

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BIOMASA AGRÍCOLA  
REPRESENTATIVA EN SANTANDER:  
“PAPA, YUCA, MORA, PAPAYA, CEBOLLA JUNCA”

JOHANA MEJÍA GONZÁLEZ  
JOHANNA VANESSA RONDÓN ROA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2013

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BIOMASA AGRÍCOLA  
REPRESENTATIVA EN SANTANDER:  
“PAPA, YUCA, MORA, PAPAYA, CEBOLLA JUNCA”

JOHANA MEJÍA GONZÁLEZ  
JOHANNA VANESSA RONDÓN ROA

Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Químico

Director:

Ph. D. Humberto Escalante Hernández  
Ing. Químico Director:

Co-director:

Ph.D María Paola Maradei García  
Ing. Química Ph.D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2013

## **AGRADECIMIENTOS**

A los profesores Humberto Escalante Hernández y María Paola Maradei García, por su apoyo, confianza, orientación y enseñanzas.

A la profesora Nathalia Bedoya por su orientación y conocimiento, por brindarnos su apoyo y sugerencias.

A la profesora Débora Nabarlatz por su oportuno aporte, brindándonos su conocimiento y colaboración.

A los técnicos del laboratorio de Operaciones Unitarias, Don Wilson y Don Eduardo por su orientación, paciencia y colaboración incondicional con los equipos.

Al ingeniero Reynel de la Vega, por su apoyo y colaboración durante todo el proceso y desarrollo de nuestro trabajo de investigación.

Al equipo de trabajo del Centro de Estudios e investigaciones ambientales CEIAM por su trabajo y colaboración.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas y acogernos durante el tiempo de nuestra formación.

## DEDICATORIA

*Gracias a Dios Todo Poderoso, por darme la vida, por nunca fallarme y colocar en mi camino a personas maravillosas; también por darme la oportunidad de continuar con mi preparación y llevar a feliz término este nuevo logro.*

*A los profesores que hicieron parte de mi formación profesional y personal, sus sugerencias, apoyo y paciencia.*

*A mi madre, Victoria, por estar siempre conmigo y ser la mejor amiga del mundo, que con su amor, oración y humildad, hizo de mí una persona de valores, capaz de afrontar con paciencia las situaciones de la vida.*

*A mi padre, Vicente, que desde el cielo me acompaña y bendice cada paso que doy, para que transite siempre por el camino del bien.*

*A mi hermana, Rubiela, por estar ahí cuando la necesito y aunque la distancia nos separa, nuestros lazos de amor, uerquera y perseverancia nos mantiene siempre unidas; no existe una mejor hermana que tú.*

*A mi novio, William Johany, por el amor y apoyo incondicional, por confiar y creer siempre en mí, por ser el hombre más maravilloso y noble capaz de soportarme y acompañarme en mis tristezas y disfrutar de mis alegrías.*

*A mis amigos, en especial a Vanessa, Reynel y Sebastian, que me ayudaron y compartieron conmigo durante este proceso de aprendizaje.*

*Johana Mejía González*

## DEDICATORIA

*Gracias a Dios, por iluminar mi camino de paciencia, constancia, sabiduría, fortaleza para seguir adelante.  
Hija hermosa, eres mi mayor razón para luchar, te amo.*

*A mi querida madre, Alcira. Gracias por ser mi fiel amiga, por su incondicional apoyo, por ser mi bastón todos estos años.*

*Gracias Nona, por ser mi apoyo incondicional, por preocuparse por mí y por mi hija. Gracias por tus consejos, por tu servicio y tu cariño y sobre todo por recibirme en casa cuando lo necesite.*

*Gracias a mis amigas de universidad a Silvis, Carito, Eliana, Rositas, Angélica, Joha, Aleja, Laura O. y X.. Andresito, Poblador por cuidar de mi hija, mientras tenía que ir a clases, por los momentos compartidos.  
Gracias por su amistad.*

*Gracias apreciada U. I. S., por abrirme las puertas del alma máter y darme la formación todos estos años.  
A mi hija, madre y nona dedico este triunfo, las amo con todo mi corazón.*

*Johanna Vanesa Rondón Roa*

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. METODOLOGÍA .....	23
1.1. CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE BIOMASA .....	23
1.2. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL .....	25
1.3. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO .....	27
2. RESULTADOS.....	28
2.1. CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA, FACTOR RESIDUO Y OFERTA DE RESIDUO.....	28
2.2. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA BIOMASA RESIDUAL .....	29
2.2.1. Análisis Elemental.....	32
2.2.2. Análisis Próximo .....	34
2.2.3. Análisis Estructural .....	38
2.3. ANÁLISIS ENERGÉTICO .....	40
2.3.1. Potencial Energético.....	41
3. CONCLUSIONES .....	44
BIBLIOGRAFIA.....	45
ANEXOS.....	50

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Parámetros para la caracterización fisicoquímica de biomasa residual agrícola.....	25
Tabla 2 Oferta de biomasa residual agrícola para cinco cultivos en Santander....	28
Tabla 3 Caracterización fisicoquímica de biomasa residual de cinco cultivos representativa en Santander.....	30
Tabla 4 PE para las biomásas residuales de cinco cultivos representativos de Santander.....	42

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Sitios de muestreo de biomasa residual agrícola. ....	24
Figura 2 Procedimiento para análisis estructural. ....	26
Figura 3 Carbono, hidrógeno y oxígeno, para residuos de biomasa estudiados. ....	32
Figura 4 Nitrógeno y azufre para la biomasa residual estudiada. ....	34
Figura 5 Humedad de la biomasa residual generada por los cultivos bajo estudio. ....	35
Figura 6 MV y CF contenida en los residuos de la biomasa estudiada.....	37
Figura 7 Cenizas contenidas en los residuos de la biomasa agrícola estudiada. ....	38
Figura 8 Análisis estructural en base seca para los residuos estudiados. ....	39
Figura 9 Porcentaje de oferta de biomasa y potencial energético por cultivo. ....	41

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LOS CULTIVOS PAPAYA, MORA, YUCA, PAPA, CEBOLLA JUNCA .....	50
Anexo B FORMATO DE ENTREVISTA A LOS CULTIVADORES.....	53
Anexo C PROTOCOLO PARA EL MUESTREO DE LOS CULTIVOS .....	54
Anexo D BALANCES DE MASA MATERIAL LIGNOCELULÓSICO .....	55

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE BIOMASA AGRÍCOLA REPRESENTATIVA EN SANTANDER: “PAPA, YUCA, MORA, PAPAYA, CEBOLLA JUNCA”\*

**AUTORES:** Mejía González, Johana.  
Rondón Roa, Johanna Vanessa. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Oferta de biomasa residual agrícola, PE (potencial energético), caracterización fisicoquímica, PCI (Poder calórico inferior).

**DESCRIPCION:**

Los cultivos energéticos están recibiendo una atención creciente por varios motivos: obtención de combustibles alternativos a los fósiles, reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y adquisición de una mayor independencia energética. Siendo la biomasa de naturaleza variada para el aprovechamiento de fuentes renovables, requiere en cada caso de tecnologías específicas; bajo este contexto para el caso de la biomasa residual agrícola se hace necesario su análisis fisicoquímico que permita orientar hacia la mejor tecnología de transformación en recurso energético renovable. El presente trabajo se centró en la caracterización fisicoquímica de cinco cultivos representativos del departamento de Santander, de los cuales se obtuvieron 15 residuos entre RAC Y RAI. Se presenta una información completa de los análisis: elemental, próximo y estructural; así como la determinación del Potencial energético (PE) para todos los residuos de biomasa.

De los residuos estudiados, 13 presentan humedad, celulosa y relación C/N favorables para las tecnologías bioquímicas de conversión, alejándose de esta tendencia los residuos de hojas de yuca y la poda de la mora, que a pesar de superar el 10%p en humedad, podrían ser aprovechadas eficientemente en procesos de combustión.

En cuanto al PE, se determinó utilizando un modelo matemático, que se fundamenta en que la energía contenida en la materia, representada por su Poder Calórico Inferior (PCI) es proporcional a su masa seca. Los residuos del cultivo de mora presentan los valores más altos de Potencial energético con 442,42 TJ/año correspondiente al 51,01% del total aportado por las 15 biomásas residuales estudiadas.

---

\*Trabajo de grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Química. Director: PhD. Humberto Escalante Hernández. Codirector: PhD. María Paola Maradei García.

**TITLE:** PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF REPRESENTATIVE AGRICULTURAL BIOMASS IN SANTANDER: "POTATO, CASSAVA, MULBERRY, PAPAYA AND GREEN ONION" \*

**AUTHORS:** Mejía González, Johana.  
Rondón Roa, Johanna Vanessa. \*\*

**KEYWORDS:** Agricultural crop residue, physicochemical characterization, calorific value, energetic potential.

**DESCRIPTION:**

Energy crops are receiving increasing attention for several reasons: obtaining alternative to fossil fuels, reducing CO<sub>2</sub> emissions and acquisition of greater energy independence. As the biomass of varied nature for the use of renewable sources in each case requires specific technologies in this context for the case of agricultural waste biomass is necessary physicochemical analysis to guide to the best technology in energy resource transformation renewable. This work focused on the physicochemical characterization of five crops representative of the department of Santander, of which 15 residues were obtained between RAC and RAI. We present a complete information analysis: elementary, next and structural as well as the determination of the energy potential for all biomass residues.

Of the residues studied, 13 have moisture, cellulose and C/N ratio favorable biochemical conversion technologies, this trend away from waste cassava leaves and pruning mulberry, that despite more than 10%p in moisture can be exploited efficiently in combustion processes.

As for the EP, was determined using a mathematical model, which is based on the energy contained in matter, represented by Lower Caloric Power is proportional to its dry mass. The mulberry crop residues have the highest values of potential energy with 442.42 TJ/year corresponding to 51.01% of the total contribution of the 15 studied residual biomass.

---

\*Thesis

\*\*Physicochemical Engineering Department. Chemical Engineering. Director: PhD. Humberto Escalante Hernández. Codirector: PhD. María Paola Maradei García.

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>CF</b>	Carbono fijo
<b>COT</b>	Carbono orgánico total
<b>FR</b>	Factor de residuo
<b>Ha</b>	Hectárea
<b>MV</b>	Material volátil
<b>kJ</b>	Kilo-Joule
<b>PCI</b>	Poder calorífico inferior
<b>PCS</b>	Poder calorífico superior
<b>PE</b>	Potencial energético
<b>t</b>	Tonelada
<b>TJ</b>	Tera joule
<b>RAC</b>	Residuo agrícola de cosecha
<b>RAI</b>	Residuo agroindustrial
<b>Rc</b>	Rendimiento de cosecha
<b>RSOU</b>	Residuos sólidos orgánicos urbanos

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de fuentes alternas de energía en los últimos años ha surgido como una respuesta a la creciente demanda energética, la reducción de las reservas de petróleo y la concientización sobre el impacto ambiental generado por sus emisiones (García *et al.*, 2012). Fuentes de energía renovables como la mareomotriz, hidráulica, eólica, solar y la obtenida a partir de la biomasa, se han convertido en alternativas atractivas para la producción de energía de forma sostenible (Agugliaro *et al.*, 2013). Esta última representa en la actualidad la mayor fuente renovable de energía, cuya disponibilidad mundial se estimó entre los 112 y 220 millones de toneladas anuales (Demirbas, 2001).

Diversas tecnologías para transformar la biomasa han aparecido, estas se clasifican en térmicas y biológicas; dentro de las primeras se encuentra la combustión, pirólisis, gasificación; para la segunda están la fermentación y digestión anaerobia (McKendry, 2002). En México, residuos de frutas y hortalizas han sido estudiados para la obtención de metano a partir de digestión anaerobia (García *et al.*, 2011). Así mismo en Tailandia se realizó un estudio para la producción de bio-oil a partir de residuos de yuca mediante pirólisis rápida en un reactor de lecho fluidizado, obteniendo rendimientos de aceite del 65% (Pattiya, 2011).

Sin embargo, en orden de explotar el potencial de la biomasa, para decidir qué tecnología adoptar para su transformación energética, la caracterización fisicoquímica es muy relevante. Se ha determinado, por ejemplo, que la relación C/N representa un índice de la digestibilidad de la biomasa. Residuos con una relación C/N entre 20 y 30 son susceptibles a su aprovechamiento por digestión anaerobia (Haladová *et al.*, 2011). De igual manera, altos contenidos de humedad y cenizas, representan restricciones para las tecnologías térmicas. Diversos

estudios han determinado que durante el proceso de pirólisis los contenidos de humedad en la biomasa pueden ocasionar aumentos en la temperatura de reacción así como desaceleraciones en la velocidad de calentamiento del residuo, afectando también las propiedades fisicoquímicas del bio-oil que se produce (Su-Heo *et al.*, 2010).

Hoy en día, la biomasa residual generada a partir de los procesos de corte y transformación de la cosecha, es ampliamente utilizada con fines energéticos. Sin embargo, para evaluar su viabilidad, se hace indispensable la estimación de su oferta medida en términos de su Potencial Energético (PE). China, India, Filipinas, Sri Lanka y Tailandia han realizado estudios para evaluar el PE de la biomasa residual agrícola del estiércol animal y de los residuos sólidos urbanos (RSOU) (Bhattacharya *et al.*, 2010). En la región de Navarra (España) se elaboró una cartografía que informa el PE de los residuos agroforestales a fin de identificar posibles zonas para la ubicación de plantas de aprovechamiento de biomasa (Domínguez *et al.*, 2003). En Colombia se realizó un atlas del potencial energético de la biomasa residual agrícola, pecuario y de RSOU, que además de evaluar la oferta de los residuos a nivel nacional, se realizó su caracterización y representación espacial en la cartografía del país (Escalante *et al.*, 2010).

La actividad agrícola en Santander representa uno de los pilares de su economía, destacándose los cultivos de yuca, papa, mora, cebolla y papaya (EVA, 2010). La estimación del PE de la biomasa residual generada por estos cultivos se convierte, en un primer paso para la toma de decisiones sobre la factibilidad de generación de energía a partir de estos recursos (Chiang *et al.*, 2012). El objetivo principal de este trabajo es: Cuantificar la oferta de la biomasa residual proveniente de los cultivos de yuca, papa, mora, cebolla y papaya, seleccionados por su alta producción agrícola departamental y caracterizar sus principales propiedades fisicoquímicas y energéticas.

El presente trabajo de grado se encuentra enmarcado dentro del proyecto “Aprovechamiento Energético de la Biomasa Residual Agrícola de Santander”, cuya visión es la caracterización de 23 cultivos representativos del departamento. Proyecto financiado por la Universidad Industrial de Santander, liderado por el CEIAM y el Centro de Investigaciones en Ciencia y Tecnología en Recursos Energéticos (CICT-Energías).

## **BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA**

La biomasa residual agrícola es la materia orgánica proveniente de los desechos de los procesos de corte y transformación de cultivos. Esta biomasa se clasifica como: Residuo Agrícola proveniente de las Cosechas (RAC) y Residuo Agrícola proveniente del procesamiento industrial (RAI) (Escalante *et al.*, 2010).

El factor residuo (FR), es un parámetro de gran incidencia en la determinación de la oferta de biomasa generada por los cultivos. Para determinar el FR se requiere conocer la dinámica del cultivo, el área cosechada, el producto principal y el desechado. La oferta de residuo afecta directamente el contenido de energía disponible de la biomasa que puede ser aprovechada y utilizada con fines energéticos, identificado como potencial energético (PE) (Voivontas *et al.*, 2001).

El Potencial energético (PE) se constituye en una información importante para la selección y valorización energética de una biomasa. En este estudio, para la determinación del PE de las biomásas residuales de los cinco cultivos, se utilizó el modelo matemático propuesto por Escalante *et al.*, (2010). Este modelo se fundamenta en que la energía contenida en su materia es proporcional a su masa seca y por consiguiente puede expresarse en forma general como:

$$PE = (M_{rs}) * E \quad [1]$$

Donde:

$PE$ : Potencial energético [TJ/año].

$M_{rs}$ : Masa de residuo seco [t/año].

$E$ : Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t].

La energía del residuo es equivalente al llamado Poder Calórico Inferior (PCI), cuyas unidades son kJ/kg de residuo seco. Teniendo en cuenta la Ec. 1 y las particularidades de la producción de cada residuo seco del sector agrícola, a continuación se muestra el modelo de PE aplicado.

Inicialmente el modelo establece la masa seca del residuo agrícola, por unidad de tiempo, se puede expresar como:

$$M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs} \quad [2]$$

Donde:

$M_{rs}$ : Masa de residuo seco [t/año].

$A$ : Área cultivada [Ha/año].

$R_c$ : Rendimiento del cultivo [t producto principal/Ha sembrada].

$M_{rg}$ : Factor de generación residuo (FR) [t residuo/ t producto principal].

$Y_{rs}$ : Fracción de residuo seco [t residuo seco/t de residuo húmedo].

La Ec. 2 aplicada a un tipo de cultivo por residuos se expresa como:

$$M_{rs} = \alpha * A * R_c * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (M_{rgki} * Y_{rski}) \quad [3]$$

El valor de  $\alpha$  es igual a  $1 * 10^{-6}$  y corresponde a la constante de conversión de unidades. El contador “ $k$ ” hace referencia a la clasificación de la biomasa ya sea RAC y/o RAI mientras que el contador “ $i$ ” hace referencia a los tipos de biomasa residual, en cada una de las clasificaciones. Por ejemplo, para el cultivo de la papa

los tipos de biomasa asociados según clasificación son: Poda y papa de descarte para RAC y cáscara para RAI.

Una vez obtenida la masa del residuo de biomasa agrícola seca anual, el potencial energético global de la biomasa residual agrícola (PE), conformada por los residuos de cosecha y agroindustriales para los cinco cultivos de estudio, se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$PE = \alpha * A * R_c * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (M_{rgki} * Y_{rski} * PCI_{ki}) \quad [4]$$

Donde:

*PCI*: Poder calórico inferior [kJ/kg].

## **CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA AGRÍCOLA**

La valorización de la biomasa como fuente alterna de energía involucra el estudio de su composición fisicoquímica y contenido energético. La biomasa es un material formado principalmente por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), su caracterización involucra los siguientes análisis:

Análisis Elemental: Permite la determinación del contenido en peso de los elementos C, H, O, nitrógeno (N) y azufre (S) que constituyen el combustible (Speight, 2005, Pag.41).

Análisis Próximo: Evalúa el contenido de humedad, el contenido de material volátil (MV), el contenido de ceniza o material sólido inorgánico no combustible presente en una muestra y el contenido de carbono fijo (CF) o fracción de carbono contenido en una muestra libre de MV, humedad y ceniza (Nogués *et al.*, 2010).

Análisis Estructural: Determina los componentes lignocelulósicos de la biomasa. Estos son las macromoléculas que forman la pared celular y mantienen la integridad estructural de las células vegetales como la celulosa, lignina, hemicelulosa y aquellas moléculas de menor peso molecular como los extraíbles y sustancias minerales (Fengel *et al.*, 1983).

Análisis Energético: Permite la determinación del poder calórico inferior (PCI) que representa la cantidad de energía liberada cuando se quema por completo una masa unitaria de material en condiciones normalizadas (Orduz, 2011)

## **1. METODOLOGÍA**

Las etapas llevadas a cabo para satisfacer los objetivos de este trabajo comprenden, cuantificación de los recursos de biomasa (oferta de biomasa y factor residuo (FR)), caracterización fisicoquímica de la biomasa y evaluación del PE.

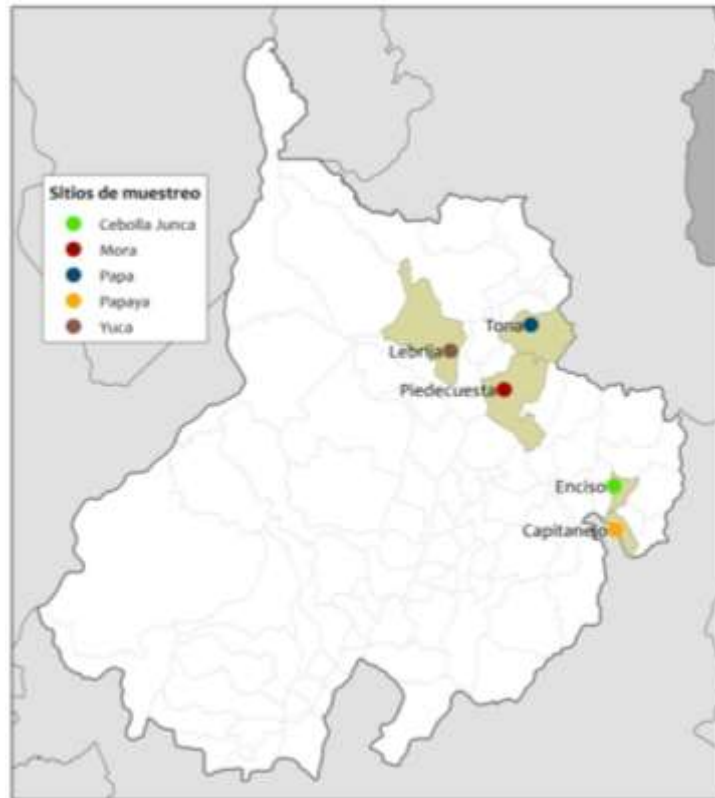
### **1.1. CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE BIOMASA**

La selección de los cultivos de estudio se realizó con base en la información estadística presentada por la Secretaria de Agricultura de Santander (EVA, 2010). De los cultivos representativos del departamento se seleccionaron 5 entre transitorios, anuales y permanentes, teniendo como variables de decisión la extensión del área sembrada (mayor a 180 Ha/año) y el nivel de producción anual (mayor a 9.000 t/año producidas). Por lo anterior se seleccionan, los cultivos de papaya, mora, papa, yuca y cebolla junca; las descripciones biológicas de estos cultivos se presentan en el Anexo A.

Con el fin de estudiar cada cultivo y recolectar muestras de biomasa se seleccionaron en Santander distintos puntos de muestreos de acuerdo a la disponibilidad del residuo y la factibilidad de contar con la asesoría de personal técnico y agricultores. Los muestreos fueron realizados en los municipios de Enciso, Piedecuesta, Tona, Capitanejo y Lebrija (ver Figura 1), tomando áreas de cultivo entre 1 y 2 Ha aproximadamente. Cada visita fue programada en épocas de producción, corte y/o recolección del producto principal de cada especie agrícola. Mediante entrevistas al personal de apoyo se determinaron los residuos generados por cultivo y la disposición de los mismos (ver Anexo B). Así mismo se recolectaron muestras (aproximadamente 3 Kg por cultivo) de los diferentes

residuos y teniendo en cuenta la información suministrada por los cultivadores se determinó el FR.

**Figura 1** Sitios de muestreo de biomasa residual agrícola.



Para las recolecciones de muestras se utilizó el protocolo de muestreo (ver Anexo C) establecido por el Laboratorio de Análisis Físicoquímico del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander (Escalante *et al.*, 2010).

La biomasa fue clasificada en dos grupos RAC y RAI; para los primeros se seleccionaron los residuos generados en la recolección del producto y para los segundos se tomó la biomasa residual por la transformación industrial del producto principal.

## 1.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL

En la Tabla 1 se presentan para cada una de las biomásas, los parámetros evaluados.

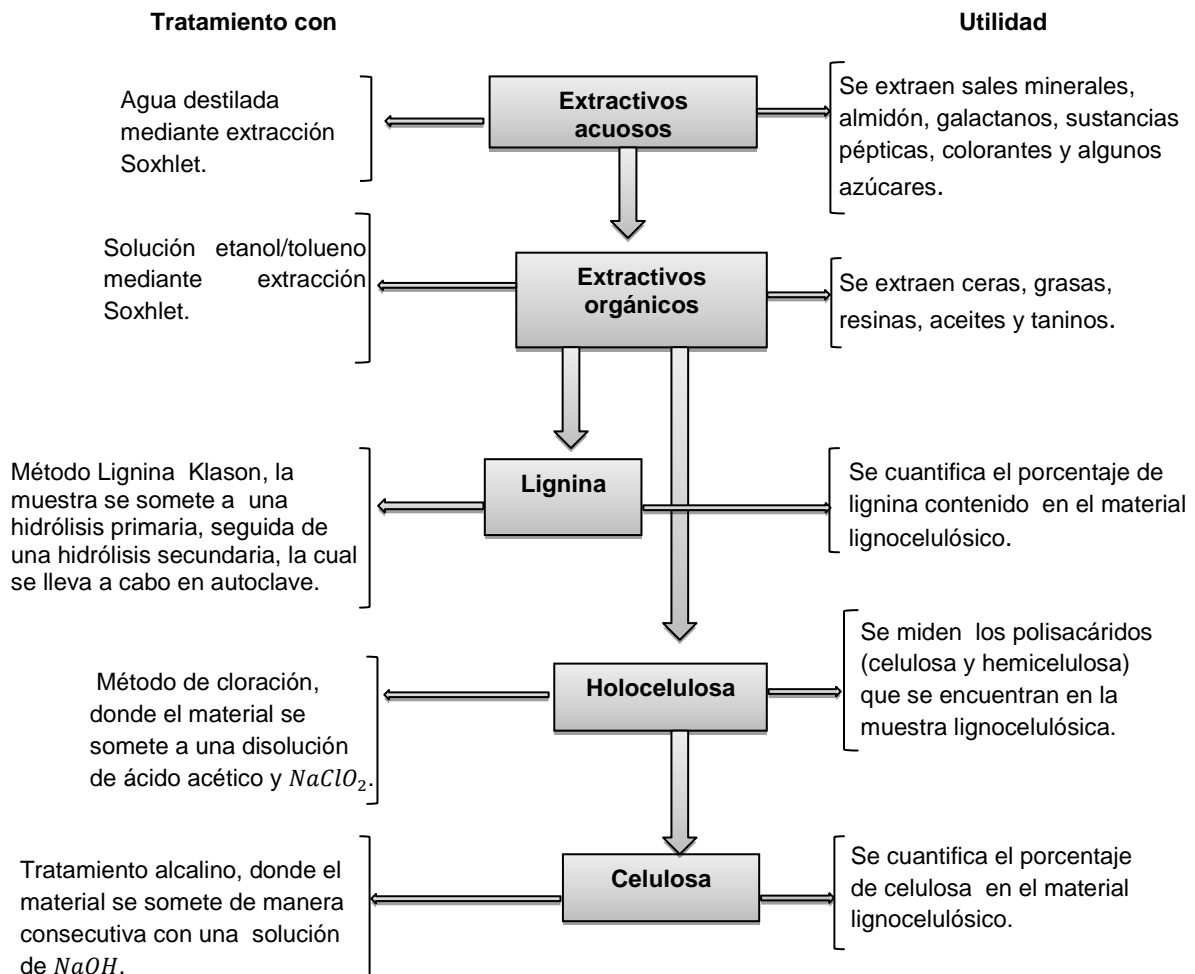
**Tabla 1** Parámetros para la caracterización fisicoquímica de biomasa residual agrícola.

TIPO DE ANALISIS	VARIABLE	TECNICA	NORMA	LABORATORIO
<b>Elemental</b>	COT	Colorimétrico	NMX-AA-21-1984	CEIAM
	Hidrógeno	Colorimétrico	NMX- AA- 068-1986	
	Oxígeno	Gravimétrico	-	
	Nitrógeno	Kjeldahl	NTC 1556	
	Azufre	Turbidimétrica	-	
<b>Próximo</b>	Humedad	Análisis Termogravimétrico	ASTM D7582-10	CILIQ
	MV			
	CF			
	Cenizas			
<b>Estructural</b>	Grasa	Extracción Soxhlet	NTC 668	CEIAM
	Proteína	Kjeldahl	NTC 1556	CEIAM
	Extractivos Acuosos	Extracción Soxhlet	ASTM D1110-56(77)	10B (IQ)
	Extractivos Orgánicos	Extracción Soxhlet	ASTM D1110-56(77)	10B (IQ)
	Holocelulosa	Cloración	ASTM D1104-56(78)	10B (IQ)
	Celulosa	Tratamiento alcalino	ASTM D1103-60(77)	10B (IQ)
	Lignina	Hidrólisis	ASTM D1106 96(2007)	10B (IQ)
<b>Otros Parámetros</b>	Materia Orgánica	Colorimétrico	NMX-AA-21-1984	CEIAM
	PCS	Bomba Calorimétrica	ASTM D5865	Ingeniería Metalúrgica
	Almidón	Polarimetría de Ewers modificada	IRAM 15859	Laboratorios Calderón

De las muestras recolectadas para cada cultivo, una parte sin pre tratamiento se destinó para la realización del análisis próximo en el Centro Integrado Laboratorios Ingeniería Química (CILIQ). A la biomasa restante se le realizó una primera reducción de tamaño para ser llevadas al horno del laboratorio de procesos, donde se mantuvieron a 109°C hasta observar peso constante y garantizar el secado de la muestra. Luego mediante el uso de un molino de cuchillas (marca Wiley Mill) se

realizó una segunda reducción de tamaño. Mediante tamizado se garantiza una granulometría de 2mm, indispensables para el análisis elemental, realizados en los laboratorios del CEIAM, con aproximadamente 100 gr de muestra y una reducción adicional de tamaño de 1mm. Para el análisis estructural se realizaron las pruebas por duplicado, siguiendo los pasos que se muestran en la Figura 2 de acuerdo a los protocolos de análisis de material lignocelulósico CILIQ, basados en las normas estándar ASTM mostradas en la tabla 1.

**Figura 2** Procedimiento para análisis estructural.



### 1.3. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

El PE se determinó a partir del modelo propuesto por Escalante *et al.*, (2010) (Ec. 4). Este modelo involucra el PCI, el cual se calculó a partir del PCS.

El PCS se determinó experimentalmente mediante el uso de una bomba calorimétrica marca BTRS-MODELO 83, en el Laboratorio de Planta de Aceros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander. El PCS se halló usando la siguiente ecuación proporcionada por el manual del equipo:

$$PCS \left( \frac{\text{cal}}{\text{g}} \right) = \frac{tW + e_3}{m} \quad [5]$$

$t$ :  $\Delta t$  del agua en la bomba.

$e_3$ : Correlación en calorías para calor de combustión del alambre fusible Parr 45c10 níquel-cromo, utilizado en la prueba.  $e_3 = (2,3 * c_3)$

$c_3$ : Centímetros de alambre consumido.

$W$ : 2402, energía equivalente del calorímetro en [cal/°C].

$m$ : Masa de la muestra en gr.

Una vez determinado el PCS se procede a utilizar el modelo propuesto por López y Llera para hallar el PCI.

$$PCI_{bs} = PCS_{bs} - (9 * 2,449 * H_{bs}) \quad [6]$$

Donde  $H_{bs}$  es la fracción másica del hidrógeno en el combustible en base seca, dato obtenido del análisis elemental. El 9 hace referencia a que por cada gramo de hidrógeno existente se producen nueve gramos de agua y 2,449 [J/g] es la entalpía de vaporización del agua formada en la combustión. Los valores de PCS y PCI están expresados en kJ/kg.

## 2. RESULTADOS

### 2.1. CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA, FACTOR RESIDUO Y OFERTA DE RESIDUO.

En la Tabla 2 se presentan, la clasificación de los residuos (RAC y RAI), área cosechada, rendimiento del cultivo (Rc), factor residuo (FR) y oferta de la biomasa residual.

**Tabla 2** Oferta de biomasa residual agrícola para cinco cultivos en Santander.

Cultivo	Residuo	Tipo residuo	Área cosechada [Ha]	Rc [t producto principal/Ha sembrada]	FR [t residuo/t producto principal]	Oferta residuo [t/año]
YUCA	Cáscara	RAI	7190,50	10,53	0,02	1523,55
	Fruto descarte	RAC			0,10	7569,33
	Hojas	RAC			0,04	3330,51
	Tallos	RAC			0,24	17787,93
PAPA	Cáscara	RAI	3753,00	23,97	0,14	12971,77
	Fruto descarte	RAC			0,30	26991,72
	Hojas y tallos	RAC			0,64	57582,34
MORA	Corona, corazón y semillas	RAI	1635,80	10,62	0,25	4322,24
	Mora descarte	RAC			0,30	5213,46
	Hojas y tallos	RAC			2,00	34756,42
PAPAYA	Cáscara y semillas	RAI	189,00	51,74	0,30	2916,53
	Fruto descarte	RAC			0,06	569,22
	Hojas y tallos	RAC			0,02	155,75
CEBOLLA JUNCA	Fruto descarte	RAC	1005,00	27,83	0,25	6991,10
	Hojas	RAI			0,37	10286,12

La biomasa residual en Santander generada por los cultivos bajo estudio presenta valores de FR muy variados que van desde 0,02 hasta 2. El FR depende de la dinámica del cultivo, si es anual o permanente, la poda y cantidad cosechada. Además del tipo de cultivo y sus condiciones de cosecha; clima, prácticas agrícolas tecnificadas, producto rechazado por su mal condición y aprovechamiento a nivel industrial (Voivontas *et al.*, 2001).

Se destacan los tallos y hojas de mora con el mayor valor, mientras que los residuos de cáscara de yuca y poda de papaya presentan el FR más bajo, indicando que se obtiene poca oferta de biomasa residual para su aprovechamiento energético.

El cultivo de papaya presenta la menor área cosechada, pero mayor rendimiento del cultivo, indicando que se genera buena producción de producto principal por hectárea. Una planta de papaya puede brotar hasta 50 frutos por cosecha, generando poco residuo de hojas y tallos, esto se ve reflejado en el FR de 0,02. A diferencia de la mora, con aproximadamente ocho veces más área cosechada y cuatro veces menor el rendimiento de cultivo respecto a la papaya, presenta una mayor cantidad de residuo (poda), favoreciendo considerablemente la cantidad de oferta de biomasa residual del cultivo. Los factores residuos para la papaya y mora son bajos comparados con los residuos del banano (0,15 a 5) (Escalante *et al.*, 2010).

## **2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA BIOMASA RESIDUAL**

La Tabla 3 presenta los resultados de la caracterización físicoquímica de las biomásas residuales para los cinco cultivos estudiados en este trabajo.

**Tabla 3** Caracterización fisicoquímica de biomasa residual de cinco cultivos representativa en Santander.

PARÁMETRO	CULTIVO TRANSITORIO			CULTIVO ANUAL			
	PAPA			YUCA			
	Cáscara	Papa descarte	Hojas y tallos	Cáscara	Yuca descarte	Hojas	Tallos
<b>Análisis Elemental en Base Seca [%p]</b>							
<b>COT</b>	44,81	46,98	41,00	52,61	52,18	39,47	56,66
<b>Hidrógeno</b>	5,15	5,40	4,71	6,05	6,00	4,54	6,51
<b>Oxígeno</b>	42,23	41,77	38,50	30,47	38,67	44,25	30,46
<b>Nitrógeno</b>	1,70	1,42	1,71	0,64	0,36	3,27	0,26
<b>Azufre</b>	0,02	0,01	0,05	0,01	0,02	0,02	0,02
<b>Análisis Próximo en Base Seca [%p]</b>							
<b>MV</b>	87,33	84,36	82,54	76,60	85,32	85,40	85,77
<b>CF</b>	9,60	12,75	9,74	13,87	12,82	7,62	5,85
<b>Cenizas</b>	3,10	2,58	7,72	9,38	1,89	6,71	8,42
<b>Análisis Estructural en Base Seca[%p]</b>							
<b>Grasa</b>	0,68	0,31	1,68	0,99	1,67	6,11	1,17
<b>Proteína</b>	10,63	8,88	10,59	4,00	2,25	20,44	1,63
<b>Celulosa</b>	13,10	7,06	28,22	20,08	7,62	18,45	30,63
<b>Hemicelulosa</b>	19,65	24,70	14,13	5,97	16,44	11,98	27,23
<b>Lignina</b>	6,69	3,47	14,18	16,65	3,95	32,46	18,33
<b>Otros Parámetros[%p]</b>							
<b>Materia Orgánica</b>	77,25	80,99	70,69	90,69	89,96	68,04	97,67
<b>Relación C/N</b>	26,36	33,08	23,98	82,20	144,94	12,07	217,92
<b>Humedad</b>	82,09	74,74	91,58	69,45	63,98	39,79	68,03

**Tabla 3 (Continuación).** Caracterización fisicoquímica de biomasa residual de cinco cultivos representativa en Santander.

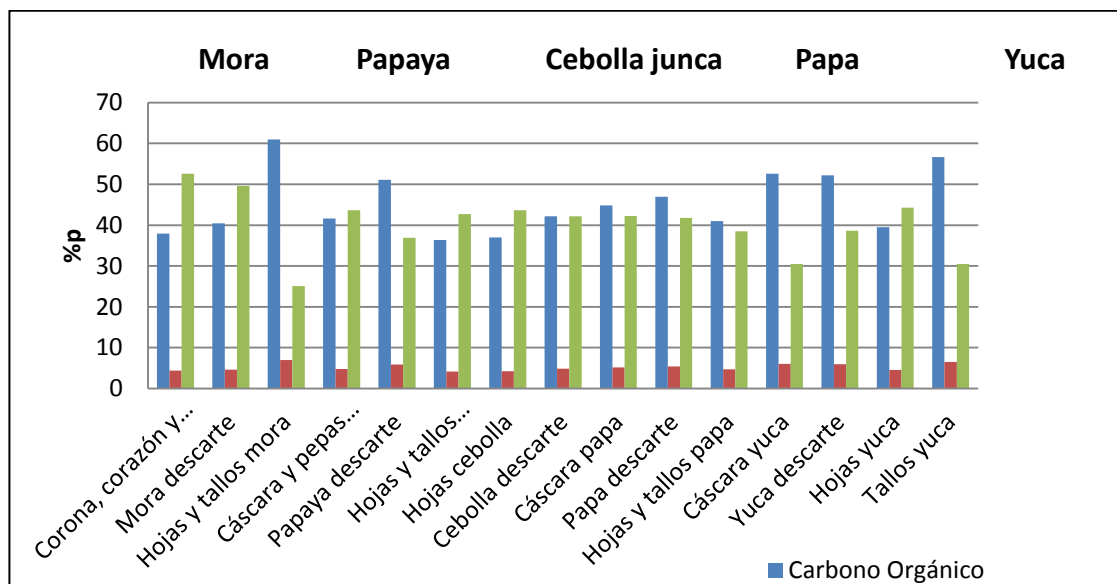
CULTIVOS PERMANENTES								
PARÁMETRO	MORA			PAPAYA			CEBOLLA JUNCA	
	Corona, corazón y semillas	Mora descarte	Hojas y tallos	Cáscara y semillas	Papaya descarte	Hojas y tallos	Hojas	Cebolla descarte
<b>Análisis Elemental en Base Seca [%p]</b>								
<b>COT</b>	37,92	40,46	60,93	41,63	51,10	36,34	37,02	42,18
<b>Hidrógeno</b>	4,36	4,65	7,00	4,78	5,87	4,18	4,26	4,85
<b>Oxígeno</b>	52,59	49,61	25,07	43,63	36,94	42,75	43,62	42,14
<b>Nitrógeno</b>	1,97	1,28	1,45	1,91	1,35	2,45	3,11	2,63
<b>Azufre</b>	0,03	0,02	0,02	0,19	0,07	0,11	0,30	0,31
<b>Análisis Próximo en Base Seca [%p]</b>								
<b>MV</b>	86,99	79,32	91,06	84,74	86,63	80,61	92,16	90,68
<b>CF</b>	11,82	17,64	5,12	14,69	9,96	15,38	0,46	3,99
<b>Cenizas</b>	1,19	2,99	3,89	0,57	3,29	4,00	7,42	5,36
<b>Análisis Estructural en Base Seca [%p]</b>								
<b>Grasa</b>	7,91	3,46	2,49	8,84	1,16	4,38	3,84	1,86
<b>Proteína</b>	12,31	8,00	9,06	11,94	8,44	15,31	19,44	16,44
<b>Celulosa</b>	19,20	14,76	25,43	15,58	10,56	31,82	26,24	22,33
<b>Hemicelulosa</b>	19,04	15,80	19,16	1,79	1,12	10,42	6,08	2,30
<b>Lignina</b>	26,55	25,21	19,17	13,54	3,74	9,12	7,56	5,97
<b>Otros Parámetros [%p]</b>								
<b>Materia Orgánica</b>	65,38	69,76	105,05	71,76	88,10	62,66	63,83	72,72
<b>Relación C/N</b>	19,25	31,61	42,02	21,80	37,85	14,83	11,90	16,04
<b>Humedad</b>	82,40	83,91	29,05	84,08	84,54	78,86	82,53	71,45

### 2.2.1. Análisis Elemental

**Carbono, hidrógeno y oxígeno:** La Figura 3 presenta los valores de C, H y O correspondiente a las biomazas de los cinco cultivos. Los combustibles fósiles con valores de C y O >60%p y <9%p respectivamente, pueden aportar mayor energía que las biomazas agrícolas (Rojas & Barraza, 2008).

Los residuos presentan altos contenidos de oxígeno con un promedio de 40,18%p e hidrógeno con valores superiores al 4%p. Estas relaciones de O e H favorecen el número de enlaces C-O y O-H en la biomasa. Lo anterior se refleja en la disminución del contenido energético de los biocombustibles, debido a la menor energía aportada por estos enlaces comparada con los enlaces C-C.

**Figura 3** Carbono, hidrógeno y oxígeno, para residuos de biomasa estudiados.



La presencia de oxígeno afecta tanto positiva como negativamente el uso de la biomasa como combustible mediante tecnologías de conversión termoquímica. Su presencia contribuye a suplir las necesidades de aire para llevar a cabo el proceso de combustión completa del residuo, pero a su vez disminuye su aporte energético (Subero, 2010).

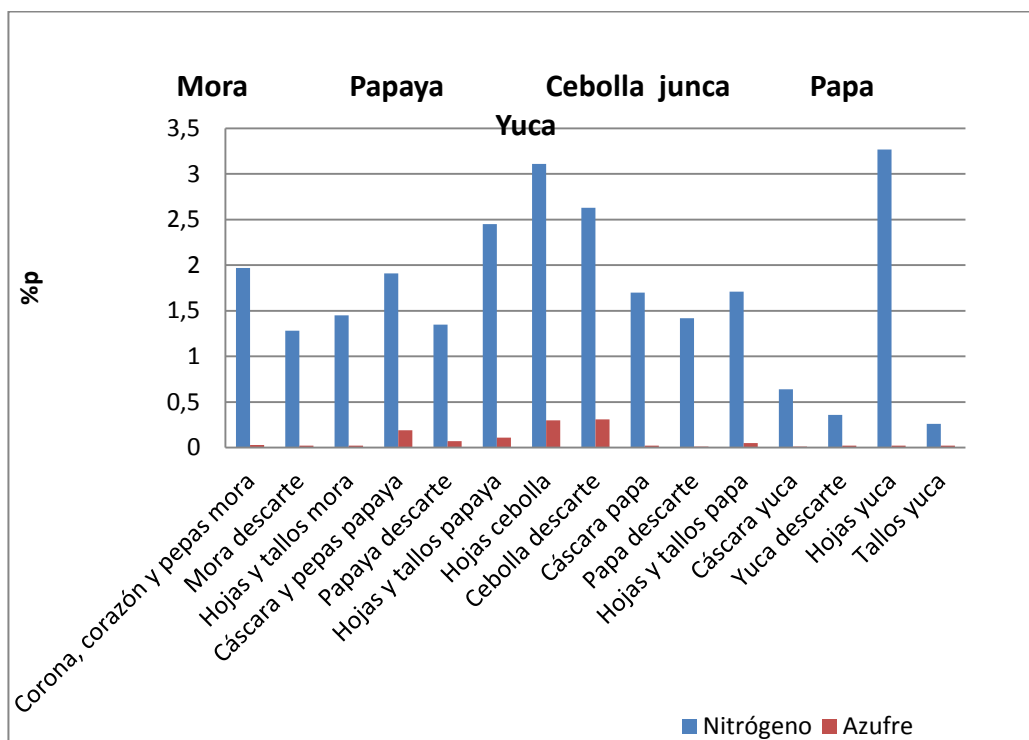
Además, la Figura 3 muestra que los valores de COT oscilan entre 37%-60%p, destacándose las hojas y tallos de mora con un 60,93%p; favoreciendo la cantidad de enlaces C-C, lo cual conducirá a que el aporte al PE total por este cultivo se incremente. Los valores reportados para las biomásas agrícolas estudiadas en este trabajo siguen tendencias similares a los reportados por Shen *et al.*, (2010) y García *et al.*, (2012).

**Relación C/N:** El C y N son elementos indispensables en la nutrición y síntesis de proteínas de microorganismos; su relación permite conocer la digestibilidad del material a usar como sustrato en un proceso biotecnológico. El rango ideal de la relación C/N (25-30) favorece procesos de fermentación y producción de biogás, mientras que relación C/N menores a 16 no son favorables para los procesos biotecnológicos (Habiba *et al.*, 2009).

En el intervalo adecuado se encuentran los residuos de “corona, corazón y semillas” de mora, cáscara y semillas de papaya, cebolla descarte, cáscara y poda de la papa. Residuos de yuca como la cáscara, tallos y tubérculo de descarte, presentan relación C/N superiores a 80; indicando su alta degradabilidad (Escalante *et al.*, 2010).

**Nitrógeno y Azufre:** En la Figura 4, se presenta los valores de N y S correspondiente a las biomásas de los cinco cultivos. Los residuos muestran bajos contenidos de N y S, con valores inferiores al 3,3% y 0,4%p respectivamente. Lo anterior favorece a la biomasa como sustrato para procesos bioquímicos (Quintero *et al.*, 2012). Además un biocombustible con mínimos contenidos de estos elementos genera pequeñas cantidades de  $NO_x$ ,  $SO_x$  y  $HCl$ , razón por la cual presentan ventajas frente a los combustibles fósiles, por sus bajos efectos de gases contaminantes.

**Figura 4** Nitrógeno y azufre para la biomasa residual estudiada.



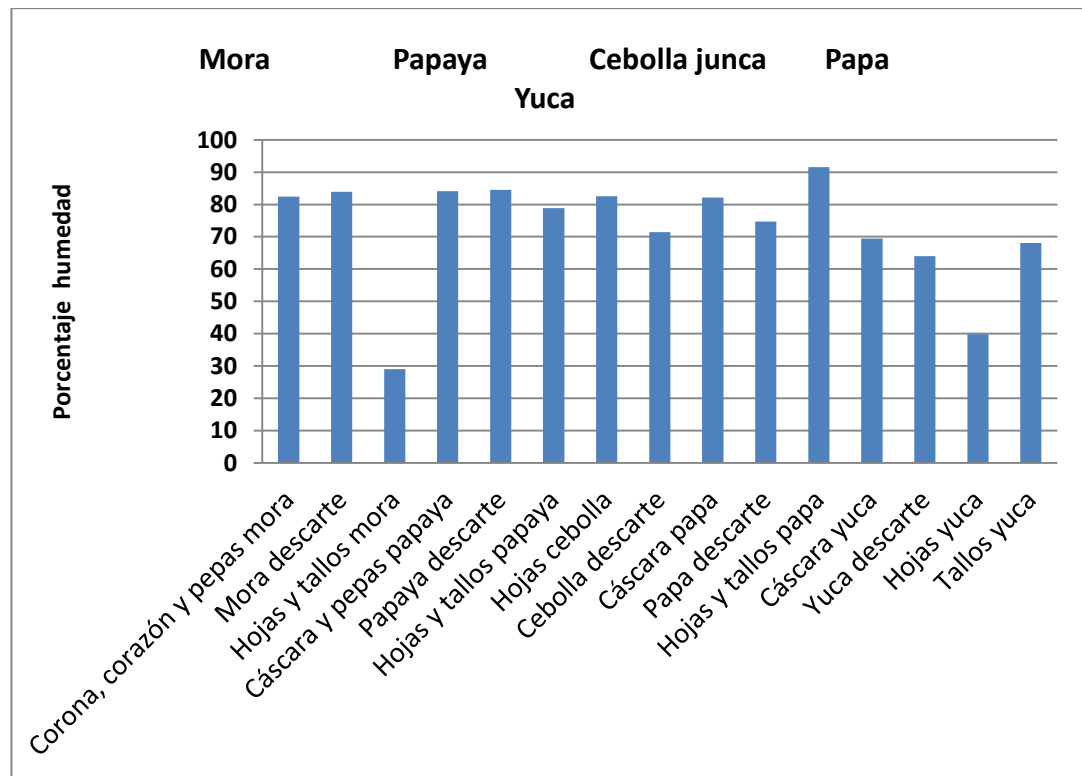
La presencia de N tiene efectos negativos en el poder energético del material y el azufre actúa como agente corrosivo y abrasivo en los equipos utilizados para su procesamiento (Nogués *et al.*, 2010). Los resultados para todas las biomásas presentan valores similares a los reportados por Cuiping *et al.*, (2004) y García *et al.*, (2012), con contenidos de N<3% y S<1% para otros residuos agrícolas de tomate, maíz, café y arroz.

### 2.2.2. Análisis Próximo

**Humedad:** En la Figura 5, se presenta un consolidado de las humedades de las biomásas bajo estudio. La mayoría de residuos tienen humedades que superan 60%p, mostrando dificultades para la utilización de tecnologías termoquímicas. Sin embargo, los residuos con humedades del orden de 78,28%p de agua favorece la rapidez de descomposición de la parte orgánica constituyente de la biomasa (Escalante *et al.*, 2010). Este factor, unido a una

adecuada relación de C/N ( $\approx 22$ ) permitiría valorizar energéticamente estos residuos mediante la tecnología de digestión anaerobia.

**Figura 5** Humedad de la biomasa residual generada por los cultivos bajo estudio.



Cultivos como papa y yuca se utilizan en procesos de fermentación para la producción de etanol a partir de azúcar y almidón (Kopsahelis *et al.*, 2007). De igual manera es posible proponer que se permita la obtención de biogás a partir de residuos con alta humedad (más de 80-90%p) (Igoni *et al.*, 2008). Lo anterior sumado a una relación adecuada de C/N (20-30), permite que residuos como cáscara y semillas de papaya y poda de la papa, sean estudiadas en procesos de digestión anaerobia para producir metano (García *et al.*, 2011).

Cuando una biomasa presenta elevado contenido de humedad, durante un proceso de aprovechamiento como la combustión, gran parte de la energía se consume en vaporización de agua (Permchart *et al.*, 2004).

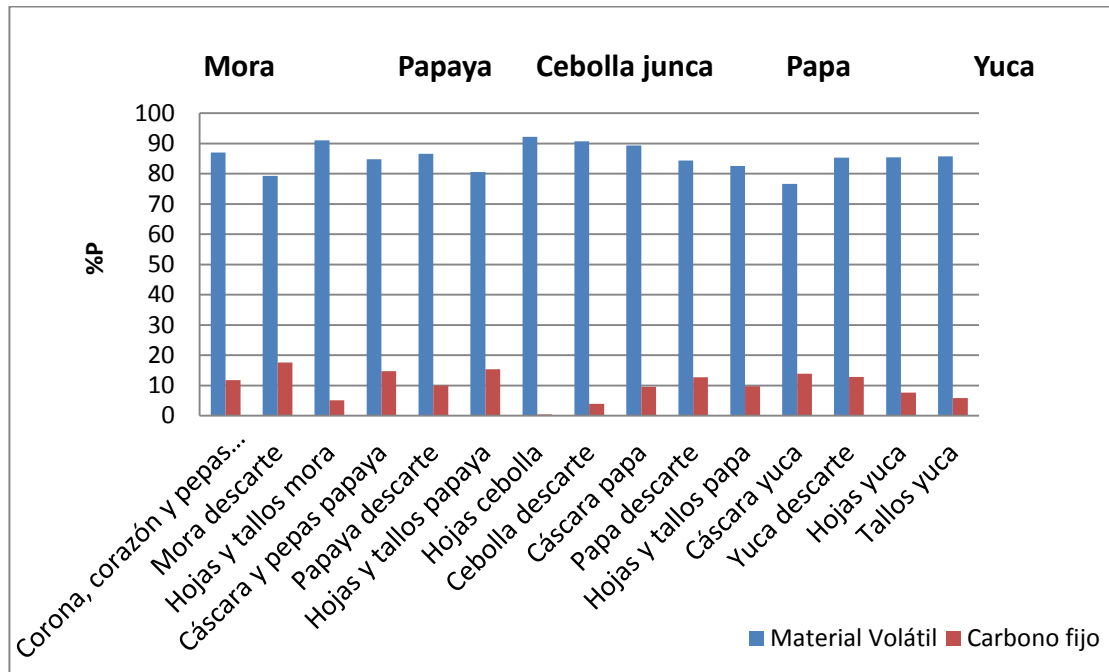
Las hojas de yuca y la poda de mora se alejan significativamente de la tendencia, presentando humedad inferior al 40%p. Estos residuos pueden ser aprovechados energéticamente en procesos termoquímicos (combustión).

**Material volátil y carbono fijo:** En la Figura 6, se presenta el consolidado de MV y CF para las biomásas de los residuos bajo estudio. Se observa que todos los residuos presentan contenidos de MV que superan el 76%p, de acuerdo con valores típicos en este tipo de biomasa (75-90%p) como fue reportado por Khan *et al.*, (2009).

Se destacan los residuos de cebolla junca y la poda de mora con MV superiores al 90%p. Estos elevados % de MV permite a la biomasa tener una temperatura de ignición baja y una alta estabilidad para producir gas de síntesis durante el proceso de gasificación, en comparación con combustibles fósiles como el carbón (Chiang *et al.*, 2012). Además, elevados % de MV, permite evaluar la descomposición del elemento orgánico constituyente en la biomasa por acción de microorganismos; permitiendo la aplicación de tecnologías como digestión anaerobia (Kopsahelis *et al.*, 2007).

La cantidad de MV y CF presentes en una biomasa, permite establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. Un bajo contenido de cenizas y un alto contenido de MV (superior 80%), son favorables para la biomasa sobre los combustibles fósiles como el carbón; haciéndola sustrato ideal para procesos como pirólisis o gasificación (Savitri *et al.*, 2007).

**Figura 6** MV y CF contenida en los residuos de la biomasa estudiada.



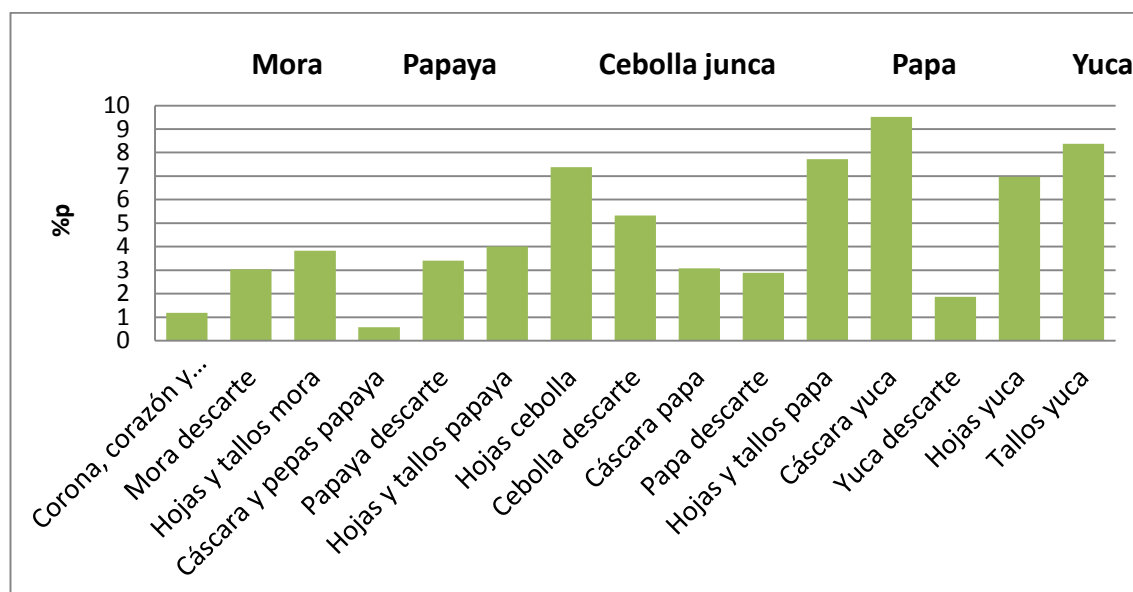
Adicionalmente, el CF parámetro que influye dentro de la transformación energética contenida en la biomasa presenta gran variabilidad dentro de estos residuos. La mora descarte sobresale con el mayor contenido de CF de 17,64%p, siendo uno de los cultivos con mayor aporte de PCI.

**Cenizas.** En la Figura 7, se presenta un consolidado de cenizas para las biomazas de los residuos bajo estudio. En una biomasa, el % de cenizas permite identificar la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de residuo. El contenido de ceniza afecta tanto los gastos de manipulación como el procesamiento de conversión energética.

Consecuentemente para la aplicación de procesos de pirólisis o gasificación se requiere que las biomazas posean valores de ceniza del orden del 3%p. La ceniza disminuye el rendimiento del proceso al formar escoria, ensuciamiento y corrosión de los equipos (Savitri *et al.*, 2007). Además, la eliminación de la ceniza presente en una biomasa por medio de pre tratamiento implica el uso de tecnologías complejas y costosas (Castells *et al.*, 2005).

De acuerdo a la Figura 7, la ceniza se encuentra en un rango de 0,5-10%p, presentando las podas un mayor contenido respecto a los demás residuos. El promedio de cenizas para la biomasa estudiada es de 4,56%p, siendo la mitad del valor reportado por Escalante *et al.*, (2010) y el doble del reportado por Gómez & Parra, (2013) para el estudio de residuos agrícolas.

**Figura 7** Cenizas contenidas en los residuos de la biomasa agrícola estudiada.



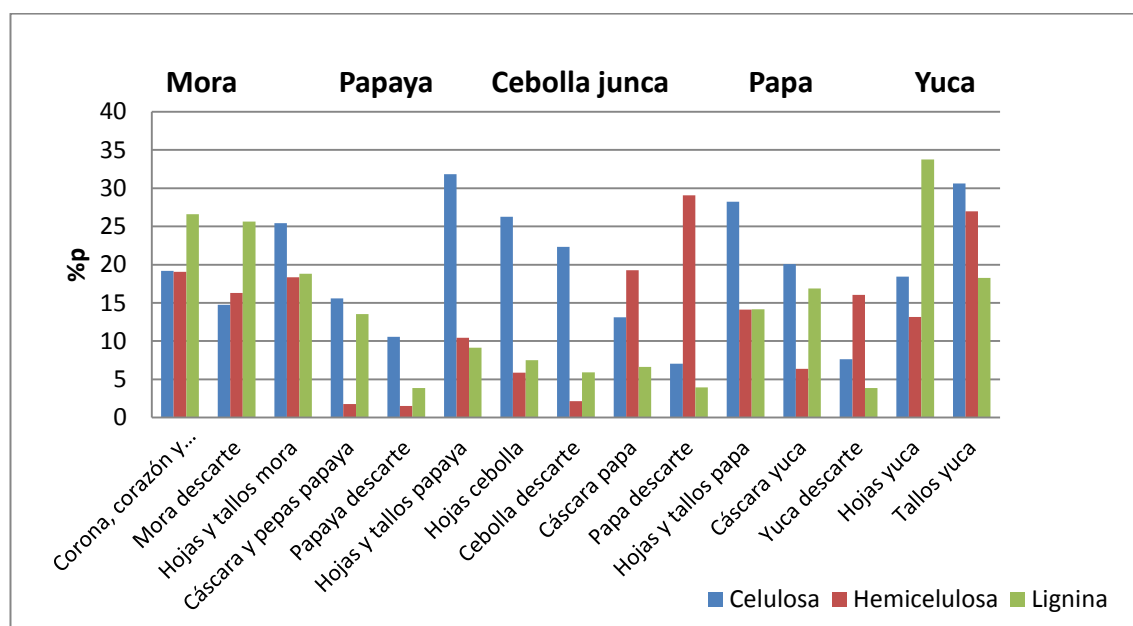
El poder calórico de un material se reduce según su contenido de ceniza. Esta tendencia se evidencia en la mayoría de los residuos, es el caso de la “corona, corazón y semillas” de mora que presentó el mayor PCI con 18804,44 kJ/kg. Los resultados del análisis próximo de tallos y hojas de papa y mora son similares a los reportados por García *et al.*, (2012) y Quintero *et al.*, (2012).

### 2.2.3. Análisis Estructural

**Celulosa, hemicelulosa y lignina:** El análisis estructural de las biomásas residuales estudiadas, se consolida en la Figura 8. Se observa que los valores de la lignina están en el rango de 3-33%p. Altos contenidos de lignina se presentan en residuos de hojas de yuca y “corona, corazón y semillas” de

mora con valores superiores al 26%p. Lo anterior se refleja en el poder calorífico (PCI) aportado por dichos cultivos (Ver tabla 4). Además, valores elevados de lignina afectan la degradación de sustratos de la biomasa en procesos como digestión anaerobia (Bakar *et al.*, 2013).

**Figura 8** Análisis estructural en base seca para los residuos estudiados.



Estudios realizados en cáscaras de cítricos donde la proporción de celulosa supera el 20%p y el contenido de lignina presenta valores inferiores al 14%p, demostraron que se favorecen los procesos de conversión bioquímica (Mckendry, 2002). La papaya descarte tiene los valores más bajos de hemicelulosa y lignina con 1,12%p y 3,74%p respectivamente, siendo también el residuo con mayor contenido de extractivos acuosos (Ver balance de masa, Anexo D). De acuerdo a lo anterior y según Aguiar *et al.*, (2008) que demostraron que el poco contenido de lignina afecta la producción de bio-oil. Se podría decir que la papaya descarte y los residuos de cebolla no son apropiados para la generación de bio-oil. Adicionalmente puede esperarse que la poda de papaya y las hojas de cebolla con celulosa superior al 25%p y lignina inferior al 10%p, se utilicen eficientemente para la producción de alcohol por fermentación (Iakovou *et al.*, 2010). Contrario a esto los residuos de mora

como “corona, corazón, semillas” y mora descarte con lignina entre 25-27%p favorecen la producción de bio-oil y de residuos sólidos de acuerdo con Uzun *et al.*, (2010).

De acuerdo a la Figura 8, se observa una tendencia similar de las biomásas de cebolla junca a valores reportados por otros estudios de residuos herbáceos (Demirbas, 2004). Se muestra mayor el valor de celulosa, seguida de la lignina y por último la hemicelulosa. De igual manera la planta de tomate estudiada por Gómez & Parra, (2013) sigue también esta tendencia. Lo anterior sumado a la relación C/N indica que los residuos de cebolla podrían ser aptos para producir bioetanol.

Los tubérculos dentro de su estructura interna presentan altos contenidos de almidón, componente de gran importancia en la producción de etanol. Residuos como cáscaras de yuca y papa poseen 28,77%p y 44,21%p en almidón respectivamente, así como tubérculos de descarte con valores que superan el 50%p. Debido a lo anterior, estos cultivos han sido estudiados en procesos de fermentación para la producción del biocombustible (Kopsahelis *et al.*, 2007).

### **2.3. ANÁLISIS ENERGÉTICO**

En la tabla 4, se presenta el PE para las biomásas de los cinco cultivos. Los resultados del PCI reportados por Escalante *et al.*, (2010) para residuos de maíz, arroz, café, banano y otras biomásas agrícolas oscila entre 8000-20000 kJ/kg. Las biomásas bajo estudio se encuentran dentro del rango mencionado, siendo de 13000-19000 kJ/kg. Además el promedio de este parámetro es de 14932.25 kJ/kg, similar al obtenido por Gómez & Parra, (2013) para otras biomásas agrícolas de Santander, siendo de 14323.01kJ/kg.

Los tallos y hojas de papa presentan el menor valor de PCI con 13463,269 kJ/kg; debido a su alto porcentaje de humedad 91,58%p (ver Tabla 3 y 4). Contrario a esto, residuos generados por el cultivo de mora reportaron los

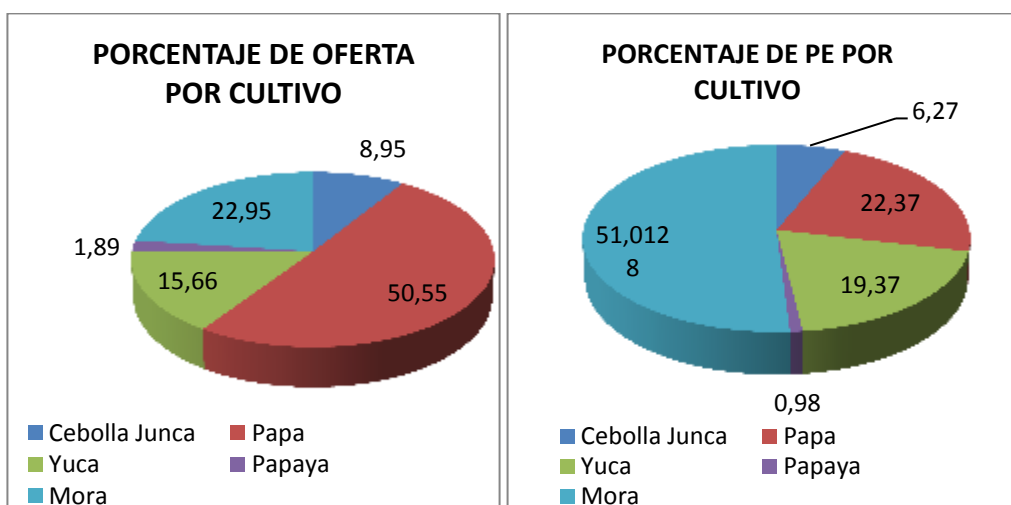
contenidos más altos de PCI, siendo la “corona, corazón y semillas” el de mayor valor con 18804,44 kJ/kg.

Los datos obtenidos para biomásas agrícolas son menores que el PCI reportado por Chiang *et al.*, (2012) para el carbón. De lo anterior se deduce que la energía entregada por los residuos agrícolas es inferior a la generada por el carbón con un contenido energético de 26805,88 kJ/kg (Rojas & Barraza, 2008).

### 2.3.1. Potencial Energético.

Se observa que para los cinco cultivos el PE es muy variable, donde el cultivo de mora sobresale con un PE de 442,42 TJ/año y aporta el 51.01% al PE total (ver Figura 9). Esto se debe a que los tallos y hojas de mora tienen la humedad más baja, de 29,05%p y el factor residuo más alto (ver Tabla 2). Consecuentemente, este residuo posee la mayor oferta, aportando 34756,42 t residuo/año. El cultivo de la papa, aunque presenta la mayor oferta de biomasa residual (97545,83 t residuo/año (ver Tabla 4)), es el segundo cultivo que aporta un 22,37% al PE total. Esto se debe a los altos contenidos de humedad de sus residuos que afectan los valores de PCI. Adicionalmente sus factores residuos son bajos influenciando en el resultado del PE.

**Figura 9** Porcentaje de oferta de biomasa y potencial energético por cultivo.



El cultivo de yuca es el tercero en aportar con 19,37% al PE total, a pesar de que tiene la mayor área cosechada, su oferta de biomasa no es significativa. Lo anterior se debe en gran parte a sus valores de factor residuo, es el caso de la cáscara de yuca con 0,02.

La oferta de biomasa aportada por los cultivos analizados es tres veces menor que la hallada por Gómez & Parra, (2013), para biomásas representativas en Santander como cítricos, tomate, cacao y fique. Esto se ve influenciado en el valor del PE total obtenido en este trabajo siendo de 867,28 TJ/año

**Tabla 4** PE para las biomásas residuales de cinco cultivos representativos de Santander.

Cultivo	Residuo	Oferta residuo [ t /año]	PCI [kJ/kg]	(PE) residuo [TJ/año]	PE CULTIVO [TJ/año]
<b>CEBOLLA JUNCA</b>	Hojas	10286,12	13918,81	25,02	54,35
	Cebolla descarte	6991,10	14694,80	29,34	
<b>PAPA</b>	Cáscara	12971,77	14111,28	32,78	193,99
	Hojas y tallos	57582,34	13463,27	65,27	
	Papa descarte	26991,72	14073,44	95,94	
<b>YUCA</b>	Cáscara	1523,55	13901,54	6,47	168,03
	Yuca descarte	7569,33	14321,89	39,06	
	Hojas	3330,51	16577,76	33,25	
	Tallos	17787,93	15688,14	89,24	
<b>PAPAYA</b>	Cáscara y semillas	2916,53	14528,50	6,75	8,49
	Papaya descarte	569,22	13771,47	1,29	
	Hojas y tallos	155,75	13633,10	0,45	
<b>MORA</b>	Corona, corazón y semillas	4322,24	18804,44	13,49	442,42
	Mora descarte	5213,46	15626,75	13,10	
	Tallos y hojas	34756,42	16868,57	415,83	

.Sobresalen los cultivos de fruta aportando valores significativos de PE, es el caso del cultivo de mora con aportes superiores a 400 TJ/año para las biomásas estudiadas. Al igual que estudios realizados por Escalante *et al.*, (2010) donde se destaca el aporte de frutos como el banano.

### 3. CONCLUSIONES

En Santander, los cultivos de papa, yuca, mora, papaya y cebolla junca generan 192967,99 t/año de biomasa, correspondientes a 15 residuos agrícolas (5 de RAI y 10 de RAC).

La biomasa agrícola de Santander procedente de los cultivos de papa, yuca, mora, papaya y cebolla junca, poseen un PE de 867,28 TJ/año, lo cual indica que estos residuos puedan ser aprovechados energéticamente. Sobresale el cultivo de mora con el 51,01% del PE total, favorecido por el bajo contenido de agua (29,05%p) y el mayor valor de FR (2) en sus tallos y hojas, aportando una oferta de residuo de 34756,42 t/año.

La caracterización fisicoquímica realizada, muestra que la mayoría de residuos son materia prima favorable para tecnologías bioquímicas de conversión debido a los contenidos de humedad, celulosa y relación C/N. A diferencia de las hojas de yuca y la poda de mora que pueden ser aprovechadas eficientemente en procesos de combustión.

Este trabajo ofrece al sector industrial la información necesaria acerca de la biomasa residual de 5 cultivos. Por lo tanto, la comprensión de las características fisicoquímicas de los diferentes residuos aporta en el diseño de sistemas de conversión, óptimas para un mayor aprovechamiento energético.

## BIBLIOGRAFIA

AGUGLIARO M, ALCAYDE A, MONTOYA G, ZAPATA A, GIL C. *Scientific production of renewable energies worldwide: An overview*, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013; 18: 134–143

AGUIAR L, MARQUEZ F, GONZALO A, SANCHEZ J. L, ARAUJO J. *Influence of temperatura and particle size on the fired bed pyrolysis of orange peel residues*. J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2008; 83: 124-130.

BAKAR SIDIK D.A, NGADI N, SAIDINA AMIN N. A. *Optimization of lignin production from empty fruit bunch via liquefaction with ionic liquid*. Universiti Teknologi Malaysia. Bioresource Technology. 2013; 153: 690–696.

BHATTACHARYA S, SALAM A, RUNQING H, SOMASHEKAR L, RACELIS D, RATHNASIRI P, YINGYUAD R. *An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries*. Biomass and Bioenergy. 2010; 67-177.

CASTELLS X.E., CADAVID C, CAMPOS P.E., FLOTATS R.X., GARCÍA M.J., GAYA F.J., JURADO G.L., CREMADES O.L., VELO G.E. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones días de santos, España. 2005; pág.64.

CHIANG K, CHIEN K, LU C. *Characterization and comparison of biomass produced from various sources: Suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy*. Applied Energy 2012; 100: 164–171.

CUIPING L, CHUANGZHIA W, HAITAO H. *Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China*, Biomass and Bioenergy. 2004; 27: 119–130.

DEMIRBAS A. *Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals*. Energy Convers Manage.2001; 42-78.

DEMIRBAS A. *Combustion characteristics of different biomass fuels*. Progress in Energy and Combustion Science.2004; 30: 219-230.

DOMINGUEZ B, J, CIRIA P, ESTEBAN L.S, SÁNCHEZ D. *Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de navarra (España)*, congreso Geo Focus, 2003.

ESCALANTE H, ORDUZ J, ZAPATA H, CARDONA M.C, DUARTE M. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Ediciones UIS; 2010. pág.131-155.

FENGEL D, WEGENER G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. New York: Walter de Gruyter. 1983.

GARCÍA R, PIZARRO C, LAVÍN A.G, BUENO J.L *Characterization of Spanish biomass wastes for energy use*. Bioresource Technology.2012; 103: 249-258.

GARCIA E.I, PARAMESWARAN P, KANG D.W, CANUL M, KRAJMALNIK R. *Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology*. Bioresource Technology. 2011; 102: 9447-9455.

GÓMEZ D, PARRA J. *Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas en Santander: "cacao, cítricos, fique y tomate"*. (Trabajo de grado) Bucaramanga. Colombia, Universidad Industrial de Santander. 2013.

HABIBA L, HASSIB B, MOKTAR H. *Improvement of activated sludge stabilisation and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition*. Bioresource Technology. 2009; 100: 1555-1560.

HALADOVA D, PECEN J. *selection of optimal anaerobic digestion technology for family sized farm use- case study of southwest Madagascar*. *Agricultura tropical* .2011; pág. 3.

SU-HEO H. , PARK J. H, YIM J, SOHN J, PARK J, KIM S, RYU C, JEON J, PARK Y. *Influence of operation variables on fast pyrolysis of miscanthus sinensis var. purpurascens*. *Bioresource Technology*. 2010; 101; 3672-3677.

IAKOVOU E, KARAGIANNIDIS A, VLACHOS D, TOKA A, MALAMAKIS A. *Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis*. *Waste Management*. 2010; 30: 1860–1870.

IGONI, A.H., AYOTAMUNO, M.J., EZE, C.L., OGAJI, S.O.T., PROBERT, S.D., *Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste*. *Appl. Energy*. 2008; 85: 430–438.

KHAN, A.A., DE JONG, W., JANSSENS, P.J., SPLIETHOFF, H. *Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies*. *Fuel Process Technology*. 2009; 90: 21–50.

KOPSAHELIS N, AGOURIDIS N, BEKATOROU A, KANELLAKI M. *Comparative study of spent grains and deligni Wed spent grains as yeast supports for alcohol production from molasses*. *BioresourceTechnology*. 2007; 98: 1440–1447.

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

NOGUÉS F, GARCIA D, REZEAU A. *Energía de la Biomasa*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.

ORDUZ J. *Modelo matemático para evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia* (Tesis maestría) Bucaramanga, Colombia Universidad industrial de Santander; 2011.

PATTIYA A. *Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidized-bed reactor*. *Bioresource Technology*. 2011; 102: 1959–1967.

PERMCHART W, KOUPRIANOV V. I. *Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized -bed combustor firing various biomasses*. *Technol*. 2004; 92: 83–91.

QUINTERO M, CASTRO LI, ORTIZ C, GUZMÁN C, ESCALANTE H. *Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique's bagasse as an example*. *Bioresource Technology*. 2012; 108: 8-13.

SECRETARIA DE AGRÍCULTURA Y DESARROLLO RURAL DE SANTANDER. *Evaluaciones agropecuarias municipales*. Editor. Gobernación de Santander; 2010.

SHEN J, ZHU S, LIU X, ZHANG H, TAN J. *The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis*, *Energy Conversion and Management* 2010; 50: 983–987.

SAVITRI G, UBONWAN C, SUTHUM; JITTAWADEE. *Physical and chemical properties of Thai biomass fuels from agricultural residues*. *Thailand bioresorce technology*.2008; 83: 79-82.

SPEIGHT J. *Handbook of coal analysis*. New Jersey: Wiley Interscience, 2005; 41- 67.

SUBERO, E. *Caracterización de los combustibles Sólidos*. Zaragoza: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial., (2010).

ROJAS G, A., BARRAZA B, J. caracterización morfológica del carbonizado de carbones pulverizados: determinación experimental. Universidad de Antioquia. Medellín. 2008: 42-58.

VOIVONTAS D, ASSIMACOPOULOS D, KOUKIOS E, G. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. Department of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Zografou Campus. *Biomass and Bioenergy*. 2001; 20: 101-112.

UZUN B.B, APAYDIN-VAROL E, ATES F, OZBAY N, PUTUN A.E. Synthetic fuel production from tea waste: Characterization of bio-oil and bio-char. *Fuel*. 2010; 89: 176-1.

## ANEXOS

### Anexo A CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LOS CULTIVOS PAPAYA, MORA, YUCA, PAPA, CEBOLLA JUNCA

Se presentan las fichas técnicas de los cultivos estudiados en este trabajo.

**Figura 10.** Ficha técnica de cultivo de papaya.

**FICHA TÉCNICA: CULTIVO DE PAPAYA**


<u>Nombre Común:</u>	Papaya.	
<u>Nombre Científico:</u>	<i>Arica papaya</i> L	
<u>Origen:</u>	Las áreas cálidas de norte y Centroamérica, entre el sur de México y Nicaragua	
<u>Tipo de cultivo:</u>	Permanente	

La papaya es una planta herbácea de crecimiento rápido y de vida corta. Tiene un tallo hueco, segmentado y erecto; presenta un gran número de hojas grandes y lobuladas. La altura de esta planta puede llegar hasta varios metros. Es una planta tropical, puede cultivarse desde el nivel del mar hasta los 1000 m.s.n.m., pero los frutos de mejor calidad y los de más rendimiento se obtienen por debajo de los 800 metros.

Fuente: MANUAL TÉCNICO BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN PAPAYA, EL SALVADOR, MARZO 2002

**Figura 11.** Ficha técnica de cultivo de yuca.

**FICHA TÉCNICA: CULTIVO DE YUCA**

<u>Nombre Común:</u>	Yuca	
<u>Nombre Científico:</u>	<i>Manihotesculenta</i> Crantz	
<u>Familia:</u>	Tubérculo Euphorbiacea	
<u>Género:</u>	Manihot	
<u>Origen:</u>	Originaria del Brasil. Extendida por todas las regiones tropicales y subtropicales de América, Asia y África.	
<u>Tipo de cultivo:</u>	Anual	

La yuca es un arbusto perenne de tamaño variable, que puede alcanzar los 3 m de altura. Se pueden agrupar los cultivares en función de su altura en: bajos (hasta 1,50 m), intermedios (1,50-2,50 m) y altos (más de 2,5 m). Altura para el cultivo es 1.500 m.s.n.m.

Fuente: LARDIZÁBAL RICARDO, MANUAL DE PRODUCCIÓN DE LA YUCA VALENCIA, JUNIO 2002

**Figura 12.** Ficha técnica de cultivo de mora.

FICHA TÉCNICA: CULTIVO DE MORA	
<u>Nombre Común:</u>	Mora
<u>Nombre Científico:</u>	Rubusglaucus
<u>Familia:</u>	Rosaceae
<u>Origen:</u>	Las zonas altas tropicales de América principalmente en Colombia, Ecuador, Panamá, Guatemala, Honduras, México y Salvador.
<u>Tipo de cultivo</u>	Permanente.



Las moras son arbustos generalmente con espina, las hojas están compuestas por 3-5 folíolos de bordes dentados, las flores son blancas o rosadas. Se adapta muy bien entre alturas de 1500 y 300 m.s.n.m. con una buena productividad, la temperatura debe oscilar entre los 10-18 °C. Se producen frutos de manera continua aunque hay una época de mayor producción con intervalos de 5 a 6 meses, las raíces sostiene la planta y producen brote para reproducción de la misma, distribuyen en los primeros 30 cm, profundidad en el suelo

Fuente: BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN MORA ORGÁNICA, GUATEMALA 2003.

**Figura 13.** Ficha técnica de cultivo de papa.

FICHA TÉCNICA: CULTIVO DE PAPA	
<u>Nombre Común:</u>	Papa
<u>Nombre Científico:</u>	Solanumtuberosum
<u>Familia:</u>	Solanácea
<u>Origen:</u>	Perú
<u>tipo de cultivo:</u>	Transitorio




La papa es una especie transitoria, herbácea, que por ser su semilla altamente heterocigoto se reproduce agónicamente a partir de tubérculos (tallos subterráneos modificados). En Colombia se concentra en paisajes y ecosistemas de montaña de clima frío, entre los 2.000 y 3.500 m.s.n.m., mientras que alturas inferiores o superiores a dichas cotas se consideran marginales para el cultivo.

Fuente: DIRECCIÓN DE DESARROLLO SECTORIAL SOSTENIBLE COLOMBIA, FEDEPAPA ,GUÍA AMBIENTAL PARA EL CULTIVO DE LA PAPA, MAYO DE 2004

**Figura 14.** Ficha técnica de cultivo de cebolla junca.

FICHA TÉCNICA: CULTIVO CEBOLLA JUNCA	
<u>Nombre Común:</u>	Cebolla larga, cebolla junca, cebolla llorona, cebolleta,
<u>Nombre Científico:</u>	Allium fistulosum Linnaeus
<u>Familia:</u>	Alliasedae
<u>Origen:</u>	Asia
<u>Tipo de cultivo:</u>	Permanente



La planta de cebolla de rama está formada por macollas, las cuales consisten en un conjunto de vástagos o gajos que nacen de un mismo lugar. Se distinguen cuatro partes fundamentales en su estructura: la raíz, el tallo, el seudotallo y las hojas. La mejor zona de producción, por área sembrada y por calidad, está situada en zona considerada de páramo, entre los 3.000 y los 3.400 msnm. Esta especie tiene buenos requerimientos de agua, por lo cual se hace necesario disponer de agua de riego para contar con una producción constante y de buena calidad, más si se tiene en cuenta que es un cultivo permanente, cuyo desarrollo y cosecha tiene lugar durante todo el año.

Fuente: corporación colombiana de investigación agropecuaria, corpoica , LA CEBOLLA DE RAMA (Allium fistulosum) Y SU CULTIVO, agosto 2004.

## Anexo B FORMATO DE ENTREVISTA A LOS CULTIVADORES

### MUESTREO

TIPO DE CULTIVO: \_\_\_\_\_

PREGUNTAS AL CULTIVADOR:

- Área sembrada/cultivo [Ha]: \_\_\_\_\_
- Plantas/Ha: \_\_\_\_\_
- Tiempo de cosecha: \_\_\_\_\_
- Cosechas anuales: \_\_\_\_\_
- Periodo y/o frecuencia de poda o de retiro de desechos: \_\_\_\_\_
- Tipo de desecho que se le quita a la planta: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_
- Cuanto desecho quita por planta (especificación para cada tipo de desecho):  
 \_\_\_\_\_:  
 \_\_\_\_\_:  
 \_\_\_\_\_:

MEDICIONES DEL EJECUTADOR DE MUESTRA

- Distancia entre plantas (largo): \_\_\_\_\_
- Distancia entre plantas (ancho): \_\_\_\_\_
- Plantas/m<sup>2</sup>: \_\_\_\_\_
- Plantas/ha: \_\_\_\_\_

	TIPO DE DESECHO	CANTIDAD/PLANTA (Kg)	CANTIDAD/m <sup>2</sup>	CANTIDAD/Ha
RAC				
RAI				

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

## **Anexo C** PROTOCOLO PARA EL MUESTREO DE LOS CULTIVOS

Después de ubicada y analizada la zona de muestreo para cada cultivo, se procedió la recolección de los diferentes residuos generados utilizando el método de malla.

### MÉTODO DE MALLA

Se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- a. Se toma un área representativa de la plantación, subdividida en cuadros de igual tamaño, como especie de red; de cada cuadro se toma muestra de residuo y se coloca en un lugar apartado, libre de posibles contaminaciones.
- b. Se procedió a realizar otra malla de menor tamaño sobre el residuo seleccionado anteriormente, tomando otras muestras de diferentes puntos de la red, y así sucesivamente se repitió este procedimiento hasta obtener un residuo equivalente a 1,5 kg.
- c. El residuo recolectado se coloca en bolsas plásticas bien selladas y dentro de cavas para su conservación durante el tiempo de traslado al laboratorio para su tratamiento.

## Anexo D BALANCES DE MASA MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

En la tabla 5 y 6 se presentan los balances de masa del material lignocelulósico, que comprenden extractivos acuosos, extractivos orgánicos, holocelulosa, lignina y cenizas. Para el caso de los tubérculos se reporta el contenido de almidón.

**Tabla 5.** Balances de masa de las biomásas residuales de papa, yuca.

Cultivo	Residuo	Ext. Acuosos	Ext. Orgánicos	Holocelulosa	Lignina	Cenizas	Almidón	Total
<b>PAPA</b>	Cáscara papa	11,80±1,04	1,54±0,39	32,75±1,97	6,69±1,03	3,10± 0,10	44,21±0,00	100,09
	Hojas y tallos	33,48 ± 0,90	2,26± 0,11	42,35 ± 1,04	14,18 ± 1,04	7,72± 0,00	-----	99,99
	Papa descarte	8,99±0,51	0,71±0,18	31,76±2,04	3,47±0,92	2,54± 0,25	52,53±0,00	100,00
<b>YUCA</b>	Cáscara yuca	17,58±0,46	1,57±0,14	26,05±1,66	16,65±0,38	9,38±0,46	28,77±0,00	100,00
	Yuca descarte	9,38±0,03	0,09±0,09	24,06±1,82	3,95±0,54	1,89±0,16	60,63±0,00	100,00
	Hojas yuca	22,47 ± 0,58	7,93±0,01	30,43 ± 1,70	32,46 ± 0,25	6,71± 0,01	-----	100,00
	Tallos yuca	15,07 ± 0.30	0,32±0,07	57,86±0,50	18,33±0,40	8,42±0,04	-----	100,00

**Tabla 6.** Balances de masa de las biomásas residuales de papaya, mora y cebolla junca.

<b>Cultivo</b>	<b>Residuo</b>	<b>Ext. Acuósos</b>	<b>Ext. Orgánicos</b>	<b>Holocelulosa</b>	<b>Lignina</b>	<b>Cenizas</b>	<b>Total</b>
<b>Papaya</b>	Cáscara y semillas	59,44±1,05	9,08±0,13	17,37 ±0,16	13,54 ±0,04	0,57 ±0,00	100,00
	Papaya descarte	79,44 ±0,25	1,85 ±0,03	11,68 ±0,44	3,74±0,30	3,29 ± 0,00	99.99
	Hojas y tallos	38,50 ±0,81	6,13 ±0,20	42,24±0,82	9,12 ±0,39	4,00±0,00	99.99
<b>Mora</b>	Corazón, corona y semillas	22,45 ±0,08	11,57±0,29	38,24 ±1,53	26,55±1,67	1,19 ±0,00	100,00
	Mora descarte	39,82±0,22	1,42±0,094	30,56±0,31	25,21±0,64	2,99±0,29	100,00
	Tallos y hojas	27,28 ±0,37	5,07 ±0,08	44,59±0,44	19,17±0,54	3,89±0,00	100,00
<b>Cebolla junca</b>	Hojas cebolla	46,48± 2,45	6,22±0,85	32,32±0,35	7,56± 0,84	7,42± 0,03	100,00
	Cebolla descarte	58,06± 0,69	5,98± 0,54	24,63± 1,98	5,97± 1,16	5,36± 0,04	100,00