



Anexo B

Anexo B



Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia

INTRODUCCIÓN

La composición fisicoquímica y el potencial energético de la biomasa residual son aspectos importantes a considerar cuando se está evaluando una posible tecnología para su aprovechamiento. Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar. Por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado gas pobre, mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Adicionalmente para la selección de una tecnología de aprovechamiento energético de la biomasa, es importante conocer sus características físicas para definir el tipo de tratamiento previo que es necesario aplicar (*Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002*).

En este trabajo se realizó un muestreo de biomasa residual en el nivel nacional, que incluyó la recolección de 96 muestras en diferentes puntos del país. En la caracterización de la biomasa se evaluaron dos variables físicas, 17 químicas, seis microbiológicas y el contenido energético en todas las muestras.

Las principales propiedades que se evalúan en un residuo son la humedad, el carbono fijo, las cenizas, los metales alcalinos, la relación celulosa/lignina y el contenido energético. Para la conversión energética de la biomasa que presente un contenido de agua superior al 30%, las variables humedad y la relación celulosa/lignina son las más importantes a tener en cuenta para seleccionar el proceso de aprovechamiento.

Para garantizar el correcto procedimiento en la toma, preservación, transporte y análisis de las muestras se siguieron los protocolos establecidos por el laboratorio de Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales de la Universidad Industrial de Santander (ver Anexo C).

Los análisis físicos, químicos y microbiológicos se realizaron en el Ceiam, con el apoyo de Laboratorios Calderón de la ciudad de Bogotá. El análisis del contenido energético se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS.

El estudio de la composición de la biomasa residual se llevó a cabo en las siguientes etapas:

- Definición de la población objeto de estudio.
- Selección de los puntos de muestreo.
- Recolección de muestras a nivel nacional.
- Caracterización físicoquímica, microbiológica y energética de las muestras.

1. POBLACIÓN BASE DE ESTUDIO

Como se observa en las siguientes tablas, en el estudio se identificaron 25 tipos de biomasa residual de las cuales 22 corresponden al sector agrícola (cascarilla, bagazo, pulpa, cisco, etc.), uno al sector pecuario (estiércol) y dos a los residuos sólidos orgánicos urbanos (residuos de poda y residuos de centros de abasto y plazas de mercado).

2. PUNTOS DE MUESTREO

En las Tablas 17, 18 y 19 se indica para los tres sectores las especies incluidas, los tipos de biomasa residual y los sitios donde se tomaron las muestras, los cuales

corresponden a 35 puntos localizados en diferentes regiones a nivel nacional.

La localización de los sitios de muestreo se realizó con base en el análisis de los aspectos que pueden influir en la composición de la biomasa residual. En los sectores agrícola y pecuario se tuvo en cuenta el sistema de producción, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. Con respecto a los residuos sólidos orgánicos urbanos se consideró la influencia de las costumbres alimenticias por regiones.

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de biomasa residual y el número de sitios seleccionados se recolectaron las 96 muestras, para el análisis físicoquímico, energético y microbiológico.

Tabla 17. Población de estudio y sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa residual del sector agrícola

Subsector	Tipo residuo		Localización			N° de muestras
	Agrícola de cosecha	Agroindustrial	Zona de producción	Departamento	Municipio	
Maíz	Rastrojo, capacho, tusa	-	Nororiente	Santander	Sabana de Torres y Floridablanca	6
Arroz	Tamo	Cascarilla	Sur	Tolima	Guamo	4
Caña azúcar	Hojas	Bagazo	Valle del Cauca	Valle del Cauca	Palmira	4
Palma de aceite	-	Raquis, fibra, cuesco	Central	Santander	Puerto Wilches	6
Plátano	Raquis y vástago	Plátano rechazo	Noroccidente	Antioquia	Turbo	6
Café	Tallos	Pulpa, cisco	Eje cafetero	Antioquia Caldas	Andes Chinchiná	6
Caña panelera	RAC, hoja seca	Bagazo	Hoya del Río Suárez	Santander	Barbosa	4
Banano	Raquis, Vástago	Banano rechazo	Noroccidente	Antioquia	Apartado	6

3. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

La caracterización de la biomasa residual agrícola, pecuaria y de los residuos sólidos orgánicos urbanos contempló la determinación de los parámetros que describen la composición de la materia orgánica (Castells *et al.*, 2005); correspondiente a un análisis fisicoquímico y de contenido energético.

Como variables físicas se evaluaron la densidad aparente, la densidad real, la humedad y los sólidos totales. En cuanto a las variables químicas están incluidas en el análisis último, el análisis próximo y el análisis estructural.

El contenido energético se evaluó mediante el Poder Calorífico Inferior (PCI). Por otra parte,

a las muestras del sector pecuario, teniendo en cuenta el tipo de residuo y los potenciales riesgos en su manipulación, se les realizó un análisis microbiológico, que incluyó la valoración de coliformes fecales y totales, mesófilos aeróbios, mohos y levaduras.

Los ensayos se realizaron por duplicado. Los resultados se presentan en porcentaje peso a peso en base seca, a excepción del poder calórico inferior que se expresa en unidades de energía. Los resultados de la caracterización se presentan, en Tablas adjuntas a los mapas para cada tipo de biomasa, en los capítulos 1 (Tablas 2 a la 9), 2 (Tablas 10 a la 12) y 3 (Tablas 13 y 14).

Tabla 18. Población de estudio y sitios seleccionados para la toma de muestra de la biomasa residual del sector pecuario

Subsector		Localización			N° de muestras
		Zona de producción	Departamento	Municipio	
Bovino	Leche	Andina	Antioquia	San Pedro	12
		Andina	Cundinamarca	Mosquera	
	Carne	Caribe	Córdoba	Tierra Alta	
		Suroriental	Meta	Puerto López	
	Doble propósito	Andina	Caldas	Pensilvania	
		Caribe	Cesar	Aguachica	
Porcino	Tecnificado	Central	Valle	Palmira	10
		Antioquia	Antioquia	Santa Rosa de Osos	
		Oriental	Santander	Piedecuesta	
	No tecnificado	Antioquia	Antioquia	Santa Rosa de Osos	
		Oriental	Santander	Piedecuesta	
Avícola	Ponedoras	Santanderes	Santander	Bucaramanga	8
		Central	Cundinamarca	Guaduas	
	Engorde	Santanderes	Santander	Bucaramanga	
		Antioquia y Eje cafetero	Cundinamarca	Cajicá	

3.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

La caracterización fisicoquímica de un material involucra realizar a la muestra un análisis último y un próximo. Estos análisis se expresan en base seca, razón por la cual se requiere previamente evaluar el contenido de humedad.

Con el análisis elemental se determina el contenido de compuestos simples que se gasifican y que aportan energía en las reacciones de combustión. Este análisis incluye cuantificar en la muestra el porcentaje en peso de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N) (Castells; *et. al.*, 2005).

El análisis próximo abarca determinar en la muestra el contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo. Sin embargo cuando se desea valorar una aplicación industrial de un residuo, como fuente energética,

es recomendable incluir en el análisis la cunfificación del contenido de proteínas, las grasas y aceites, la densidad aparente y un análisis estructural; que incluye determinar celulosa, lignina y hemicelulosa.

- Densidad aparente. Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico en que se presenta en condiciones dadas. Los combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requieren equipos de menor tamaño y permiten aumentar los períodos entre cargas. Por otro lado, los materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso. (*Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA*, 2002).

Tabla 19. Sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa residual del sector de los residuos sólidos orgánicos urbanos y de podas

Subsector	Localización			N° de muestras
	Zona de producción	Departamento	Municipio	
Plazas - Centros de acopio	Norte	Atlántico	Barranquilla	12
	Oriental	Santander	Bucaramanga	
	Occidental	Antioquia	Medellín	
	Central	Cundinamarca	Bogotá	
	Centro Oriental	Meta	Villavicencio	
	Sur	Valle del Cauca	Cali	
Podas de zonas verdes	Norte	Atlántico	Barranquilla	12
	Oriental	Santander	Bucaramanga	
	Occidental	Antioquia	Medellín	
	Central	Cundinamarca	Bogotá	
	Centro Oriental	Meta	Villavicencio	
	Sur	Valle del Cauca	Cali	

- Humedad (Hu). Es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca.

El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 50% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de

combustión directa, pirólisis o gasificación. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%.

Cuando los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy elevado es necesario, antes de ingresar al proceso de conversión de energía, implementar operaciones de secado las cuales incrementan los costos de su aprovechamiento energético (McKendry, 2002). Por lo anterior, es recomendable que una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% sea aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia.

- Azúfre. Este elemento da lugar a las escorias perjudiciales y forma óxidos muy contaminantes. En la combustión de la biomasa, el nitrógeno no aporta energía, y si la cantidad es importante y la temperatura del proceso es elevada, se forma NO_x de origen térmico. La cantidad de oxígeno presente en la biomasa ayuda a reducir las necesidades de aire en la combustión, pero reduce su poder calorífico. El carbono de la biomasa puede proceder tanto de la materia orgánica como de los carbonatos presentes. Las relaciones H/C y O/C, determinan las eficiencias de conversión energética de los biocombustibles. La biomasa, en comparación con los combustibles fósiles, tiene un mayor contenido de oxígeno. El incremento del poder calorífico implica que disminuye la relación O/C y aumenta la relación H/C (Ptasinski; *et. al.*, 2007).

- Relación Carbono/Nitrógeno (C/N). Expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteínica. La relación C/N es un índice significativo de la digestibilidad de un determinado material orgánico. Un residuo orgánico con una relación adecuada de C/N es apto para la producción de biogás mediante un proceso de fermentación. La formación de metano y de ácido puede darse con valores mínimos

de C/N de 16. Sin embargo las bacterias responsables del proceso pueden tener un excelente desempeño cuando el residuo presenta una relación C/N entre 25 y 30 (Werner; 1989).

- Cenizas (Cz). Corresponden a la cantidad de materia sólida no combustible presente en un material. Es usual expresar la cantidad de ceniza por kilogramo de muestra. El poder calorífico de un material se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas. Un alto contenido de cenizas en un residuo biológico es perjudicial para su aprovechamiento energético por vías térmicas ya que reduce su poder calorífico. Las cenizas tienden a depositarse en las tuberías de las calderas e intercambiadores, ocasionando dificultad en la transmisión del calor. Sin embargo, la eliminación de las cenizas presentes en un compuesto, implica el uso de tecnologías complejas y costosas (Castells *et al.*, 2005, Couping; *et al.*, 2004).

- Material Volátil (MV). Está constituido por combinaciones de carbono, hidrógeno y otros elementos. El material volátil se determina calentando la muestra en un crisol tapado durante siete minutos a 950 °C; a esta temperatura se lleva a cabo un proceso de descomposición de la materia orgánica por ruptura de enlaces químicos (pirólisis). La pérdida en peso que sufre la muestra, una vez descontada su humedad, indica la cantidad de compuestos gaseosos producidos en la descomposición de la sustancia carbonosa (Castells, *et al.*, 2005). El contenido de material volátil da una idea de la longitud de la llama, en el caso que esta biomasa se utilice en un proceso de incineración.

- Carbono Fijo (CF). Es la fracción de carbono residual que permanece luego de retirar de la muestra la humedad, las cenizas y el material volátil. Por consiguiente se puede calcular el porcentaje de carbono fijo = 100 – porcentaje de humedad – porcentaje de material volátil – porcentaje de ceniza. El carbono fijo es el compuesto que no destila cuando se calienta un combustible.

Desde el punto de vista energético, no todos los volátiles presentes en el material aportan energía. La cantidad de material volátil y carbono fijo presentes en la biomasa, permiten establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. La ocurrencia de uno u otro tipo de reacción depende del tipo de proceso utilizado para el aprovechamiento energético de la biomasa.

- Proteínas (Pr). Son compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, de estructura química compleja e inestable. Constituyen un componente esencial del protoplasma celular y de la dieta de todo animal. La formación de proteína supone el enlace de un gran número de α -aminoácidos, los cuales son sintetizables por la mayoría de las plantas y bacterias; todas contienen un grupo amino adherido al carbón alfa del aminoácido.

- Grasas y Aceites (G y A). Las grasas y aceites de origen vegetal o animal son triglicéridos denominados ésteres de la glicerina; y están constituidos por ácidos grasos de cadena larga de hidrocarburos. A temperatura ambiente a un triglicérido en estado sólido se le conoce como grasa, y en estado líquido se dice que es un aceite.

- Celulosa. Polisacárido (carbohidrato no reductor), de peso molecular elevado, insoluble en agua e insípido. La celulosa está compuesta por unidades de D-glucosa unidas entre sí por enlaces β -1,4 glucosídicos, estructuralmente consta de una parte amorfa y otra cristalina (organizada), la cual le confiere protección a la célula y constituye un impedimento estérico al ataque de reactivos.

- Lignina. Es un polímero ramificado, amorfo y heterogéneo. En los vegetales ayuda a mantener unidos la celulosa y las hemicelulosas entre sí, proporcionando rigidez a la pared celular del material y evita la acción de los microorganismos.

- Hemicelulosa. Son carbohidratos que forman una estructura polimérica compleja, ramificada compuesta por la unión de

diferentes unidades de pentosas, hexosas y ácidos de estos azúcares. La función de la hemicelulosa es brindar rigidez a la estructura vegetal.

La proporción de celulosa y lignina en una biomasa vegetal es importante para seleccionar su proceso de aprovechamiento energético. La biodegradabilidad de la celulosa es mayor que la de lignina, por lo tanto la conversión promedio de las plantas que contienen carbón como celulosa es mayor que aquellas con altos contenidos de lignina. A manera de ejemplo, la bioproducción de etanol alcanza elevados rendimientos cuando se utiliza como sustrato una biomasa que posee un alto contenido de celulosa-hemicelulosa (McKendry P., 2002).

3.2 CONTENIDO ENERGÉTICO

Corresponde a la cantidad de energía disponible en el material. Los combustibles son compuestos que poseen carbono, el cual al reaccionar con el oxígeno, en procesos térmicos o en las celdas de combustible, libera energía en forma de calor.

Algunos combustibles tienen mayor facilidad o dificultad para arder cuando son sometidos al proceso químico de oxidación. Sin embargo, la calidad de un combustible está determinada por la cantidad de energía que contiene y que puede liberar en el proceso de conversión energética. Esta cantidad de calor, referida a la unidad de masa, se denomina poder o potencia calorífica. El contenido energético de un compuesto se enuncia en unidades de energía por unidad de masa. Por ejemplo el poder calorífico se expresa en Joule por kilogramo [J/kg] o calorías por gramo [cal/g].

Existen diferentes formas de expresar el contenido energético de los combustibles; Leach y Gowent (1998) proponen los siguientes:

- Energía primaria: Indica la cantidad de energía contenida en un material en su forma natural.
- Energía entregada: Es la cantidad de

energía liberada por un combustible para su consumo. La energía entregada puede corresponder a una fracción o la totalidad de la energía primaria del combustible. Por ejemplo, la energía liberada por la leña es el total de su energía primaria, mientras que para el carbón corresponde sólo a una fracción.

- Energía útil: Es la cantidad de energía empleada en los usos finales descontando las pérdidas. La energía útil representa la cantidad de trabajo o calor que realmente fue útil en una determinada actividad.
- Intensidad energética (consumo específico de combustible): Indica la cantidad de energía utilizada en un uso final específico por unidad de PIB. En terminos globales la intensidad energética es el valor medio de la energía necesaria para generar una unidad de riqueza.

En los combustibles el contenido energético depende del poder calórico: energía liberada en forma de calor durante la reacción de oxidación para formar dióxido de carbono y agua. Para cuantificar la energía contenida en una sustancia se emplean dos tipos de unidades:

- Unidades absolutas: Se utilizan para definir la cantidad total de energía presente en una materia sin hacer referencia a su masa, es usual expresarla como Mega Joule [MJ], Pico Joule [PJ] y Tonelada Equivalente de Petróleo [TEP].
- Unidades relativas: Indican la cantidad de energía producida o consumida en un periodo de tiempo o por unidad de masa. Estas unidades se emplean en la medición de energía primaria, energía disponible y energía útil y puede ser expresada en Mega Joule por kilogramo [MJ/kg] o Tera Joule por año [TJ/año].

El contenido energético de un compuesto orgánico es proporcional a las cadenas carbono-carbono en su estructura. El

contenido energético de la biomasa es menor que el de los combustibles fósiles, debido a que en su estructura predominan las cadenas carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno. El uso de biomasa con elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material (Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002).

3.3 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

Las excretas animales están plagadas de enterobacterias, hongos y levaduras. Las características fisiológicas y metabólicas de los microorganismos que habitan en las excretas pecuarias los convierten en organismos versátiles, adaptables y con mayores posibilidades de supervivencia.

La carga microbiana patógena en una biomasa pecuaria se determina mediante la cuantificación de los coliformes totales y fecales. Este grupo de enterobacterias se caracteriza por habitar el tracto gastrointestinal de los vertebrados. Los microorganismos patógenos presentes en el estiércol animal lo convierten en un agente causante de enfermedades como el cólera, hepatitis, polio, fiebre tifoidea, giardiasis, amebiasis, etc.

El estiércol es un subproducto rico en carbono y se convierte en una excelente fuente de nutrición para los hongos, por esta razón este grupo de microorganismos está ampliamente distribuido en la biomasa pecuaria.

La caracterización microbiológica de la biomasa pecuaria se realizó de acuerdo al protocolo establecido por el laboratorio del Ceiam (ver Anexo C), evaluando el contenido de coliformes fecales y totales de los mohos y de las levaduras. Este análisis es importante ya que conocer los microorganismos presentes en la biomasa pecuaria y el tipo de bioproceso diseñado, es un aspecto relevante cuando se evalúa una tecnología para el aprovechamiento energético de esta

clase de residuos. Por otra parte, conocer los microorganismos presentes en el estiércol es de vital importancia para la manipulación de las muestras en campo durante su procesamiento y análisis.

Utilizar la biomasa residual pecuaria como fuente potencial de energía, ayuda a disminuir el impacto ambiental negativo generado sobre las fuentes hídricas, el suelo y la calidad del aire.

4. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR AGRÍCOLA

Las características fisicoquímicas de la biomasa agrícola de Colombia se presentan en las Tablas 2 a la 9, ubicadas en el Capítulo 1. En la Tabla 20 se presenta un reporte comparativo de las características de la biomasa residual agrícola de Colombia y la de otros estudios en el nivel mundial.

Tabla 20. Comparativo de la caracterización de la biomasa residual del sector agrícola

Parámetro	Unidad	Localización		Asia	Colombia
		Nordin 1994	So Sander 1997	Cuiping, <i>et al.</i> 2004	Este estudio 2009
C	% Peso	44,00 - 58,80	47,00 - 52,00	38,52 - 50,15	32,28 - 58,73
H	% Peso	5,70 - 6,30	5,20 - 6,40	6,13 - 8,36	4,39 - 6,75
O	% Peso	320 - 46,20	NR	39,03 - 46,66	22,83 - 49,13
N	% Peso	0,12 - 0,31	0,10 - 1,50	0,11 - 2,06	0,29 - 1,58
S	% Peso	0,009 - 0,26	0,10 - 0,20	0,02 - 0,39	0,02 - 0,38
	% Peso	NR	NR	0,89 - 15,24	0,67 - 23,80
MV	% Peso	NR	NR	61,00 - 76,00	57,38 - 98,82
PCI	MJ/kg	NR	NR	16,00 - 20,00	8,00 - 20,00

NR: No Reportado

Dado que el interés energético de la biomasa residual ha sido tema de estudio para diversos investigadores, Nordin (1994) presenta la recopilación de la caracterización de algunas fuentes de biomasa, extraída de la literatura y de algunas bases de datos relacionadas con combustibles renovables. So Sander (1997) reportó la composición para algunas fuentes de biomasa como las pajas y maderas abundantes en Dinamarca y Cuiping (2004) caracterizó residuos de biomasa forestal y agrícola para China.

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y del PCI de la biomasa agrícola en Colombia coinciden con los

rangos obtenidos para cada parámetro en los estudios usados para su comparación. En algunas variables se observan diferencias significativas, las cuales pueden asociarse a las variedades de las especies vegetales, las condiciones edafoclimáticas en las cuales se desarrolla el cultivo y el manejo agronómico dado al residuo.

Los combustibles fósiles como el carbón poseen un alto contenido energético, evidenciado en su PCI de 26.805,88 kJ/kg (Rojas A., Barraza J., 2008) El elevado poder energético del carbono se debe a la presencia de abundantes enlaces C-C. El análisis último de la biomasa agrícola de

Colombia indica que estos residuos poseen altos contenidos de oxígeno e hidrógeno y bajos contenidos de carbono. El número de enlaces C-O y C-H, en la estructura molecular de la biomasa, son los responsables del valor de su PCI. La biomasa agrícola tiene valores de PCI que oscilan entre 7.862,64 y 19.374,25 kJ/kg. Aún cuando la biomasa agrícola tiene un PCI promedio de 16.000,04 kJ/kg; este valor es bastante más bajo que el PCI del carbón, lo cual indica que la cantidad de energía que pueden entregar los residuos siempre será menor que la del carbón.

La biomasa residual agrícola de Colombia presenta niveles de humedad muy variados. Los residuos de capacho de maíz, cascarilla de arroz y las hojas secas de la caña panelera poseen valores de humedad cercanos al 7,55% y energéticamente se pueden aprovechar por vías térmicas o bioquímicas. Los residuos de plátano y banano, con humedades cercanas al 94 %, son aptos para procesos de conversión bioquímicos, por ejemplo la biodigestión o la fermentación. Los demás residuos podrían ser usados en procesos térmicos, como la combustión directa, gasificación o pirólisis.

Al evaluar la biomasa agrícola como fuente de energía renovable, debe tenerse en cuenta que aún cuando presenta valores promedios de PCI bajos, sus contenidos de ceniza (0,67% a 30,14% con un promedio de 8,64%) están por debajo del 12% que posee el carbón del Cerrejón (Rojas A., Barraza J., 2008). Por otra parte, la biomasa residual agrícola analizada posee niveles elevados de material volátil los cuales oscilan en un rango de 41,07% a 98,02%; dependiendo de la especie vegetal originaria del residuo. Según Cuiping (2004) un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, son las ventajas que tiene la biomasa sobre los combustibles fósiles como el carbón. Por lo anterior, y dado su contenido de humedad, cenizas y material volátil, un alto porcentaje de la biomasa residual agrícola de Colombia es ideal para ser aprovechada energéticamente mediante procesos como la pirólisis o la gasificación.

5. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR BOVINO

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual bovina se presentan en el Capítulo 2, tabla 11. La biomasa bovina posee humedades cuyos valores oscilan entre 71,09 y 88,96 % p/p, material volátil entre 36,82 y 72,41% p/p, materia orgánica entre 60,81 y 76,75% y relación C/N entre 13,69 y 32,44%. La biomasa residual bovina está influenciada por factores intrínsecos al animal como: a) la fisiología digestiva, b) la composición de la dieta, c) la etapa de crecimiento y d) el sistema de manejo. El contenido de sólidos volátiles orgánicos (grasas, carbohidratos y proteínas) representa el material disponible para el desarrollo y reproducción de bacterias anaeróbicas. El contenido de materia volátil junto con el de carbono fijo, son los parámetros influyentes en la transformación energética de la biomasa.

El contenido microbiológico de las excretas bovinas está acorde con los valores propios para este tipo de residuo, por lo cual cualquier actividad asociada con su aprovechamiento debe realizarse tomando las medidas de prevención y control necesarias para su manipulación. El PCI de la biomasa residual bovina oscila entre 6.860 y 17.800 KJ/Kg, mientras que el carbón del Cerrejón posee valores de 26.805,88 KJ/Kg. Sin embargo, este residuo puede tener un aprovechamiento energético mediante el uso de bioprocesos (digestión anaerobia) ya que sus características fisicoquímicas lo hacen idóneo para el crecimiento y desarrollo de consorcios microbianos capaces de degradar la materia orgánica y producir biogás.

6. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR PORCINO

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual porcina se presentan en el Capítulo 2, Tabla 12. El contenido de humedad de este residuo oscila entre 67,18% y 75,13% por consiguiente, de acuerdo a las recomendaciones de

Mc Kendry (2002), su aprovechamiento energético se puede realizar mediante la aplicación de procesos bioquímicos como la fermentación o la digestión anaerobia, para su aprovechamiento energético.

El análisis próximo indica que las excretas porcinas presentan un contenido de ceniza en el rango de 17,91 a 44,79 % p/p; con valores considerables de carbono fijo y material volátil. El material volátil es un indicador del contenido de componentes orgánicos que pueden ser convertidos a metano. Por consiguiente estos parámetros dan una medida de la facilidad con la cual este tipo de biomasa puede ser sometida al proceso de ignición y de gasificación.

Adicionalmente esta biomasa presenta otra ventaja y es que su contenido de azufre es bajo, ya que oscila en un rango entre 0,08 y 0,17 % p/p, y esta característica es importante en los procesos de conversión energética (García, 2000).

Una relación típica de C/N en una muestra de estiércol porcino para uso energético, debe estar por el orden de 11% p/p (UPME, 2003). Los resultados del presente estudio indican que la biomasa porcina de los sistemas tecnificados presenta valores óptimos de la relación C/N (5,02, 9,53 y 12,33 % p/p); mientras las dos muestras de los estiércoles de los sistemas no tecnificados presentaron valores menores (8,50 y 8,69 % p/p).

7. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR AVÍCOLA

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual avícola se presentan en el Capítulo 2, Tabla 10. Estas características varían de uno a otro departamento y entre animales de engorde o gallinas ponedoras, debido a las diferencias significativas en los materiales usados en las camas, la densidad de aves por metro cuadrado, la temperatura y humedad de las unidades de producción, el sistema de agua, alimentación

y los métodos de limpieza utilizados. La humedad de la biomasa residual de las aves ponedoras registra un rango entre valores de 56,40 y 75,31 %, mientras que para los pollos de engorde el rango oscila entre 18,43 y 29,42%. Para el aprovechamiento energético de una biomasa mediante la gasificación, es indispensable que el residuo posea valores de humedad entre 10 y 30% y si se pretende utilizar la combustión, la humedad debe ser menor al 40%. Esto explica por qué la biomasa avícola es un combustible atractivo para la aplicación de tecnologías termoquímicas.

La biomasa residual avícola para el sistema de aves ponedoras muestra un mayor contenido de cenizas y carbono fijo frente a los valores encontrados para la biomasa de los sistemas de aves de engorde; este hecho puede estar favorecido por la deposición de excretas ricas en minerales hasta el final del ciclo. En la biomasa residual de las aves ponedoras existe un menor contenido de nitrógeno (valor promedio de 2,3 % p/p) debido a la volatilización que se presenta durante el ciclo. Un comportamiento similar se observa en las variables materia orgánica y sólidos volátiles. Los residuos avícolas, en contraste con algunos tipos de carbón, tienen alto contenido en volátiles y cuando este parámetro es superior al 9% se facilita la aplicación de procesos termoquímicos para su aprovechamiento energético.

En general, las excretas de origen animal presentan menor relación C/N que otras fuentes de biomasa. La biomasa residual del sector avícola posee una relación de C/N entre 9,12 y 13,04 % p/p; valores que corresponden a los reportados en la literatura para este tipo de biomasa. Una relación C/N del orden de 16/1 se considera óptima para la producción de biogás. Por consiguiente la biomasa residual avícola se puede aprovechar energéticamente mediante un bioproceso (Carrillo L.; 2003).

La biomasa residual avícola posee un contenido promedio de azufre de 0,23 %p/p y de nitrógeno de 2,9 % p/p, mientras que el carbón tiene 0,79% p/p de azufre y 1,18%

p/p de nitrógeno (Rojas A. y Barraza J., 2008). Desde el punto de vista ambiental los óxidos de azufre (SO₂) y de nitrógeno (NO_x) contribuyen a la formación de la lluvia ácida. Por consiguiente las bajas concentraciones de azufre y nitrógeno en la biomasa del sector avícola, garantizan que al utilizarla como combustible para la gasificación, a temperatura de operación de 900°C, se reduce la formación NO_x.

8. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS DE PLAZAS DE MERCADO Y PODAS

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los residuos orgánicos urbanos se presentan en el Capítulo 3, Tablas 13 y 14. Las costumbres alimenticias de cada región del país influyen en las características fisicoquímicas de sus residuos orgánicos de plazas y centros de acopio. Este tipo de biomasa presenta elevados niveles de humedad (84,14 a 92,85 % p/p), con un promedio de 88,69% p/p. La humedad es significativa para evaluar la rapidez de descomposición del elemento orgánico constituyente del residuo, razón por la cual este tipo de residuo es energéticamente aprovechado mediante el proceso de digestión anaerobia.

Los residuos orgánicos de plaza presentan un bajo contenido de ceniza (varía entre 8,50 a 37,65 % p/p), lo cual indica que esta biomasa contiene inertes que influyen en su poder calorífico. La biomasa de residuos orgánicos presenta elevados contenidos de material volátil, (48,75 y 79,50 % p/p), lo cual es un indicador importante en la eficiencia de la producción de biogás, dado que éste contiene los componentes orgánicos que pueden ser convertidos en metano. Los contenidos de carbón fijo varían entre 8,20 a 22,83 % p/p, parámetro que resulta ser influyente dentro de la transformación energética contenida en la biomasa.

El análisis último de los residuos orgánicos urbanos presenta contenidos medios o

bajos de carbono orgánico total (promedio 33,40% p/p) y altos contenidos de oxígeno (valor promedio de 44,77 % p/p); razón por la cual el PCI de este tipo de residuo es inferior al de los combustibles de origen fósil.

Los residuos orgánicos de plazas de mercado y centros de acopio presentan contenidos de nitrógeno que oscila entre 1,39 y 2,05 % p/p y contenidos de azufre entre 0,0026 y 0,10 % p/p, estos valores son bajos en comparación con los de otras fuentes de biomasa; siendo una ventaja para su conversión energética mediante procesos biotecnológicos.

El análisis estructural de la biomasa de los residuos orgánicos urbanos indica que el contenido de grasas oscila entre 1,19 y 11,97 % p/p y el contenido promedio de proteínas es de 10,36 % p/p, estos resultados son bastante similares en casi todas las ciudades del país.

Los residuos orgánicos de plazas en Colombia poseen valores de sólidos volátiles entre 62,35 y 91,51%, está variable es un indicador importante en la eficiencia de la producción de Biogás, dado que en ellos están presentes los componentes orgánicos que son convertidos en metano.

Una relación adecuada entre el carbono y el nitrógeno (C/N) de 16 % p/p favorece la digestibilidad de los materiales orgánicos (Werner, U., *et. al.*, 1989). La relación C/N de los residuos orgánicos de plaza en las principales ciudades de Colombia se encuentra dentro del rango óptimo; adicionalmente estos residuos poseen un contenido de materia orgánica dentro del rango ideal (73,02 y 47,79 % p/p) para los procesos biológicos. Por esta razón, este tipo de biomasa puede ser aprovechada energéticamente mediante procesos de fermentación para la producción de biogás y su correspondiente transformación en hidrógeno, y la fermentación encaminada a la obtención de bioetanol.

BIBLIOGRAFÍA

Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA. (2002). Biomasa, Manuales Sobre Energía Renovables para América Central. San José C.R.; 1 ed. ISBN: 9968-904-02-3, pp. 3-17.

Carrillo L. Universidad Nacional de Salta. (2003). Microbiología Agrícola, capítulo 5: Rumen y Biogás, pp. 16, ISBN:987-9381-16-5. Argentina en: <http://www.unsa.edu.ar/matbib>

Castells X.E., Cadavid C., Campos P.E., Flotats R.X.; García M.J., Gaya F.J., Jurado G.L., Ruíz-Álvarez F., Cremades O. L., Velo G.E. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos, Ediciones Díaz de Santos, ISBN:84-7978-694-9, España, pp. 64.

Cuiping L., Chuangzhi W., Yanyongjie, Haitao H. (2004). Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels in China. *Biomass & Energy* 27, pp. 119-130.

García, A. R. (2000). Calidad alimentaria de la mezcla estiércol de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol, para bovinos de engorde (tesis maestría). Universidad de Colima – México. pp. 99.

Leach G, y Gowen M. (1989). Manual de referencia sobre el sector energético residencial. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial Washington D.C.

Mckendry P. (2002). Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology* 83, pp. 37-46.

Nordin A. (1994). Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels. *Biomass and Bioenergy* 6 : pp. 339 - 347.

Ptasinski K.J., Mark J.P., Anke P. (2007). Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy* 32, pp. 568 - 574.

Rojas A., Barraza J. (2008). Caracterización Morfológica del Carbonizado de Carbones Pulverizados: Determinación Experimental. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Número 43*, pp. 42 – 58.

So Sander (1997). Properties of Danish Biofuels and the Requirements for Power Production. *Biomass and Bioenergy* 12, pp 177 - 183.

Unidad de Planeación Minero Energética, Unión Temporal Icontec – AENE (2003). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. Documento No. ANC 603 – 19 – 01. Bogotá, pp. 47.

Werner, U., Stohr, U. y Hees, N. (1989). Biogás Plants in Animal Husbandry. – A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Germany : Vieweg & Sonh ed. pp.39-86.