

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS EN
SANTANDER:**

"CACAO, CÍTRICOS, FIQUE Y TOMATE"

**DIANA CAROLINA GÓMEZ RUEDA
JENYFFER MASSIEL PARRA CEPEDA**

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

2013

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS EN
SANTANDER:**

"CACAO, CÍTRICOS, FIQUE Y TOMATE"

**DIANA CAROLINA GÓMEZ RUEDA
JENYFFER MASSIEL PARRA CEPEDA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director:

**Humberto Escalante Hernández
Ing. Químico Ph.D**

Co-director:

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

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

2013

DEDICATORIA

Gracias a Dios por la vida maravillosa que tengo, por mi familia, por la salud, por las situaciones que he tenido que pasar para convertirme en la persona que soy y por permitirme culminar ésta etapa satisfactoriamente.

A mi madre, Alicia, por darme la vida, por ser la mejor madre que una hija pudiera pedir, por su ejemplo y porque a pesar de las dificultades nunca se ha dado por vencida.

A mi padre, Ramón, por ser el hombre trabajador que fue, por procurar darnos siempre lo mejor, por los años que compartimos, por los viajes y los buenos momentos, sé que eventualmente nos volveremos a encontrar.

A mis hermanos, José, Juan y Andrés, porque aunque a veces la distancia nos separe nos une el más fuerte de los lazos: La familia. No hay mejores hermanos que ustedes.

A César, por el amor, el apoyo y la comprensión durante todo este camino y por encontrar siempre la forma de sacarme una sonrisa.

A Lina, Ángela, Dora, Julie, Silvia y Walter. Por ser tan buenos amigos y por volver buenos los momentos difíciles, los mejores recuerdos de la universidad son junto a ustedes.

A todos aquellos que siempre han creído en mí y que con el paso del tiempo me han demostrado su cariño.

Diana Carolina Gómez Rueda

DEDICATORIA

A quienes han hecho parte de este ciclo en mi vida.

A quienes han reído y llorado conmigo.

A mis padres por su amor e incondicional apoyo.

Massiel Parra Cepeda

AGRADECIMIENTOS

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

A la profesora Nathalia Bedoya por compartir su conocimiento, colaboración y sugerencias en la ejecución de este trabajo.

A las asociaciones gremiales (CORPOICA, Asociación de fiqueros y pequeños cultivadores) por su disposición y acompañamiento en las diferentes plantaciones.

A los técnicos del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química; Eduardo Carreño y Wilson Carreño por su cooperación y colaboración.

Al laboratorio CEIAM, en especial a Yaneth y Patricia por atender nuestras inquietudes.

A todos aquellos que hicieron de esta una experiencia enriquecedora.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 18 |
| 1 METODOLOGÍA | 23 |
| 1.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS CULTIVOS | 23 |
| 1.2 MUESTREO DE LA BIOMASA RESIDUAL | 24 |
| 1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL | 25 |
| 2 RESULTADOS | 28 |
| 2.1 FACTOR RESIDUO Y OFERTA DE LA BIOMASA RESIDUAL PARA CADA CULTIVO | 28 |
| 2.2 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA PARA CADA CULTIVO | 28 |
| 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS | 31 |
| 3.1 FACTOR RESIDUO | 31 |
| 3.2 CULTIVOS DE CÍTRICOS | 31 |
| 3.2.1 Humedad | 31 |
| 3.2.2 Material volátil y carbono fijo | 32 |
| 3.2.3 Ceniza | 33 |
| 3.2.4 Carbono, hidrógeno y oxígeno | 34 |
| 3.2.5 Relación C/N | 35 |
| 3.2.6 Azufre | 35 |
| 3.2.7 Celulosa, hemicelulosa y lignina | 35 |
| 3.3 CULTIVOS DE CACAO, FIQUE Y TOMATE | 37 |
| 3.3.1 Humedad | 37 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3.2 | Material volátil y carbono fijo | 37 |
| 3.3.3 | Ceniza | 38 |
| 3.3.4 | Carbono, hidrógeno y oxígeno | 38 |
| 3.3.5 | Relación C/N | 39 |
| 3.3.6 | Azufre | 39 |
| 3.3.7 | Celulosa, hemicelulosa y lignina | 39 |
| 3.4 | POTENCIAL ENERGÉTICO DE SEIS CULTIVOS EN SANTANDER | 41 |
| 4 | CONCLUSIONES | 43 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 44 |
| | ANEXOS | 48 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Estructura de muestreo de biomasa residual de seis cultivos en Santander | 25 |
| Tabla 2. Estructura de caracterización de biomasa residual de seis cultivos en Santander | 27 |
| Tabla 3. Oferta de biomasa residual agrícola de seis cultivos en Santander | 28 |
| Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola de seis cultivos en Santander | 29 |
| Tabla 5. Potencial energético de seis cultivos en Santander | 41 |
| Tabla 6. Características biológicas de cacao | 48 |
| Tabla 7. Características biológicas de fique | 49 |
| Tabla 8. Características biológicas de limón | 49 |
| Tabla 9. Características biológicas de mandarina | 50 |
| Tabla 10. Características biológicas de naranja | 50 |
| Tabla 11. Características biológicas de tomate | 51 |
| Tabla 12. Balance de masa de las biomásas residuales de seis cultivos en Santander | 53 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Etapas realización de estudio | 23 |
| Figura 2. Análisis próximo de la biomasa residual de limón, mandarina y naranja | 32 |
| Figura 3. Análisis último de la biomasa residual de limón, mandarina y naranja | 34 |
| Figura 4. Análisis estructural de la biomasa residual de limón, mandarina y naranja | 36 |
| Figura 5. Análisis próximo de la biomasa residual de cacao, fique y tomate | 37 |
| Figura 6. Análisis último de la biomasa residual de cacao, fique y tomate | 39 |
| Figura 7. Análisis estructural de la biomasa residual de cacao, fique y tomate | 40 |
| Figura 8. Aporte a la oferta y PE de biomasa residual para seis cultivos en Santander | 42 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A. CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS CULTIVO DE CACAO, CÍTRICOS, FIQUE Y TOMATE | 48 |
| ANEXO B. PROTOCOLO MUESTREO | 52 |
| ANEXO C. BALANCES DE MASA MATERIAL LIGNOCELULOSICO | 53 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------|---------------------------|
| CF | Carbono fijo |
| FR | Factor de residuo |
| Ha | Hectárea |
| MV | Material volátil |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| PCS | Poder calorífico superior |
| PE | Potencial energético |
| t | Tonelada |
| kt | Kilotonelada |
| TJ | Terajoule |
| RAC | Residuo agro de cosecha |
| RAI | Residuo agro industrial |

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS EN SANTANDER: "CACAO, CÍTRICOS, FIQUE Y TOMATE" *

AUTORES: Gómez Rueda, Diana Carolina.

Parra Cepeda, Jenyffer Massiel. **

PALABRAS CLAVE: Biomasa residual, caracterización fisicoquímica, poder calorífico, potencial energético.

DESCRIPCIÓN:

En las últimas décadas Colombia ha incursionado en la búsqueda de fuentes alternas de energía, donde las biomásas de origen agrícola se constituyen en materia prima de interés, esto en consecuencia a su diversidad de cultivos y oferta de biomasa residual. En el presente trabajo de investigación se realizó la caracterización fisicoquímica y determinación del potencial energético a 14 biomásas residuales provenientes de cosecha e industria de 6 cultivos representativos del departamento de Santander, proporcionando información detallada que contribuye a determinar su potencialidad como futuras fuentes de energía.

Se encontró que residuos leñosos de podas de cítricos, hojas y tallos de cacao presentaron contenido de humedad, lignina, material volátil, carbono fijo y poder calorífico que podrían hacerlos aptos en un aprovechamiento energético por vías termoquímicas, mientras que los residuos de bagazo de fique, cáscaras de cítricos y planta de tomate presentaron contenido de humedad, celulosa, lignina y material volátil que sugieren su aprovechamiento energético por tecnologías bioquímicas como fermentación o digestión anaerobia. Pese a su poder calorífico, en general las biomásas tienen poco aporte a la oferta de biomasa residual, esto sumado a un alto contenido de humedad causa la disminución de su potencial energético. El potencial energético del cultivo del cacao se destaca con un valor de 1703,28 TJ/año.

* Trabajo de grado.

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

ABSTRACT

TITLE: PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISATION OF AGRICULTURAL WASTES IN SANTANDER: "COCOA, CITRUS, FIQUE AND TOMATO" *

AUTHORS: Gómez Rueda, Diana Carolina.

Parra Cepeda, Jenyffer Massiel. **

KEY WORDS: Biomass wastes, physicochemical characterization, calorific value, energetic potential.

DESCRIPTION:

In last decades Colombia has gone into the search of alternate energy sources, where agricultural biomass represents important raw material, this because of its crop diversity and biomass wastes offer. In this investigation work it was done the physicochemical characterization and determination of energetic potential of 14 biomass wastes from harvest and industry of 6 representative crops in Santander, giving detailed information that contributes to determine its potentiality as a future energy source.

It was found that woody wastes as citrus prunings and cocoa stems and leaves showed contents of moisture, lignin, volatile matter, fixed carbon and calorific value that could make them adequate to be used in thermochemical technologies, while other wastes as fique bagasse, citrus shells and tomato plant showed contents of moisture, cellulose, lignin and volatile matter that suggest them to be used in biochemical technologies as fermentation or anaerobic digestion. Despite a calorific value, in general the biomass have a little contribution to biomass wastes offer, this combined with a high content moisture causes decrease of its energy potential. The energy potential of cocoa crop stand out with 1703.28 TJ/year.

* Thesis.

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

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se ha querido disminuir el uso de combustibles fósiles, debido a su impacto negativo sobre el medio ambiente y a la fluctuación en sus precios. Para dar solución a todo esto se han venido implementando fuentes alternas de energía como lo es la energía eólica, la energía solar o los llamados cultivos energéticos. Estos últimos no han estado alejados del todo de la controversia existente entre brindar una alternativa de energía más limpia y garantizar recursos suficientes para el consumo humano.

En las últimas décadas Colombia ha incursionado en la búsqueda de fuentes alternas de energía, donde las biomásas de origen agrícola se constituyen en materia prima de interés. Esto en consecuencia a su diversidad de cultivos y oferta de biomasa residual.

A nivel nacional, sobresale la producción de 924,62 kt/año de raquis de palma, con Potencial energético (PE) de 6607,31 TJ/año de residuo; 1278,64 kt/año de rastrojo de maíz, con PE de 12573,18 TJ/año de residuo; 5789,67 kt/año de tamo de arroz, con PE de 20699,91 TJ/año [Escalante *et al.*, 2010].

Una idea global con creciente interés gubernamental, ha sido la búsqueda e implementación de nuevas tecnologías, en pro de un mayor rendimiento de procesos. Es así como hoy en día tratamientos como pirólisis, gasificación, digestión anaerobia y producción de alcohol por vía fermentativa han sido ampliamente aplicados a la biomasa con el fin de obtener energía [Demirbas, 2004].

En Turquía [Demirbas, 1997], China [Cuiping *et al.*, 2004], Canadá [Naik *et al.*, 2010], España [García *et al.*, 2012] y Colombia [Escalante *et al.*, 2010] biomásas

de origen agrícola y forestal fueron caracterizadas fisicoquímicamente con el fin de evaluar su capacidad para producir combustibles.

Filipinas determinó el PE a biomásas agrícolas, estiércol animal y residuos leñosos [Bhattacharya *et al.*, 2005]. En India se estudió la producción de metano por digestión anaerobia en cáscaras de frutos [Gunaseelan, 2004]. En Cuba se estudió la pirólisis de cáscara de naranja [Aguiar *et al.*, 2008]. En España se estudió la producción de bioetanol por vía fermentativa de cáscara de limón [Boluda *et al.*, 2013].

En el departamento de Santander se destacan las cadenas productivas de cacao, cítricos, tomate y fique. Este departamento, por su desarrollo agroindustrial, tiene una producción de 21,41 kt/año de cacao en grano; 109,11 kt/año de frutos cítricos; 47,95 kt/año de tomate y 2,75 kt/año de fibras [EVA, 2010]. Los residuos generados en las actividades agrícolas de Santander son biomásas con PE que puede llegar a ser aprovechado, siempre y cuando se disponga de la información de su ubicación, oferta y características fisicoquímicas.

En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue definir los tipos de biomásas residuales generadas por 6 cultivos representativos de Santander, determinar sus características fisicoquímicas y PE.

BIOMASA RESIDUAL

La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales tales como, residuos de cosechas, podas o frutos de descarte, lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos de plazas de mercado. La biomasa residual agrícola se clasifica según su origen como: Residuos Agro Industriales (RAI) o Residuos Agros de Cosecha (RAC) [Escalante *et al.*, 2010].

La selección de una tecnología para el aprovechamiento energético de un residuo depende en gran medida de sus características fisicoquímicas. La caracterización de una biomasa residual agrícola comprende realizar al residuo un análisis próximo, análisis último, análisis estructural y determinar su poder calorífico.

CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL

El análisis último cuantifica la concentración de carbono, nitrógeno, hidrógeno, azufre y oxígeno presentes en una muestra de biomasa.

El análisis próximo evalúa el contenido de humedad o cantidad de agua presente en la muestra, el contenido de material volátil (MV) o compuestos liberados cuando la muestra hace combustión, excluyendo la humedad, 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].

La biomasa está compuesta en su estructura alrededor del 85-90%p por holocelulosa y lignina, donde la holocelulosa a la vez se compone de celulosa y hemicelulosa. La función de estos polímeros es mantener la integridad estructural de las células vegetales. Adicionalmente, la biomasa contiene extractivos orgánicos y minerales inorgánicos [Naik *et al.*, 2010; Pasangulapati *et al.*, 2012].

La celulosa es un polisacárido lineal, el cual es la estructura principal de la pared celular vegetal, normalmente existe en forma de hebras largas llamadas microfibrillas que suelen estar incrustadas en una matriz que contiene hemicelulosa y lignina. Se descompone a altas temperaturas, formando cadenas de hidrocarburos ligeros [Pasangulapati *et al.*, 2012; Nogués *et al.*, 2010].

La hemicelulosa es un polisacárido ramificado compuesto por diferentes monómeros de azúcar, tales como glucosa, xilosa, manosa, galactosa, arabinosa

y ácidos urónicos. Debido a su ramificación puede formar enlaces de hidrógeno con la celulosa y lignina [Pasangulapati *et al.*, 2012].

La lignina es una macromolécula fenólica con alto grado de reticulación entre las unidades de fenil-propano, este entrecruzamiento genera mayor estabilidad térmica. La concentración de lignina disminuye desde la capa exterior a la capa interior de la biomasa. Tiene función fijadora, proporcionando elasticidad y resistencia mecánica [Azadi *et al.*, 2013; Pasangulapati *et al.*, 2012].

El poder calorífico es la cantidad de calor desprendido de un material por unidad de masa durante su combustión a presión constante, teniendo como productos dióxido de carbono y agua. El poder calorífico superior (PCS) se define como el poder calorífico teniendo en cuenta el calor por la condensación del vapor de agua formado. El poder calorífico inferior (PCI) se define como el poder calorífico sin tener en cuenta el calor de condensación del vapor de agua formado, el cual es la energía aprovechable.

El PCS es determinado teóricamente mediante modelos matemáticos o experimentalmente mediante el uso de bomba calorimétrica. El PCI es determinado a partir del PCS con el modelo propuesto por López y Llera. [Nogués *et al.*, 2010].

$$PCI_{bs} = PCS_{bs} - (9 * 2449 * H) \quad \text{[ecuación 1]}$$

Donde H es la fracción másica de hidrógeno en la biomasa y el subíndice bs indica base seca. Los valores de PCS y PCI se encuentran expresados según el SI en kJ/kg.

POTENCIAL ENERGÉTICO BIOMASA RESIDUAL

El PE se define como la energía química de la biomasa que puede ser transformada para su aprovechamiento energético. Se obtiene del producto entre la masa de residuo y su contenido energético, PCI [Orduz, 2011].

El PE es determinado utilizando el modelo matemático desarrollado por Escalante *et al.*, (2010).

$$PE = \alpha * A * R_C * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m M_{rgki} * Y_{rski} * PCI_{ki} \quad [\text{ecuación 2}]$$

PE esta expresado en TJ/año.

Donde:

A: Área cosechada ha/año.

R_C: Rendimiento del cultivo [t producto principal /ha sembrada].

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

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

α : Constante de conversión de unidades [$1 \cdot 10^{-6}$].

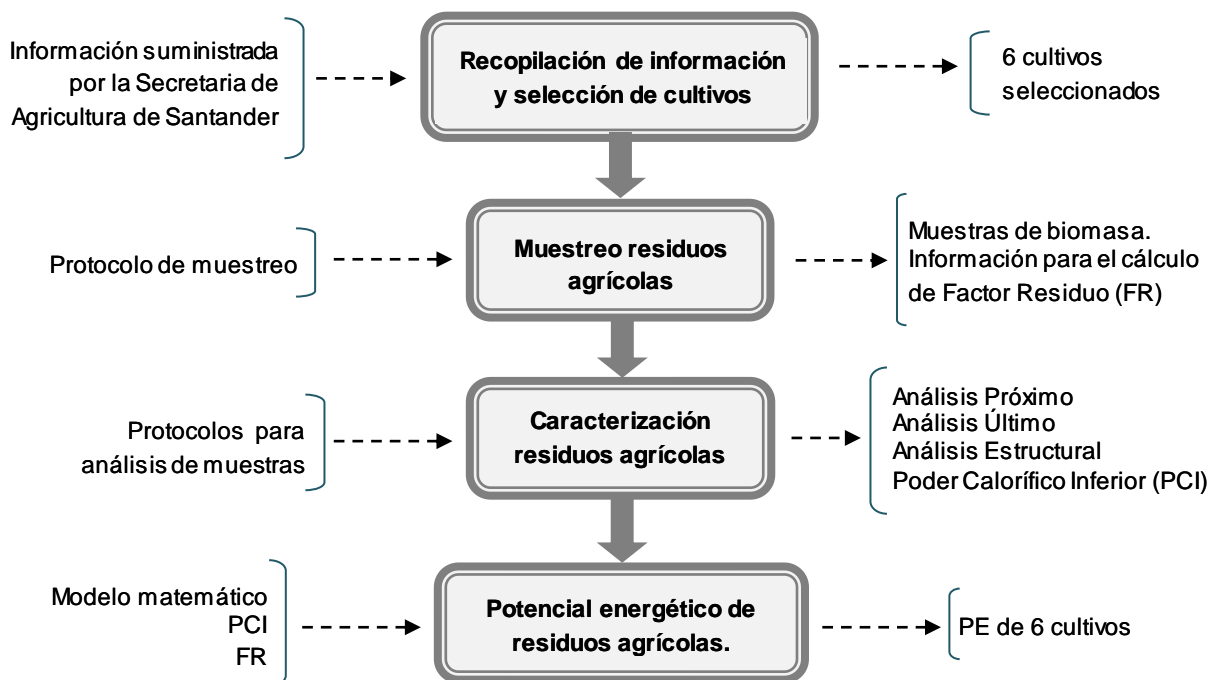
PCI: en kJ/kg.

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.

1 METODOLOGÍA

El presente estudio se llevó a cabo en las cuatro etapas que se esquematizan en la Figura 1.

Figura 1. Etapas realización de estudio.



1.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y SELECCIÓN DE CULTIVOS

A partir de información suministrada por la Secretaria de Agricultura de Santander se hizo una revisión de la actividad agrícola del departamento para seleccionar los cultivos a estudiar, esta se ve representada por los cultivos de cacao, fique, limón tahití, mandarina, naranja y tomate [EVA, 2010], cuyas características biológicas (ver Anexo A) se ven favorecidas por los diferentes ambientes climáticos de la región. Los criterios que se tuvieron en cuenta para seleccionar los seis cultivos de estudio fueron:

- a) Área sembrada mayor a 2500 ha/año. Mediante este criterio se seleccionaron los cultivos de cacao con 44158 ha/año; fique con 2898 ha/año y mandarina con 6141 ha/año [EVA, 2010].
- b) Producción anual mayor a 12 kt/año. Mediante este criterio se seleccionaron los cultivos de tomate con 47,95 kt/año de frutos; cacao con 21,41 kt/año de cacao en grano; limón tahití, mandarina y naranja con 109,11 kt/año de frutos [EVA, 2010].

1.2 MUESTREO DE LA BIOMASA RESIDUAL

Se identificaron en Santander plantaciones de los cultivos seleccionados con la colaboración de asociaciones gremiales (CORPOICA, Asociación de fiqueros y pequeños cultivadores). Adicionalmente, con ayuda del personal técnico de cada plantación se obtuvo información propia del cultivo correspondiente a producto principal, generación de residuos RAC y su cuantificación por planta. En cada plantación se recolectaron muestras de los diferentes residuos (ver Tabla 1).

En la recolección de muestras se utilizó el protocolo de muestreo (ver Anexo B) establecido por el laboratorio de Análisis Físicoquímico del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) [Escalante *et al.*, 2010].

Residuos RAI de producto principal de cítricos fueron cuantificados al ser sometidos a extracción de zumos en el laboratorio de investigaciones de la escuela de Ingeniería Química (UIS).

Tabla 1. Estructura de muestreo de biomasa residual de seis cultivos en Santander.

| Cultivo | Residuo | Tipo | Entidad | Plantación | Ubicación |
|-----------|-----------------|------|------------------------|---|---|
| Cacao | Hojas | RAC | CORPOICA | Banco nacional de germoplasma de cacao. | Estación experimental la Suiza Rionegro |
| | Tallos | RAC | | | |
| | Frutos descarte | RAC | | | |
| | Cacota | RAI | | | |
| Fique | Bagazo | RAI | ASOCIACIÓN DE FIQUEROS | Comercial fique | San Joaquín |
| Limón | Poda | RAC | CORPOICA | Comercial cítricos | Estación experimental la Suiza Rionegro |
| Mandarina | Poda | RAC | CORPOICA | Comercial cítricos | Estación experimental la Suiza Rionegro |
| Naranja | Poda | RAC | CORPOICA | Comercial cítricos | Estación experimental la Suiza Rionegro |
| Tomate | Planta | RAC | CULTIVADOR | Comercial tomate | Vereda Chocóa Vía Zapatoca |
| | Frutos descarte | RAC | | | |

1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL

Parte de las muestras recolectadas se trasladaron a los laboratorios de la escuela de Ingeniería Química de la UIS y parte a los laboratorios del CEIAM para su respectiva caracterización. Todos los análisis fueron realizados por duplicado. La caracterización fisicoquímica realizada a la biomasa residual contempló las variables que se presentan en la Tabla 2.

La determinación de extractivos acuosos, extractivos orgánicos, celulosa, hemicelulosa y lignina se realizó de acuerdo a los protocolos de análisis de material lignocelulósico CILIQ, basado en las normas estándar ASTM presentadas en Tabla 2.

En primer lugar se realizó un secado de las muestras, seguido de una disminución de tamaño en un molino de cuchillas (marca Wiley Mill) del laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química.

Para la determinación del contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina es necesario trabajar con el material libre de extractivos, para lo cual se realizó una extracción acuosa, y una extracción orgánica. Estas extracciones fueron realizadas mediante extracción Soxhlet.

A continuación se determinó del contenido de holocelulosa mediante el método de cloración, para lo cual se parte de una muestra de material lignocelulósico libre de extractivos, que es sometida a un ataque con una disolución de NaClO_2 y ácido acético.

Continuando con el análisis estructural, se procedió a determinar el contenido de celulosa, mediante tratamiento alcalino. Esto se hace partiendo del material seco resultante del análisis de holocelulosa. El material es tratado con una solución de NaOH en ataques consecutivos.

De manera alterna, partiendo de un material lignocelulósico libre de extractivos se determinó el contenido de lignina, mediante el método de Lignina Klason, el cual consiste en una hidrólisis primaria, seguida de una hidrólisis secundaria, la cual se lleva a cabo en autoclave.

El PCI se determinó usando la ecuación 1, en base al PCS hallado experimentalmente mediante el uso de la bomba calorimétrica (marca BTRS-Modelo 83) en el laboratorio de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Mediante el cálculo de FR [t residuo/t producto principal], el PCI y rendimiento del cultivo [EVA, 2010] se determinó el PE utilizando el modelo matemático, ecuación 2.

Tabla 2. Estructura de caracterización de biomasa residual de seis cultivos en Santander.

| Tipo de análisis | Variable | Técnica | Norma | Laboratorio |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| Análisis Próximo | Humedad | Análisis Termogravimétrico | ASTM D7582-10 | CILIQ |
| | MV | | | |
| | CF | | | |
| | Cenizas | | | |
| Análisis Último | Carbono | Colorimétrico | NMX-AA-21-1984 | CEIAM |
| | Hidrógeno | Colorimétrico | NMX- AA- 068-1986 | |
| | Oxígeno | Gravimétrico | -- | |
| | Nitrógeno | Kjeldahl | NTC 1556 | |
| | Azufre | Turbidimétrica | -- | |
| Análisis Estructural | Grasa | Extracción Soxhlet | NTC 668 | CEIAM |
| | Proteína | Kjeldahl | NTC 1556 | CEIAM |
| | Extracción Acuosa | Extracción Soxhlet | ASTM D1110-56(77) | 10B (IQ) |
| | Extracción Orgánica | 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) |
| Otros Parámetros | Materia orgánica | Colorimétrico | NMX-AA-21-1984 | CEIAM |
| | Relación C/N | Gravimétrico | NMX-AA-067-1985 | 10B (IQ) |
| | Sólidos volátiles Totales | Gravimétrico | APHA 2540-E | 10B (IQ) |
| | Poder calorífico superior | Bomba calorimétrica | ASTM D5865 | INGENIERÍA METALÚRGICA |

*: [Sentís, 1969]

2 RESULTADOS

2.1 FACTOR RESIDUO Y OFERTA DE LA BIOMASA RESIDUAL PARA CADA CULTIVO

En la Tabla 3 se presenta la clasificación de los residuos agrícolas según su origen como: Residuos Agro Industriales (RAI) o Residuos Agros de Cosecha (RAC), el área cosechada, cantidad de producto principal [EVA, 2010], el FR, y la oferta de residuo.

Tabla 3. Oferta de biomasa residual agrícola de seis cultivos en Santander.

| Cultivo | Residuo | Tipo de residuo | Área cosechada [ha] | Producto principal [kt/año] | FR [t residuo/t producto principal] | Oferta residuo [kt/año] |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Cacao | Hojas | RAC | 36654,30 | 21,41 | 2,66 | 56,95 |
| | Tallos | RAC | | | 2,83 | 60,59 |
| | Frutos descarte | RAC | | | 5,90 | 126,32 |
| | Cacota | RAI | | | 15,25 | 326,50 |
| Fique | Bagazo | RAI | 2729,70 | 2,75 | 5,00 | 13,75 |
| Limón | Poda | RAC | 711,00 | 12,31 | 0,11 | 1,35 |
| | Cáscara | RAI | | | 0,50 | 6,16 |
| Mandarina | Poda | RAC | 5550,50 | 74,57 | 0,08 | 5,97 |
| | Cáscara | RAI | | | 0,50 | 37,29 |
| Naranja | Poda | RAC | 1873,50 | 22,22 | 0,04 | 0,89 |
| | Cáscara interior | RAI | | | 0,37 | 8,22 |
| | Cáscara exterior | RAI | | | 0,15 | 3,33 |
| Tomate | Planta | RAC | 1200,56 | 47,95 | 0,44 | 21,10 |
| | Frutos descarte | RAC | | | 0,33 | 15,82 |

2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA PARA CADA CULTIVO

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización físicoquímica de las biomásas residuales para seis cultivos de Santander. El balance de masa para el material lignocelulósico corresponde a extraíbles acuosos, extraíbles orgánicos, celulosa, hemicelulosa, lignina y ceniza (ver Anexo C).

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola de seis cultivos en Santander.

| Residuo | Análisis Próximo Base Seca [%φ] | | | | Análisis Último* [%φ] | | | | |
|------------------|---------------------------------|------------------|--------------|---------|-----------------------|-----------|---------|-----------|--------|
| | Humedad | Material Volátil | Carbono Fijo | Cenizas | Carbono | Hidrógeno | Oxígeno | Nitrógeno | Azufre |
| Cacao | | | | | | | | | |
| Hojas | 17,98 | 77,03 | 20,88 | 2,09 | 45,74 | 5,23 | 36,73 | 1,50 | 0,09 |
| Tallos | 71,68 | 86,44 | 11,17 | 2,39 | 48,39 | 5,56 | 39,95 | 0,69 | 0,02 |
| Frutos descarte | 85,47 | 73,92 | 19,48 | 6,60 | 51,67 | 5,94 | 33,90 | 0,64 | 0,09 |
| Cacota | 87,41 | 84,43 | 11,83 | 3,74 | 45,05 | 5,18 | 41,04 | 0,68 | 0,03 |
| Fique | | | | | | | | | |
| Bagazo | 85,36 | 95,42 | 1,99 | 2,59 | 35,58** | 6,02** | 47,44** | 1,32** | 0,01** |
| Limón | | | | | | | | | |
| Poda | 43,96 | 82,72 | 16,00 | 1,28 | 53,40 | 6,14 | 33,61 | 1,16 | 0,05 |
| Cáscara | 69,43 | 81,94 | 15,15 | 2,91 | 46,63 | 5,36 | 41,87 | 1,04 | 0,02 |
| Mandarina | | | | | | | | | |
| Poda | 47,35 | 84,48 | 14,66 | 0,86 | 47,15 | 5,19 | 43,52 | 0,90 | 0,05 |
| Cáscara | 70,19 | 81,45 | 16,10 | 2,45 | 45,12 | 5,42 | 42,19 | 1,26 | 0,07 |
| Naranja | | | | | | | | | |
| Poda | 34,49 | 83,09 | 16,11 | 0,80 | 40,92 | 4,70 | 45,87 | 1,19 | 0,03 |
| Cáscara interior | 69,99 | 89,00 | 8,74 | 2,26 | 49,59 | 5,70 | 40,05 | 1,01 | 0,04 |
| Cáscara exterior | 69,30 | 81,86 | 14,98 | 3,16 | 47,17 | 5,42 | 41,95 | 1,09 | 0,06 |
| Tomate | | | | | | | | | |
| Planta | 89,75 | 78,24 | 20,96 | 1,60 | 39,15 | 4,50 | 38,28 | 2,33 | 0,32 |
| Frutos descarte | 91,97 | 92,77 | 1,50 | 5,73 | 39,70 | 4,56 | 43,30 | 2,20 | 0,09 |

*: 100 = carbono + oxígeno + hidrógeno + nitrógeno + azufre + ceniza + material no cuantificado.

** : [Quintero *et al.*, 2012]

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola de seis cultivos en Santander.

| Residuo | Análisis Estructural [%p] | | | | | Otros Parámetros [%p] | | |
|------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| | Grasa | Proteína | Celulosa | Hemicelulosa | Lignina | Materia Orgánica | Relación C/N | Sólidos Volátiles Totales |
| Cacao | | | | | | | | |
| Hojas | 4,45 | 9,38 | 20,14 | 28,12 | 32,80 | 78,51 | 30,35 | 81,65 |
| Tallos | 0,54 | 4,31 | 30,27 | 36,77 | 23,34 | 83,42 | 70,12 | 27,64 |
| Frutos descarte | 2,02 | 4,00 | 25,11 | 14,73 | 25,15 | 89,08 | 80,73 | 13,56 |
| Cacota | 0,56 | 4,25 | 21,19 | 14,93 | 25,30 | 77,67 | 66,25 | 12,12 |
| Fique | | | | | | | | |
| Bagazo | 4,13 ² | 4,38 ^{**} | 41,81 ^{**} | 22,17 ^{**} | 15,76 ^{**} | 71,31 | 26,95 ^{**} | 14,26 |
| Limón | | | | | | | | |
| Poda | 0,77 | 7,25 | 34,93 | 22,49 | 21,02 | 92,06 | 46,03 | 55,33 |
| Cáscara | 1,02 | 6,50 | 14,19 | 9,11 | 12,89 | 80,39 | 44,83 | 29,68 |
| Mandarina | | | | | | | | |
| Poda | 0,77 | 5,63 | 30,42 | 28,46 | 24,87 | 81,30 | 52,39 | 52,20 |
| Cáscara | 7,23 | 7,88 | 23,39 | 13,36 | 13,27 | 77,79 | 35,81 | 29,08 |
| Naranja | | | | | | | | |
| Poda | 1,23 | 7,44 | 30,64 | 27,08 | 25,75 | 70,55 | 34,39 | 64,99 |
| Cáscara interior | 1,30 | 6,31 | 24,55 | 13,54 | 13,37 | 85,50 | 49,10 | 29,33 |
| Cáscara exterior | 1,83 | 6,81 | 23,72 | 14,04 | 10,65 | 81,33 | 43,28 | 29,73 |
| Tomate | | | | | | | | |
| Planta | 5,89 | 14,56 | 27,26 | 12,17 | 14,17 | 67,49 | 16,80 | 10,09 |
| Frutos descarte | 2,25 | 13,75 | 13,26 | 7,82 | 6,86 | 68,45 | 18,05 | 7,57 |

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 FACTOR DE RESIDUO

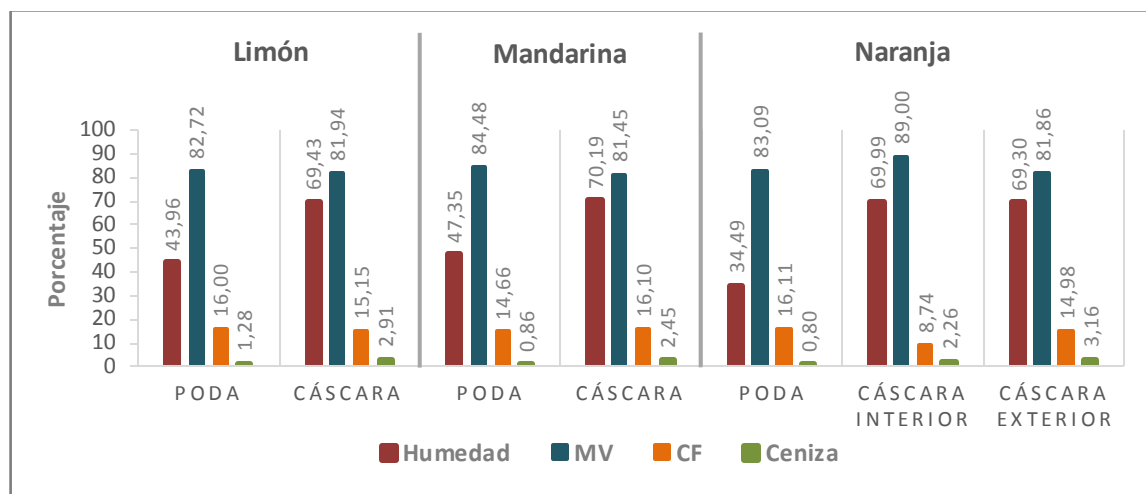
Residuos del cultivo de cacao y fique sobresalen con altos FR (ver Tabla 3) respecto a estudios reportados en Colombia por Escalante y col. (2010), como es el caso del raquis de palma con FR de 1,06 y el bagazo de caña con FR de 2,53. Adicionalmente, se observa que la cacota de cacao es quien tiene el mayor FR, el cual es de 15,25. Cultivos de cítricos y tomate tienen FR bajos que oscilan entre 0,04 y 0,5. Esta variabilidad del FR para las biomásas objeto de estudio podría afectar significativamente el PE de cada biomasa.

3.2 CULTIVOS DE CÍTRICOS

En el presente trabajo la cáscara de naranja se analizó como dos residuos, cáscara interior y cáscara exterior. La cáscara interior se compone de la parte blanca que rodea a la pulpa, de grosor aproximado a 5mm. La cáscara exterior se compone de la parte externa de la corteza, de grosor aproximado a 1,5mm y puede tener un color entre verde y amarillo.

3.2.1 Humedad. En la Figura 2 se observa que la cáscara interior y la cáscara exterior presentan el mismo contenido de humedad.

Figura 2. Análisis próximo de la biomasa residual de limón, mandarina y naranja.



Se observa que residuos de podas presentan contenidos de humedad cercanos al 50%p. Un aprovechamiento efectivo en sistemas de combustión u otro proceso termoquímico requeriría una etapa de secado con el objeto de disminuir la humedad por lo menos a 10%p, esto debido que un alto contenido de humedad reduce la eficiencia de la combustión, al usar gran parte del calor de reacción para evaporar el agua del combustible [Permchart *et al.*, 2004]. Además, la humedad de la biomasa inicial en la pirólisis flash contribuye a la cantidad de agua del aceite de pirólisis, reduciendo el valor calorífico, especialmente el PCI y la temperatura de llama [Czernik *et al.*, 2004].

Residuos de cáscaras presentan humedades superiores al 50%p sugiriendo su aprovechamiento mediante tecnologías bioquímicas como fermentación o digestión anaerobia, las cuales no tienen restricción en la cantidad de agua del residuo.

3.2.2 Material volátil y carbono fijo. Como se observa en la Figura 2 los residuos de cáscaras y podas de cítricos presentan mayor contenido de MV y tendencias similares en CF a los reportados por García y col. (2012). Adicionalmente, se observa que estos residuos tienen contenidos muy similares

de MV y CF entre sí. Sin embargo, la cáscara interior de la naranja se aleja de esta tendencia con CF de 8,74%p y MV de 89,00%p.

Según Nogués (2010), la producción de gas y carbón vegetal se ve favorecida con altos contenidos de MV y CF. De acuerdo a Aguiar y col. (2008) es posible obtener residuo sólido de alto poder calorífico en pirólisis de lecho fijo de la cáscara de naranja. Lo anterior sugiere que podas de los cítricos pueden ser aprovechadas energéticamente por esta vía, al seguir tendencias similares de CF del material estudiado por Aguiar y col. (2008) o buscar formación de bio-oil de alto poder calorífico debido a su alto contenido de MV, teniendo como ventaja un menor contenido de humedad, logrando su disminución mediante secado solar.

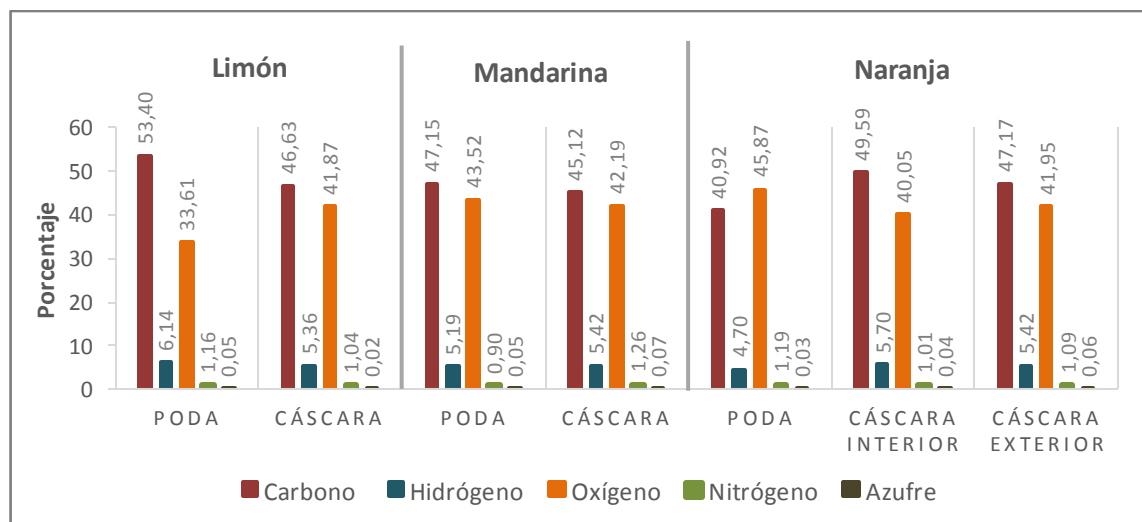
3.2.3 Ceniza. De acuerdo con Adbullah y col. (2008), una concentración elevada de cenizas del material lignocelulósico usado como alimentación en una reacción de pirólisis flash, disminuye el rendimiento del líquido producido. Por lo tanto, es necesario la reducción del contenido de cenizas por lo menos a 3%p para obtener líquidos homogéneos.

Adicionalmente, Adbullah y col. (2008) observaron una contribución de cenizas en el rendimiento del residuo carbonoso. De hecho, en procesos termoquímicos las cenizas favorecen la formación de hollín, el cual termina como depósito en superficies de equipos aguas abajo del reactor, causando la formación de escoria y problemas de corrosión, como fue constatado igualmente por Vamvuca y col. (2008) en procesos de combustión donde la eficiencia disminuye considerablemente.

Es posible observar una mayor cantidad de cenizas en cáscaras que en podas de cítricos. Tendencias similares son reportadas por García y col. (2012). De acuerdo con Adbullah y col. (2008), se esperaría entonces un mayor rendimiento del líquido en pirólisis flash en podas que en cáscaras.

3.2.4 Carbono, hidrógeno y oxígeno. En la Figura 3 se observa que residuos de cáscaras y podas de cítricos presentan tendencias similares en carbono, hidrógeno y oxígeno a las reportadas por García y col. (2012).

Figura 3. Análisis último de la biomasa residual de limón, mandarina y naranja.



Adicionalmente, el hidrógeno presenta poca variabilidad para las biomásas residuales de los tres cultivos.

Es importante estudiar el poder calorífico en biomásas con bajo contenido de humedad en aras de su posible aprovechamiento por combustión. Como se muestra en la Figura 3 la poda de limón presenta alto contenido de carbono y oxígeno de 33,61%p, generando un PCI de 15,2 MJ/kg (ver Tabla 5) respecto a un PCI de 16 MJ/kg de la poda de mandarina. El PCI de poda de naranja es el menor de las podas con 14,4 MJ/kg, siendo consecuente con el carbono en esta biomasa. Lo anterior es coherente con estudios realizados por Sheng y col. (2005) quienes han demostrado que el carbono, hidrógeno y oxígeno tienen un efecto positivo sobre el poder calorífico de la biomasa lignocelulósica.

La relación C/O en poda de limón es de 1,6 y es la más alta en las tres podas; esta relación es favorable para la producción de bio-oil, debido que un alto contenido de oxígeno resulta en la disminución del poder calorífico del

combustible, además de hacerlo inestable, esto sumado al requerimiento de desoxigenación para su transporte [Czernik *et al.*, 2004].

Cáscara interior y exterior de naranja presentan una variación en contenido de oxígeno y carbono muy pequeña (ver Figura 3) y también en su PCI con 13,7 y 13,8 MJ/kg respectivamente (ver Tabla 5).

3.2.5 Relación C/N. De acuerdo a la Tabla 4 las cáscaras de cítricos tienen relación C/N entre 35,81 y 49,10 alejándose de un óptimo entre 20 y un máximo de 30 para su uso en digestión anaerobia [Habiba *et al.*, 2009]. Estudios realizados por Gunaseelan (2004) mostraron bajo rendimiento de cáscaras de cítricos en producción de metano.

3.2.6 Azufre. Residuos de cítricos presentan contenidos de azufre inferiores a 0,1%p (ver Figura 3), estos valores son bajos respecto a los reportados por García y col. (2012). Sin embargo, esto resulta ventajoso ya que las emisiones de SO₂ en la combustión serán bajas [García *et al.*, 2012].

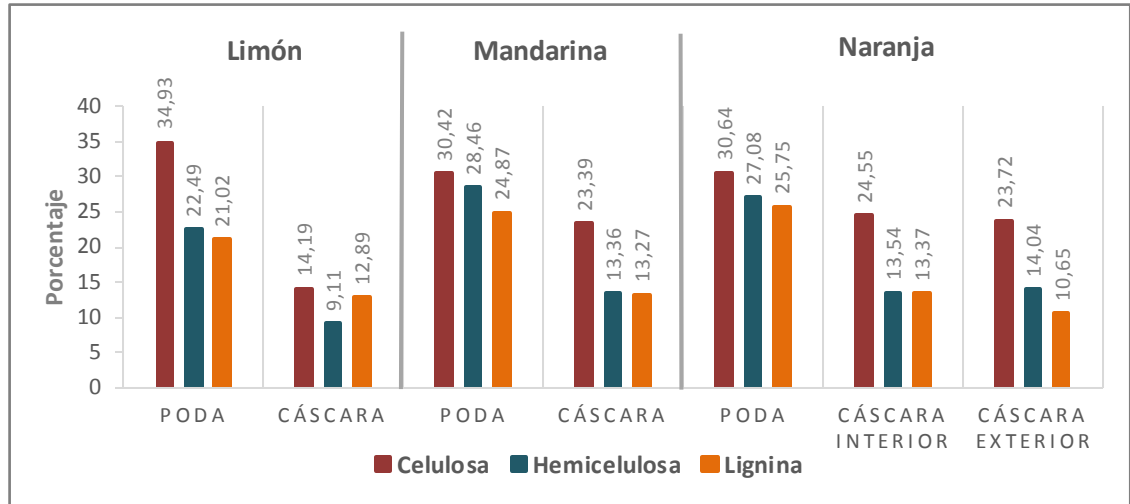
3.2.7 Celulosa, hemicelulosa y lignina. Como se puede apreciar en la Figura 4, celulosa y hemicelulosa en cáscaras de mandarina y naranja presentan valores semejantes entre sí, tendencias similares han sido reportadas por Marín y col. (2007). En contraste la cáscara de limón presenta un contenido de celulosa y hemicelulosa inferior a los dos cultivos, alejándose de tendencias mostradas por Marín y col. (2007). Esto se debe a la gran cantidad de extractivos acuosos presentes en esta biomasa (ver Anexo C).

Se observa que cáscara interior y exterior de naranja no presentan diferencia apreciable en los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Adicionalmente, el contenido de lignina es menor en las cáscaras que en las podas, donde las cáscaras presentan valores inferiores a 14%p de lignina. Lo

anterior es favorable en procesos de conversión bioquímica, donde la proporción de celulosa y lignina en la biomasa es de gran importancia [Mckendry., 2002].

Figura 4. Análisis estructural de la biomasa residual de limón, mandarina y naranja.



Diferentes estudios [Wilkins *et al.*, 2007; Wilkins., 2009; Boluda *et al.*, 2010; Boluda *et al.*, 2013] han demostrado que las propiedades fisicoquímicas de las cáscaras de cítricos hacen de éstas, biomasa residual apta para aprovechamiento energético por fermentación.

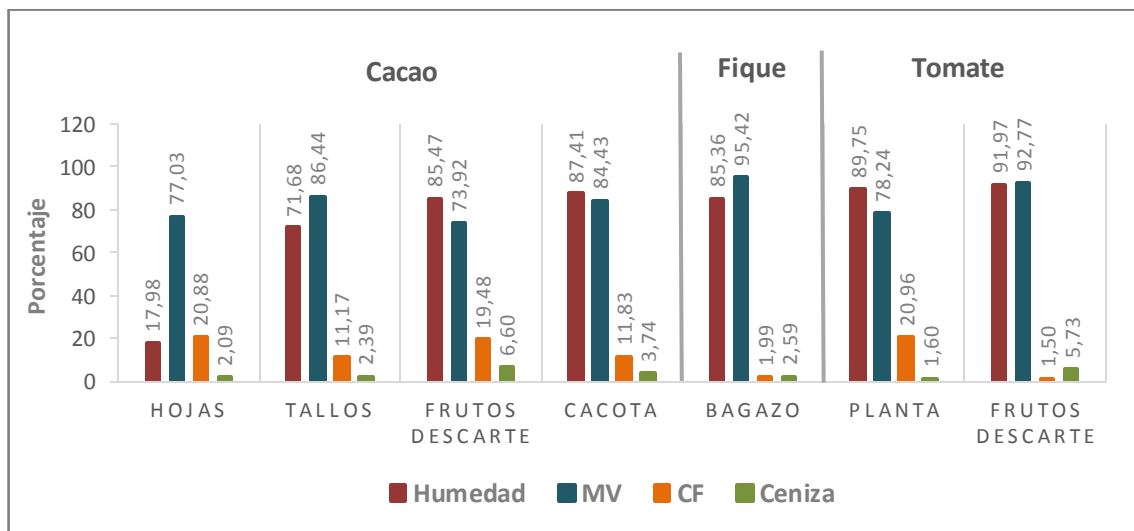
De acuerdo con Uzun y col. (2010) es posible obtener bio-oil y residuo sólido de residuos de té, el cual presentó contenido de lignina de 25,7%p. En contraste, Aguiar y col. (2008) demostraron que la cáscara de naranja al tener poca lignina no produce cantidades apreciables de bio-oil. Consecuentemente, se puede esperar que las podas de cítricos al tener lignina (ver Figura 4) en un rango cercano a la materia prima estudiada por Uzun y col. (2010) puedan generar bio-oil o residuo sólido de alto poder calorífico.

3.3 CULTIVOS DE CACAO, FIQUE Y TOMATE

3.3.1 Humedad. En general la Figura 5 muestra que todos los residuos exceptuando las hojas y tallos de cacao, presentan humedades superiores al 85%p con lo que se consideran sustratos altamente degradables, convirtiéndolos en candidatos ideales para la producción de metano [García *et al.*, 2011].

Las hojas de cacao presentan humedad de 17,98%p la cual, aunque es superior al 10%p puede ser reducida mediante simple secado por exposición solar. En contraste los tallos de cacao aunque tienen humedad del 71,68%p son residuos leñosos y no deben descartarse en procesos de conversión termoquímica.

Figura 5. Análisis próximo de la biomasa residual de cacao, fique y tomate.



3.3.2 Material volátil y carbono fijo. Los residuos de planta de tomate, hojas, tallos y cacota de cacao siguen tendencias similares en cuanto a MV y CF reportados por otros autores en biomásas agrícolas y forestales [Demirbas., 2004; Cuiping *et al.*, 2004; García *et al.*, 2012].

Además, se observa que el bagazo de fique y frutos de descarte de tomate presentan contenidos de MV de 95,42 y 92,77%p junto a CF de 1,99 y 1,50%p,

respectivamente. Estos valores son extremos para las dos variables respecto a las especies de estudio; tendencias similares han sido reportadas por Gulaseelan (2004) en cáscaras blandas, indicando que estos materiales están compuestos casi en su totalidad de MV.

3.3.3 Cenizas. Por otro lado, residuos de frutos de descarte y cacota presentan mayores contenidos de ceniza, siguiendo tendencias observadas en cítricos y reportadas por García y col. (2012) en biomásas agrícolas, lo anterior no es favorable en procesos termoquímicos como la combustión [Vamvuca *et al.*, 2008].

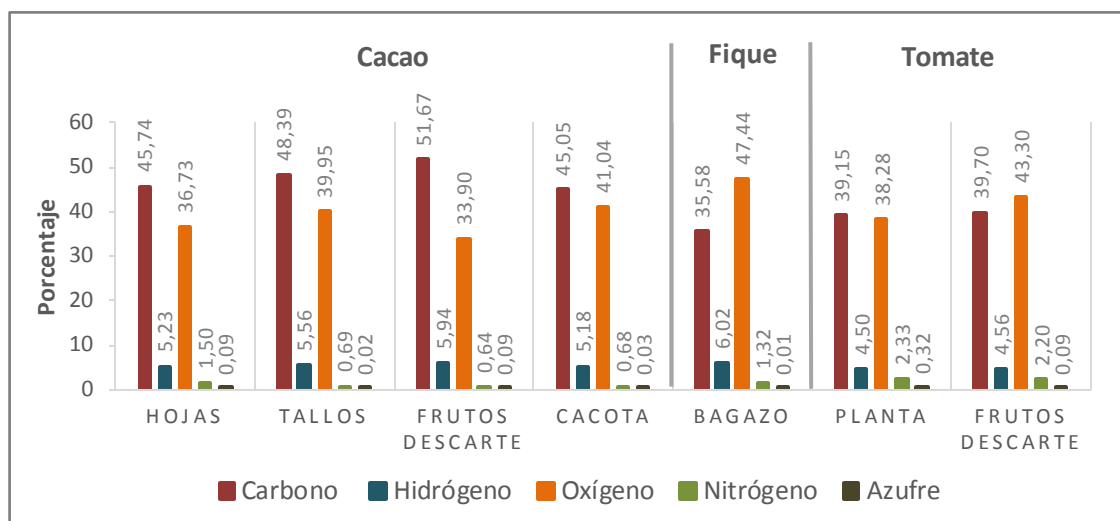
De acuerdo a Adbullah y col. (2008) la planta de tomate, tallos y hojas de cacao presentan rangos óptimos de ceniza para ser usados como materia prima en pirólisis flash.

3.3.4 Carbono, hidrógeno y oxígeno. Residuos de cacao, fique y tomate siguen tendencias similares en cuanto a carbono, hidrógeno y oxígeno (ver Figura 6) a las reportadas por otros autores en biomásas agrícolas y forestales [Cuiping *et al.*, 2004; Telmo *et al.*, 2010; García *et al.*, 2012].

Las hojas y tallos de cacao presentan contenidos muy similares de carbono, oxígeno e hidrógeno, en consecuencia el PCI de estas dos biomásas es de 13,8 MJ/kg para las hojas y de 13,7 MJ/kg para los tallos (ver Tabla 5), indicando la influencia de estos elementos en el poder calorífico de esta biomasa.

Adicionalmente, se observa que los frutos de descarte de cacao presentan bajo contenido de oxígeno, lo cual se ve reflejado en un PCI de 14,1 MJ/kg (ver Tabla 5), pero se ven desfavorecidos en un aprovechamiento energético por vías térmicas debido a su alto contenido de humedad (ver Figura 5).

Figura 6. Análisis último de la biomasa residual de cacao, fique y tomate.



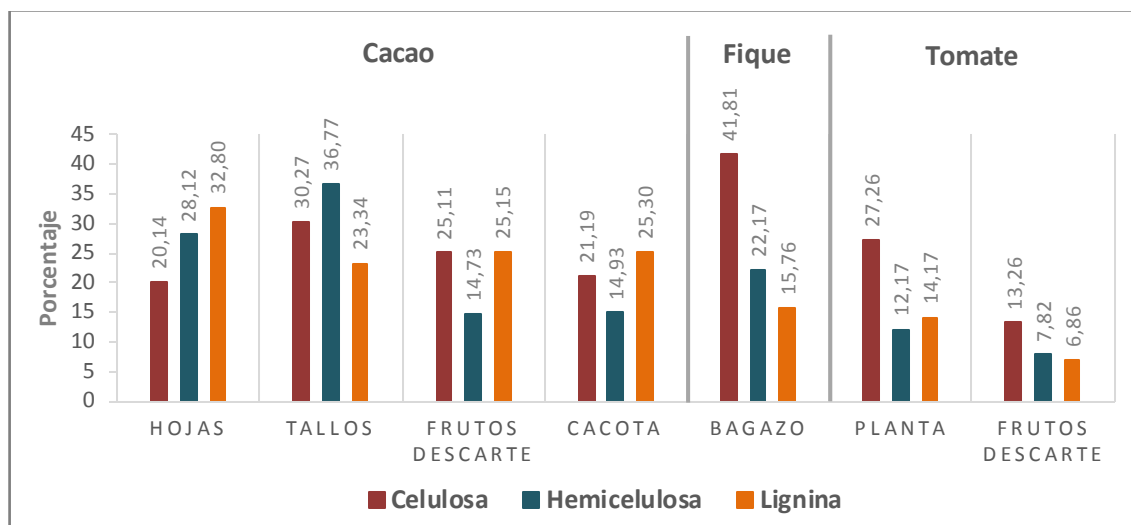
3.3.5 Relación C/N. De acuerdo a Habiba y col. (2009) la relación C/N (ver Tabla 4) del bagazo de fique se encuentra en el óptimo requerido para ser usado como sustrato en digestión anaerobia. En planta de tomate este parámetro es de 18,05 el cual es cercano al óptimo, mientras que residuos con alta degradabilidad del cultivo de cacao tienen valores extremos de hasta 80,73.

3.3.6 Azufre. En general, todas las biomásas residuales de cacao, fique y tomate presentan contenidos de azufre inferiores a 0,1%p, exceptuando la planta de tomate con 0,32%p, esta tendencia también se observó en los cítricos (ver Figura 3) y va de la mano con lo reportado por Telmo y col. [Telmo *et al.*, 2010].

El azufre en las biomásas objeto de estudio es favorable en digestión anaerobia, debido que menor contenido de éste en la biomasa reduce la producción de sulfuro de hidrógeno en el proceso [Quintero *et al.*, 2012].

3.3.7 Celulosa, hemicelulosa y lignina. El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en las biomásas residuales del cacao, fique y tomate presentan tendencias similares a valores reportados por otros estudios en residuos herbáceos y leñosos [Demirbas., 2004; Naik *et al.*, 2010].

Figura 7. Análisis estructural de la biomasa residual de cacao, fique y tomate.



De acuerdo a la Figura 7 las biomásas residuales del cacao tienen altos contenidos de lignina, en especial los tallos con 32,8%p. Aunque frutos y cacota no son residuos leñosos, también presentan lignina en el mismo rango que estas especies, siguiendo tendencia en valores reportados por Naik y col. (2010).

El bagazo de fique presenta alto contenido de celulosa, debido a esto y demás características fisicoquímicas mencionadas anteriormente (ver Figuras 5 y 6) puede ser utilizado como sustrato en digestión anaerobia [Quintero *et al.*, 2012].

En cuanto al cultivo de tomate, los frutos de descarte presentan bajos contenidos en celulosa, hemicelulosa y lignina, esto se debe a su gran contenido de extraíbles acuosos (ver Anexo C), lo anterior sumado a sus demás características fisicoquímicas (ver Figuras 5 y 6) reduce su posibilidad de aprovechamiento energético tanto por vías térmicas como por vías bioquímicas.

Adicionalmente, se observa que la planta de tomate presenta similitud con cáscaras de cítricos en cuanto a celulosa, hemicelulosa y lignina, indicando que esta biomasa podría ser apta en producción de bioetanol, además su relación C/N indica afinidad para producción de metano por digestión anaerobia. Sin embargo,

en España se han reportado estudios sobre descomposición térmica de este residuo [Encinar *et al.*, 2008; Font *et al.*, 2009].

3.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DE SEIS CULTIVOS EN SANTANDER

En la Tabla 5 se presenta el rendimiento del cultivo [t producto principal/ha sembrada], la oferta de residuo, el PCI y el PE calculado usando la ecuación 2. Se puede observar que el PCI de las especies de estudio oscila entre 12,8 y 16 MJ/kg, estos siguen tendencias similares a otros estudios realizados en Colombia a biomásas residuales agrícolas [Orduz, 2011].

Tabla 5. Potencial energético de seis cultivos en Santander.

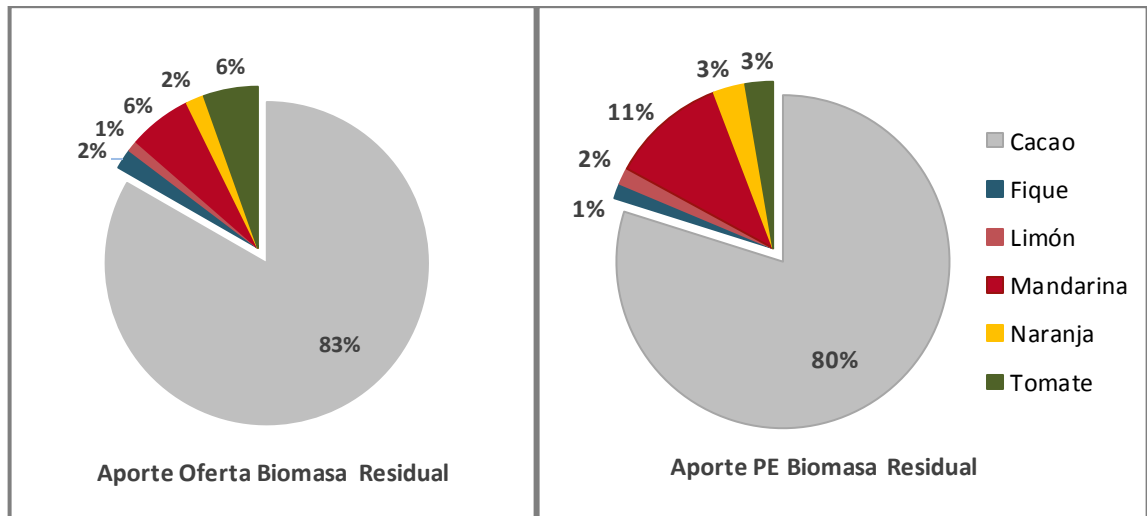
| Cultivo | Residuo | Rendimiento [t/ha] | Oferta residuo [kt/año] | PCI [kJ/kg] | PE residuo [TJ/año] | PE cultivo [TJ/año] |
|-----------------|------------------|--------------------|-------------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| Cacao | Hojas | 0,58 | 56,95 | 13856,13 | 537,16 | 1703,28 |
| | Tallos | | 60,59 | 13723,49 | 195,21 | |
| | Frutos descarte | | 126,32 | 14112,67 | 215,10 | |
| | Cacota | | 326,50 | 13959,88 | 476,30 | |
| Fique | Bagazo | 1,01 | 13,75 | 13798,83 | 26,22 | 27,85 |
| Limón | Poda | 17,32 | 1,35 | 15182,69 | 9,18 | 35,54 |
| | Cáscara | | 6,16 | 12876,83 | 19,43 | |
| Mandarina | Poda | 13,44 | 5,97 | 16038,30 | 45,22 | 222,49 |
| | Cáscara | | 37,29 | 15464,73 | 155,80 | |
| Naranja | Poda | 11,86 | 0,89 | 14441,08 | 7,86 | 56,30 |
| | Cáscara interior | | 8,22 | 13694,74 | 33,66 | |
| | Cáscara exterior | | 3,33 | 13806,38 | 13,81 | |
| Tomate | Planta | 39,94 | 21,10 | 14156,41 | 29,22 | 50,70 |
| | Frutos descarte | | 15,82 | 15408,00 | 18,68 | |
| PE TOTAL | | | | | | 2096,16 |

Se observa que las biomásas residuales de los seis cultivos presentan un PE de bastante variabilidad, donde el cultivo de cacao sobresale con PE de 1703,28 TJ/año, entre otros destacados en el departamento de Santander como el café con

1077,44 TJ/año; palma de aceite con 3401,65 TJ/año y caña panelera con 9677,63 TJ/año [Escalante *et al.*, 2010].

La Figura 8 muestra de forma comparativa el aporte al PE y la oferta de biomasa residual de cada uno de los cultivos objeto de estudio.

Figura 8. Aporte a la oferta y PE de biomasa residual de seis cultivos en Santander.



Según la figura 8, la oferta de la biomasa residual incide significativamente sobre el PE de cada cultivo. Por tanto, el cultivo de tomate, aunque presenta el 6% de biomasa residual a la oferta total, no aporta sino el 3% al PE total, esto consecuencia a su alto contenido de humedad (ver Figura 5) y justificado por el modelo matemático usado para determinar el PE (Ecuación 2) en donde la oferta de biomasa residual en base seca es una variable influyente.

Por otro lado, el cultivo de la mandarina tiene un aporte del 6%p sobre la oferta de biomasa residual y genera un aporte del 11%p en el PE total. En este caso, se puede afirmar que el área cosechada (ver Tabla 3), la cual afecta proporcionalmente la generación de producto principal, incide de forma directa sobre el PE del cultivo, siendo en este caso ocho veces mayor que el área cosechada del limón, y tres veces mayor que el área cosechada de la naranja.

4 CONCLUSIONES

Los cultivos de cacao, limón, mandarina, naranja, fique y tomate son representativos del departamento de Santander en cuanto a área sembrada y producción anual, éstos se muestrearon en plantaciones, encontrándose un total de 14 biomásas residuales y su correspondiente FR; destacándose la cacota de cacao con un FR de 15,25. Para los demás residuos este parámetro oscila entre 0,04 – 5,9.

A partir de las características fisicoquímicas, es de resaltar que residuos de podas de cítricos presentan humedades bajas, sumado a contenidos elevados de celulosa, hemicelulosa y lignina. En contraste, las cáscaras de cítricos tienen humedades altas y su lignina es de las más bajas. El bagazo de fique es el residuo con el mayor contenido de celulosa, además de ser una biomasa constituida casi en su totalidad por MV. Residuos del cultivo de cacao evidenciaron ser biomásas de altos contenidos de carbono y lignina. La planta de tomate presenta degradabilidad y relación C/N afines a un uso energético por digestión anaerobia. Los frutos de descarte de tomate evidencian bajos contenidos en celulosa, hemicelulosa y lignina; además de presentar elevada humedad y MV, reduciendo su posibilidad de aprovechamiento energético.

Este trabajo ofrece al sector industrial la información correspondiente al PCI para cada una de las biomásas estudiadas, mostrando similitud entre los valores encontrados. Se observó que hay biomásas que pese a su elevado PCI presentan poco aporte a la oferta de biomasa residual, esto sumado a un alto contenido de humedad causa la disminución de su PE como es el caso de los residuos de tomate. El potencial energético del cultivo del cacao se destaca con un valor de 1703,28 TJ/año siendo equivalente al 80% del PE total, consecuencia de su aporte a la oferta de biomasa residual.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM D 1103-60 (1977). *Method of test for alpha-cellulose in wood.*

ASTM D 1104-56 (1978). *Method of test for holocellulose in wood.*

ASTM D1106-96 (2007). *Standard test method for acid-insoluble lignin in wood.*

ASTM D 1110-84 (2007). *Standard test methods for water solubility of wood.*

ASTM D5865-12 (2012). *Standard test method for gross calorific value of coal and coke.*

ASTM D7582-10 (2010). *Standard test methods of coal and coke by macro thermogravimetric analysis.*

ABDULLAH N, GERHAUSER H. *Bio-oil derived from empty fruit bunches.* Fuel. 2008; 87: 2606-2613.

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

AZADI P, INDERWILDI O.R, FARNOOD R, KING D.A. *Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013; 21: 506-523.

BHATTACHARYA S.C, ELAURIA J.C, CASTRO M.L.Y, ELAURIA M.M, ABDUL P. *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in the Philippines.* Biomass and Bioenergy. 2005; 29: 191–198.

BOLUDA M, LÓPEZ A. *Production of bioethanol by fermentation of lemon (Citrus limon L.) peel wastes retreated with steam explosion.* Industrial Crops and Products. 2013; 41: 188-197.

- DEMIRBAS A. *Calculation of higher heating values of biomass fuels*. Fuel. 1997; 76: 43-434.
- DEMIRBAS A. *Combustion characteristics of different biomass fuels*. Progress in Energy and Combustion Science. 2004; 30: 219-230.
- CZERNIK S, BRIDGWATER A. V. *Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil*. Energy and Fuels. 2004; 18: 590-598.
- CUIPING L, CHUANGZHI W, YANYONGJIE, HUANG H. *Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China*. Biomass and Bioenergy. 2004; 27: 119-130.
- ENCINAR J.M, GONZÁLEZ J.F, MARTÍNEZ G. *Energetic use of the tomato plant waste*. Fuel Processing Technology. 2008; 89: 1193-1200.
- ESCALANTE H, ORDUZ J, ZAPATA H, CARDONA M.C, DUARTE M. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Ediciones UIS; 2010. p.123.
- FONT R, MOLTÓ J, GÁLVEZ A, REY M.D. *Kinetic study of the pyrolysis and combustion of tomato plant*. J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2009; 85: 268-275.
- 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.
- GARCÍA R, PIZARRO C, LAVÍN A.G, BUENO J.L. *Characterization of Spanish biomass wastes for energy use*. Bioresource Technology. 2012; 103: 249-258.
- GUNASEELAN V. N. *Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks*. Biomass and Bioenergy. 2004; 26: 389-399.

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.

Librería virtual agropecuaria. Disponible en: http://www.corpoica.org.co/sitioweb/libreria/libropreg.asp?id_libro=3&id_capitulo=5. Acceso el 14 de Diciembre de 2012.

MARÍN F.R, SOLER C, GARCÍA O, CASTILLO J, PÉREZ J.A. *By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres*. Food Chemistry. 2007; 100: 736-741.

MCKENDRY P. *Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass*. Bio Resource Technology. 2002; 83: 55-63.

NOGUÉS F.S, GARCÍA D, REZEAU A. *Energía de la biomasa*. Editor. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza; 2010. p. 142.

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.

PASANGULAPATI V, RAMACHANDRIYA K.D, KUMAR A, WILKINS R, JONES C.L, HUHNE R.L. *Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass*. Bioresource Technology. 2012; 114: 663-669.

PERMCHART W, KROUPRIANOV V.I. *Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized- bed combustor firing various biomass fuels*. Bioresource Technology. 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.

NAIK S, GOUD V.V, ROUT P.K, JACOBSON K, DALAI A.K. *Characterization of Canadian biomass for alternative renewable biofuel*. Renewable Energy. 2010; 35: 1624-1631.

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

SENTÍS I. *Metodología de laboratorio recomendada para el diagnóstico de salinidad y alcalinidad en suelos, aguas y plantas*. Editor: Universidad central de Venezuela. 1969. P.58

SHENG CH, AZEVEDO J.L.T. *Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data*. Biomass and Bioenergy. 2005; 28: 499-507.

TELMO C, LOUSADA J, MOREIRA N. *Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood*. Bioresource Technology. 2010; 101: 3808-3815.

UZUN B.B, APAYDIN-VAROL E, ATES F, ÖZBAY N, PÜTÜN A.E. *Synthetic fuel production from tea waste: Characterization of bio-oil and bio-char*. Fuel. 2010; 89: 176-184.

VAMVUCA D, ZOROGRAFOS D, ALEVIZOS G. *Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds*. Bioresource Technology. 2008; 99: 3534-3544.

WILKINS M. R, WIDMER W. W, GROHMANN K. *Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol*. Process Biochemistry. 2007; 42: 1614-1619.

WILKINS M. R. *Effect of orange peel oil on ethanol production by *Zymomonas mobilis**. Biomass and Bioenergy. 2009; 33: 538-541.

ANEXO A


CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS CULTIVO DE CACAO, CÍTRICOS, FIQUE Y TOMATE

A continuación en las Tablas 6, 7, 8, 9, 10 y 11 se presentan las características biológicas de los seis cultivos estudiados en el departamento de Santander.

- **CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE CACAO**

Tabla 6. Características biológicas de cacao. Fuente: Librería virtual agropecuaria.

| Cacao (Theobroma Cacao) | |
|--|--------------------|
| <p>Árbol caulífero (flores y frutos nacen directamente del tronco). Necesita humedad y calor. Hoja perenne que siempre se encuentra en floración. Requiere sombra, protección del viento y un suelo poroso. Altitud entre 1,000 a 1,400 msnm. Rango de pH entre 6,0 y 6,5.</p> | |
| Familia | Malvaceae |
| Variedad | Criollo |
| Origen | México |
| Residuos | Hojas |
| | Tallos |
| | Cacota |
| | Frutos de descarte |
| Tipo de cultivo | Permanente |
| Tipo de planta | Leñosa |




Fuente: Autor.

- **CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE FIQUE**

Tabla 7. Características biológicas de fique. Fuente: Librería virtual agropecuaria.

| Fique (Furcraea Cabuya Trel) | |
|---|------------------|
| Planta monocotiledónea de hábitos xerófilos. Sus hojas son de color verde y carecen de espinas. Se cultiva principalmente entre los 1500 y 2000 msnm. | |
| Familia | Agavaceae |
| Variedad | -- |
| Origen | América tropical |
| Residuo | Bagazo de fique |
| Tipo de cultivo | Permanente |
| Tipo de planta | Herbácea |



Fuente: www.veoverde.com

- **CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LIMÓN**

Tabla 8. Características biológicas de limón. Fuente: Librería virtual agropecuaria.

| Limón (Citrus Limonum Risso) | |
|--|-------------------|
| Árbol frutal perenne, pertenece al género botánico <i>citrus</i> , su fruto es de sabor ácido y extremadamente fragante. Necesita suelos permeables, poco calizos y un medio ambiente húmedo tanto en el suelo como en la atmósfera. Altitud entre 400 y 1500 msnm. Rango de pH entre 5,5-7,0. | |
| Familia | Rutáceas |
| Variedad | Tahiti |
| Origen | Sudeste Asiático |
| Residuos | Poda |
| | Cáscara y Semilla |
| Tipo de cultivo | Permanente |
| Tipo de planta | Leñosa |



Fuente: www.agronegociosperu.org

- **CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE MANDARINA**

Tabla 9. Características biológicas de mandarina. Fuente: Librería virtual agropecuaria.

| Mandarina (Citrus Reticulata) | |
|--|-------------------|
| <p>Árbol que pertenece al género botánico <i>citrus</i>, espinoso, de hoja perenne y flores aromáticas. Necesita suelos permeables, poco calizos y un medio ambiente húmedo tanto en el suelo como en la atmósfera. Humedad relativa entre 60 y 70%. Altitud entre 400 y 1300 msnm. Rango de pH entre 5,5 – 7,0.</p> | |
| Familia | Rutáceas |
| Variedad | Arrayana |
| Origen | Sudeste Asiático |
| Residuos | Poda |
| | Cáscara y Semilla |
| Tipo de cultivo | Permanente |
| Tipo de planta | Leñosa |




Fuente: www.frutas-hortalizas.com.

- **CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE NARANJA**

Tabla 10. Características biológicas de naranja. Fuente: Librería virtual agropecuaria.

| Naranja (Citrus Sinensis) | |
|--|-------------------|
| <p>Árbol frutal perenne, de porte mediano, del genero <i>citrus</i>, su fruto es dulce y de forma esférica. Necesita suelos permeables, poco calizos y un medio ambiente húmedo tanto en el suelo como en la atmósfera. Altitud entre 400 y 1500msnm. Rango de pH entre (5,5-7,0).</p> | |
| Familia | Rutáceas |
| Variedad | Criolla |
| Origen | Sudeste Asiático |
| Residuos | Poda |
| | Cáscara y Semilla |
| Tipo de cultivo | Permanente |
| Tipo de planta | Leñosa |



Fuente: thegreensshop.com

- **CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE TOMATE**

Tabla 11. Características biológicas de tomate. Fuente: Librería virtual agropecuaria.

| Tomate (<i>Solanum Lycopersicum</i>) | |
|--|--------------------|
| <p>Crece naturalmente de manera rastrera. Tallos delgados y frágiles. Planta de clima cálido y templado. Requerimiento de luz solar. Altitud entre 100 y 1500 msnm. Humedad relativa 65-70%. Rango de p H entre 5,9-6,5.</p> | |
| Familia | Solanáceas |
| Variedad | Chonto |
| Origen | Sudamérica |
| Residuos | Planta descarte |
| | Frutos de descarte |
| Tipo de cultivo | Transitorio |
| Tipo de planta | Herbácea |



Fuente: plantamedicinales.net

ANEXO B

PROTOCOLO MUESTREO

Inicialmente se inspeccionó la plantación y posteriormente se realizó la recolección de muestras utilizando el método de malla.

- **MÉTODO DE MALLA**

1. Consistió en abordar un área extensa de la plantación subdividida en cuadros con distanciamiento equitativo; en cada cuadro se realizó toma de la muestra, agrupándola en un lugar adecuado y evitando su contaminación con el suelo.
2. Posteriormente se procedió a realizar una malla de menor tamaño e ir seleccionando de diferentes puntos otra cantidad de muestra, esta operación se repitió las veces necesarias hasta recolectar 1,5 kg de muestra.
3. Las muestras se colocaron en bolsas plásticas herméticas almacenándolas en cavas para su conservación durante el transporte al laboratorio.

ANEXO C

BALANCES DE MASA MATERIAL LIGNOCELULOSICO

En la tabla 12 se presentan los balances de masa de material lignocelulósico, que comprenden extractivos acuosos, extractivos orgánicos, holocelulosa, celulosa y ceniza.

Tabla 12. Balances de masa de las biomásas residuales de seis cultivos en Santander.

| Cultivo | Residuo | Ext. Acuosos | Ext. Orgánicos | Holocelulosa | Lignina | Ceniza | Total |
|-----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| Cacao | Hojas* | 12,26 ± 0,65 | 4,59 ± 0,06 | 48,26 ± 0,7 | 32,8 ± 0,05 | 2,09 ± 0,00 | 100,00 |
| | Tallos | 8,64 ± 0,28 | 1,65 ± 0,15 | 67,04 ± 1,67 | 23,34 ± 1,19 | 2,39 ± 0,07 | 103,06 |
| | Frutos descarte | 28,54 ± 0,33 | 1,52 ± 0,23 | 42,09 ± 0,42 | 25,15 ± 0,73 | 0,97 ± 0,18 | 99,70 |
| | Cacota | 29,87 ± 0,67 | 4,54 ± 0,52 | 37,31 ± 1,57 | 25,30 ± 0,50 | 0,47 ± 0,26 | 98,33 |
| Limón | Poda* | 2,21 ± 0,72 | 18,07 ± 0,17 | 57,42 ± 0,36 | 21,02 ± 0,09 | 1,28 ± 0,00 | 100,00 |
| | Cáscara | 58,06 ± 0,06 | 2,60 ± 0,01 | 23,30 ± 0,22 | 12,89 ± 1,04 | 2,91 ± 0,33 | 99,76 |
| Mandarina | Poda* | 12,32 ± 0,46 | 3,07 ± 0,26 | 58,88 ± 0,99 | 24,87 ± 0,50 | 0,86 ± 0,00 | 100,00 |
| | Cáscara | 37,02 ± 0,37 | 9,11 ± 0,37 | 36,75 ± 0,46 | 13,27 ± 0,25 | 2,45 ± 0,04 | 98,60 |
| Naranja | Poda* | 11,32 ± 0,16 | 4,41 ± 0,29 | 57,72 ± 2,16 | 25,75 ± 0,50 | 0,80 ± 0,00 | 100,00 |
| | Cáscara interior | 42,53 ± 0,14 | 2,78 ± 0,06 | 38,09 ± 0,06 | 13,37 ± 0,33 | 2,26 ± 0,49 | 99,03 |
| | Cáscara exterior | 44,46 ± 0,19 | 2,98 ± 0,01 | 37,76 ± 0,51 | 10,65 ± 1,03 | 3,16 ± 0,25 | 99,01 |
| Tomate | Planta | 39,35 ± 0,77 | 7,24 ± 0,45 | 39,43 ± 0,59 | 14,17 ± 1,00 | 1,60 ± 0,31 | 101,79 |
| | Frutos descarte | 60,96 ± 0,18 | 4,91 ± 0,04 | 21,08 ± 0,47 | 6,86 ± 0,91 | 5,73 ± 0,23 | 99,54 |

*: Ceniza = 100 - ext. acuosos – ext. orgánicos – holocelulosa – lignina. Debido a contaminación de la muestra con el suelo.