

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL  
AGRÍCOLA EN CAQUETÁ: CASO DE ESTUDIO**

**ANDRÉS FELIPE MURILLO BARRIOS  
KARINA ANDREA BARRERA PATIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL  
AGRÍCOLA EN CAQUETÁ: CASO DE ESTUDIO**

**ANDRÉS FELIPE MURILLO BARRIOS  
KARINA ANDREA BARRERA PATIÑO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**Dr. Viatcheslav Kafarov  
Ingeniero Químico Dr. Sc**

**Co-Director**

**Leidy Katherine Rodríguez Cáceres  
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## *Dedicatoria*

*Quiero agradecer a Dios, por haberme llenado de salud fortaleza y paciencia cada día para cumplir con esta meta.*

*Dedico este trabajo*

*A mis padres, por su apoyo incondicional porque sin ellos esto no sería posible, por su cariño y por sus grandes esfuerzos para lograr terminar mi carrera profesional.*

*A mis hermanas, por escucharme y aconsejarme en este arduo camino.*

*A mis grandes amigas Karina y Diana por su sincera e incondicional amistad, por su compañía, apoyo y por tantas experiencias vividas en esta etapa.*

*A Jessi, Vicky, Tefy, Les, Norma, María, Andrés, Ángela, Daniel y a todos mis amigos por su gran amistad, compañía y apoyo en muchas circunstancias.*

*Karina Andrea Barrera Patiño.*

*Dedicatoria*

*A Dios, a mi familia y amigos.*

*Andrés Felipe Murillo Barrios.*

## **Agradecimientos**

A Dios, por ser nuestro guía en este camino, por bendecirnos y fortalecernos para alcanzar este logro.

Al Doctor Viatcheslav kafarov, por permitirnos realizar este proyecto.

A la ingeniera Katherine Rodríguez, por su apoyo, dedicación y paciencia en el transcurso de este proyecto.

A la ingeniera Neila Mantilla, por sus enseñanzas y colaboración para lograr culminar este trabajo.

Al CIDES, por su contribución, apoyo y acogida en este grupo y por aconsejarnos para la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería química por permitirnos realizar nuestros estudios y formarnos como ingenieros químicos y como personas.

A Darwin Andrés Flórez director de la UMATA y colaboradores, por su acompañamiento y ayuda para la elaboración de este proyecto.

A nuestros padres, por sus esfuerzos, orientación y apoyo para lograr alcanzar esta meta.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. GENERALIDADES .....	20
1.1 BIOMASA RESIDUAL.....	20
1.2 ANÁLISIS DE LA BIOMASA .....	21
1.2.1 Análisis elemental .....	21
1.2.2 Análisis próximo .....	22
1.2.3 Análisis estructural .....	22
1.3 TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN .....	22
1.3.1 Procesos fisicoquímicos.....	23
1.3.2 Procesos termoquímicos.....	23
1.3.3 Procesos bioquímicos .....	25
2. METODOLOGÍA .....	27
2.1 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN, SELECCIÓN DE MUNICIPIO Y CULTIVOS.....	28
2.2 MUESTREO DE LA BIOMASA RESIDUAL .....	29
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA .....	30
2.4 EVALUACIÓN DE DEL POTENCIAL ENERGÉICO .....	30
3. RESULTADOS.....	34
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL .....	35

3.1.1 Humedad .....	37
3.1.2 Cenizas .....	38
3.1.3 Carbono Fijo y material volátil.....	38
3.1.4 Relación C/N.....	39
3.1.5 Carbono .....	40
3.1.6 Oxígeno .....	40
3.1.7 Hidrógeno .....	40
3.1.8 Nitrógeno .....	41
3.1.9 Azufre.....	41
3.1.10 Lignina, celulosa y hemicelulosa.....	41
3.2 POTENCIAL ENERGÉTICO .....	42
3.3 TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA .....	44
4. CONCLUSIONES .....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS .....	54

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Actividad agrícola de Cartagena de Chairá.	29
Tabla 2. Técnicas utilizadas en la caracterización de la biomasa residual.	30
Tabla 3. Producción, Área cosechada y FR de los residuos agrícolas en el departamento de Caquetá y FR de otras fuentes	34
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual.	35
Tabla 5. Potencial energético de la biomasa.	43

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Proceso para la transformación de biomasa con fines energéticos	24
Figura 2. Metodología experimental del estudio.	27
Figura 3. Análisis Próximo de los residuos agrícolas y el carbón.	37
Figura 4. Análisis elemental de los residuos agrícolas y el carbón.	40
Figura 5. Ficha técnica del maíz.	54
Figura 6. Ficha técnica del maíz.	54
Figura 7. Ficha técnica de la caña panelera	55
Figura 8. Ficha técnica del plátano	55

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LOS CULTIVOS	54
ANEXO B. PROTOCOLO DE MUESTREO PARA LOS CULTIVOS	56
ANEXO C. PLANTILLA DESCRIPTIVA DEL SITIO A MUESTREAR	57
ANEXO D. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	59

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ZI</b>	Zonas interconectadas.
<b>ZNI</b>	Zonas no interconectadas.
<b>SIN</b>	Sistema interconectado nacional.
<b>MW/h</b>	Megavatio / hora.
<b>RAC</b>	Residuos agrícolas de cosecha.
<b>RAI</b>	Residuos agrícolas industriales.
<b>PE</b>	Potencial energético.
<b>PCI</b>	Poder calórico inferior.
<b>TJ</b>	Tera-joule.
<b>t</b>	Toneladas.
<b>ha</b>	Hectáreas.
<b>FR</b>	Factor de residuo.
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de nitrógeno.
<b>C – C</b>	Carbono-carbono.
<b>KJ</b>	kilo-joule.
<b>Kg</b>	kilogramo.

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN CAQUETÁ: CASO DE ESTUDIO\*

**AUTORES:** ANDRÉS FELIPE MURILLO BARRIOS, KARINA ANDREA BARRERA PATIÑO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Biomasa residual, energía renovable, ZNI, potencial energético, digestión anaerobia.

### CONTENIDO:

En Colombia las zonas interconectadas (ZI) son aquellas que tienen acceso al servicio de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las zonas no interconectadas (ZNI) son aquellas que no tienen acceso al SIN, esto debido principalmente a su geografía, difícil acceso y problemas de orden público que impiden la realización de diferentes proyectos de interconexión. Dentro de estas zonas se encuentra el departamento de Caquetá. En este departamento el 92,38% corresponde a SIN y el 7,62% a las ZNI. La enorme variedad de recursos naturales que presentan las ZNI ha favorecido el uso de fuentes de energía renovables y sostenibles dentro de ellas la biomasa, recurso a base de carbono que puede presentar un alto potencial energético y ser una alternativa para satisfacer la demanda energética de una manera sostenible.

En este trabajo se hizo una revisión de información de la actividad agrícola y demanda energética en el municipio de Cartagena de Chairá del departamento de Caquetá. Se estudiaron cuatro cultivos representativos de esta zona, yuca, plátano, caña panelera y maíz tradicional. Se recolectaron aleatoriamente las muestras para cada uno de los cultivos seleccionados y posteriormente se caracterizaron con análisis básico, elemental, próximo, energético y estructural permitiendo la determinación del potencial energético disponible. Se determinó un potencial total de 412,87 TJ/año, destacándose el potencial encontrado a partir del rastrojo de maíz. Los resultados muestran que los residuos estudiados pueden ser aprovechados para producir energía por tecnologías bioquímicas como digestión anaerobia y co-digestión.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Química. Escuela de Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov Ing. Químico Dr. Sc. Codirector: Leidy Katherine Rodríguez Cáceres Ing. Química.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE ENERGETIC POTENTIAL OF AGRICULTURAL WASTE IN CAQUETA: CASE STUDY\*

**AUTHORS:** ANDRÉS FELIPE MURILLO BARRIOS, KARINA ANDREA BARRERA PATIÑO\*\*

**KEY WORDS:** Residual biomass, renewable energy, ZNI, energetic potential, anaerobic digestion.

### CONTENT:

In Colombia interconnected areas (ZNI) are those who have access to electricity services through the National Interconnected System (SIN) and non-interconnected zones (ZNI) are those who have no access to the SIN, this mainly due to its geography, difficult access, and public order problems impeding the realization of different interconnection projects. Within these zones is the department of Caquetá. In this department it corresponds to 92.38% SIN and 7.62% to ZNI. The enormous variety of natural resources that have the ZNI has favored the use of renewable and sustainable energy within them biomass, carbon-based resource that can provide a high energy potential and be an alternative to meet energy demand for a sustainably.

This paper made a review of information from agricultural activity and energy demand in the city of Cartagena de Chairá, Caquetá department. Four representative crops in this area, cassava, banana, sugarcane and traditional corn were studied. They were randomly collected samples for each of the selected crop and subsequently characterized with basic, elementary, proximate, energetic and structural analysis, allowing the determination of potential energetic available. The total potential 412.87 TJ / year was determined, highlighting the potential found from corn stover. The results show that the studied waste can be exploited to produce energy by biochemical technologies such as anaerobic digestion and co-digestion

---

\* Thesis

\*\* Faculty of Engineering Physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director: Viatcheslav Kafarov Chemical Engineer Dr. Sc. Codirector: Leidy Katherine Rodríguez Cáceres Chemical Engineer

## INTRODUCCIÓN

Actualmente es de gran importancia que toda la población de un país cuente con la posibilidad de abastecerse del servicio de energía eléctrica ya que esto permite el desarrollo humano y la realización de la mayoría de actividades productivas, domésticas, económicas, industriales y sociales.

Colombia se divide energéticamente en dos tipos de zonas: las Zonas Interconectadas (ZI) y Zonas No Interconectadas (ZNI); las ZI son aquellas que tienen acceso al servicio de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las ZNI son aquellas que no tienen acceso al SIN, esto debido principalmente a su geografía, baja población, difícil acceso y problemas de orden público que impiden la realización de diferentes proyectos de interconexión. (Esteve, 2011).

La mayoría de las ZNI son de carácter rural y se caracterizan por su riqueza natural, étnica y cultural, muchas de ellas son áreas protegidas debido a la presencia de resguardos indígenas y terrenos colectivos, donde se encuentra la mayor parte de la biodiversidad. Estas zonas corresponden al 52% del territorio nacional y abarcan 17 departamentos conformados por 1441 localidades, 5 capitales departamentales, 112 municipios y 14 grupos municipales (IPSE, 2013).

Dentro de estas zonas se encuentra el departamento de Caquetá, poseedor de una gran riqueza de flora y fauna. Geográficamente este se divide en 16 municipios siendo uno de los departamentos más grandes del país con una extensión de 88.965 km<sup>2</sup> equivalente al 7.8% de la superficie de Colombia. Económicamente se fundamenta en la producción agrícola y ganadera subsistiendo principalmente de cultivos como el maíz, plátano, yuca, caña panelera, arroz, palma africana, cacao,

frijol y sorgo. Energéticamente presenta una demanda de 671 [MW/h] (IPSE, 2013) donde el 92,38% corresponde al SIN y el 7,62% a las ZNI (UPME, 2014).

La enorme oferta de recursos naturales que presentan las ZNI y las fluctuaciones en los precios de la energía, problemas ambientales, cambios climáticos, seguridad energética y las fuentes de energía fósiles limitados ha favorecido el uso de fuentes de energía renovables y sostenibles permitiendo la utilización de la biomasa como una fuente de energía limpia. Por lo tanto, al contemplar las necesidades de rápido crecimiento para la energía, la biomasa es considerada como una de las fuentes más prometedoras para la generación de energía, representando la cuarta fuente de energía primaria más utilizada en el mundo después del petróleo, carbón y gas natural. Sin embargo, en los países industrializados representa solamente alrededor del 4% de la oferta energética, siendo a menudo el último recurso de energía notable, después de la energía nuclear e hidráulica, mientras que en países en desarrollo representa alrededor del 35% (Bilgili & Ozturk, 2015; Shium et al, 2012; Bocci et al, 2014).

Diversos estudios de biomasa se han elaborado en el mundo para contribuir a la producción de energía. En España se han realizado investigaciones para caracterizar residuos de biomasa para usos energéticos basados en análisis próximo, último y calorimétrico (García et al, 2012). También se ha evaluado la viabilidad energética y medioambiental de biomasa lignocelulósica para generación de energía eléctrica (Hernández, 2011). En la India (Kumar et al, 2015) realizaron un estudio en donde se analizó el alcance, el potencial y el escenario de la energía de la biomasa y su aplicación. En América Latina se han explorado alternativas disponibles de biomasa que puedan ser utilizadas para diversas cuestiones tecnológicas y ambientales para promover el uso de energías renovables. En Argentina evaluaron el potencial de la biomasa residual de diferentes cultivos para su uso como fuente de energía alternativa (Roberts et al, 2015; Manrique et al, 2008). En Colombia se elaboró el atlas de potencial energético de la biomasa

residual agrícola, pecuaria y de residuos sólidos urbanos realizando su caracterización y representación espacial en la cartografía del país (Escalante et al, 2010).

De esta manera, el objetivo principal del presente trabajo es estimar el potencial energético y la composición fisicoquímica de la biomasa residual agrícola de los cultivos más representativos en las ZNI del departamento de Caquetá con el fin de sugerir una tecnología para su transformación en energía eléctrica.

En los países en desarrollo se encuentran considerables reservas de energías renovables como la biomasa, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, solar, hídrica, entre otras, las cuales se han convertido en una opción destinada a poner fin a los altos niveles de gases de efecto invernadero, además cuentan con un alto potencial para satisfacer en mayor proporción la energía primaria necesaria para la producción de electricidad (Zuluaga & Dyner, 2007). Por esta razón la biomasa ha sido considerada como el único recurso a base de carbono que es lo suficientemente amplio para ser utilizado como un sustituto de los combustibles fósiles, ya que representa un alto potencial energético y puede ser la mejor opción para satisfacer la demanda del futuro suministro de energía / combustible de una manera sostenible (Roberts et al, 2015; Chandra et al, 2012).

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 BIOMASA RESIDUAL**

El término biomasa significa, en su definición más amplia, cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en algún proceso biológico. Este concepto comprende tanto a los productos de origen vegetal como a los de origen animal en los que se incluyen residuos de cosechas, residuos forestales, desechos animales, residuos sólidos urbanos, cultivos energéticos, materiales procedentes de su transformación natural o artificial, excluyendo los combustibles fósiles, porque aunque derivan de materiales biológicos, a través del tiempo han sufrido transformaciones que han alterado profundamente su naturaleza.

Actualmente se ha extendido el uso del término biomasa para denominar a un tipo de energía renovable basada en la materia orgánica anteriormente descrita. La energía de la biomasa procede de la energía solar fijada por los vegetales mediante la fotosíntesis y acumulada en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas que los conforman, es entonces una forma de energía química (Fernández, 2002; Bilgili & Ozturk, 2015).

El empleo de la biomasa como fuente de energía presenta numerosas ventajas. A nivel individual, las ventajas son fundamentalmente económicas ya que es una energía que permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Bilgili & Ozturk, 2015); a nivel de la sociedad presenta ventajas ambientales, sociales y económicas; en cuanto a aspectos ambientales la reducción de gases contaminantes a la atmósfera como el dióxido de carbono; y desde el punto de vista social y económico contribuye a la diversificación energética y reduce la pobreza generando nuevos empleos especialmente en zonas rurales (Manrique et al, 2008).

Debido a estas ventajas, la biomasa en los últimos años se ha convertido en una fuente importante de combustible en especial los residuos agrícolas que son utilizados, entre otras cosas, para la generación de energía. Estos residuos se clasifican en dos categorías: los residuos agrícolas de cosecha (RAC) que son aquellos que quedan en el campo después de la recolección de cultivos, y los residuos agrícolas industriales (RAI) que son subproductos de los procesos posteriores a la cosecha que se generan a partir de limpieza, cribado y molienda (Shium et al, 2012).

## **1.2 ANÁLISIS DE LA BIOMASA**

Para evaluar la energía contenida en la biomasa es necesario determinar el potencial energético que se define como la energía lumínica que toma la biomasa del sol para ser transformada en energía química mediante reacciones enzimáticas que se almacenan en sus enlaces químicos (Escalante et al, 2010).

**1.2.1 Análisis elemental** El análisis elemental permite establecer el porcentaje en peso de los principales elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: Carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S). Se utiliza para combustibles sólidos y líquidos. A partir del conocimiento de dichos contribuyentes se pueden establecer las reacciones de oxidación, de manera que, por ejemplo, se determine el aire preciso para la combustión (aire estequiométrico). También existen ciertas formulaciones empíricas, que, partiendo del porcentaje en peso de cada elemento, permite obtener una aproximación de su contenido energético (poder calorífico). Finalmente, los recursos biomásicos, comparados con los combustibles fósiles como carbones bituminosos (hulla), se caracterizan en términos generales por presentar un bajo contenido de carbono (aproximadamente 50%) y un alto contenido de oxígeno (mayor al 40%) (Nogués et al, 2010).

**1.2.2 Análisis próximo** Es el método más utilizado para la caracterización de biocombustibles; se define como la determinación de la humedad, cenizas, contenido volátil y carbono fijo en muestras de biomasa expresados como porcentajes en peso (García et al, 2012). Básicamente, este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas) (Nogués et al, 2010).

**1.2.3 Análisis estructural** Hace referencia a cuantificar el contenido de lignina, celulosa y de hemicelulosa (Escalante et al, 2010) .La lignina es el compuesto más heterogéneo que contiene la biomasa, no posee una estructura cristalina definida como la celulosa y la hemicelulosa. La relación C/H es mayor en la lignina, razón por la cual su aporte energético es mayor en comparación con los otros constituyentes de la biomasa. Como la lignina no posee estructura química definida, en lugar de ello están conformadas por estructuras poliméricas fenólicas, aportan rigidez y resistencia a las paredes celulares de los vegetales (Montoya et al, 2013).

La celulosa y hemicelulosa son polímeros formados por unidades de azúcares (D-glucosa y D-xilosa, respectivamente) que se descomponen con mayor rapidez que las ligninas, cuando el material orgánico es sometido a calentamiento, reaccionando primero las hemicelulosas debido a la menor masa molecular de sus elementos fundamentales (Manrique et al, 2008).

### **1.3 TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN**

La biomasa es una fuente de energía que se puede procesar en muchos aspectos que conducen a una variedad de productos y subproductos, como se muestra en la figura 1. Con el fin de transformar la biomasa en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos para su conversión en calor o electricidad, se han desarrollado diversos

procesos y tecnologías. Existen tres grupos principales en los que se clasifican los procesos: fisicoquímicos, bioquímicos y termoquímicos.

**1.3.1 Procesos fisicoquímicos** Consiste en prensar mecánicamente la biomasa a través de procesos como la extracción directa, por medio de la aplicación de presión o vapor, por ejemplo plantas oleaginosas como el maní, girasol, palma, soja y semilla de algodón, para producir aceites vegetales combustibles. Dentro de este grupo se encuentra la transesterificación y la esterificación para la producción de biodiesel. Así mismo procesos como la densificación que se obtienen a partir de un prensado de aserrín, virutas o polvo de madera generando productos de muy alto valor añadido como las briquetas y pellets. (García, 2011; Monroy, 2013 & Unidad de Desarrollo Tecnológico en Chile, 2014).

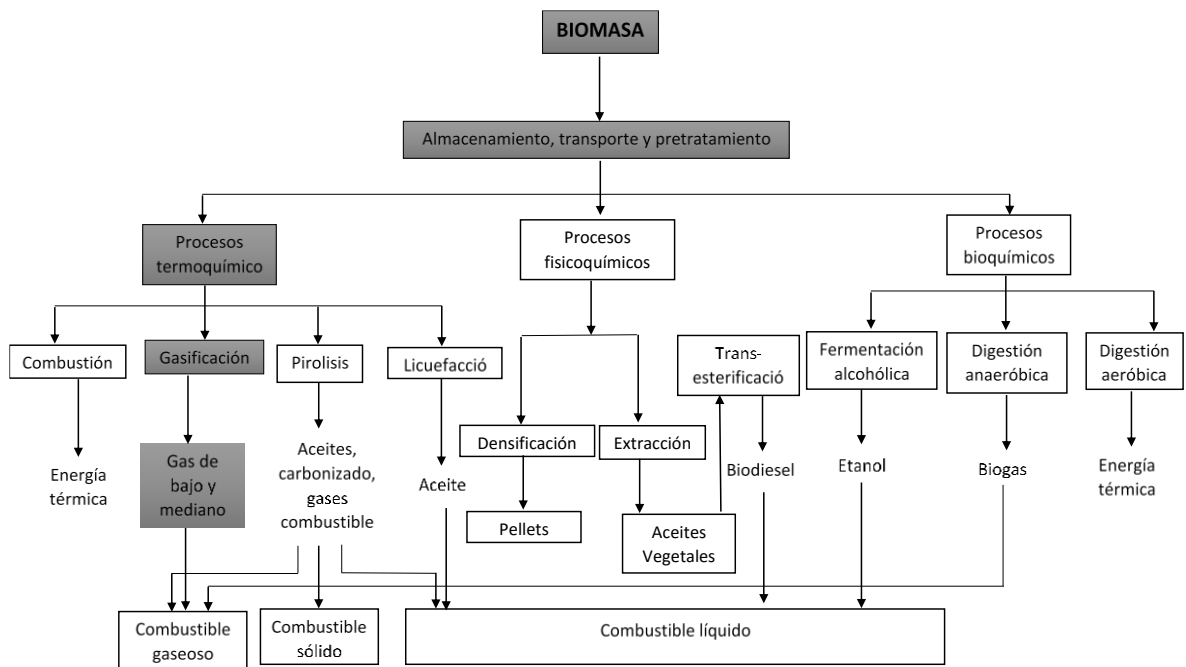
**1.3.2 Procesos termoquímicos** Los procesos termoquímicos se clasifican en combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción. La combustión es la tecnología de conversión termoquímica más simple que se realiza en presencia de aire. El calor, el poder o la cogeneración son los principales productos de la combustión directa de la biomasa lignocelulósica. Este proceso consiste en reacciones heterogéneas y homogéneas consecutivas. La combustión de biomasa depende básicamente del tamaño de partícula y las propiedades de la materia prima, la temperatura, la atmósfera de combustión, las altas emisiones de NO<sub>x</sub> y el manejo de cenizas que hacen que este proceso sea muy difícil desde el punto de vista ambiental (Patel et al, 2016).

La gasificación es un proceso termoquímico en el que se transforma un combustible sólido en uno gaseoso. El proceso está conformado por varios fenómenos complejos que van desde mecanismos de transferencia de masa y energía en un sistema reactivo heterogéneo, derivando las etapas de secado y devolatilización del combustible, para dar paso a la oxidación de los volátiles y el carbón, con el

consecuente cambio del diámetro de las partículas y las pérdidas de presión en el lecho (Pérez et al, 2010).

La pirólisis es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustibles útiles, con un alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Por su capacidad de tratamiento, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables. Desde un punto de vista químico, la pirólisis es un proceso complejo, generalmente se lleva a cabo a través de una serie de reacciones en las que influyen muchos factores entre ellos la estructura y composición de la materia prima, la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso (Urien, 2013).

**Figura 1. Proceso para la transformación de biomasa con fines energéticos**



Fuente: GARCÍA, H. *Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 2011

La licuefacción juega un papel importante en la conversión termoquímica. Este proceso es la conversión directa de la biomasa en combustibles líquidos, la principal ventaja de la licuefacción durante la pirolisis y la gasificación es que no requiere biomasa seca como materia prima inicial reduciendo el número de operaciones de la unidad requerida en la conversión de biomasa en combustibles líquidos (Patel et al, 2016).

Diferentes tipos de biomásas son utilizados para estos procesos con fines energéticos como residuos forestales y agrícolas, siendo los más importantes los sectores de la caña de azúcar y de la palma de aceite por sus extensos cultivos y sus elevadas cantidades de biomasa residual, además por sus propiedades lignocelulósicas ya que está presente en el material vegetal como principal componente de la pared celular de las plantas y están formado por una mezcla de lignina, hemicelulosa y celulosa; a su vez, la celulosa está compuesta por una larga cadena de azúcares, por lo que casi cualquier residuo vegetal sería susceptible de ser transformado en azúcar y posteriormente en bioetanol. Además, la celulosa tiene la ventaja de no ser de uso alimentario, permitiendo el aprovechamiento de los residuos vegetales generados durante el cultivo de especies destinadas a la producción de alimentos, por lo que se erige como una fuente óptima de materia prima para la producción de combustibles de forma sostenible (Gómez et al, 2008); (Faba et al, 2013); (Leyva & Ruiz, 2011).

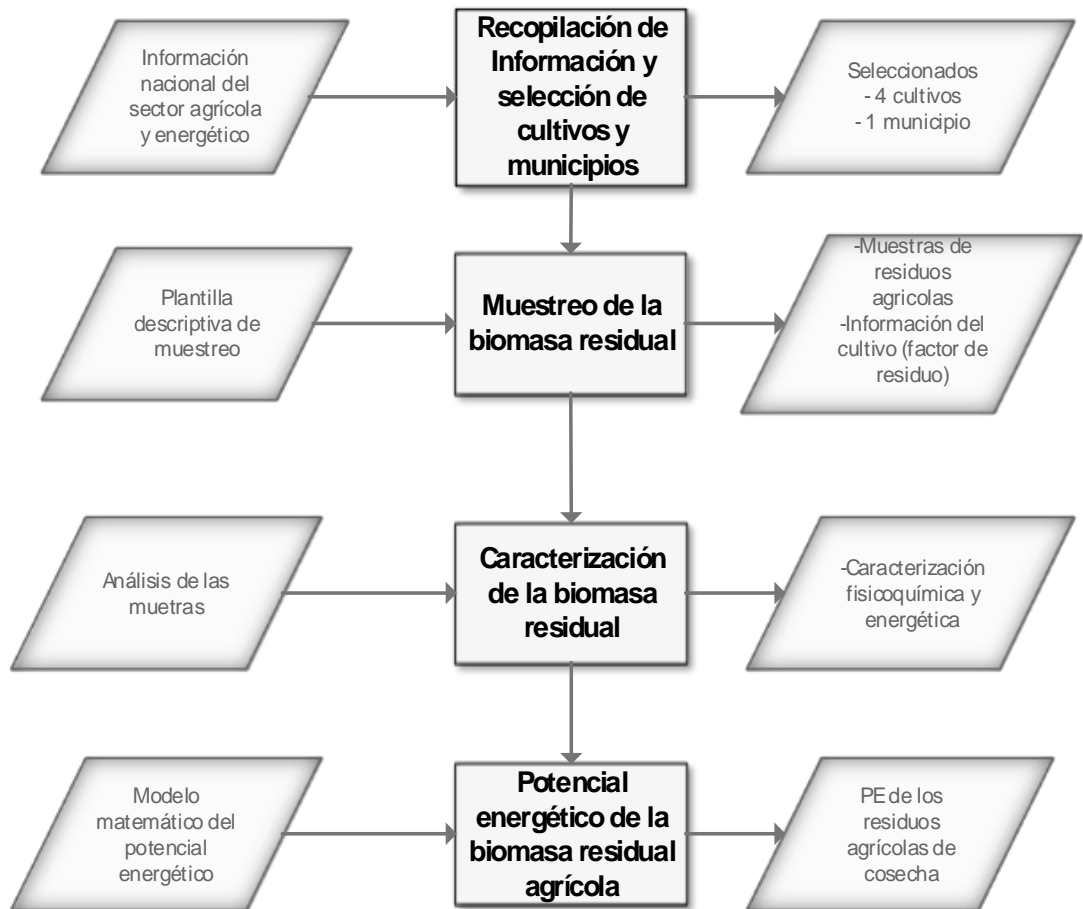
**1.3.3 Procesos bioquímicos** los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias Este tipo de procesamiento está dividido en dos clases de procesos: la fermentación anaeróbica (en ausencia de aire), en la cual la biomasa como Residuos de jardín, comida pre y postconsumo de viviendas y de establecimientos comerciales como restaurantes y expendios de alimentos y residuos animales son depositados en una cámara hermética o biodigestor, y después de un cierto tiempo de residencia se obtiene como producto un gas combustible denominado biogás. Como otro producto del proceso se obtiene un

residuo que presenta una alta calidad como fertilizante, denominado bioabono. La Fermentación alcohólica, se obtiene como producto del proceso alcohol como combustible o carburante en motores de combustión interna o para plantas de generación de energía a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa entre otros). Entre estas materias primas se encuentran las frutas y vegetales como la caña de *azúcar* y la remolacha provenientes de ligno–celulosas o de residuos orgánicos (García, 2011); (Vázquez & Dacosta, 2007);(Parra et al,2015).

## 2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se estableció en etapas orientadas a evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola en el departamento de Caquetá, como se expone en la figura 2.

**Figura 2. Metodología experimental del estudio.**



## **2.1 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN, SELECCIÓN DE MUNICIPIO Y CULTIVOS**

A partir de la información consultada en bases de datos gubernamentales tales como la Red de Información y comunicación del Sector Agropecuario (AGRONET), Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas no Interconectadas (IPSE), la Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), se hizo una recopilación y revisión de información de la actividad agrícola y demanda energética del departamento de Caquetá, para seleccionar el municipio y los cultivos de estudio. Los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección fueron:

### **Selección de cultivos**

- I. Área sembrada del cultivo en el departamento mayor a 3.000 ha/año.
- II. Producción mayor a 8.000 t/año.

Por los criterios anteriores se seleccionaron tres cultivos permanentes (yuca, plátano y caña panelera) y un cultivo transitorio (maíz tradicional). Las descripciones biológicas de estos cultivos se encuentran en el Anexo A.

### **Selección de municipio**

- I. Clasificación del municipio como una Zona no Interconectada.
- II. Movilidad segura en su zona rural y cabecera municipal.
- III. Disponibilidad de la totalidad de los cultivos seleccionados.

Mediante estos factores se seleccionó el municipio de Cartagena de Chairá para realizar el muestreo de la biomasa residual agrícola en el departamento de Caquetá. La actividad agrícola de los principales cultivos representada mediante el área cultivada (ha), la producción (t) y el rendimiento (t/ha) se puede evidenciar en la tabla 1. Los datos recopilados corresponden al año 2013.

## 2.2 MUESTREO DE LA BIOMASA RESIDUAL

Se identificaron diferentes puntos de muestreo de los cultivos seleccionados con la ayuda de los cultivadores y líderes de la junta de acción comunal de las veredas del área rural para la recolección de las muestras la cual se realizó mediante un muestreo aleatorio para cada uno de los cultivos seleccionados ver (Anexo B).

Al mismo tiempo se obtuvo información específica del cultivo, producto principal y cantidades de residuos generadas por las plantas con el fin de calcular el factor de residuo necesario para determinar el potencial energético, adicionalmente se recolectó información de los usos finales de la biomasa residual en cada finca, utilizando una plantilla descriptiva de muestreo establecida y suministrada por el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en la Industria y Energía (CIDES) (Anexo C).

**Tabla 1. Actividad agrícola de Cartagena de Chairá.**

<i><b>Municipio</b></i>	<i><b>Cultivo</b></i>	<i><b>Año</b></i>	<i><b>Área Sembrada [Ha]</b></i>	<i><b>Producción [t]</b></i>	<i><b>Rendimiento [t/Ha]</b></i>
<b>Cartagena de Chairá</b>	Arazá	2013	10,0	20,0	2,5
	Arroz Secano Manual	2012 <sup>B</sup>	100,0	126,0	1,4
		2013 <sup>A</sup>	100,0	120,0	1,3
	Cacao	2013	321,0	70,0	0,5
	Caña Panelera	2013	743,0	1949,0	4,5
	Caucho	2013	780,0	181,0	1,2
	Chontadur o	2013	30,0	180,0	6,0
	Maíz Tradicional	2012 <sup>B</sup>	1000,0	950,0	1,0
		2013 <sup>A</sup>	1000,0	950,0	1,0
	Piña	2013	30,0	180,0	6,0

<i>Municipio</i>	<i>Cultivo</i>	<i>Año</i>	<i>Área Sembrada [Ha]</i>	<i>Producción [t]</i>	<i>Rendimiento [t/Ha]</i>
	Plátano	2013	1780,0	9480,0	6,0
	Yuca	2013	1700,0	13200,0	8,0

Fuente: Agronet (2015) <http://www.agronet.gov.co/Paginas/estadisticas.aspx>

## 2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Los análisis básico, elemental, próximo y energético fueron realizados por Doctor Calderón Asistencia Técnica Agrícola LTDA, el análisis estructural se elaboró en el Centro Integrado Laboratorios Ingeniería Química (CILIQ) el cual se especifica en el anexo D.

## 2.4 EVALUACIÓN DE DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

La caracterización de la biomasa se realizó con el fin de estudiar el potencial de energía disponible en la biomasa residual e identificar una tecnología apropiada para su aprovechamiento. En la tabla 2 se presenta la técnica y la norma correspondiente a cada análisis realizado. Posteriormente con el modelo matemático propuesto por Escalante et al., (2010) indicado en la ecuación 1 y el PCI, se estimó el valor del potencial energético para cada residuo.

**Tabla 2. Técnicas utilizadas en la caracterización de la biomasa residual.**

<i>Tipo de Análisis</i>	<i>Variable</i>	<i>Técnica</i>	<i>Norma</i>
<b>Análisis Básico</b>	Humedad	Gravimetría	NTC 35
	Sólidos Totales	Gravimetría	NTC 35

<b>Tipo de Análisis</b>	<b>Variable</b>	<b>Técnica</b>	<b>Norma</b>
<b>Análisis Elemental</b>	Carbono	Volumetría	NTC 5167
	Hidrógeno	Cálculos	---
	Oxígeno	Cálculos	---
	Nitrógeno	Volumetría	LBC 7 KJELDAHL
	Azufre	Turbidimetría	NTC 1174
<b>Análisis Próximo</b>	Humedad	Gravimetría	NTC 35
	MV	Gravimetría	NTC 5167
	CF	Cálculos	---
	Cenizas	Gravimetría	NTC 4431
<b>Análisis Estructural</b>	Lignina	---	NREL
	Celulosa	---	NREL
	Hemicelulosa	---	NREL
<b>Contenido Energético</b>	PCI	Cálculos	Fórmula de Dulong

$$PE = (Mrs) * (E) \quad (1)$$

Donde:

PE= Potencial Energético [TJ/año]

Mrs= Masa residuo seco [t/año]

E= Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t]

La energía del residuo es correspondiente al poder calórico inferior (PCI) que representa la energía química del combustible que puede ser transformada en energía térmica (Manrique et al, 2008) y está relacionada directamente con su contenido de humedad (Valverde et al, 2007).

La masa del residuo seco esta expresada con la siguiente ecuación:

$$M_{rs} = A * Rc * M_{rg} * Y_{rs} \quad (2)$$

Donde:

A= Área cultivada [ha/año].

Rc= Rendimiento del cultivo [t producto principal/ ha sembrada].

Mrg= Factor de residuo generado del cultivo [t de residuo/ t de producto principal].

Yrs= Fracción de residuo seco [t residuo seco/ t residuo húmedo].

El factor de residuo (Mrg o FR) es una variable de gran incidencia para la determinación del potencial energético ya que depende de factores como dinámica del cultivo, la cantidad de residuo generado, el área sembrada y su producto principal.

Para el caso de diferentes tipos de cultivos ya sean de cosecha o agroindustriales la masa de residuo seco se expresa como se indica en la ecuación (3).

$$M_{rs} = \alpha * A * Rc * \sum_k^2 \sum_i^n M_{rg\ i,k} * Y_{rs\ i,k} \quad (3)$$

Donde:

$\alpha$ = Constante de conversión de unidades igual a  $1*10^{-6}$

El contador “k” hace referencia a la clasificación de la biomasa ya sea residual agrícola de cosecha y/o industrial. El contador “i” hace referencia a los tipos de biomasa residual en cada una de las clasificaciones.

De igual manera es importante conocer los parámetros que aportan la descripción fisicoquímica del combustible los cuales se estudiarán a partir de un análisis elemental, próximo y estructural que se definen a continuación.

### 3. RESULTADOS

La Tabla 3 presenta el área cosechada, parámetros como el factor de residuo y la producción anual de cada cultivo en el departamento de Caquetá.

**Tabla 3. Producción, Área cosechada y FR de los residuos agrícolas en el departamento de Caquetá y FR de otras fuentes**

<i><b>Cultivos</b></i>	<i><b>Residuos</b></i>	<i><b>Área cosechada [Ha]</b></i>	<i><b>producción principal [ton/año]</b></i>	<i><b>FR Calculado [t de residuo/t de producto principal]</b></i>	<i><b>Rangos FR Otras Fuentes [t de residuo/t de producto principal]</b></i>
<b>Caña panelera</b>	Hojas y cogollo	433	18.386,5	0,48	3,75
<b>Plátano</b>	Vástago	1.580	68.070,0	2,76	5
	Hojas			0,25	-
<b>Yuca</b>	Rastrojo	1.650	46.687,0	0,75	0,06
<b>Maíz</b>	Rastrojo	950	6.253,5	5,67	1,58 a 2

Fuente: Agronet (2015) <http://www.agronet.gov.co/Paginas/estadisticas.aspx>; (Escalante et al, 2010), (Kemausuora et al, 2014), (Lye et al, 2013), (González 2014)

El factor de residuo relaciona la cantidad de residuo obtenido por unidad de producto principal, también incide ampliamente en la determinación de la oferta de los residuos generados por cada cultivo.

Al comparar el factor de residuo con otras fuentes (Escalante et al, 2010), (Kemausuora et al, 2014), (Lye et al, 2013), (González 2014) (ver tabla 3), se puede

evidenciar que los valores de FR estudiados son muy diferentes a los encontrados en la literatura como es el caso del rastrojo de maíz y las hojas y cogollo de caña panelera.

Las anteriores diferencias de FR de los cultivos en los estudios de comparación, se debe principalmente a las condiciones ambientales que presenta cada cultivo como tipo de suelo y cambios climáticos, variedad de cultivo, el suministro de agua y nutrientes durante el cultivo, el uso de reguladores químicos del crecimiento y pesticidas; de igual manera es importante resaltar la fecha de siembra ya que si la cosecha es temprana el factor de residuo aumenta y si es tardío el factor de residuo disminuye (Chandra et al, 2012 & López et al. 2015).

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL

En la Tabla 4 se muestra la caracterización fisicoquímica de los residuos correspondientes a cada uno de los cuatro cultivos presentando su análisis básico, próximo, elemental, estructural y energético en base seca, respectivamente.

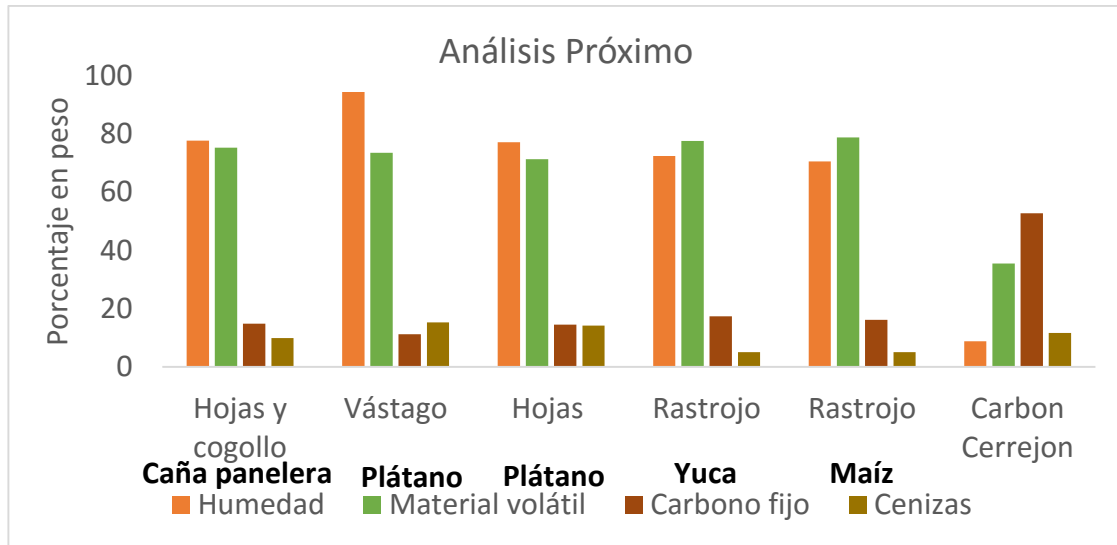
**Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual.**

<i>Tipo de análisis</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Cultivo</i>				
		<i>Caña panelera</i>	<i>Plátano</i>		<i>Yuca</i>	<i>Maíz</i>
		<i>Residuo</i>				
		<i>Hojas y cogollo</i>	<i>Vástago</i>	<i>Hojas</i>	<i>Rastrojo</i>	<i>Rastrojo</i>
<b>Análisis básico [% peso]</b>	<b>Humedad</b>	77,75	94,37	77,17	72,38	70,60
	<b>Sólidos totales</b>	20,62	5,50	21,04	26,99	28,21
<b>Análisis Próximo</b>	<b>Material volátil</b>	75,29	73,51	71,32	77,62	78,77
	<b>Carbono fijo</b>	14,86	11,24	14,52	17,35	16,12

<i>Tipo de análisis</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Cultivo</i>				
		<i>Caña panelera</i>	<i>Plátano</i>		<i>Yuca</i>	<i>Maíz</i>
		<i>Residuo</i>				
		<i>Hojas y cogollo</i>	<i>Vástago</i>	<i>Hojas</i>	<i>Rastrojo</i>	<i>Rastrojo</i>
<b>en base seca [% peso]</b>	<b>Cenizas</b>	9,85	15,25	14,16	5,03	5,11
<b>Análisis elemental [% peso]</b>	<b>Carbono</b>	36,91	36,46	35,74	38,74	40,86
	<b>Hidrógeno</b>	4,82	4,76	4,67	5,16	5,45
	<b>Oxígeno</b>	36,58	36,13	35,42	39,76	41,93
	<b>Nitrógeno</b>	1,12	0,48	2,24	1,44	0,88
	<b>Azufre</b>	0,25	0,15	0,14	0,19	0,11
<b>Análisis Estructural [% peso]</b>	<b>Celulosa</b>	16,03	26,08	22,75	34,87	14,61
	<b>Hemicelulosa</b>	34,76	24,43	26,96	32,86	33,54
	<b>Lignina</b>	12,35	3,46	13,37	18,11	10,12
<b>Otros parámetros</b>	<b>Relación C/N</b>	32,96	75,96	15,96	26,90	46,43

En las figuras 3 y 4 se presenta una comparación del análisis próximo y elemental de los residuos estudiados con el carbón de cerrejón evidenciando valores muy semejantes como el contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno y levemente el contenido de azufre, y por el contrario valores muy alejados como el contenido de humedad, materia volátil y oxígeno cuyos valores son mayores en la biomasa siendo aprovechables energéticamente.

**Figura 3. Análisis Próximo de los residuos agrícolas y el carbón.**



**3.1.1 Humedad** El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. En la figura 3 se puede observar que la humedad en los residuos tuvo una variación de 71% y 95% en peso, con un promedio de 78,45% en peso. Los valores más bajos se obtuvieron en los residuos de rastrojo de maíz (70,66% en peso) y rastrojo de yuca (72,38% en peso). El valor más alto de humedad se encontró en el vástago de plátano (94,37% en peso). El exceso de humedad en la biomasa dificulta el almacenamiento y afecta el costo de los procesos (Rambo et al, 2015).

Los porcentajes de humedad no deben ser superiores a 60% para que la biomasa sea viable como combustible debido a que a mayor porcentaje de humedad menor es el poder calórico inferior (Burgos, 2011). La cantidad de humedad que presenta la biomasa establece la tecnología de conversión más adecuada (Nogués et al, 2010). Los altos porcentajes de humedad que contienen los residuos en este estudio dificultan la utilización de tecnologías termoquímicas lo que obliga a implementar operaciones de pretratamiento como el secado antes de ingresar al proceso de conversión de energía. (Valverde et al, 2007).

**3.1.2 Cenizas** El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo del material. Los residuos con mayor porcentaje de cenizas fueron el vástago y las hojas de plátano con valores de 15,25 % y 14,26% en peso, respectivamente. Lo anterior implica una reducción en el poder calorífico del combustible y del rendimiento térmico de un horno o caldera debido a que las cenizas y escorias dificultan la transmisión de calor, bajan la temperatura de combustión y reducen la cantidad de calor que podría extraerse de un carbón, así mismo, originan problemas de ensuciamiento, deposición y corrosión, a la vez dificultan el contacto entre combustible y comburente (Santos 2008).

**3.1.3 Carbono Fijo y material volátil** Como se observa en la figura 3, el material volátil en los residuos agrícolas estudiados estuvo en un rango de 71,32% a 78,77% siendo el rastrojo de maíz el residuo con mayor contenido de material volátil y las hojas de plátano el de menor valor. Según la literatura el rango ideal de material volátil para la biomasa es de 65-80% (San Miguel et al, 2015).

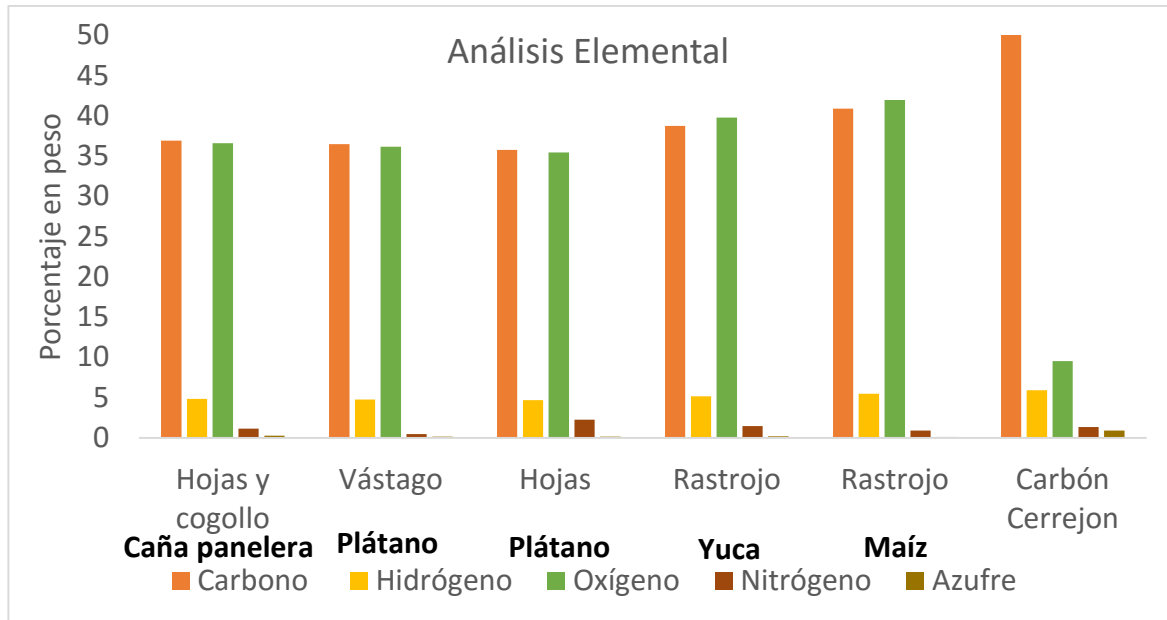
Los contenidos de materia volátil que presentan los residuos analizados reducen el poder calorífico debido a que una parte de las materias volátiles está formada por combinaciones de oxígeno y nitrógeno no combustibles por otro lado estos altos contenidos permiten determinar el tamaño de llama, la estabilidad de los procesos y la emisión de compuestos orgánicos volátiles contaminantes (Santos 2008 & San Miguel et al, 2015).

El carbono fijo presentó valores similares en todas las muestras las cuales se encontraron entre 10-20% siendo el rango ideal para la biomasa en general. El residuo con mayor porcentaje de carbono fijo es el rastrojo de yuca con un valor de 17,35% en peso, aunque es un valor muy bajo comparado con otras fuentes como el carbón de cerrejón cuyo carbono fijo es de 52,77% peso (San Miguel et al, 2015 & Rojas et al, 2008).

**3.1.4 Relación C/N** La relación carbono/nitrógeno, expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material. El carbono es la fuente energética para los microorganismos y el nitrógeno es un material esencial para la síntesis proteínica (Núñez, 2012).

El residuo de vástago de plátano presenta la relación más alta con un valor de 75,96 indicando su alta digestibilidad, las hojas de plátano por el contrario presentan la relación más baja con un valor de 15,96. El rango ideal de la relación C/N es 20-30 favoreciendo la producción de biogás mediante un proceso de fermentación. Dentro de este rango se destaca el residuo de rastrojo de yuca con un valor de 26,90. Cuando la relación de C/N es muy alta significa falta de nitrógeno lo que ocasiona consecuencias negativas para la formación de proteínas en procesos bioquímicos esto debido a que los microorganismos consumen rápidamente el nitrógeno para satisfacer sus necesidades de proteínas y no reaccionan con el contenido de carbono sobrante (Chandra et al, 2012). Por otro lado, si la relación C/N es baja puede conducir a la liberación de amoníaco generando efectos tóxicos sobre los microorganismos (Li k et al, 2015).

**Figura 4. Análisis elemental de los residuos agrícolas y el carbón.**



**3.1.5 Carbono** Como se observa en la figura 4, los contenidos de carbono de los residuos varían entre 35 y 41% en peso con un valor promedio de 37,74% en peso. La mayor concentración se presentó en el residuo de rastrojo de maíz incrementando la formación de enlaces C – C y el potencial energético de este cultivo.

**3.1.6 Oxígeno** Los porcentajes de oxígeno de los residuos se encuentran entre 35 y 42%p. La mayor concentración se presentó en el residuo de rastrojo de maíz, esto trae ventajas y desventajas ya que el oxígeno reduce el poder calórico del combustible pero a su vez, al ser tan elevado contribuye a las necesidades de aire en procesos de combustión (Santos 2008).

**3.1.7 Hidrógeno** Este elemento está presente en las sustancias orgánicas en forma de humedad. Los residuos agrícolas analizados se encuentran en un rango de 4,6 a 5,5% en peso siendo el rastrojo de maíz el de mayor concentración.

**3.1.8 Nitrógeno** Las muestras analizadas contienen un porcentaje de nitrógeno entre 0,4 y 2,3% en peso siendo el de mayor concentración las hojas del plátano. Según (Nogués et al, 2010) el porcentaje adecuado de nitrógeno para la biomasa debe ser inferior a 1% en peso; un elevado valor de este elemento trae consecuencias negativas para el potencial energético ya que obliga a gastar energía y además reduce el rendimiento del combustible durante la conversión termoquímica (Rambo et al, 2015).

El interés en la evaluación del nitrógeno en la biomasa reside en evaluar la cantidad de posibles emisiones de óxidos de nitrógeno que pueden alterar los procesos de transformación de energía (Nogués et al, 2010).

**3.1.9 Azufre** Las muestras analizadas presentan porcentajes inferiores al 1 % en peso, siendo las hojas y cogollo de caña panelera el residuo con la máxima composición con un valor de 0,25% en peso, esto mitiga de manera significativa el impacto ambiental causado por la liberación de óxidos sulfurosos y evita la corrosión de piezas y equipos en los diferentes procesos (Montoya et al, 2013).

**3.1.10 Lignina, celulosa y hemicelulosa** Los residuos estudiados en este trabajo reportan contenidos de celulosa entre 13-35%. Mayores valores se presentan en los residuos de yuca y plátano mejorando sus características de descomposición ya que la biodegradabilidad de la celulosa es superior a la de la lignina debido a que los compuestos de la celulosa tienen la estructura de ramificación de la cadena de polisacáridos y no hay compuestos aromáticos que se volatilicen fácilmente (Gani & Naruse, 2007).

Según (Farinas, 2015), los contenidos de lignina deben estar en un rango de 10-30% en peso seco, dentro de este rango se encuentran las hojas y cogollo de caña panelera, las hojas de plátano, el rastrojo de maíz y el rastrojo de yuca con valores de 12,35%, 13,36%, 10,11% y 18,11%, respectivamente. Estos valores tienen

influencia sobre el poder calorífico dependiendo del porcentaje de lignina. Por otro lado, los residuos sólidos con mayor contenido en lignina precisan de mayor tiempo de residencia para reaccionar completamente, debido a la complejidad de su estructura (San Miguel et al, 2015).

Los valores de hemicelulosa investigados en la literatura (Farinas, 2015) se encuentran entre (15-35%), rango dentro de cual se encuentran los valores de los residuos estudiados. Se puede observar que los residuos de hojas y cogollo de caña, el rastrojo de maíz y el rastrojo de yuca sobresalen con valores de 34,76, 33,54 y 32,86, respectivamente.

Por su parte, el vástago de plátano presentó un valor de lignina menor al 10% y celulosa mayor al 25% basado en estos valores, el residuo puede ser utilizado para la producción de alcohol por fermentación (Lakovou et al., 2010), además la proporción entre los contenidos de celulosa y lignina representan un parámetro importante cuando se seleccionan materias primas para conversión bioquímica (Nogués et al, 2010).

### **3.2 POTENCIAL ENERGÉTICO**

En la tabla 5 se muestra el potencial energético de los residuos correspondientes a cada cultivo en el municipio y el departamento, el poder calorífico inferior y la oferta departamental del residuo.

**Tabla 5. Potencial energético de la biomasa.**

<b>Cultivo</b>	<b>Residuo</b>	<b>Oferta de residuo departamental [ton/año]</b>	<b>Poder Calórico Inferior en base seca [KJ/Kg]</b>	<b>Potencial Energético [TJ/año]</b>	
				<b>Cartagena de Chairá</b>	<b>Caquetá</b>
<b>Caña panelera</b>	Hojas y cogollo	8.825,52	12.836,51	4,64	25,49
<b>Plátano</b>	Vástago	187.873,20	12.669,15	9,82	62,60
	Hojas	17.017,50	12.422,30	7,57	48,26
<b>Yuca</b>	Rastrojo	35.015,25	13.380,43	37,70	129,40
<b>Maíz</b>	Rastrojo	35.457,35	14.112,63	47,05	147,12
<b>Total</b>				106,78	412,87

Los resultados del PCI de los cinco residuos son inferiores comparados con algunos combustibles fósiles sólidos encontrados en la literatura como el carbón de cerrejón cuyo valor alcanza a 26.805,88 KJ/Kg, el coque 29.300 KJ/Kg y la antracita 34.300 KJ/Kg. Los valores para el PCI de los residuos agrícolas estudiados varían entre 12.000 y 15.000 KJ/Kg siendo muy similares a fuentes de biomasa encontradas por (Muñoz et al, 2013) para otras biomásas nacionales e internacionales las cuales presentan valores entre 12.552 y 20.016,26 KJ/Kg.

El rastrojo de maíz presenta el mayor PCI con un valor de 14.112 KJ/kg, por el contrario, las hojas y el vástago de plátano presentan los menores valores de PCI debido a su alto contenido de humedad, lo que reduce la eficiencia en la combustión puesto que gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material (Valverde et al, 2007).

Se observa que la cantidad de energía generada en el departamento a partir de los residuos estudiados es de 412,87 TJ/año. Las hojas y cogollo de la caña panelera presentan el menor PE con un valor de 25,49 TJ/año aportando un 6,17% al PE total. El maíz por el contrario presenta el mayor PE con un valor de 147,11 TJ/año esto debido principalmente a que el rastrojo de maíz presenta el factor de residuo más elevado y el contenido de humedad más bajo permitiendo un aumento en el PCI.

El rastrojo de yuca es el segundo residuo con el mayor PE mostrando un valor de 129,49 TJ/año y contribuyendo en un 31,34% del PE total. Por su parte las hojas y el vástago de plátano contienen un PE de 110,86 TJ/año y aportan un 26,85% del PE total.

### **3.3 TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA**

Las rutas de conversión de la biomasa a energía eléctrica se clasifican principalmente en dos, termoquímica y bioquímica. De acuerdo con (Nogués 2010), la cantidad de humedad que presenta la biomasa establece la tecnología de conversión más adecuada. La caracterización fisicoquímica de la biomasa es un aspecto importante para la selección de la tecnología. Para el caso de procesos termoquímicos como la pirolisis, gasificación, combustión y licuefacción se requiere biomasa rica en material volátil, contenidos de humedad inferiores a 60% y contenidos de cenizas bajos para evitar daños en los equipos y mejorar la eficiencia de los procesos (Barrera et al, 2014). Para el caso de procesos bioquímicos como la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica se requieren contenidos de humedad entre 60-85% (Tiwari et al. 2015).

Según las características de la biomasa del presente estudio, la mejor ruta de transformación energética es la bioquímica, esto debido a que los residuos cuentan

con humedades mayores al 60%. El proceso a sugerir para el rastrojo de yuca y las hojas y cogollo de caña es la digestión anaerobia ya que presenta una relación C/N óptima para este tipo de tecnología.

Para los residuos de rastrojo de maíz, hojas y vástago de plátano se sugiere el proceso de Co-digestión anaerobia teniendo en cuenta que al mezclarse con otros sustratos como estiércol, gallinaza u otros residuos usados como bioabono aumentan o disminuyen la relación C/N acercándola a valores óptimos para el proceso.

Diferentes tipos de biomasa usando esta tecnología han sido estudiados en Colombia anteriormente por Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA) de la Universidad del Valle mostrando como resultado biogás con producciones de metano en el biogás entre 30% y 70% y relaciones C/N entre 15 y 47.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos en el presente estudio para la biomasa residual agrícola en el departamento de Caquetá, demuestran que existe una gran disponibilidad de residuos agrícolas de 284.182,82 ton/ año y un alto potencial energético disponible para ser aprovechada con un valor de 412,87 TJ/año. El PE del rastrojo de maíz se destacó con un valor de 147,11 TJ/año aportando un 35,63% al PE total.

Los análisis fisicoquímicos de las muestras analizadas evidencian que los residuos de los diferentes cultivos son adecuados para el uso de tecnologías bioquímicas como la digestión anaerobia y co-digestión debido a sus altos contenidos de humedad y a su relación C/N. Cabe resaltar que el vástago de plátano debido a su bajo contenido de lignina es un residuo aprovechable para la producción de alcohol mediante fermentación.

## BIBLIOGRAFÍA

BILGILLI, F., OZTURK, I. *Biomass energy and economic growth nexus in G7 countries: Evidence from dynamic panel data*. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Abril, 2015. vol. 49. p. 132-138.

BOCCI, E., DI CARLO, A., MC GALLUCCI, K., FOSCOLO, P., MONETI, M., VILLARINI, M., CARLINI, M. *Biomass to fuelcells stage of the art: A review of the most innovate technology solutions*. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY XXX. Diciembre, 2014. vol. 39. no. 36,. pp. 1- 20.

BURGOS, F., OPORTO, C. *Biomasa como fuente de energía sustentable*. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 2010

CHANDRA, R., TAKEUCHI, H., HASEGAWA, T. *Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production*. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Junio, 2012. vol. 16. pp. 1462-1476.

Energías Renovables 2008 – *Energía Biomasa* Secretaría de Energía de Argentina, Buenos Aires, Argentina. 2008

ESCALANTE, H., ORDUZ, J., ZAPATA, H., CARDONA, M., DUARTE, M. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Ediciones UIS. 2010. p.

ESTEVE, N. *Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica*. Tesis de Magister en Gestión Ambiental. Bogotá D.C.

Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, 2011. 8 p

FABA, L., DÍAZ, E., ORDOÑEZ, S. *La biomasa como materia prima para obtención de combustibles líquidos*. En: Ecotimes. Junio, 2013. Disponible en: <http://www.ambientum.com/revista/2013/junio/biomasa-como-materia-prima-para-obtencion-combustibles-liquidos.asp>

GANI, A., NARUSE, I. *Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass*. En: Renewable Energy Abril, 2007. vol. 32. pp. 649-661.

GARCÍA, H. *Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 2011

GARCÍA, L. *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 2011

GARCÍA, R., PIZARRO, C., LAVÍN, A., BUENO, J. *Characterization of spanish biomass wastes for energy use*. En: Bioresource technology. Octubre. 2011. vol. 103. no. 1, pp. 249-258.

GÓMEZ, A., RINCÓN, S., KLOSE, W. *Pirólisis de biomasa cuesco de palma*. Bogotá, Colombia. Kassel University Press. 2008

González, M., MIRKO, M., PINELLI, M., RUGGERO, P., VENTURINI, M., FINKENRATH, M., POGANIETZ, W. *Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia*. En: Applied Energy. Diciembre, 2014. Vol 136. pp. 781 – 796.

HERNÁNDEZ, S. *Evaluación de la viabilidad energética y medio ambiental de la producción de biomasa lignocelulósica de cultivos energéticos para la generación de energía eléctrica en España*. Tesis de ingeniería Industrial. Madrid. Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2011.

Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas no Interconectadas, *Sobre Información Institucional - ¿Qué son las ZNI?*. 2013 [en línea] [Fecha de consulta: 25 de septiembre de 2015] disponible en: <http://ipse.gov.co/atencion-ciudadano/preguntas-frecuentes-y-respuestas/2Institucional/3-que%20las%20ZNI>

KEMASAUUOR, F., KAMP, A., TJALFE, S., CUDJOE, E., OSTERGARD, H. *Assessment of biomass residue availability and bioenergy yields in Ghana*. En: *Resources Conservation and Recycling*. Mayo, 2014. Vol 86. pp. 28 – 37.

KUMAR, A., KUMAR, N., BARENDAR, P., SHUKLA, A. *A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India*. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Febrero, 2015. vol. 45. pp. 530 – 539.

LAKOVOU, E., KARAGIANNIDIS, A., VLACHOS, D., TOKA, A., MALAMAKIS, A. *Waste biomass-to-energy supply chain management a critical synthesis*. En: *Waste Management*. Octubre, 2010, vol. 30. pp. 1860 – 1870

LETVA, A., RUÍZ, G. *Cultivos energéticos y biocombustibles* En: *LYCHNOS*. Octubre, 2011. Disponible en: [http://www.fgcsic.es/lychnos/es\\_es/publicaciones/lychnos\\_num\\_06](http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/publicaciones/lychnos_num_06)

LI, K., LIU, R., SUN, C. 2015. *A review of methane production from agricultural residues in China*. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Noviembre, 2015. vol 54. pp. 857 – 865.

LÓPEZ, M., MASAGUER, A., PAREDES, C., ROCA, L., ROS, M., SALAS, M., BOLUDA, R. *De residuo a recurso el camino hacia la sostenibilidad*. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa 2015

LYE, E., BILSBORROW, P. *Assessment of the availability of agricultural residues on a zonal basis for medium- to large-scale bioenergy production in Nigeria*. En: Biomass and Bioenergy. Enero, 2013. Vol 48. pp. 66 – 74.

MANRIQUE, S., FRANCO, J., NUÑEZ, V., SEGHEZZO, L. *Potencial energético de Biomasa residual de tabaco y ají en el municipio de coronel moldes (SALTA – ARGENTINA)*. En: Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 2008. vol. 12. pp. 87-94.

MONROY, C. *Modelación cinética de pirólisis de biomasa*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 2013

MONTOYA, J., CHEJNE, F., CASTILLO, E., ACERO, J. *Pirólisis rápida de biomasa*. Medellín, Colombia. Editorial Universidad Nacional de Colombia. p. 26. 2013

MUÑOZ, D., CUATIN, M., PANTOJA, A. *Potencial energético de residuos agroindustriales del departamento del Cauca, a partir del poder calorífico inferior*. En: Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Julio, 2013. Vol 11. pp. 156 – 163.

NOGUÉS, F., GARCÍA, D., REZEAU, A. *Energía de la biomasa*. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza. 2010

NÚÑEZ, D. *Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta*. En: Tecnura, diciembre 2012. Vol. 16. pp. 142 – 156. 2012

PARRA, B., TORRES, P., MARMOLEJO, L., CÁRDENAS, L., VÁSQUEZ, C., TORRES, W., ORDOÑEZ, J. *Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de biorresiduos de origen municipal*. En: Ingeniería, investigación y tecnología. Diciembre, 2015. vol. 16. pp. 515-526

PATEL, M., ZHANG, X., KUMAR, A. *Techno – economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review*. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Enero, 2016. vol 53. pp. 1486 – 1499.

PÉREZ, J., BORGE, D., AGUDELO, J. *Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales*. En: revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Marzo, 2010. Vol. 52. pp. 95 – 107. 2010

RAMBO, M., SCHMIDT. F., FERREIRA, M. *Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities*. En: Talanta. Junio, 2015. vol. 144. pp. 696 – 703

Red de Información y comunicación del Sector Agropecuario. *Producción agrícola por departamento*, [en línea] [Fecha de consulta: 03 de marzo de 2015] disponible en: <http://www.agronet.gov.co/Paginas/estadisticas.aspx>

ROBERTS, J., MOROTTA, A., PRADO, P., ALVES, R., PARRELLA, J. *Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of general pueyrredón, Argentina*. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Junio, 2015. vol. 41. pp. 568-583.

SAN MIGUEL, G., GUTIERREZ, F. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa 2015

SANTOS, J. *Fuentes de Energía No Renovables: El Carbón*. 2008 [en línea] [Fecha de consulta: 10 de Noviembre de 2015] disponible en: <http://josanna.webs.uvigo.es/>

SHIUN, J., ABDUL, Z., WAN, S., HASHIM, H. *A review on utilisation from rice industry as a source of renewable energy*. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Marzo, 2012. vol. 16. pp. 3084-3094.

Unidad de Desarrollo Tecnológico Universidad de Concepción. *Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión*. [en línea] [Fecha de consulta: 17 de febrero de 2016] disponible en: [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266\\_PresentacionPellets.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266_PresentacionPellets.pdf).

Unidad de Planeación Minero Energética. *Plan iniciativa de expansión de cobertura de energía eléctrica 2010-2014*. [en línea] [Fecha de consulta: 5 de abril de 2015] disponible en: [http://www.upme.gov.co/Docs/PIEC/PIEC\\_UPME\\_2010\\_2014\\_\\_Prelimar.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PIEC/PIEC_UPME_2010_2014__Prelimar.pdf)

URIEN, A. *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España. 2013

VALVERDE, A., SARRIA, B., MONTEGUDO, J. *Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz*. En: *Scientia et Technica* año XIII. Diciembre, 2007. vol. 37. pp. 255-260.


VÁZQUEZ, H., DACOSTA, O. *Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas*. En: *Ingeniería, investigación y tecnología*. Diciembre, 2007. vol.4. pp. 249-259

ZULUAGA, M., DYNER, I. *Incentives for renewable energy in reformed Latin-American electricity markets: the Colombian case*. En: Journal of Cleaner Production. Mayo, 2007. vol. 15. pp. 153-162


## ANEXOS

### ANEXO A. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LOS CULTIVOS


**Figura 5.** Ficha técnica del maíz.

<b>Yuca</b>	
Nombre común: Yuca	
Nombre científico: Manihot esculenta	
Familia: Euphorbiaceae	
Género: Manihot	
Origen: América del Sur	
Tipo de cultivo: Anual	
Residuos: Hojas y Tallos (Rastrojo)	
<p>Es un cultivo de amplia adaptación ya que se siembra desde el nivel del mar hasta los 1 800 msnm, a temperaturas comprendidas entre 20 y 30 °C con una óptima de 24 °C, una humedad relativa entre 50 y 90 por ciento con una óptima de 72 por ciento y una precipitación anual entre 600 y 3 000 mm con una óptima de 1 500 mm.</p>	


**Figura 6.** Ficha técnica del maíz.

<b>Maíz Tradicional</b>	
Nombre común:	
Nombre científico: Zea mays	
Familia: Poaceae	
Género: Zea	
Origen: América	
Tipo de cultivo: Trasitorio	
Residuos: Rastrojo, Tusa, Capacho y Hojas secas	
<p>El maíz posee buen desarrollo vegetativo que puede alcanzar hasta los 5 metros de altura en altitudes superiores a los 1,000 metros sobre el nivel del mar (msnm). El maíz, en general, crece bien en suelos con pH entre 5.5 y 7.8. Fuera de estos límites suele aumentar o disminuir la disponibilidad de ciertos elementos y se produce toxicidad</p>	

**Figura 7.** Ficha técnica de la caña panelera

<b>Caña panelera</b>	
Nombre común: Caña panelera	
Nombre científico: Saccharum officinarum.	
Familia: Poaceae	
Género: Saccharum	
Origen: Asia	
Tipo de cultivo: Permanente	
Residuos: Bagazo, hojas secas y Rac	
<p>Planta herbácea, tallo erguido hasta 3 m de longitud, seis centímetros de diámetro, rico en azúcar. Hojas verdes, simples alternas, pubescentes urticantes, pegadas al tallo en vainas envolventes, lanceoladas de 1,5 metros de longitud; nervaduras paralelinervias. Flores pequeñas plumosas, se unen en inflorescencias en el extremo de la planta, color púrpura.</p>	

**Figura 8.** Ficha técnica del plátano

<b>Plátano</b>	
Nombre común: Plátano	
Nombre científico: Musa acuminata Colla	
Familia: Musaceae	
Género: Musa	
Origen: Asia	
Tipo de cultivo: Permanente	
Residuos: Hojas Raquis y Vástago	
<p>El plátano exige un clima cálido y una constante humedad en el aire. Necesita una temperatura media de 26-27 °C La platanera tiene una gran tolerancia a la acidez del suelo, oscilando el pH entre 4,5-8, siendo el óptimo 6,5. Por otra parte, los plátanos se desarrollan mejor en suelos planos, con pendientes del 0-1%</p>	

## **ANEXO B. PROTOCOLO DE MUESTREO PARA LOS CULTIVOS**

Se realizó un muestreo aleatorio para la recolección de las muestras teniendo en cuenta como criterio la mayor área sembrada de cada cultivo.

Se llevó a cabo de la siguiente manera:

- a. Hacer toma de la muestra utilizando el método de muestreo aleatorio. Este método consiste en tomar un área de 1 ha en el cultivo y seleccionar entre tres a cinco plantas del cultivo cada 10 pasos de forma aleatoria.
- b. Para la recolección tomar un peso de 1 kg de cada residuo evitando contaminación de la muestra con tierra y otros residuos.
- c. Las muestras se colocan dentro de bolsas plásticas debidamente selladas e identificadas y se almacenan en una cava para que puedan ser trasladadas al laboratorio.

## ANEXO C. PLANTILLA DESCRIPTIVA DEL SITIO A MUESTREAR

**MUESTRA No.** \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Finca \_\_\_\_\_

Vereda \_\_\_\_\_

Municipio \_\_\_\_\_

Departamento \_\_\_\_\_

Evaluador responsable \_\_\_\_\_

Personal que atendió al evaluador \_\_\_\_\_

### 1. CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

Clima del día \_\_\_\_\_

Temperatura \_\_\_\_\_

Terreno húmedo\_\_\_\_ Terreno seco\_\_\_\_

Observaciones \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 2. CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO

Nombre común del cultivo \_\_\_\_\_

No. de hectáreas cultivadas \_\_\_\_\_

Distancia de siembra del cultivo \_\_\_\_\_

Tipo de abono \_\_\_\_\_

Siembra tradicional \_\_\_\_\_ Siembra tecnificada \_\_\_\_\_

Cosecha tradicional \_\_\_\_\_ Cosecha tecnificada \_\_\_\_\_

Cuáles son las vías de acceso al cultivo:

Automóvil\_\_\_\_ Lancha o barca\_\_\_\_ Caballo o mula\_\_\_\_ A pie\_\_\_\_ Otro\_\_\_\_

¿Cuál? \_\_\_\_\_

Residuos generados en la cosecha\_\_\_\_\_

Observaciones\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### **3. USO ACTUAL DE BIOMASA RESIDUAL**

Abono\_\_\_\_ Biodigestión\_\_\_\_ Compostaje\_\_\_\_ Cocción de alimentos\_\_\_\_\_

Ninguno\_\_\_\_\_

Conoce proyectos donde utilicen este tipo de biomasa\_\_\_\_\_

Observaciones\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ANEXO D. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

**Figura 8.** Metodología del análisis estructural

