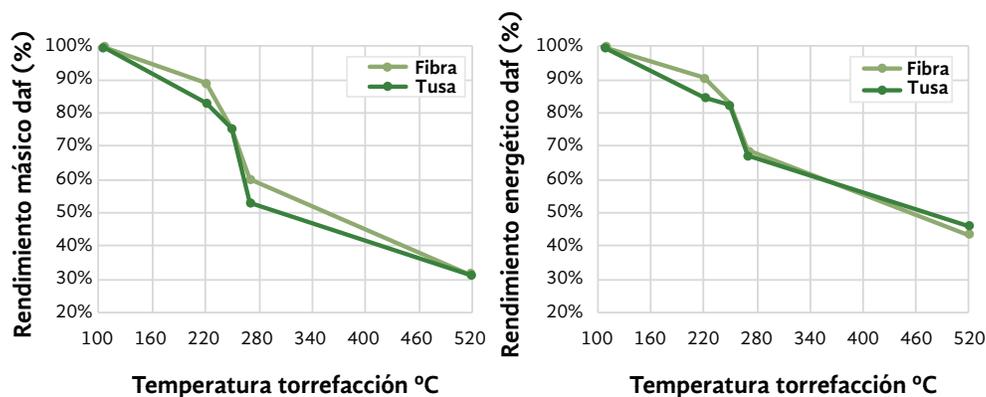


Tabla 7. Balance de energía del proceso de torrefacción de tusa y fibra de acuerdo con la Ecuación 11.

Biomasa	Tratamiento	Energía en la biomasa db (MJ/kg biomasa,db)	Energía en los productos de torrefacción (MJ/kg biomasa,db)			Entalpía reacción
			Sólido torrefacto _{db}	Producto líquido	Producto gaseoso	
Fibra	220°C – 30 min	15,28	18,20	0,04	0,00	2,95
Fibra	250°C – 30 min	15,28	18,37	0,27	0,04	3,40
Tusa	250°C – 30 min	16,50	15,40	1,27	0,14	0,30
Tusa	270°C – 30 min	16,50	12,94	4,75	0,31	1,49

En la Tabla 6 se presenta la composición elemental de los orgánicos determinada a partir de las ecuaciones 5, 6 y 7. Al aumentar la temperatura de torrefacción aumenta el contenido de carbono en los compuestos orgánicos. Con una temperatura de torrefacción de 250 °C la fibra reporta un mayor contenido de carbono y un menor contenido de hidrógeno y oxígeno.

A partir de la composición elemental de los compuestos orgánicos se calcula su poder calorífico superior de acuerdo con la Ecuación 4. Dicha información se presenta en la Tabla 6 para la torrefacción de fibra a 220 y 250 °C y para la tusa a 250 y 270 °C. Los componentes que se encuentran en menor proporción (orgánicos y monóxido de carbono) son los que realizan el aporte de energía a los productos en estas fases. De acuerdo con datos experimentales reportados por Prins *et al.*, (2006), el poder calorífico supe-

rior de los condensables generados en la torrefacción de madera de haya a 250 °C; durante 30 minutos es próximo a 5 MJ/kg y a 270 °C durante 30 minutos presenta un valor de 12 MJ/kg, valores que se asemejan a los reportados en este trabajo para la tusa y la fibra. Se resalta que el poder calorífico del producto líquido es mayor que el de los gases. Adicionalmente, el poder calorífico del producto líquido en la torrefacción de tusa a 270 °C presenta un alto potencial para su aprovechamiento energético.

Con el poder calorífico de los productos de torrefacción es posible realizar un balance de energía del proceso y determinar la entalpía de reacción de acuerdo con la Ecuación 11. Este balance se presenta en la Tabla 7. Se observa que el material sólido torrefacto contiene la mayor cantidad de energía presente en los productos de torrefacción, seguido del producto líquido. El producto gaseoso contiene la menor cantidad de energía.

Al aumentar la temperatura de torrefacción aumenta la energía contenida en los productos líquido y gaseoso. Con una temperatura de torrefacción de 250 °C los productos líquidos y gaseosos de la tusa reportan un mayor contenido energético comparado con la fibra. Esta diferencia es causada por la mayor descomposición térmica de la tusa comparada con la fibra.

En todos los tratamientos de torrefacción se observa una entalpía de reacción positiva, lo cual indica que la reacción global de torrefacción es endotérmica (la energía presente en los productos es mayor a la contenida en la biomasa). Al aumentar la temperatura de torrefacción las reacciones son más endotérmicas. Este comportamiento es reportado en trabajos realizados por Bates & Ghoniem (2013) y Yan *et al.*, (2010), donde se indica que las reacciones de torrefacción son ligeramente endotérmicas.

A partir de la información presentada en la Tabla 5 es posible determinar el rendimiento másico y energético del proceso de acuerdo con las Ecuaciones 8 y 9. Estos parámetros se resumen en la Figura 11 para cada tipo de biomasa en cada tratamiento. Los rendimientos másico y energético para la tusa y fibra secas a 105 °C durante 3 horas correspondientes al experimento T0 y T4 (Figura 7) son iguales a 100 % debido a que a esta temperatura no hay descomposición térmica del producto.

Adicional a las pruebas de torrefacción descritas, para el análisis de resultados se reportan dos tratamientos adicionales denominados “pirólisis de tusa” y “pirólisis de fibra”. Estos tratamientos permiten comparar la torrefacción con un proceso de pirólisis a mayor temperatura (próximo a 520 °C), en el cual se reporta un poder calorífico del material sólido mayor (superior a 25 MJ/kg) y un rendimiento másico considerablemente bajo (la degradación térmica de la biomasa es mayor en la pirólisis, ocasionando una mayor pérdida de masa). Estos tratamientos se realizan de acuerdo con la norma ISO 647 *Determinación del rendimiento de alquitranes, agua, gases y residuos de carbonizado por destilación a baja temperatura*, a través de un procedimiento en el que se calienta la biomasa en la retorta de aluminio en ausencia de oxígeno hasta una temperatura de 520 °C con una tasa de calentamiento aproximada de 6 °C/min.

En la Figura 11 se concluye que los rendimientos másico y energético obtenidos son ligeramente ma-

yores para la fibra que para la tusa. Se observa que en el rango de temperaturas estudiadas para la torrefacción la variación del rendimiento másico y energético es bastante grande. Es decir, la temperatura de torrefacción en los niveles de temperatura estudiados juega un papel determinante en el proceso de degradación térmica de la biomasa, ya que a temperaturas superiores a 300 °C incrementa considerablemente la volatilización de la materia prima y la posterior pérdida de contenido energético en el material sólido.

De la experimentación realizada en la retorta es posible observar que el mejor escenario desde el punto de vista del rendimiento energético se encuentra en un rango de 220 y 250 °C, puesto que es en este punto donde se observa un mayor rendimiento energético de los productos, tanto para la tusa como para la fibra.

Conclusiones

En la experimentación se concluye que es posible realizar torrefacción de tusa y de fibra de palma africana en los rangos de temperatura evaluados de 220 a 270 °C, generando un material sólido torrefacto con un poder calorífico entre 19 y 23 MJ/kg y un rendimiento másico que oscila entre 50 y 90 %. Desde el punto de vista del rendimiento energético las temperaturas más adecuadas para la torrefacción se encuentran en un rango de 220 y 250 °C. La tusa reporta un mayor grado de descomposición térmica en los montajes de termobalanza y retorta al compararlo con la fibra, generando un producto con un alto poder calorífico pero con un rendimiento másico y energético considerablemente bajo.

De la experimentación en la termobalanza se concluye que el tiempo de torrefacción debe ser inferior a 30 minutos, ya que la tasa de pérdida de material sólido al cabo de este tiempo es considerablemente menor respecto al punto de mayor pérdida de masa registrado. Prolongar la torrefacción por más tiempo incurre en un excesivo gasto de energía en calentamiento, comparado con el aumento en el poder calorífico del producto sólido. Es necesario adelantar los experimentos sobre el efecto del tiempo de torrefacción en el poder calorífico de la tusa y fibra torrefactas con el fin de tener un mejor criterio de selección sobre este parámetro.

Durante la torrefacción de tusa a 270 °C se produce una mayor cantidad de monóxido de carbono CO comparada con la torrefacción de fibra a las mismas condiciones, obteniéndose un mayor poder calorífico en los gases. El producto líquido se compone de una fracción mayoritaria de agua y una fracción menor de compuestos orgánicos. Durante la torrefacción de tusa a 270 °C se obtiene un menor contenido de agua, lo que favorece el contenido energético en este producto disponible para combustión. El poder calorífico de esta fase es mayor al obtenido en la fase gaseosa, sin embargo, su aprovechamiento se ve limitado por el alto contenido de humedad.

Respecto al balance de energía del proceso de torrefacción, el material sólido torrefacto contiene gran parte de la energía inicial de la biomasa, seguida por el producto líquido y en menor medida el producto gaseoso. Adicionalmente, se observa un comportamiento endotérmico para la torrefacción de tusa y fibra en los rangos de temperatura evaluados.

Dentro de las recomendaciones generadas por este estudio se resalta la necesidad de caracterizar la composición química de los compuestos orgánicos presentes en los productos líquidos. Esta caracterización genera criterios tecnológicos sobre el aprovechamiento energético de los orgánicos y permite definir las condiciones autotérmicas del proceso. Debido

a que las pruebas de este estudio se desarrollaron a escala laboratorio, es limitada la identificación de su consumo energético a escala industrial o las características de los productos cuando se acentúan las condiciones de transferencia de masa y de calor, razón por la que es necesario realizar pruebas con un montaje experimental a escala demostrativa.

Finalmente, en el presente estudio se observa el aumento en el poder calorífico de la tusa y la fibra torrefactas. Sin embargo, no es del todo claro el comportamiento de estos residuos torrefactos por periodos prolongados de almacenamiento. Por esta razón se recomienda evaluar el efecto de la temperatura, el tiempo de torrefacción y el tamaño de partícula, no solo en el poder calorífico sino en la estabilidad bioquímica del material torrefacto.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Fedepalma – Fondo de Fomento Palmero por el soporte y la financiación del proyecto y a la empresa Regeneración Ltda. por su participación conjunta. Adicionalmente, se reconoce el apoyo de la planta de beneficio Unipalma S.A. al suministrar el material de tusa y fibra utilizado en la experimentación del proyecto.

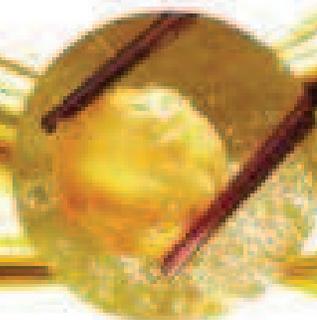
Referencias bibliográficas

- 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.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. (Second Edition). Jamestown Road, London: Elsevier Inc.
- Bates, R. B., & Ghoniem, A. F. (2013). Biomass torrefaction : Modeling of reaction thermochemistry. *Bioresource Technology*, 134, 331–340. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.158>
- Bergman, P. C., Boersma, 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*, July, 1-71.

- Casta, T. G., & Romero, H. M. (2012). *Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia : estado del arte y perspectivas de investigación*. Boletín Técnico No. 31. Bogotá: Fedepalma.
- Demirbas, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-434.
- Fedepalma (2013). *Minianuario Estadístico 2013*. Bogota: Fedepalma.
- Fedepalma (2015). *Minianuario Estadístico 2015*. Bogotá: Fedepalma.
- Fedepalma (2016). *Minianuario Estadístico 2016*. Bogotá: Fedepalma.
- Fedepalma & Cenipalma. (2013). *Reporte - Síntesis del Proyecto GEF Conservación de la Biodiversidad en las Zonas de Cultivos de Palma: Capítulo 1 Antecedentes y problemática*. Bogotá: Fedepalma - Cenipalma.
- Fu, P., Hu, S., Xiang, J., Li, P., Huang, D., Jiang, L., ... Zhang, J. (2010). FTIR study of pyrolysis products evolving from typical agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 88(2), 117-123. <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.03.004>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de biomasa: Cuesco de palma de aceite*. Kassel, Alemania: Kassel University Press GmbH.
- Granados, D., Velásquez, H. I., & Chejne, F. (2014). Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process. *Energy*, 74, 181-189. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.046>
- Ley No. 1715. República de Colombia - Gobierno Nacional (2014).
- Li, C., & Suzuki, K. (2010). Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification - An overview. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 594-604. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.009>
- Ospina, L. M. F. (2014). *Síntesis de carbón activado peletizado a partir de mineral del Cerrejón*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*, 31(15), 3458-3470. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.008>
- Ramirez, N., & Garcia-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.
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. Á. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28(5), 499-507. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 5(october), 384-401. <http://doi.org/10.1089/ind.2011.0014>

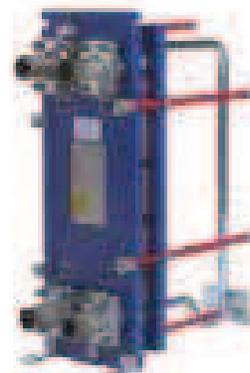
- Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T., & Yusup, S. B. (2011). Torrefaction of oil palm wastes. *Fuel*, 90(8), 2585-2591. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.021>
- Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Yan, W., Hastings, J. T., Acharjee, T. C., Coronella, C. J., & Victor, R. V. (2010). Mass and Energy Balances of Wet Torrefaction of Lignocellulosic Biomass. *Energy & Fuels*, 13, 4738-4742. <http://doi.org/10.1021/ef901273n>

De fruto a alimento y mucho más



Soluciones a la medida que agregan valor a su proceso

Nuestras soluciones integran sistemas de desarenado, decantadores de tres fases, centrifugas de recuperación, filtros de copilos, centrifugas purificadoras y secador a vacío, generando versatilidad para adaptar los sistemas actuales o nuevos, a sistemas de clarificación que permiten reducir hasta en 30% la generación de efluente por TRFF y tener pérdidas de aceite alrededor de 0,35% Aceite/TRFF en clarificación, comparado con las tecnologías tradicionales.



Alfa Laval Colombia
Trans. 93 # 53 - 48 int. 70
Bogotá
info.colombia@alfalaval.com
Tel. 291 6330
Cel. 315 299 2966



www.alfalaval.com