EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y TÉRMICAS DE TALLOS DE CAFÉ Y SU ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA PRODUCCIÓN DE PELLETS COMO BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO

EVALUATION OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND THERMAL IN STEMS COFFEE AND ITS ECONOMIC ANALYSIS FOR THE PRODUCTION OF SOLID PELLETS AS BIOFUEL



Viruta de madera de tallo de café para la producción de pellets

Natalia Romo Ortega, Ing.
Coodinadora de Producciòn
Centro de capacitacion don Bosco
Universidad Autónoma de Occidente, Cali - Colombia.
nataliaortega21@gmail.com

Andrés Fernando Toro, Ing.
Grupo Interinstitucional de Investigación en Biocombustibles Grubioc.
Universidad Autónoma de Occidente,Cali - Colombia.
andresfernandotoro@yahoo.com

Luz Marina Flores Pardo, Ph.D.
Profesor del Departamento de ingeniería industrial.
Universidad Autónoma de Occidente,Cali - Colombia

Abdul Cañas Velasco, M.Sc.
Profesor del Departamento de Ciencias Económicas
Universidad Autónoma de Occidente
Cali - Colombia
acanas@uao.edu.co

**Recibido: 16 Febrero 2011 *Aceptado 4 Abril 2011*

RESUMEN

En el Valle del Cauca, Colombia, existen alrededor de 28014 hectáreas de cafetos. Anualmente tras el proceso de renovación por soca[1], cada hectárea produce aproximadamente 97643 toneladas de biomasa de tallos de café, quedando en el campo en forma de desechos, generándose problemas de contaminación y accidentalidad se realiozo una evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de esta biomasa con el

[1]Soca, zoca, es una palabra usada en América Latina para designar a los brotes o retoños de las plantas como la caña de azúcar, el arroz y, en este caso, el cafeto

propósito de convertirla en un combustible útil para el sector industrial. Siguiendo la norma Europea CEN/TS 335, se concluyó que la mejor opción para darle valor agregado a un residuo de este tipo es la producción de pellets de madera. El contenido de humedad de la madera de café fue de 11,44% con un poder calorífico de 16607 BTU/kg, lo que lo ubica en el mismo nivel de otras biomasas (bagazo de caña, cisco de café, etc.) usadas comúnmente por las industrias. Su contenido de 12,9% de carbono fijo garantiza una fácil ignición durante su combustión. El análisis económico para montar una fábrica de pellets en el país se estimó en dólares americanos para un periodo de 8 años. La inversión inicial fue de USD $ 376444, cubriendo los gastos de compra, cambio de motor e importación de la maquinaria, compra del lote, construcción de la edificación y arranque de la planta. Los ingresos mensuales fueron de USD $ 118760, con una utilidad del 26,6% y una tasa interna de retorno del 25,92% al tercer año de la inversión. La planta se calculó para una superficie de 388 m^2, con una eficiencia del 70% y un a capacidad de producción de 2184 toneladas mensuales de pellets. El costo por tonelada se calculó a USD $ 52 y el ahorro estimado para una microempresa consumidora de carbón puede ser de USD $ 19422 aproximadamente durante el primer año después de realizar el cambio de combustible a pellets de madera de café.

PALABRAS CLAVE

Madera de cafeto, pellets, poder calorífico, análisis de inversión, precio de venta.

ABSTRACT

There are about 28014 hectares of coffee trees. Each year after the renewal process by ratoons or shoots, each hectare produces about 97643 tonnes of coffee stem biomass, left in the fields as waste, creating problems of contamination and causing accidents by accumulations falls. Thus, a detailed assessment of physicochemical and thermal properties of this biomass for the purpose of converting it into a useful fuel for industry was carried out. Following the European standard CEN / TS 335, it was concluded that the best choice to give added value to this kind of waste is the production of wood pellets. Its moisture contents was 11,44%, with a calorific value of 16607 BTU/kg. These properties put it in the same level of other biomass sources (bagasse, coffee debris, etc.) commonly used by industries. Its contents of fixed carbon, 12,9%, ensures easy ignition and combustion. The economic analysis to implement a pellet factory in the country was estimated in US Dollars for a period of eight years. Initial investment has to be of USD $ 376444 to cover the costs of equipment purchasing, engine changes and costs of machinery imports, purchase of building lot, building construction, and plant startup. Estimated monthly income was USD $ 118760, with a profit of 26,6% and a return rate of 25,92% in the first three years. The plant was calculated for an area of 388 m^2, with an efficiency of 70%, and a production capacity of 2184 tons per month of pellets. The cost per ton was estimated at USD $ 52 and the estimated savings for a small business traditionally consuming coal is USD $ 6201 approximately after the first year of the change of coal by coffee wood pellets.

KEYWORDS

Coffee's wood, pellets, calorific value, investment, price of sale.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo actual hace frente a una disminución progresiva de sus fuentes energéticas debido principalmente a que son no renovables (combustibles fósiles). Su enorme uso conduce a un impresionante aumento de gases contaminantes liberados a la atmosfera, lo cual causa graves cambios en el clima global. Por ello, es de suma importancia buscar alternativas a través de un conjunto de tecnologías. Una solución apropiada y renovable es el uso de la energía solar en forma de biomasa, preferiblemente de residuos lignocelulósicos (Chau et al., 2009).

Alrededor del mundo, se estima que el 55% de los 4 billones de metros cúbicos de madera disponibles son usados anualmente por la población como combustible en forma directa o combinándola con carbón. De esa población, en Colombia, se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo es aprovechado un 20%, siendo el otro 40% abandonado en el

campo y el último 40% se transforma el proceso de aserrío, en astillas, corteza y aserrín (Focer, 2001). En el campo es común ver desechos forestales sin ningún uso energético. Son pocas las familias que utilizan estos mal llamados "desperdicios" como fuente de calor para generar energía ya sea para cocinar o empleándolos como combustibles en la calefacción. Recientemente, en Colombia se han realizado estudios de producción de biomasa a partir del bagazo de la caña de azúcar o de la cascarilla del arroz, pero se ha dejado a un lado toda la biomasa proveniente de los desechos forestales, desperdiciando estos subproductos (Fernandez, 2009).

El objetivo de esta investigación se centra en la evaluación técnico-económica de la utilización de biomasa como fuente de biocombustible sólido. Los tallos de café después de realizar la soca son considerados en especial por los grandes caficultores como desperdicio, ya que comúnmente son abandonados en laderas. Este residuo de café que puede llegar a formar pilas de varias toneladas, se pudre generando contaminación o, en otros casos, tapando cuencas de ríos. El café durante su procesamiento genera una serie de subproductos que son utilizables, entre los que se encuentran la pulpa, la cáscara de café, el biogás procedente de las aguas residuales y el mucílago entre otros, pero aún no se ha considerado la utilización de la madera de tallos de café como un subproducto de alto valor en el ámbito de su utilización como fuente de energía renovable.

Se han conocido diferentes estudios sin éxito con la madera de café. Uno de ellos se realizó en la multinacional Smurfit Kappa Cartón de Colombia, donde veinte años atrás se realizaron pruebas de obtención de pulpa con madera de café. Finalmente, las investigacionesno arrojaron resultados favorables para continuar, así que esta empresa adecuó toda su maquinaria para recibir sólo madera de pino y eucalipto. Tablemac, empresa líder en Colombia en el sector de aglomerados, asegura que la densidad óptima de la madera para hacer tableros es del orden de 500-600 kg/m^3, por lo que la madera de café al ser más densa afectaría la calidad de sus productos. Finalmente se encontró que, con la substitución de un 20 a un 30% de toda la madera soqueada por caficultor en la región antioqueña (Antioquia, Colombia), se podría aprovechar como materia prima para la fabricación de mobiliario doméstico y arquitectónico, con un proyecto llamado "De grandes posibilidades de desarrollo y progreso para el país, favoreciendo aspectos como la reforestación, el empleo, la economía y aprovechamiento de insumos nacionales" según lo afirma Henry Madrid, Gerente General del Grupo Monarca (Madrid, 2010). En abril del 2006, esta empresa antioqueña inició un proyecto para el aprovechamiento de la madera de café de la variedad Caturra para la fabricación de sillas y butacas.

En esta investigación se abre una nueva oportunidad para el aprovechamiento de este residuo maderable. En Colombia no existe una planta de producción que aproveche este tipo de residuos para fabricar pellets. La biomasa es un biocombustible de "carbono neutral", es decir, que la cantidad de CO_2 emitida por la combustión es, comparativamente la misma fijada durante la fotosíntesis. Por tanto, su utilización no incrementa el efecto invernadero. Por otro lado, debido a que los pellets tienen en su composición muy poco azufre, la combustión de los mismos no produce dióxido de azufre, por lo que se piensa que con la utilización de este desecho, se verán reducida las consecuencias que este gas puede generar, como por ejemplo, la producción de la lluvia ácida, en comparación con los combustibles fósiles tradicionales (Klinger, 2002).

En América del Sur, Argentina y Brasil cuentan con industrias de pellets a base de los residuos de la industria del aserrío que generan aproximadamente 2.8 millones de residuos anuales. Colombia es un país que cuenta con todos los medios, tanto de materia prima como de espacio para poseer una infraestructura suficiente que permitiera abrir una industria de pellets de alta calidad, promoviendo así el uso eficiente de desechos agroindustriales apoyados en tecnologías modernas que permitan ubicar al país a la altura de potencias como Brasil en cuanto al ahorro de energía eléctrica y combustibles fósiles.

2. MATERIALES Y METODOS

Todos los análisis físicos y termogravimétricos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Combustión y Combustibles de la Universidad de Valle en Cali-Colombia.

Materia prima

Se tomaron muestras de tallos de café de diferentes fincas cafetaleras ubicadas en zonas rurales de Felidia, Trujillo y Alcalá en el Departamento del Valle del Cauca, en Colombia. Para el muestreo se seleccionaron aleatoriamente plantas de café (de 2 a 7) en un área de aproximadamente 60 metros cuadrados, las cuales

fueron “soqueadas” rudimentariamente y la biomasa obtenida pesada. Las muestras se clasificaron como Tipo A, Tipo B y Tipo C. En la Tabla 1 se presenta la masa de cada muestra.

Tabla 1. Masa de los troncos obtenidos (tipo A, tipo B y tipo C)

Clacificacio de Tallos	Cantidad de Tallos	Masa total de los Tallos (g)
Tipo A	11 Tallos	6500 g
Tipo B	8 Tallos	8500 g
Tipo C	4 Tallos	7045 g

Fuente: Autor

Las muestras fueron almacenadas a la intemperie bajo la luz solar de 29 a 35°C y evitando que el agua de la lluvia pudiera interferir en los resultados. Antes de trasladarse al laboratorio se pasaron por una sierra convencional que convirtió los tallos en viruta y finalmente fueron tamizados (tamiz numero 20), para efecto de un mejor análisis.

Prueba de humedad. A los tallos de café se les midió su contenido de humedad determinado a tres diferentes tiempos de almacenamiento después de ser “soqueados” (3 días, 1 mes, 9 meses). El análisis se realizó acorde con el método de análisis ASTM E 871-82 (ASTM, 1998a) y CEN/TS 14774-3 (Technical Specifications, 2004). Se usaron 4g de muestra para cada uno de los tres ensayos. El equipo empleado fue un horno CHN 2000 marca Leco a una temperatura de 105ºC hasta obtener la muestra a masa constante.

Análisis aproximado y elemental. Los análisis de humedad, materia volátil y cenizas se realizaron con base en el método de análisis ASTM 5142 (1998c). Para los análisis de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se uso el método ASTM 5373 (1998a), para el análisis de azufre el ASTM 4239 (1998b) y, finalmente, para el análisis de carbón fijo el ASTM 3172 (1998c). En todos los casos se siguieron las metodologías ASTM establecidas con anterioridad. La muestra de 3g fue quemada y carbonizada entre 220 y 550ºC, en un equipo analizador de carbono, hidrógeno y nitrógeno CHN 2000 marca Leco, obteniéndose los resultados en base seca.

Determinación del poder calorífico. El valor de poder calorífico a volumen constante en base seca fue determinado acorde a la norma ASTM 5142 (1998c). Las masas de las muestras oscilaban entre 0.3044 y 0.3015 g. La combustión se realizó empleando una bomba calorimétrica modelo AC-350 marca LECO a una presión de 3102.66 kPa (450 psi).

Prueba termogravimétrica. El cambio de masa en rangos específicos de temperatura proporciona indicaciones sobre la composición de la muestra y su estabilidad térmica, demostrando cómo se comporta la biomasa en función de su masa y su temperatura. Este análisis se inició con una temperatura de 10ºC, la cual aumentó en intervalos de 10ºC cada minuto llegando hasta los 800ºC en 80 minutos. Los análisis se realizaron con base en la norma ASTM E 1641 (1998), usando un equipo SDT 2960 Simultáneo DSC-TGA modelo TA Instruments.

Analisis económico. Para el análisis económico, se calculo teóricamente la cantidad de toneladas a producir. A escala de laboratorio se reprodujo lo que hará a nivel industrial para máquinas con 5 toneladas por hora de capacidad. Se realizó un estudio de costos por proceso para evaluar los costos fijos y variables y poder estimar un precio de venta por tonelada de producto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Prueba de humedad

Después de hacer las pruebas de humedad para tallos de madera de café con un tiempo mínimo de 3 días y un máximo de 9 meses, después del “soqueo”, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Prueba de humedad

Tipo de Muestra	Tiempo despues Del Soqueo	Porcentaje De Humedad
Muestra tipo A	3 Dias	34,7 %
Muestra tipo B	1 Mes	11,5%
Muestra tipo C	9 Meses	11,44%

Fuente: Autor

Como se observa en el Tabla 2, después de aproximadamente el primer mes de encontrarse almacenados los tallos a la intemperie y protegidos de la lluvia, perdieron cerca del 67% de su humedad, por lo que se trata de un material orgánico poco higroscópico. Es importante

resaltar que esta biomasa de tipo leñoso presenta un porcentaje de humedad más bajo que otro tipo de residuos como el del bagazo de la caña de azúcar, que tiene una humedad cercana al 50%. El hecho de poseer una baja humedad le confiere una ventaja en la combustión ya que los contenidos elevados de humedad reducen la eficiencia del proceso de combustión ya que debe evaporarse esa agua desaprovechando parte de la energía del material.

Análisis aproximado y elemental

aserrín de roble y de 72,2% en las astillas de pino. Las materias volátiles son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica. Para el análisis con madera de tallo de café el porcentaje de materia volátil fue de un 73,63% comprendido por agua, hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. El carbono fijo es la parte que no es volátil y se quema en estado sólido. Según el cuadro 3 se encuentra en los rangos de 12,9% en madera de café y 24,4% en corteza de pino. encontraron en cortezas de Parlikh , y otros (2007)

Tabla 3. Composición química de la madera de café comparado con 12 variedades de biomasas tipo leñosa

Biomasas de madera	Análisis aproximado					Analisis elemental				
	Mat. Volatil	C. Fijo	Humedad	Azufre	Cenizas	C	O	H	N	S
Madera de café	73.63	12.9	11.44	0.06	2.03	43.0	36.3	4.7	0.9	0.07
Corteza de eucalipto*	78.8	17.2	12.0	0.05	4.8	48.7	45.3	5.7	0.3	0.05
Residuo de aserrío*	82.0	17.5	62.9	0.03	0.5	51.4	42.5	6.0	0.1	0.03
Aserrín*	84.6	14.3	34.9	0.02	1.1	49.8	43.7	6.0	0.5	0.02
Madera de olivo*	79.6	17.2	6.6	0.03	3.2	49.0	44.9	5.4	0.7	0.03
Corteza de pino*	73.7	24.4	4.7	0.07	1.9	53.8	39.9	5.9	0.3	0.07
Astillas de pino*	72.2	21.6	7.6	0.09	6.0	52.8	40.5	6.1	0.5	0.09
Residuos forestales*	79.9	16.9	56.8	0.10	3.2	52.7	41.1	5.4	0.7	0.10
Residuos de madera*	78.8	16.6	26.6	0.08	5.4	51.4	41.9	6.1	0.5	0.08
Sauce*	82.5	15.9	10.1	0.06	1.6	49.8	43.4	6.1	0.6	0.06
Madera de roble*	78.1	21.4	6.5	0.10	0.5	50.6	42.9	6.1	0.3	0.10
Aserrin de roble*	86.3	13.4	11.5	0.01	0.3	50.1	43.9	5.9	0.1	0.01
Media*	79.1	17.4	20.9	0.05	2.5	50.2	42.1	5.7	0.4	0.05
Mínimo*	72.2	12.9	4.7	0.01	0.3	43.0	36.3	4.7	0.1	0.01
Máximo*	86.3	24.4	62.9	0.10	6.0	53.8	45.3	6.1	0.9	0.10

** Información tomada de An overview of the chemical composition of biomass; Stanislav V. Vassilev[a,b], David Baxter[b], Lars K. Andersen[b], Christina G. Vassileva[a].*

[a] Central Laboratory of Mineralogy and Crystallography, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev Street, Block 107, Sofia 1113, Bulgaria.

[b] Institute for Energy, Joint Research Centre, European Commission, P.O. Box 2, NL-1755 ZG Petten

El Tabla 3 muestra los porcentajes en base seca del análisis aproximado y elemental de 12 variedades de biomasas leñosas comparadas con la madera de café. Como se mencionó en la metodología, se determinaron humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo. La materia volátil estuvo en los rangos de 86.3% en el madera altos contenidos de carbón fijo. Sin embargo, es común en las biomasas que la materia volátil y el carbono fijo tengan una proporción de más de 3,5%, mientras que esta proporción para el carbón sea normalmente de 0,6-2,4%. Acorde a Chen y colaboradores (2009), el contenido de humedad debe ser lo más bajo

posible, generalmente en rangos de 10-15% ya que un alto contenido de humedad presenta problemas en la combustión y requeriría de energía excesiva para el proceso de secado. Los rangos de humedad para biomasas leñosas son de 4,7% en corteza de pino y 62,9% en residuos de aserrío. Los resultados expuestos son satisfactorios ya que la madera de café al ser expuesta bajo la luz solar, tiende a perder humedad rápidamente y presenta un contenido de agua menor a otros materiales, como los residuos de madera o forestales. Los rangos para las cenizas se encontraron en un orden del 0,3% en aserrín de roble y del 6,0% en astillas de pino. La determinación del contenido de cenizas indica si la biomasa puede alcanzar una combustión casi total. Según Telmo y colaboradores (2010) usualmente las variedades tropicales, tienen altos contenidos de cenizas comparado con especies de bosques templados.*http://www.torestalbweb,com*

La composición elemental de una sustancia combustible es su contenido (porcentaje en masa) de carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno, humedad y cenizas. Es la característica técnica más importante del combustible y constituye la base para los análisis de los procesos de combustión. Esto corrobora el resultado presente en el parámetro de materia volátil expresado. La fracción de masa de carbón osciló entre 53,8% en corteza de pino y 43,0% en madera de café. El oxígeno entre 45,3% en corteza de eucalipto y 36,3% en madera de café. El hidrógeno entre 6,1% en residuo de madera, sauce, astillas de pino y madera de roble y 4,7% en madera de café. Estos valores al parecer son de gran importancia para determinar la proporción teórica entre aire-combustible en sistemas de termo-conversión.

La tabla 3 muestra claramente que esas biomasas contienen altos contenidos de carbón que, comparados con el hidrógeno y el oxígeno, incrementan el valor energético. El bajo contenido de nitrógeno y de azufre es de especial importancia para la protección del medio ambiente, con rangos de 0,1% en residuos de aserrío y aserrín de roble y de 0,9% en madera de café y 0,01% en aserrín de roble y 0,10% en residuos forestales y madera de roble, respectivamente. La concentración de N y S en diferentes especies es de la mayor importancia debido a que durante la combustión causan emisiones gaseosas (NOx y SOx). Investigaciones recientes han demostrado que el mayor impacto ambiental de la combustión de combustibles sólidos lo constituyen las emisiones de NOx (Nussbaumer, 2002). El NOx aumenta de manera proporcional con el contenido de N presente en la biomasa (Leckner, 1993). El azufre contenido en los biocombustibles sólidos forma gases de SO_2 y, algunas veces, de SO_3. La eficiencia de fijación del azufre en las cenizas depende de la concentración de Ca en el combustible. Se esperarían problemas de emisión a partir de concentraciones de azufre por encima del 0.2% y la madera de cafeto que se está estudiando tiene 0.06%.

Poder calorífico superior (PCS)

El poder calorífico de 16607 BTU/kg de la madera de tallo de café hace de esta biomasa un producto competitivo en el mercado, ya que se encuentra en el mismo rango que el cisco de café. En general, el tipo de biomasa leñosa tiende a tener un poder calorífico muy similar, manejando un rango de 3000 a 5000 kilocalorías (JEA Bioenergy , 2002), pero aunque el carbón sea quien tenga un alto poder calorífico le hace perder ventaja por el solo hecho de que sea menos reactivo.

Poder calorífico inferior (PCI)

Una vez conocida la cantidad de humedad e hidrógeno en la muestra se procedió a calcular el PCI siguiendo la siguiente fórmula:

PCI = PCS (kcal / kg) – 5.85 (9 * % Hidrógeno ÷ 100 + % Humedad ÷ 100) = 4185 kcal / kg

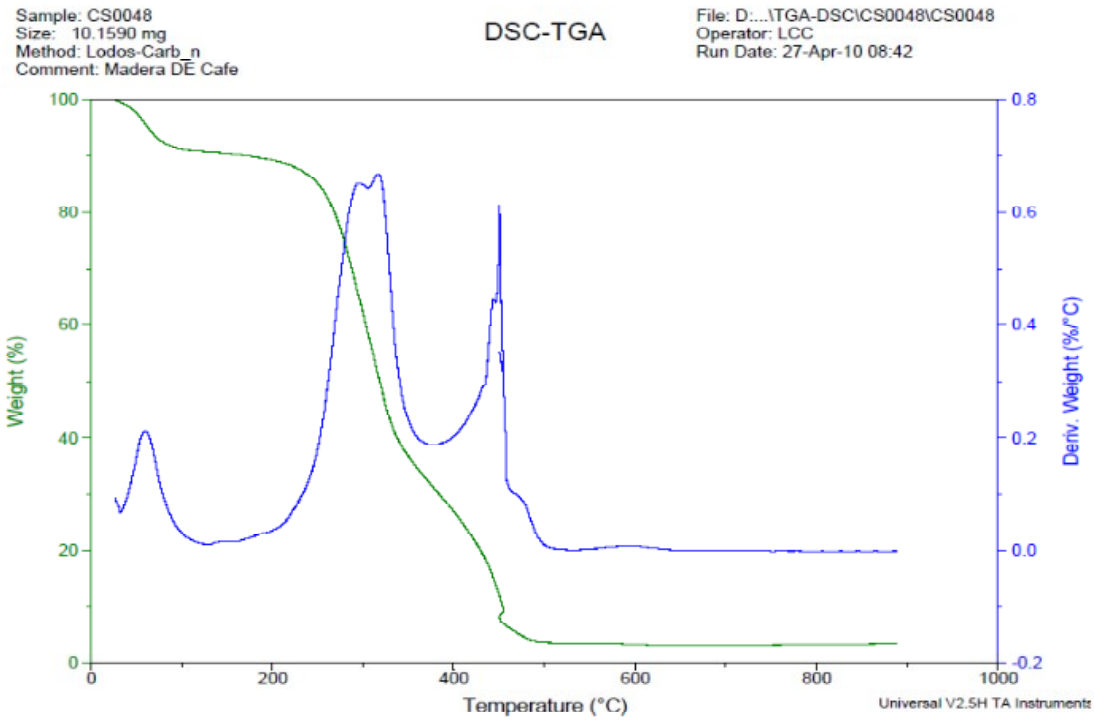
El valor del poder calorífico inferior no presentó tanta variabilidad como el del superior, lo que mantiene al producto con un alto valor competitivo comparado con otro tipo de biocombustibles.

La biomasa tipo madera proveniente del tallo de café presentó una humedad al momento de ser analizada del 11,44%.

Prueba termo gravimétrica

Como se aprecia en la Figura 1 de los análisis termogravimétricos (*TGA*, siglas en inglés para *thermogravimetric analysis*) de la madera de café, la línea que indica la pérdida de masa con respecto al tiempo (100% de la masa total) se encuentra desplazada hacia la izquierda, lo que indica que se trata de un material reactivo, lo cual se corrobora en el análisis aproximado.

En la curva de *DSC*, (siglas en inglés para *differential scanning calorimetry*) hay 3 picos máximos que indican la pérdida de masa para la madera de café. La temperatura a la que ocurre inicia a los 50, 300 y 450ºC. A una temperatura de casi 460ºC, la muestra se ha consumido completamente a hasta alcanzar una masa de 5% b.s.



Fuente: Autor

Figura 1. Diagrama termo gravimétrico de la madera del café

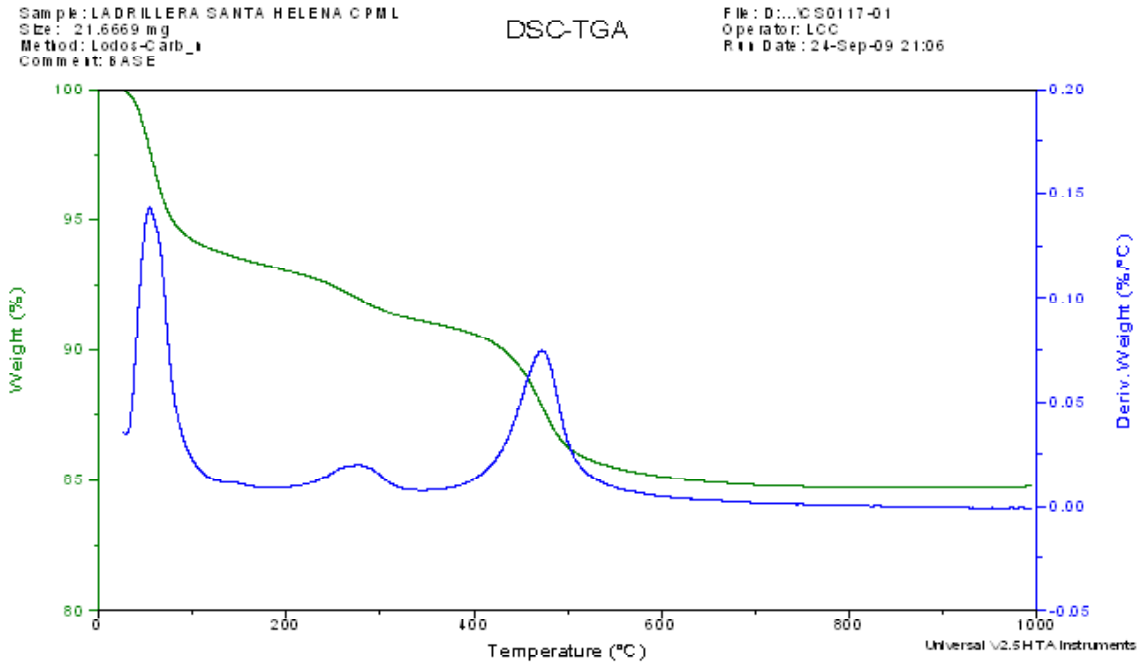
Según Kim y colaboradores (2010) para materiales lignocelulosicos la descomposición termoquímica ocurre entre 275 y los 350ºC, para la hemicelulosa entre 150 y 350ºC, para la celulosa entre 275 y 350ºC y para la lignina entre 250 y 500ºC. Esto puede corroborarse en el análisis termogravimétrico (*TGA*) de la Figura 1. Los picos más altos pueden ser asignados a la descomposición de la hemicelulosa y la celulosa. Este análisis puede compararse con el propuesto por Boluda y colaboradores (2010) donde realizan esta determinación a una biomasa de desechos de frutas (mandarina) y se observa que su pérdida de masa llega hasta un 15%.

Posteriormente, la muestra no se quema completamente y, por consiguiente, es un indicativo de que no es lo suficientemente reactiva.

Evaluando el análisis presentado en el Gráfico 2, de la empresa Ladrillera Santa Helena, claramente se aprecia cómo la línea de masa (100% de masa total) se encuentra desplazada más hacia la derecha, indicando que la biomasa no es muy reactiva, con un progreso lento para perder masa, concluyendo que no es necesario precalentar la muestra para realizar la ignición y seguidamente su combustión, todo lo opuesto a la madera de café.

Estudio técnico-económico

El Figura 3 muestra un diagrama esquemático del proceso de producción de pellets. Para este ejercicio se estimó un 30% de desperdicio lo que arroja un total de 3.5 toneladas de pellets producidos por hora. Los cálculos para determinar el tamaño de los lotes de producción se realizaron basados en la capacidad mínima de las máquinas cotizadas, que se encuentra alrededor de 5 toneladas por hora. Mensualmente entrarían a proceso 3120 toneladas de biomasa de madera de café. Según los datos suministrados por la Federación Nacional de Cafeteros, en el Valle del Cauca hay 28014 hectáreas de grandes caficultores, caficultor “soquea” la 5a parte de una plantación en el año, se cuenta con 5602 hectáreas “soqueadas”. Cada una de ellas produce 17,43 toneladas de biomasa (Álvarez-Hernández y Martínez 2006), dando un aproximado de 97642,86 toneladas de tallos de café anualmente, lo cual es suficiente para abastecer el

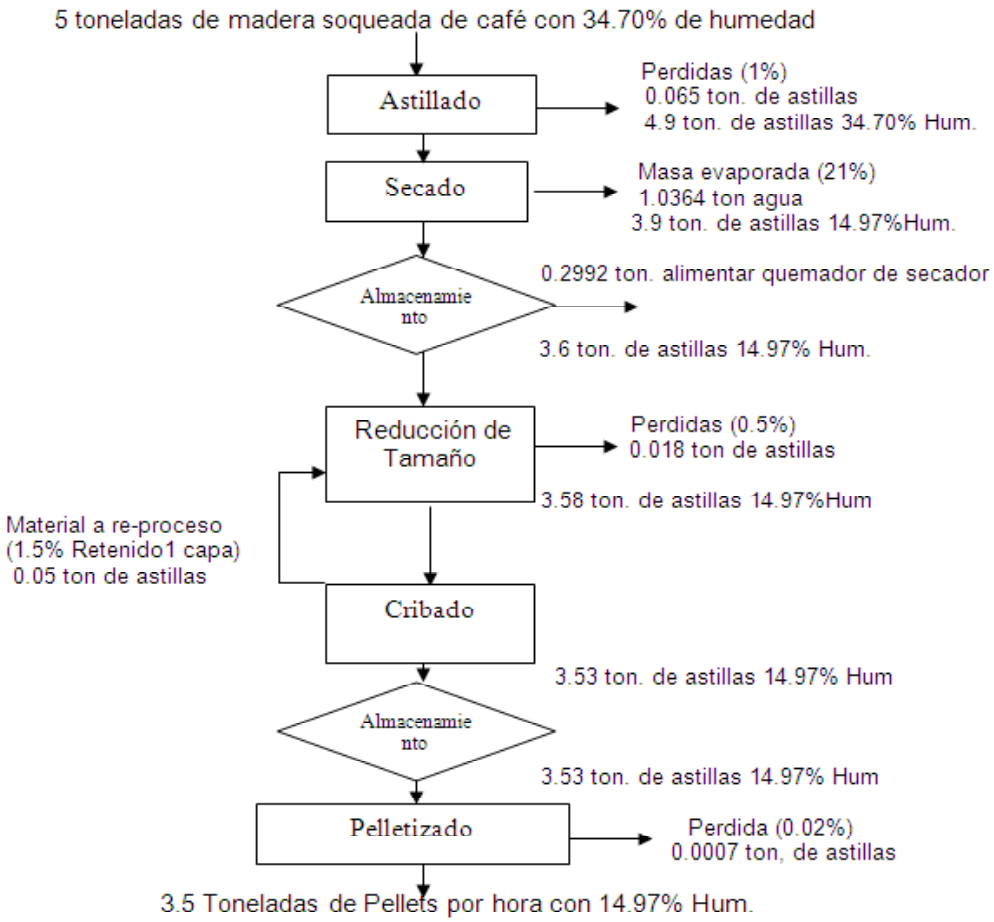


Fuente: Francisco Velasco S. M. Sc. Laboratorio de Combustión y Combustibles, Universidad del Valle, 2010

Figura 2. Diagrama termogravimétrico de arcilla

proceso por un año y medio aproximadamente. La materia prima (tallos de café) no tiene un precio de venta establecido hasta el momento, por lo que se tomó la información otorgada por el Grupo Monarca, que retribuyen a los cafeteros pagando entre USD $ 0,13 y 0,15 por tallo. Con esto se realizó un estimado de precio de venta de USD $ 1,78 por tonelada de tallos de café, esta información se dio a conocer a diferentes empresarios del café quienes estuvieron de acuerdo en el valor agregado de algo que ellos conocen como un desecho. Para la construcción de la planta se optó por Cartago, Valle del Cauca, dada su cercanía a municipios ricos en fincas cafeteras, además, se trata de un municipio con más movimiento industrial que otros en el norte del Valle. El terreno para la construcción se calculó con un área de 388 m2. La dimensión de la bodega de almacenaje de la materia prima, tiene un área de 123,25 m^2, está incluida en el área del terreno mencionada. El costo por m^2 en un terreno plano, ubicado en Cartago, se cotizó aproximadamente a USD $13,59, por lo tanto el costo del terreno es de USD $5274. El valor del metro cuadrado corresponde al de un lote ubicado en la zona industrial de Cartago en la salida a Zaragoza norte del Valle del Cauca (Juan Pablo Londoño, 2010). Finalmente el costo por la edificación se cotizo en USD $ 46765.

La maquinaria fue cotizada en Shanghai, China, con la industria
Wood Pellet Line, excepto el secador rotativo que se cotizó en Colombia con la empresa caleña Termo Vapor industrial. La maquinaria trabaja con energía eléctrica a 220 voltios, excluyendo el secador rotativo que quema 68 kg h^{-1} de astillas de madera de café que salen directamente del proceso. Los precios establecidos son los que se encuentran vigentes para todo el año 2010. El *TRM* (*tasa representativa del mercado*) utilizado para realizar la conversión a dólares americanos fue la del día 13 de marzo del 2010. Los valores de compra y su descripción se muestran en la tabla 4.
Por otro lado, se debe de realizar el cambio de motor a la maquinaria importada para que la potencia eléctrica sea la adecuada en Colombia, por un costo de USD $ 2287 El valor de la importación desde el puerto de Shanghai, China, hasta el puerto de Buenaventura,



Fuente: Autor

Figura 3. Balance de masa para la fabricación de pellets

Colombia para esta investigación fue de USD $ 100889 y el arranque de planta se consideró con un costo de USD $ 93824.

El precio de venta de una tonelada de pellets corresponde a USD $ 42,3, este valor se obtuvo del cálculo estimado de todos los gastos mensuales expuestos en el cuadro 5, sobre la capacidad de producción de pellets mensualmente. Si se compara con el precio de venta del carbón, que para el año 2010 es de USD $ 84 (Canasta Energética Colombiana, 2010), es muy favorable ya que la tonelada de pellets se encuentra a USD $ 41,7 por debajo del combustible más barato y más utilizado en el mercado colombiano. Se estimó una utilidad del 26.6% como el porcentaje de ganancias óptimo para este proyecto.

Tabla 4. Resumen de los costos de los equipos

Equipo	Unid.	Cap.	Astillas a procesar	Precio incluido FOB en USD
Chippeadora	1	5 t/hr	5 t/hr	USD $ 9522,59
Secador rotativo	1	5 t/hr	4.9 t/hr	USD $ 31223,49
Molino de martillo	1	5-6 t/hr	3.6 t/hr	USD $ 16310,18
Criba	1	4-6 t/hr	3.58 t/hr	USD $ 3828,18
Silo	3	5 t/hr	3.53 t/hr	USD $ 16639,48
Pelletizadora	1	2-3.7 t/hr	3.53 t/hr	USD $ 49880,65
Costo total en USD				USD $ 127.405

Fuente: Autor

expresados en el cuadro 5. El costo de producir una tonelada pellets es de USD $ 39 El análisis económico se estimó en dólares americanos para un periodo de 8 años. La planta emplea el 70% de su capacidad. Se trabajan 24 horas diarias, en turnos de mañana, tarde y noche 312 días al año y se obtienen 26208 toneladas de pellets anualmente.

El método de depreciación que se utilizó fue el de línea recta y un impuesto de renta del 33%. Para el segundo año de operación, se manejó un incremento en los gastos

Tabla 5. Costos fijos y variables

Costos fijos	
Materia prima	USD $ 7601
Transporte alquiler de volquetas 8 metros cúbicos	USD $ 39151
Mantenimiento de la maquinaria	USD $ 192
Depreciación de la maquinaria	USD $ 1061
Depreciación de edificación	USD $ 194
Subtotal	USD $ 46341
Costos variables	
Mano de obra directa	USD $ 10671
Energía eléctrica	USD $ 35745
Agua	USD $ 1065
Subtotal	USD $ 47482
Total/mes	USD $ 93824

Fuente: Autor

del 5% y un incremento en el precio de venta de pellets del 10%. Para calcular el valor presente neto, VPN, se tomó como referencia el mercado nacional, en donde las inversiones en el sector financiero se pagan entre el 7 y el 8% con una tasa del 15% efectivo anual. La recuperación de la inversión se estimó para el tercer año de operación. Los ingresos se determinaron de acuerdo con la cantidad de toneladas a producir en el mes y éste se multiplicó por el precio de venta que se estableció a una tonelada de pellets.

Uno de los factores que hace rentable este proyecto, es la abundancia de la materia prima para el proceso de fabricación de pellets y el bajo costo al que se puede conseguir. Se incluye el alto poder calorífico, capaz de competir con el carbón a un bajo precio de venta, lo que lo hace interesante para mercados internacionales que requieren importar pellets de países europeos a altos costos.

Análisis comparativo con empresas consumidoras de carbón

Según la canasta energética, 1 kg carbón tiene un poder calorífico de 24200 BTU/kg y los pellets de 16,607 BTU/kg. Por lo tanto, 2 kg de pellets equivalen 1 kg de carbón. A modo de proyectar la rentabilidad, tanto de los pellets como del biocombustible sólido, se expone el caso de una empresa quemadora de carbón en una caldera de 100 HP (Bocanegra, 2010). El Taba 6 presenta un análisis teórico comparativo.

Tabla 6. Análisis teórico comparativo del carbón versus pellets

Combustible	Cantidad	M BTU	Precio mensual	Precio anual
Carbón	92 Kg/hr	2226.4	USD $ 5.763	USD $ 69.158
Pellets	134 Kg/hr	2226.4	USD $ 4.145	USD $ 49.735
Ahorro en el primer mes				
			USD $ 19.422	

Fuente: *Autor*

El ahorro anual debido al cambio de combustible es de USD $ 19422. Con una demanda como la expuesta y manejando un valor presente neto, VPN, del 15%, la recuperación del capital invertido comienza en el tercer año de iniciar la producción.

Análisis comparativo con el bagazo de caña

El precio de venta de una tonelada de bagazo puede costar alrededor de USD $ 21,00. Se requiere de dos kilogramos de bagazo de caña para igualar el poder calorífico de un kilogramo de pellets, por lo tanto si una empresa que consuma bagazo de caña mas como desecho industrial que como biocombustible, gasta en un proceso productivo 5 tonelada de bagazo por hora, es decir 41885000 BTU/Ton, estaría dejando de percibir unos ingresos de USD $108,75 por esa cantidad de bagazo. Cambiando a pellets, se necesita 2,5 toneladas por hora con 41885000 BTU/Ton, con un costo de USD $200,79, lo cual significa que los ingresos que se obtendrían por la venta del bagazo no superarían el gasto que genera los pellets que los sustituyen. Consecuentemente no es nada rentable para una empresa consumidora de bagazo cambiar de biocombustible. Aunque la producción de pellets abastecería la demanda de una empresa consumidora de bagazo no es aconsejable

competir con el bagazo de caña, ya que, estas empresas se caracterizan por quemar grandes cantidades de biocombustibles, y además el precio del bagazo es mucho mas económico, los residuos de los cafetos pueden ser útiles para otros giros industriales. El bagazo, de hecho, cubre las necesidades de las empresas de la industria azucarera (ingenios) e incluso puede cogenerar electricidad.

Tabla 7. Análisis teórico del bagazo de caña versus pellets

Combustible	Consumo por hora	Consumo Mensual	Costo Mensual en Dólares
Bagazo	5 ton	3600 Ton	USD $ 78,303
Pellets	2.5 Ton	1800 Ton	USD $ 144,570
		USD $ 66,266	
Incremento en gastos por cambio a pellets			

		Producción mensual de Pellets
Combustible	Consumo mensual	
Pellets	1800 Ton	2184 Ton

Fuente: Autor

4. CONCLUSIONES

El tiempo requerido por la madera de café para llegar a un porcentaje de humedad óptima del 10%, es de aproximadamente un mes al exponerla en forma astillada a la intemperie en condiciones ambientales afines de una ciudad de clima tropical y cerca de los 1000 metros sobre nivel del mar en época de estiaje. Este tiempo es relativamente corto si se cuenta con un espacio grande de varios cientos de metros cuadrados para tener en almacenamiento una cantidad mensual de 3120 toneladas como materia prima. Sin embargo, al no ser práctico para una empresa emergente proveerse de espacios grandes solamente para almacenamiento, se opta por la reducción de la humedad de la materia prima, por medio de un horno rotativo, el cual es usado generalmente en la industria de la madera y con el cual se agilizaría el proceso de secado, disminuyendo consecuentemente el espacio necesario para su almacenamiento temporal. La relación entre el contenido de humedad y el poder calorífico es inversamente proporcional entre menor sea la humedad mayor será el valor del poder calorífico, este valor en la biomasa estudiada se considera muy similar al de otros biocombustibles sólidos que están siendo actualmente utilizados en el mercado.

Esto a simple vista indica que este producto sería competitivo y viable para su comercialización en el mercado.

En cuanto a su competitividad con el carbón, combustible sólido mejor posicionado en el sector industrial por sus características y poder energético, los pellets tiene la ventaja sobre éste de que su tiempo de ignición es mucho más corto.

El bagazo de caña por su abundancia como coproducto satisface completamente y a un costo muy bajo, las necesidades energéticas de los ingenios azucareros, además de que las calderas de estos últimos actualmente están tecnológicamente adaptadas para el uso del bagazo.

La posibilidad de utilizar pellets de madera de cafeto en estas calderas es poco factible. La única forma de poder utilizar madera de cafeto como combustible, seria en tiempos de escasez de bagazo, como los extremadamente lluviosos y en donde hubiera necesidad de complementar la baja cantidad de bagazo disponible o durante el arranque de los ingenios durante la zafra. Para esto sería necesario incorporar la madera de cafeto al bagazo por medio de la desfibración. De esta forma la biomasa resultante de esta mezcla seguiría conservando prácticamente todas las propiedades físicas y mecánicas del bagazo, por lo cual su uso en las calderas no afectaría la operación y se lograría mejorar su poder calorífico y disminuir el contenido de humedad del combustible.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Occidente por el financiamiento otorgado a este proyecto. Asimismo, reconocen el apoyo académico del profesor Abdul Cañas Velasco, al grupo GRUBIOC y a su coordinadora la Doctora Luz Marina Flores Pardo por la ayuda prestada.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Álvarez-Hernández, J.R.; Martínez-Tovar, D.G. (2006). Aprovechamiento de la energía calórica de estu-

fas campesinas para el secado del café; Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café; pag 88; Vol 57; Abril-Junio; Chinchiná - Caldas – Colombia.

ASTM. (1998). Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures; ASTM D5142 – 09. Washington, D.C. EEUU.

ASTM. (1998a). Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke; ASTM D5373

ASTM. (1998b). Standard Test Methods for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High- Temperature Tube Furnace Combustion Methods; ASTM D4239

ASTM. (1998c). Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke; ASTM D3172 REV

Bocanegra, J. P. (2010). Comunicación personal. Ingeniero mecánico de Termo Vapor Industrial, Cali. Entrevista realizada el 27 de marzo de 2010.

Boluda, M.; García, L.; González, F. del P.; López, A. (2010). Mandarin peel wastes pretreatment with steam explosion for bioethanol production; Bioresource Technology, Volume 101, Issue 10, Pages 3506-3513

Canasta Energética Colombiana. (2010). [Citado el 12 de marzo del 2010] Disponible en Internet: http://www.aciem.org/bancoconocimiento/i/indicessaucedo2007/Canasta_Precios_Mayo_24.xls

Chau, J. ; Sowlati, T., Sokhansanj, S.; Preto, F., Melin, S., Bi, X.. (2009). Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry. Applied Energy, Volume 86, Issue 3, Pages 364-371

Chen, I.; Xing, I., Han, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 9, Pages 2689-2695

Engormix.com. (2009). [En línea] Café, clima y suelos. [Citado 23 de abril de 2009]. Disponible en Internet: http://www.engormix.com/cafe_clima_suelos__s_articulos_759_AGR.htm

Fernández, J. (2009). [En línea] Energías renovables para todos. p. 02. [Citado 29 mayo de 2009]. Disponible en Internet:
http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_BIOMASA.pdf

Focer. (2001). Manual sobre energía renovable: BIOMASA. Casa editorial. Ciudad de edición, Costa Rica.

Food and agriculture organization. (2010). [Citado 8 de febrero del 2010]. Disponible en Internet www.fao.org/docrep/007/y5143s/y5143s0v.htm

Forestalweb.com. (2010). [Citado 8 de febrero del 2010]. Disponible en Internet: http://www.forestalweb.com

IEA Bioenergy. (2002). Sustainable Production of Woody Biomass for Energy A Position Paper. ExCo. 2002:03. [Citado 20 de marzo del 2010]. Disponible en Internet: http://www.ieabioenergy.com/library/157_PositionPaper-SustainableProductionofWoodyBiomassforEnergy.pdf

Kim, M.;Hgoc, Phvong, Th, N,;Hee,Jung, S.h. (2010). Conversion of woody biomass into fermentable sugars by cellulase from Agaricus arvensis; Bioresource Technology, Volume 101, Issue 22, Pages 8742-8749

Klinger-brahan, W. (2002). Combustibilidad de la madera: La experiencia con especies colombianas. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. P. 10. Bogotá, Colombia.

Leckner. (1996). Methods for reducing the emission of nitrous oxide from fluidized bed combustion; Energy Conversion and Management, Volume 37, Issues 6-8, Pages 1297-1302

Madrid, H. (2010). Comunicación personal. Gerente General del Grupo Monarca. Ciudad. Entrevista realizada el 23 de junio de 2009.

Nussbaumer, T. (2002). Combustion and co-combustion of biomass. In: Proceedings of the 12th European Biomass Conference, vol. I. pp. 31–37. ISBN: 88-900442-5- X. Austria.

Papelera Palermo S.A. (2010). [Citado 10 de febrero del 2010]. Disponible http://papelera.eurofull.com/shop/detallenot.asp?notid=46

Parikh, J.; Channiwala, S.A.; Ghosal, G.K. A. (2007). correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. Fuel, Volume 86, Issues 12-13, Pages 1710-1719

Ruiz, P. A. (2009).*[En línea]* Madera de Café: Ingenio con aroma propio. p. 04. [Citado 01 Abril 2009]. Disponible en Internet: http://*www.revista-mm.com/rev55/muebles.pdf*.

Red interinstitucional de tecnologías limpias. (2010). [Citado 11 de marzo del 2010] Disponible en Internet www.tecnologiaslimpias.org

Servicios forestales integrales. (2010). [Citado 10 de febrero del 2010]. Disponible: w*ww.serviciosforestalesintegrales.com/.../Pellets_de_madera_alternativa_energetica_limpia.docx*

Technical Specifications. CEN/TS 14774-3:2004. (2005). Solid biofuels – Methods for the determination of moisture content – Oven dry method – Part 3: Moisture in general analysis sample.

Telmo, C.; Lousada, J. Y Moreira. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood; Bioresource Technology, Volume 101, Issue 11, Pages 3808-3815.

Vassilev, S.V.; Baxter, D.; Andersen, L.K. Y Vassileva, C.G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass; Fuel, Volume 89, Issue 5, Pages 913-933.

This document was created with Win2PDF available at http://www.win2pdf.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.