

**APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LA BIOMASA
RESIDUAL OBTENIDA DE LA EXTRACCION DEL ACEITE DE PALMA EN
COLOMBIA**



INGRID JOHANA MIRANDA CAICEDO

OLGA LUCIA AMARIS RINCON



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009



**APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LA BIOMASA
RESIDUAL OBTENIDA DE LA EXTRACCION DEL ACEITE DE PALMA EN
COLOMBIA**

INGRID JOHANA MIRANDA CAICEDO

OLGA LUCIA AMARIS RINCÓN

Proyecto de grado para optar al título de:

Ingeniero Químico

Director

HUMBERTO ESCALANTE HERNANDEZ

Ingeniero Químico. Ph. D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

Llegar al final de una formación profesional exitosa como esta, es sin duda fruto de consagración personal, pero sería imposible sin la ayuda y el apoyo de un sin número de personas. Llegó el momento más oportuno para agradecer a quienes nos han ayudado y transmitido lo más puro de sus conocimientos.

Mencionarlos a todos sería una lista infinita, pero le expresamos con toda sinceridad y respeto a los profesores de la Universidad Industrial de Santander, al colectivo de personas del Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales CEIAM, que nos sería imposible llegar aquí hoy sin la ayuda y la colaboración de cada uno de sus miembros.

Nuestros agradecimientos y reconocimientos:

Al Ph. D. Ing. Humberto Escalante Hernández, nuestro tutor que ha sido para nuestro trabajo de grado un verdadero mentor en todos los sentidos, ejemplo de disciplina, sin su ayuda y colaboración sería casi imposible la realización de este proyecto.

A la Planta Extractora Bucarelia, por brindarnos su soporte técnico.

A todos aquellos que de una u otra forma nos apoyaron para que este proyecto fuera posible.

. A Dios, ante todas las cosas, porque ha sido, es y será mi guía.

*A mis padres, **Mariela y Martin**. Por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida, por enseñarme que todo se aprende y que todo esfuerzo es al final recompensa*

*A mi esposo **Edelberto**. Por darme la estabilidad emocional y sentimental; para poder llegar hasta este logro, que definitivamente no hubiese podido ser realidad sin ti. Gracias por ser parte de mi vida.*

*A mis hijos **Camilo A y Juan D**. que bajaron del cielo para hacerme la mujer más feliz y realizada del mundo.*

Olga Lucia

A Dios, por darme siempre la fortaleza y sabiduría para superar cualquier obstáculo.

*A mis padres **Ivis y Pedro** por creer siempre en mí y haberme dado su amor de manera incondicional.*

*A mi hermanita **Angélica** con mucho cariño.*

A mis amigas, amigos y personas que han aparecido en diferentes etapas de mi vida y que creen en mí.

Con mucho cariño para todos ustedes...

Ingrid Johana

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEORICO	20
1.1 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE PALMA DE PALMA	20
1.2 BIOMASA RESIDUAL BR	21
1.3 POTENCIAL ENERGÉTICO (PE)	22
1.4 MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DEL PE DE BRV	23
1.5 UTILIZACIÓN INDUSTRIAL DE LOS RAC Y RAI DE PALMA	24
2. METODOLOGIA	27
2.1 RECOPIACIÓN y ANALISIS DE LA INFORMACIÓN	27
2.1.1 Áreas y Rendimientos del cultivo.	27
2.1.2 Factor de generación de residuos.	28
2.1.3 Contenido de Humedad y Poder Calorífico	28
2.1.3.1 Caracterización	28
2.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL	29
2.3 ESTUDIO TECNOLÓGICO	30
2.3.1 Unidad de cogeneración utilizando fibra de palma como combustible.	30
2.3.2 Unidad de gasificación de fibra de palma africana	31
2.4 TECNOLOGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BR DE PALMA DE ACEITE	32
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	33
3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	33
3.1.1 Áreas y Rendimiento del cultivo.	33
3.1.2 Factor de generación de residuos.	34

3.1.3 Contenido de Humedad y Poder Calorífico	35
3.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGETICO	36
3.3 ANÁLISIS DE TECNOLOGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BR DE PALMA DE ACEITE	38
4. GASIFICACION Vs COGENERACION	43
4.1 CRITERIO AMBIENTAL	43
4.2 CRITERIO TECNOLÓGICO	43
4.3 CRITERIO ECONÓMICO	44
CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFIA	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de la Metodología Aplicada.	27
Figura 2. Esquema tipico de generación de una planta moderna de aceite de palma.	31
Figura 3. Sistema de Gasificación de Residuos de Palma de Aceite.	32
Figura 4. Simulación del sistema de Cogeneración (HYSYS 3.2)	39
Figura 5. Simulación del Sistema de Gasificación (HYSYS 3.2)	41

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Parámetros de Caracterización de la BRV	28
Tabla 2. Potencial Energético departamental de los RPA frente a otros tipos de compuestos energéticos.	36
Tabla 3. PE de los residuos de palma de aceite en Colombia 2006	38
Tabla 4. Condiciones de entrada de fibra a los sistemas	38
Tabla. 5 Condiciones del vapor en las distintas corrientes en el sistema de cogeneración de RPA.	40
Tabla 6. Condiciones del gas a la salida del gasificador	42
Tabla 7. Gases producidos en la de combustión y gasificación de RPA	43
Tabla 8. Condiciones de proceso en la combustión y gasificación de los RPA	43
Tabla 9. Variables básicas del análisis económico.	45
Tabla 10. Equipos principales de las tecnologías de cogeneración y gasificación de RPA.	45

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Producción municipal de aceite de palma en el año 2006	33
Grafica 2. Cantidad de Biomasa Residual de la extracción de Aceite de Palma en Colombia 2006	34

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. MAPA DEL PE DE LOS RESIDUOS DE PALMA DE ACEITE	49
ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE PALMA DE ACEITE	50
ANEXO 3. ORDEN JERÁRQUICO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEPARTAMENTAL DE ACEITE DE PALMA 2006	51

RESUMEN

TITULO: APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL OBTENIDA DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA EN COLOMBIA.

AUTORES: MIRANDA CAICEDO, Ingrid Johana., AMARIS RINCÓN, Olga Lucia.

PALABRAS CLAVES: Palma de Aceite, Potencial Energético, Biomasa Residual, tecnologías.

La demanda actual y el incremento en los costos de la energía precisan la búsqueda de procesos más eficientes y limpios para el aprovechamiento energético de la biomasa.

Colombia no es ajena a la problemática energética; en el año 2006 la capacidad instalada de generación con energías renovables era de 0,35 MW. En el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010, se traza lograr aumentar la capacidad instalada de generación con energías alternativas hasta 6 MW y así sustituir la generada con combustibles fósiles. En Colombia en el año 2006 se produjeron 1'607.771,64 Ton de Residuos de Palma de Aceite que reemplazarían 537.320 Tec ò 376.124 Tep, lo que conlleva desde el punto de vista económico a minimizar los costos de combustibles para generación de energía ya que se sabe que los residuos de palma de aceite se desechan en grandes volúmenes en las plantas extractoras En Colombia en el año 2006 se produjeron 1'607.771,64 Ton de RAP que reemplazarían 537.320 Tec ò 376.124 Tep, lo que conlleva desde el punto de vista económico a minimizar los costos de combustibles para generación de energía ya que se sabe que los RAP se desechan en grandes volúmenes en las plantas extractoras de todo el país.

.Dado que el país cuenta con excelentes recursos de biomasa generada de la extracción de aceite de palma surge la necesidad de conocer su Potencial Energético y proponer alternativas para su aprovechamiento. Se encontró que la Cogeneración es la única tecnología utilizada para el aprovechamiento energético de los residuos de la extracción de aceite de palma en Colombia. Se propone una comparación de un sistema de gasificación como una nueva tecnología para el procesamiento de residuos de la extracción de aceite de palma en Colombia con el actual sistema utilizado

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director PhD. Humberto Escalante Hernández.

ABSTRACT

TITLE: ENERGY USE OF THE RESIDUAL BIOMASS OBTAINED FROM THE EXTRACTION OF PALM OIL IN COLOMBIA.

AUTHORS: MIRANDA CAICEDO, Ingrid Johana., AMARIS RINCÓN Olga Lucia.

KEY WORDS: Palm Oil, Potential Energy, Residual Biomass, technologies.

The current demand and increasing energy costs require the search process more efficient and clean use of biomass energy.

Colombia is no stranger to energy problems in 2006 the installed generating capacity from renewable energies was 0.35 MW. In the National Development Plan 2006-2010, outlines the challenges of increasing the installed generating capacity with up to 6 MW of energy and replace fossil fuel generated. In Colombia in 2006 was 1'607 771.64 tons of palm oil wastes that would replace 537,320 ò Tec Tep 376,124, resulting from the economic point of view to minimize the costs of fuels for power generation as it know that the palm oil waste are disposed of in large volumes in the extraction plants in Colombia in 2006 was 771.64 tons of RAP 1'607 to replace 537,320 ò Tec Tep 376,124, resulting from the economic point of view to minimize the costs of fuels for power generation since it is known that the RAP are discarded in large volumes in the extraction plants throughout the country.

Since the country has excellent biomass resources generated from the extraction of palm oil comes the need of their energy potential and to propose alternatives to its use. It was found that the CHP is the only technology used for the energy use of waste from the extraction of palm oil in Colombia. We propose a comparison of a gasification system as a new technology for processing waste from the extraction of palm oil in Colombia with the current system

* Thesis

** Faculty of Physico-Chemical Engineering. Chemical Engineering School. Director PhD. Humberto Escalante Hernández.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad un 87% de la energía proviene de fuentes no renovables [18]. En el año 2005 el consumo mundial de energía primaria llegó a los 465.2 cuatrillones de BTU (alcanzando una tasa de crecimiento promedio anual del 1.9% en los últimos 10 años), con una participación del 5.9% de las fuentes renovables [18]. Los elevados precios en el consumo de la energía, así como las consecuencias que se derivan del calentamiento global, evidencian la necesidad de buscar nuevas formas de energía, llámese solar, eólica o la contenida en la biomasa. Esta tendencia global, impone a los países la obligación perentoria de conocer de primera mano los recursos energéticos renovables con que cuentan.

Colombia no es ajena a la problemática energética; en el año 2006 la capacidad instalada de generación con energías renovables era de 0,35 MW [19]. En el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010, se traza lograr aumentar la capacidad instalada de generación con energías alternativas hasta 6 MW y así sustituir la generada con combustibles fósiles [19].

La biomasa tiene bajo contenido de carbono y azufre en comparación a otros combustibles de origen fósil, un elevado contenido de oxígeno y de compuestos volátiles responsables de su poder calorífico. Así mismo se supone que el aporte al calentamiento global por las emisiones de Dióxido de carbono (CO₂) en la combustión de la biomasa es neutral, debido a que este compuesto fue tomado por los cultivos energéticos durante su desarrollo y crecimiento, y por ende su regreso a la atmósfera corresponde a un balance cero [18 UPME, 2003]. El anterior planteamiento ubica a la biomasa como una alternativa de producción de energía-limpia, convirtiéndola en una fuente atractiva para ser aprovechada energéticamente.

Colombia es un país agrícola y de las 4.058.471 Hectáreas (Ha) sembradas, 200 mil están dedicadas al cultivo de palma de aceite [20 MIN. AGRICULTURA]. En

los próximos años se prevé un incremento significativo en el cultivo de palma, quizá debido al incentivo económico por parte del gobierno para estimular la producción de biocombustibles, en este caso el biodiesel.

Dado que Colombia cuenta con excelentes recursos de biomasa generada de la extracción de aceite de palma, pues ocupa el quinto lugar como productor a nivel mundial, es evidente que también posee una cantidad importante de los desechos de este proceso. El objetivo del presente trabajo es evaluar el Potencial Energético (PE) de los tres principales residuos sólidos de la extracción del aceite de palma: la fibra, el cuesco y el raquis; definir cuál de ellos tiene mayor PE y proponer una alternativa tecnológica para su aprovechamiento.

1. MARCO TEORICO

1.1 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE PALMA DE PALMA

Malasia e Indonesia son los más grandes productores de aceite de palma en el mundo, y ellos han hecho diversos estudios sobre el aprovechamiento energético de los residuos de la extracción del aceite de palma. En el año 2000 T.M.I. Mahlia, M.Z. Abdulmuin, T.M.I. Alamsyah, D. Mukhlisien [5] realizaron un estudio sobre el uso de la fibra y la cáscara obtenidos de la transformación de aceite de palma. En el año 2002 Z. Husain, Z.A. Zainal, M.Z. Abdullah [6] expusieron un análisis de la biomasa residual basado en sistemas de cogeneración en extractoras de aceite de palma. El estudio se hizo en siete extractoras de aceite de palma en el estado de Perak Malaysia. El objetivo principal del estudio fue determinar las eficiencias para la caldera y turbina, factor de utilización de la energía, la tasa de extracción de aceite y la tasa de calor / potencia, para diversas extractoras de aceite de palma que trabajan en condiciones similares y adoptando los mismos procesos. En el 2005 S. Prasertsana, B. Sajjakulnukitb [7] exponen un estudio sobre energía de la biomasa y biogás en Tailandia. En este trabajo se manifiesta, la situación energética de la biomasa y el biogás en Tailandia.

En Colombia se realizó un estudio sobre el aprovechamiento energético de los residuos de la industria de la palma. En el año 2007, F.R.P. Arrieta, F.N. Teixeira, E. Yáñez, E. Lora, E. Castillo [8] presentaron un artículo sobre el potencial de cogeneración en la industria de aceite de palma colombiana. En este trabajo se muestran los resultados del estudio acerca del potencial de la cogeneración para tres plantas extractoras de aceite de palma representativas situadas en dos importantes regiones productoras en Colombia (Sur América).

1.2 BIOMASA RESIDUAL BR

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz); del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego [14].

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía; transformándola, por ejemplo: en combustibles líquidos o gaseosos, los cuáles son más convenientes y eficientes. Así, aparte de la combustión directa, se pueden distinguir otros dos tipos de procesos: el termoquímico y el bioquímico.

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas; pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo al consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, algunos de los procesos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa. Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura compuesta en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente.

Los residuos agrícolas son clasificados en dos grupos: a) Residuos Agrícolas provenientes de las Cosechas (RAC) y b) Residuos provenientes del procesamiento industrial de los productos agrícolas (RAI).

Los RAI generados por la palma de aceite son: el raquis (racimo vacío de la fruta), la fibra, el cuesco (pericarpio de la fruta), y los lodos. Los RAC comprenden las

hojas y troncos que se generan cuando se talan las palmas que cumplen su periodo productivo, para dar paso a otra generación de plantas, en esta etapa se produce un volumen importante de biomasa, a la cual se le puede dar un uso que le dé un valor agregado a esta agrocadena.

1.3 POTENCIAL ENERGÉTICO (PE)

China, India, Filipinas, Sri Lanka y Tailandia han realizado estudios para evaluar el Potencial Energético (PE) de la Biomasa Residual Vegetal (BRV) agrícola, del estiércol animal y de los residuos sólidos urbanos [16]. Los resultados de estas investigaciones, han permitido realizar proyecciones sobre la disponibilidad de Potencial Energético hasta el año 2010.

En España se ha cartografiado la producción energética potencial de los residuos agroforestales de la región de Navarra, con el propósito de identificar zonas posibles para la ubicación de plantas de aprovechamiento de biomasa, [17]. En Estados Unidos se elaboró el atlas de los recursos energéticos renovables, contabilizando el P.E. de la biomasa residual, tomando como muestra estiércol animal, residuos forestales y de cosecha de cultivos como el maíz, el trigo y la cebada. [21].

En Suramérica, Brasil se ha interesado en la evaluación del PE de los residuos agrícolas. Ejemplo de esto es el estudio hecho para el estado de Paraná; con el fin de buscar fuentes alternativas de energía que suplan algunas necesidades energéticas que tiene esta región [22].

En Colombia se realizó la estimación del potencial del país para la implantación de cultivos para producción de energía y producción de residuos de biomasa, como combustible o para producir combustibles. Y se hizo un análisis comparativo de la utilización de biomasa, competitividad frente a otros energéticos para las diferentes regiones del país [18].

1.4 MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DEL PE DE BRV

La cuantificación de la energía presente en los residuos de la palma de aceite se determina mediante el desarrollo de un modelo matemático que involucre la masa total de residuo seco y su Poder Calórico Inferior (PCI). La masa total del residuo seco es función del área cosechada, el rendimiento del cultivo, el factor del residuo y el contenido de humedad. La metodología para evaluar el PE de los residuos de palma de aceite, puede ser extensible a los demás cultivos. Conocer el PE de los residuos procedentes de la extracción de aceite de palma en Colombia, ofrece al país una referencia para la planeación de su disponibilidad y posible aprovechamiento con propósitos energéticos.

Esta investigación se realizó dentro del proyecto “Elaboración *del Atlas del Potencial Energético de la Biomasa en Colombia*”

Para evaluar el PE de los residuos agroindustriales de la producción de aceite de palma en Colombia, se utiliza un modelo matemático [13] en función de: “la masa del residuo” y de “su contenido energético”, así:

$$PE = Masa_{Residuo-Seco} \cdot ContenidoEnergético_{Residuo}$$

En donde la masa de residuo seco es una relación directa del área sembrada y el rendimiento del cultivo, y el contenido energético es función del factor de generación de residuo, el factor de humedad y el poder calórico inferior de cada residuo de Palma de aceite. Con base en esto se planteó una ecuación (1) para evaluar el P.E individual de los residuos agroindustriales identificados para el cultivo de la palma (raquis, fibra, cuescos), ofreciendo una información más detallada y precisa, que puede ser utilizada en la ejecución de los planes de aprovechamiento energético de los residuos de palma.

Ecuación (1). Potencial de Cada Residuo

$$(1) \quad PE_{RAI} = A \cdot Re \cdot f_{p-e} \cdot f_h \cdot PCI$$

Ecuación (2). Potencial de todos los Residuos

$$(2) \quad PE_{RAC-RAI} = A \cdot Re \cdot \sum_i^n f_{p-e} \cdot f_h \cdot PCI_i \cdot K$$

En donde:

PE = Potencial Energético Biomasa Residual (TJ / año).

A = Área cultivada, representada por las hectáreas cosechadas del cultivo principal (Ha) en un año ó en un mes.

Re = Rendimiento del cultivo en función del producto principal (Ton de producto principal/ Ha sembradas).

f_{p-e} = Factor de generación de residuo energético, es una relación entre la masa de residuo con respecto a la masa de producto principal. (Ton de residuo/ Ton de producto principal).

f_h = Factor de humedad. 100 - %humedad. (Ton residuo seco/Ton de residuo húmedo).

PCI_i = Poder Calórico Inferior. Dado en KJ/ Ton de residuo seco.

$K = 0,000001$, Factor de conversión a TJ

Esta metodología de cálculo y los valores estimados con ella, brindan al país información necesaria, para la toma de decisiones sobre la planeación de fuentes energéticas renovables, y sirve como punto de partida para proponer formas de aprovechamiento energético.

1.5 UTILIZACIÓN INDUSTRIAL DE LOS RAC Y RAI DE PALMA

Los RAC y RAI pueden ser aprovechados como combustible sólido para la conversión energética, por medio de procesos termoquímicos o generadores de combustibles y biogás mediante procesos biológicos [15].

Estos residuos en su mayoría son utilizados como combustible de calderas, como abono orgánico o en lagunas de tratamiento para el caso de los lodos; puesto que son los más importantes por su fácil y continua disponibilidad.

En Malasia e Indonesia hay más de un centenar de plantas extractoras de aceite de palma en donde se logra un gran ahorro mediante el uso de la cascara y la fibra como combustible para generación de electricidad en la industria [5].

En Colombia, los sub-productos de la palma de aceite se utilizan sólo parcialmente. La fibra y el cuesco se utilizan para generar vapor de agua para el proceso. En algunas plantaciones se utiliza también para generar energía eléctrica. [3]

En una planta procesadora más del 70% del desecho de materias primas es descartado en forma de fibra, cascara, racimos y lodos. Se han sugerido muchas formas de convertir estos desechos en productos útiles; tales como conversión de la cascara en carbón activado, el empleo de la fibra en la fabricación de tablas y colchones o como alimento para animales, y la conversión de los racimos vacíos en abonos potásicos. [11]

Mediante el uso de diferentes tipos de tecnologías de transformación es posible obtener combustibles en forma sólida, líquida y gas a partir de cualquier tipo de biomasa. Entre estas tecnologías se destacan los procesos bioquímicos, con la digestión anaerobia principalmente, los procesos fisicoquímicos y los procesos termoquímicos.

Dentro de los procesos de transformación termoquímicos se cuenta con la pirolisis o degradación térmica de la biomasa, la gasificación, la combustión y la licuefacción. Este último proceso tiene como objetivo maximizar la producción de líquidos a partir de la biomasa, con el uso de elevadas presiones durante el procesamiento. Hasta la fecha, se ha mostrado inviable económicamente.

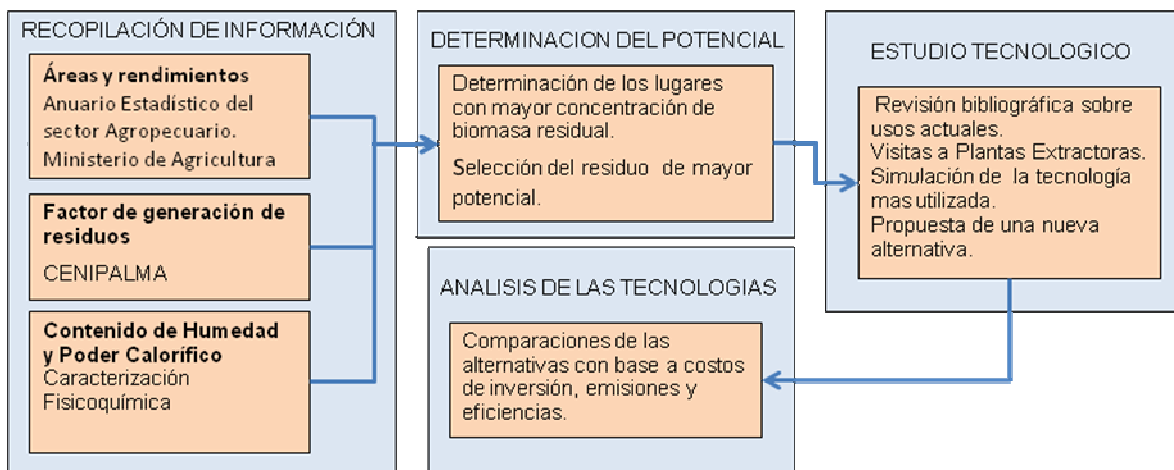
La pirolisis es un proceso de transformación básico, pues por un lado es posible obtener a partir de éste productos sólidos, líquidos o en forma de gas; y por otro lado es el primer paso en los procesos de gasificación y combustión. La gasificación puede ser interpretada como un proceso de pirolisis que busca maximizar la fracción de gas como producto del proceso. La combustión se realiza en una atmósfera reactiva con aire (u oxígeno) y arroja como producto principal calor. Con el uso de procesos adicionales o secundarios es posible obtener nuevos productos a partir del sólido, líquido o en forma de gas; obtenido anteriormente en la transformación termoquímica. Como ejemplo, es posible obtener carbón activado, briquetas combustibles, gas de síntesis, combustibles y energía eléctrica. Los tipos básicos de reactores que se emplean en estos procesos se clasifican en reactores de lecho fijo, móvil y fluidizado. [2]

Uno de los principales problemas en las plantas extractoras de aceite de palma es la acumulación de grandes volúmenes de residuos, que dificultan su almacenamiento, transporte y comercialización. Otra de las tecnologías de transformación de mucha utilidad es la fabricación de pellets. Los pellets son uno de los principales productos de la compactación de la biomasa. Generalmente para su fabricación se utilizan materiales residuales de las industrias de transformación de la madera tales como virutas, serrines, polvo de lijado, etc. También es posible utilizar residuos de poda agrícola y de limpieza forestal. En este caso se requiere una serie de tratamientos previos de los residuos como el secado, astillado y/o molienda debido a que las operaciones de peletizado necesitan unas condiciones de humedad y granulometría especiales [4]

2. METODOLOGIA

El desarrollo del presente estudio se llevo a cabo en cuatro grupos de tareas o actividades, las cuales se realizaron en una secuencia lógica que permitió realizar análisis continuos de la calidad de la información y los resultados obtenidos. La Figura 1, muestra el esquema metodológico general.

Figura 1. Diagrama de flujo de la Metodología Aplicada.



2.1 RECOPIACIÓN y ANALISIS DE LA INFORMACIÓN

2.1.1 Áreas y Rendimientos del cultivo.

La información referente a áreas cosechadas, volúmenes de producción y rendimiento del cultivo de palma de aceite, fue suministrada por el **Ministerio de Agricultura de Colombia**, en una base de datos alfanumérica con la cual se desarrolló el Anuario Estadístico del Sector Agropecuario 2006, esta información está disponible a nivel municipal, departamental y en periodo mensual o anual.

El Área y los rendimientos del cultivo sirven para calcular la producción departamental y municipal.

2.1.2 Factor de generación de residuos.

Con el apoyo de las federaciones y centros de investigación del sector palmero: Centro de Investigación en Palma de Aceite **CENIPALMA**, se identificó el factor de producción de los residuos de la agrocadena. Este factor es función del genotipo de la especie, las condiciones edafoclimáticas de desarrollo del cultivo y la cultura agrícola. Con el factor de residuo se calculó la cantidad de cada uno de los residuos a nivel nacional

2.1.3 Contenido de Humedad y Poder Calorífico

Debido a la variación en las condiciones edafoclimáticas de las zonas dedicadas al cultivo de palma de aceite, las características fisicoquímicas y energéticas como el análisis elemental que posee un residuo, pueden ser diferente en cada una de ellas. Por lo cual, se realizó una caracterización de los residuos de interés, mediante un muestreo planificado, de tal forma que los resultados sean representativos de las condiciones de clima y suelo de las regiones, en las cuales se desarrolla dicho cultivo.

2.1.3.1 Caracterización

En la Tabla 1, se observan los parámetros definidos para la caracterización fisicoquímica de la Biomasa Residual Vegetal [12].

Tabla 1. Parámetros de Caracterización de la BRV

PARÁMETROS					
Análisis Básico	Análisis Próximo en base seca	Análisis Ultimo en base seca	Análisis Bromatológico	Análisis Energético	Otros Parámetros
Humedad (%)	Material Volátil MV (%)	Carbono Orgánico total (%)	Grasa (%)	Poder Calórico Inferior (KJ/Kg)	Sólidos Volátiles totales SVT (%)
Sólidos Totales (%)	Carbono Fijo CF (%)	Hidrogeno (%)	Proteína (%)		Materia Orgánica (%)
	Cenizas (%)	Oxigeno (%)	Celulosa (%)		Relación C/N (adimensional)
		Azufre (%)	Hemicelulosa (%)		
			Lignina		

El método de muestreo utilizado, consistió en realizar una estratificación por producción, es decir se seleccionó a nivel nacional el municipio con mayor producción para cada especie, y a partir de esta selección se toma como unidad de muestreo la planta de beneficio o el municipio con mayor producción.

Se empleó las técnicas de cuarteo y/o zigzag para la toma de muestras. Se tomaron en total dos muestras de cada residuo con su respectivo duplicado, las cuales fueron debidamente preservadas, empacadas y enviadas al laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales CEIAM [12] para el análisis de los parámetros fisicoquímicos.

El Poder Calórico Inferior PCI se determinó en laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica UIS, utilizando una bomba calorimétrica y siguiendo la norma ASTM D3286-73e y la ISO1928-76.

2.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL

Los residuos que se utilizaron para calcular el PE fueron la fibra, el cuesco y el raquis debido a que el estudio se limitó a los RAI sólidos.

El cálculo del PE se realizó para cada residuo con el modelo descrito en la ecuación (1) para todos los departamentos y municipios reportados en la base estadística nacional del Ministerio de Agricultura en el año 2007. Se determinaron aquellos lugares con mayor concentración de BR de palma de aceite y se identificaron los municipios con mayor aporte al PE.

Posteriormente se realizó la selección del residuo con mayor PE a nivel nacional, teniendo en cuenta las variables más influyentes de las cuales depende este potencial.

Se construyó una matriz en Excel con los parámetros requeridos por el modelo matemático y se calculó el Potencial Energético de Los RPA a nivel departamental y municipal en el año 2006.

2.3 ESTUDIO TECNOLÓGICO

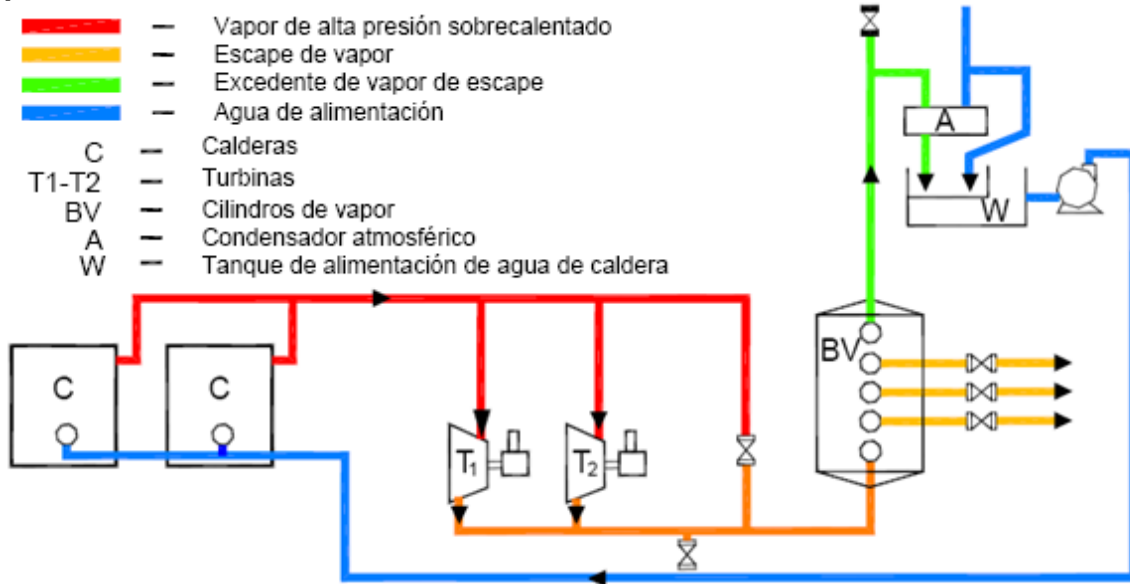
Basado en una revisión bibliográfica y visitas a algunas plantas extractoras de aceite de palma (Palmas Oleaginosas Bucarelia, Palmas Oleaginosas Las Brisas y Promociones Agropecuarias Monterrey) en el municipio de Puerto Wilches, Santander; se encontró que la Cogeneración es la única tecnología utilizada para el aprovechamiento energético de los residuos de la extracción de aceite de palma en Colombia y el mundo [8]. Sin embargo se propone una comparación de un sistema de gasificación como una nueva tecnología para el procesamiento de residuos de la extracción de aceite de palma en con el actual sistema que utiliza la caldera.

2.3.1 Unidad de cogeneración utilizando fibra de palma como combustible.

En el desarrollo del sistema de cogeneración, se tuvieron en cuenta los requerimientos de vapor y energía eléctrica de la planta extractora. Por cada tonelada de Racimo de Fruta Fresca RFF se van a producir 120 Kg de fibra. Tomando como referencia la planta extractora Bucarelia ubicada en el municipio de Puerto Wilches se tiene que para una capacidad de procesamiento promedio de 40 ton/h de RFF se producen 4800 Kg de fibra/h disponible para llevar a la caldera.

Con el software de diseño Hysys 3.2 se realizó la simulación de un ciclo de generación en una planta moderna de aceite de palma ajustando las corrientes de entrada, composición de la fibra y condiciones de operación a un combustor que representa la entrada de calor a dos calderas. El diseño propuesto, cuenta con dos turbinas y un tanque de alimentación del agua para las calderas. La siguiente figura muestra el diagrama de flujo base para simulación.

Figura 2. Esquema típico de generación de una planta moderna de aceite de palma.



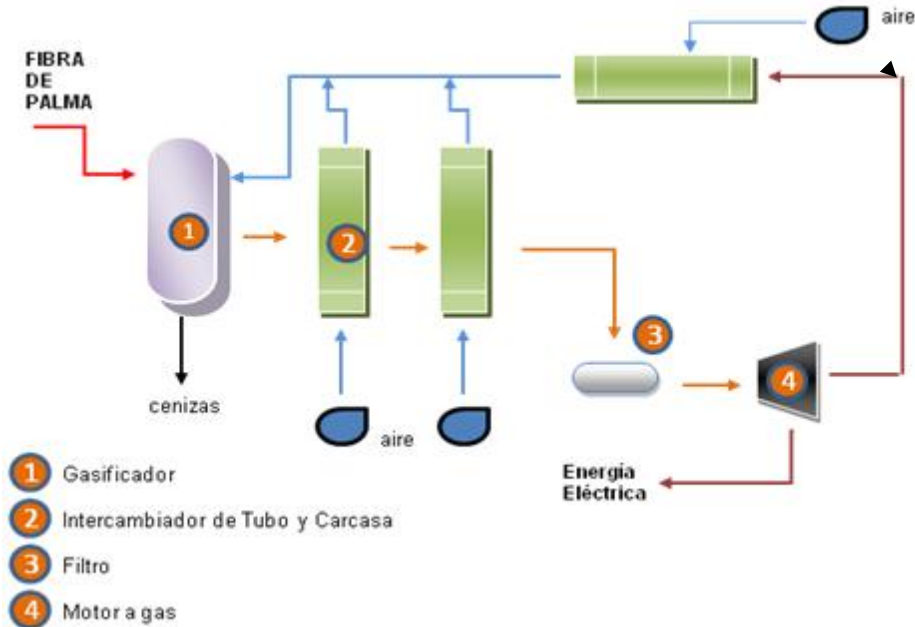
2.3.2 Unidad de gasificación de fibra de palma africana

En cuanto al desarrollo del sistema de gasificación los componentes básicos en el sistema de gasificación de la biomasa incluyen gasificador, unidad de purificación, IC motor y generador. Para producir el gas de síntesis de la combustión de la biomasa, se aplica constantemente alta temperatura al gasificador.

La elección del gasificador depende del combustible. Para las fibras es conveniente un gasificador de lecho fluidizado que para biomasa se opera a temperaturas de 800 a 900°C. La unidad de purificación consta de un dispositivo para filtrar el gas de síntesis.

Con el software de diseño Hysys 3.2 se realizó la simulación del ciclo ajustando las corrientes de entrada, composición del alimento y condiciones de operación a un reactor de conversión que aparenta el comportamiento del gasificador.

Figura 3. Sistema de Gasificación de Residuos de Palma de Aceite.



2.4 TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BR DE PALMA DE ACEITE

La selección de la tecnología más apta, para el aprovechamiento energético de la biomasa residual de la Palma, se llevo a cabo en primer término sobre un análisis de los parámetros involucrados en cada una de ellas, y en segundo lugar sintetizando esta información a manera de comparación en la que se pueda concluir la tecnología más eficiente.

Los criterios para comparar las dos tecnologías fueron el impacto ambiental, el aspecto tecnológico y económico.

Teniendo en cuenta la tasa de producción de RPA, se propone ubicar la planta en la Extractora Bucarelia ubicada en el municipio de Puerto Wilches Santander, ya que está cuenta con el área apropiada para la instalación y montaje de la planta, y una buena distribución de redes de energía eléctrica, agua y alcantarillado, necesarios para su buen funcionamiento.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

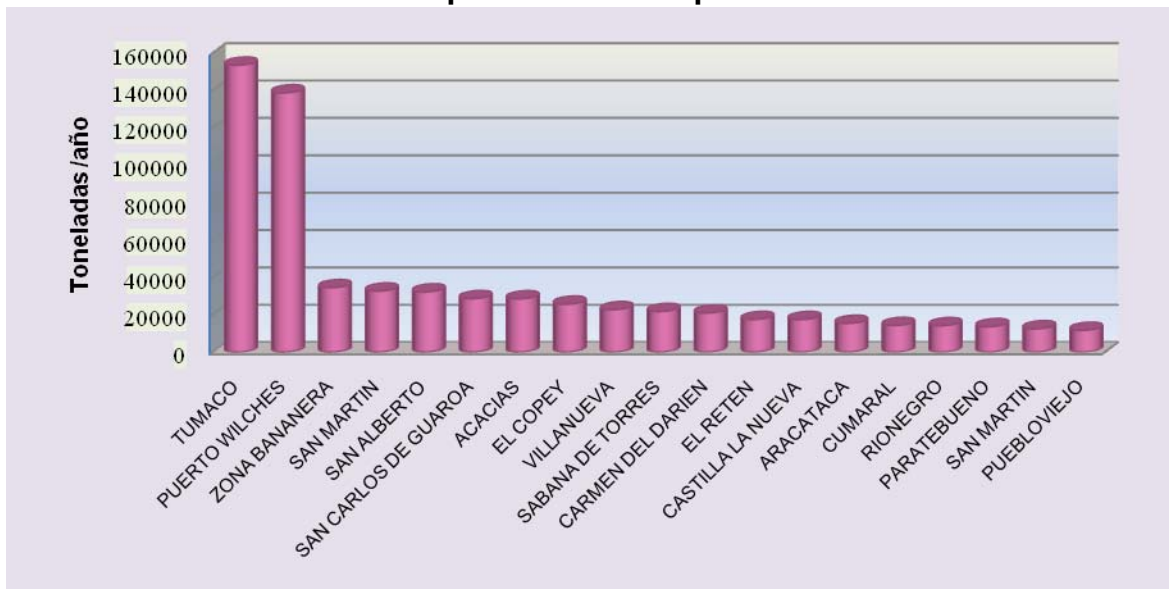
3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

3.1.1 Áreas y Rendimiento del cultivo.

La producción nacional de aceite de palma es procesada en 56 plantas de beneficio distribuidas en 12 departamentos [9], que en conjunto produjeron 6'937.253 Toneladas de Aceite de Palma (Producto Principal) en el periodo 1995 – 2006, obtenidas de la materia prima cosechada en 2'080.527 Hectáreas[10].

En la grafica 1, se muestran los municipios más representativos de acuerdo a la producción de Aceite de Palma en Colombia reportada en el año 2006.

Grafica 1. Producción municipal de aceite de palma en el año 2006



Como se observa en la grafica 1, el municipio de Tumaco produjo 153.600 Ton de Aceite de Palma en el año 2006, esto se debe a que este municipio cuenta con 7 plantas extractoras que procesan la materia prima de 32.000 Ha sembradas de Palma de Aceite. Por lo anterior Tumaco se posiciona como el mayor productor a nivel nacional.

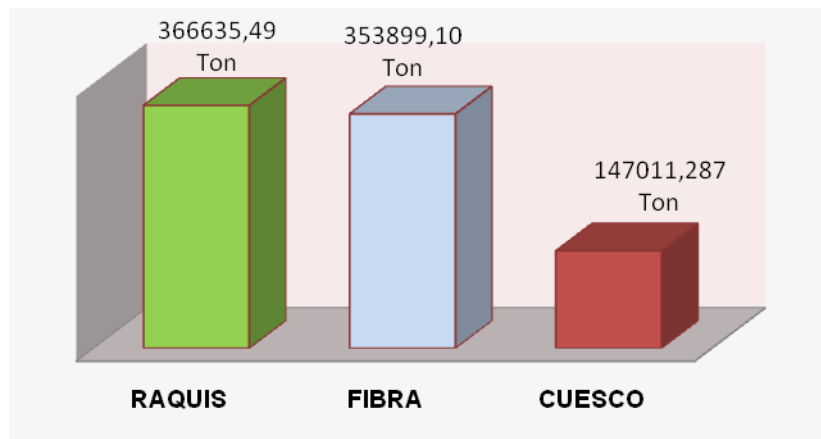
El Municipio de Puerto Wilches reportó una producción de 138.805 Ton de Aceite de Palma, a pesar de que es municipio que tiene la mayor superficie cultivada (35.500 Ha) en el país, solo cuenta con 4 plantas extractoras lo que en ocasiones causa acumulaciones de fruto y muchas veces deterioro de el mismo por el tiempo de espera para su procesamiento.

Los municipios restantes, mostrados en la grafica 1, tienen producciones entre 35.000 – 11.000 Toneladas de Aceite de Palma; esto se debe a que poseen pequeñas plantaciones (no mayores de 10.000 Ha) y cuentan con plantas de beneficio de pequeña generación.

3.1.2 Factor de generación de residuos.

En la grafica 2, se relaciona la cantidad de residuo generado a nivel nacional, durante el procesamiento de palma de aceite en el año 2006 (último reportado) [10].

Grafica 2. Cantidad de Biomasa Residual de la extracción de Aceite de Palma en Colombia 2006



Sólo la fibra y la cascara se utilizan como fuentes energéticas. En el año 2006 se produjeron alrededor de 723.249,5 Ton de residuo de palma útil. El Raquiz no se considera viable para fines energéticos por su alto valor de humedad (50 - 60) %, la dificultad de su procesamiento eficiente en términos de combustión, y genera altos costos de pretratamientos, por lo anterior la industria palmera lo utilizan como fertilizante en la plantación [11].

3.1.3 Contenido de Humedad y Poder Calorífico

En Colombia el municipio que presenta mayor producción es Tumaco, en el departamento de Nariño, con 153.600 de producción aceite crudo ton/año, pero por razones de distancia se selecciona la planta extractora Bucarelía localizada en el municipio de Puerto Wilches.

Cuando se piensa en la biomasa como una fuente de energía alternativa, es necesario conocer su contenido de humedad, ya que es un parámetro importante que define el proceso de conversión mediante el cual se le puede extraer su energía.

El contenido de humedad reportado por los Residuos de Palma de Aceite oscila entre 19 -60 %: la Cascara y la Fibra poseen valores de humedad menores a 40%, lo que indica que pueden ser utilizados en procesos térmicos, como la combustión directa, gasificación o pirolisis. El Raquiz posee una humedad de 59,13% esto lo hace apto para procesos bioquímicos.

El contenido de cenizas en la biomasa influye sobre los costos de procesamiento y transformación de la energía. El contenido de cenizas de los RPA se encuentra desde 7,62 % hasta el 9,58%, con un promedio de 8,12%; estos valores son relativamente bajos en comparación con otras fuentes de energías no renovables. Se encontró que el contenido de material volátil para los RPA es alto, este se encuentra desde los 82,56% hasta el 85,85%.

Un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, son las ventajas que tiene la BR sobre los combustibles fósiles como el carbón, el cual posee un 12% de cenizas y 36% de material volátil, haciendo a la biomasa un alimento ideal para procesos como la pirolisis o la gasificación.[1]

Los resultados del análisis elemental muestran que los RPA poseen altos contenidos de Oxígeno e hidrógeno, y bajos de carbono, en comparación con el

carbón Cerrejón (5,30%H, 8,53%O, 73,74%COT). Esto indica que la BR de Palma de Aceite posee mayores enlaces carbono-Oxígeno y Carbono-Hidrogeno y pocos enlaces carbono-carbono, lo cual se ve reflejado en la disminución del contenido energético del combustible renovable, debido a que la energía de los enlaces C-O y C-H es mucho menor que la del enlace C-C; mientras que los combustibles fósiles por su alto contenido de C y bajo de Oxígeno, está constituido por una cantidad mayor de enlaces carbono-carbono, por tal razón poseen un alto contenido energético.

Por sus altos contenido de oxígeno e hidrógeno, los valores de PCI para los RPA son más bajos que los reportados para combustibles fósiles; aun así, los hace aptos para cualquiera de las formas de aprovechamiento energético, aquí entra en juego los costos energéticos que se tendrían que invertir en el pre tratamiento del residuo para llevarlo a las condiciones mínimas iniciales requeridas para el proceso.

3.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGETICO

En la Tabla 2 se muestra el PE a nivel departamental evaluado para los RPA en Colombia en el año 2006 comparándolo con otros tipos de compuestos de origen fósil.

Tabla 2. Potencial Energético departamental de los RPA frente a otros tipos de compuestos energéticos.

DEPARTAMENTOS	Potencial Energético Total (Tj)	Energía generada por otras fuentes			
		Energía eléctrica GW	Toneladas equivalentes de carbón (Tec)	Toneladas equivalentes de Petróleo (Tep)	Barriles de Petróleo día-año
Meta	3987,84	1087,48	136068,36	95247,86	1976,10
Santander	3401,39	927,56	116058,39	81240,88	1685,50
Nariño	2820,38	769,12	96233,60	67363,52	1397,58
Cesar	2028,15	553,08	69202,32	48441,63	1005,01

Magdalena	1911,58	521,29	65224,77	45657,34	947,25
Casanare	509,56	138,95	17386,58	12170,60	252,50
Bolívar	292,94	79,88	9995,26	6996,68	145,16
Chocó	252,73	68,91	8623,37	6036,36	125,24
Cundinamarca	251,79	68,66	8591,29	6013,90	124,77
Norte de Santander	235,36	64,18	8030,58	5621,41	116,63
Antioquia	27,62	7,53	942,38	659,67	13,69
La Guajira	13,53	3,69	461,79	323,25	6,71
Caquetá	9,90	2,70	337,69	236,39	4,90
Córdoba	4,81	1,31	164,12	114,88	2,38
TOTAL	15747,58	4294,36	537320,53	376124,38	7803,41

En la tabla 2, se puede observar que en el año 2006 en Colombia, la biomasa residual de la Palma de aceite generó un PE de 15.747,57 TJ.

Las relaciones anteriores nos muestran la importancia de implementar la biomasa como una alternativa de generación de energías más limpias, reemplazando parcialmente la utilización de combustibles fósiles (petróleo, carbón, etc.) que en su proceso emiten gran cantidad de gases de efecto invernadero.

En Colombia en el año 2006 se produjeron 1'607.771,64 Ton de RAP que reemplazarían 537.320 Tec ò 376.124 Tep, lo que conlleva desde el punto de vista económico a minimizar los costos de combustibles para generación de energía ya que se sabe que los RAP se desechan en grandes volúmenes en las plantas extractoras de todo el país.

Lo anterior corrobora las oportunidades de transformación del poder calorífico de los RPA en calor y energía eléctrica mediante la aplicación de la tecnología adecuada que permita reemplazar los combustibles convencionales y reducir el costo de la demanda actual.

El Departamento del Meta produce el 25.32%, Santander el 21.6%, cabe resaltar que el departamento de Nariño solo cuenta con el municipio de Tumaco como

productor de palma de aceite el cual genera 18% del potencial nacional. El resto de departamentos generan en conjunto aproximadamente el 35% restante del potencial en Colombia.

Se seleccionó el municipio de Puerto Wilches del departamento de Santander para la ubicación de la planta de aprovechamiento energético, ya que ocupa el segundo puesto en generación de PE a nivel municipal y la caracterización fisicoquímica se realizó en una de sus plantas de beneficio. En la Tabla 3, Se muestra el PE de los RPA en Colombia en el 2006.

Tabla 3. PE de los residuos de palma de aceite en Colombia 2006

RESIDUO	CANTIDAD GENERADA TON	POTENCIAL ENERGETICO TJ
FIBRA	353899,11	6666,259914
CASCARA	147011,28	2583,78511
RAQUIS	366635,49	6497,530174

Con base en la tabla 3, se selecciono la Fibra como materia prima para la planta de aprovechamiento porque es el RPA que mas PE genera.

3.3 ANÁLISIS DE TECNOLOGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BR DE PALMA DE ACEITE

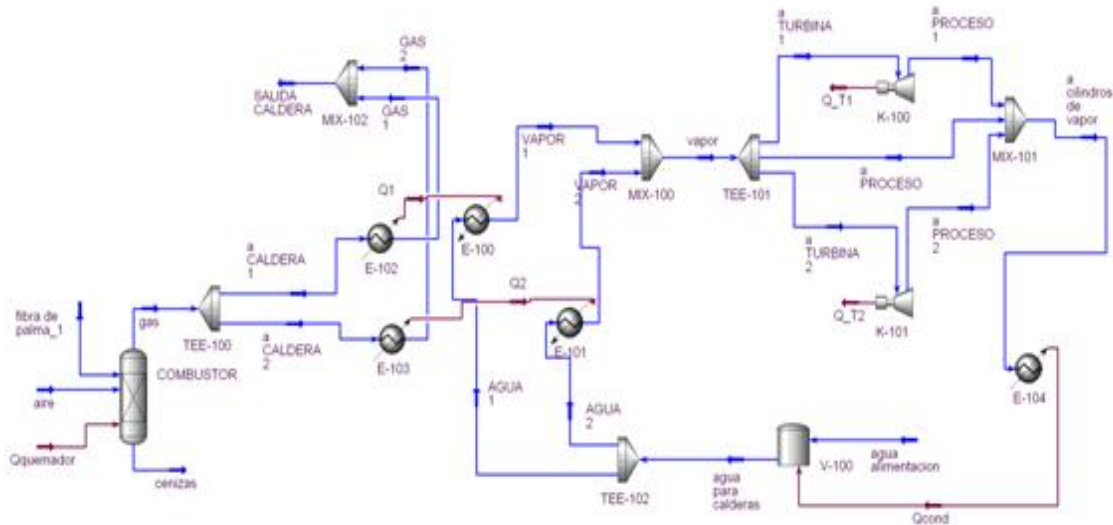
Tabla 4. Condiciones de entrada de fibra a los sistemas

Condiciones de Entrada	
Combustible	Fibra de Palma
Contenido de humedad	33.24%
Contenido de cenizas	7,16%
Densidad (Kg/m3)	984,1
Flujo de combustible	3000 kg/h
Flujo de agua alimentación	2.5 m3/h

Unidad de cogeneración utilizando fibra de palma como combustible.

En la figura 4, se muestra el esquema de la simulación de una planta de cogeneración típica utilizando Fibra de Palma de Aceite como materia prima

Figura 4. Simulación del sistema de Cogeneración (HYSYS 3.2)



El sistema de cogeneración fue alimentado con 3000 kg/h de fibra de palma de aceite a una temperatura de 70° C proveniente del proceso de extracción. La composición del alimento fue tomado de la caracterización de los RPA La humedad de la fibra fue de 33.24 %, siendo este un valor aceptable no requiere pretatamiento ya que para valores superiores se ocasionaría un retardo en la combustión causando que salgan cenizas por la chimenea.

El combustor llega a una temperatura de 450°C, por encima de los 200°C para evitar la corrosión de la chimenea con los gases de emisión.

La turbina recomendada es una turbina de condensación extracción y un sistema de generación de vapor para proceso que incluye una bomba, una válvula de reducción de presión y un intercambiador de calor.

El agua de alimentación de la Caldera es recomendable mantenerla a una temperatura regulada de 70°C, teniendo en cuenta que temperaturas mayores a 80°C causan problemas de cavitación en las bombas y por consiguiente su pronto deterioro y riesgos para la caldera, al no haber suficiente suministro de agua.

El precalentamiento del agua se realiza para eliminar oxígeno disuelto en el agua de alimentación. Además un aspecto importante en el agua de alimentación es que debe cumplir con unos pre-tratamientos mínimos: Precipitación, filtrado, suavización, desalcalinización, desmineralización y desaireación (química y física).

El vapor se genera en la caldera a una presión de 20 bar (recalentado a 260 °C) y con un turbogenerador de vapor de 18,5 bar en la entrada y 3,16 bar en la contrapresión, siendo esta una presión conveniente para el proceso gracias a sus efectos de calentamiento.

El vapor agotado que sale de las turbinas tiene unas condiciones de 135.29°C y 316 KPa.

Parte del vapor que sale de las calderas es reutilizado para precalentar el agua que se inyecta a las calderas.

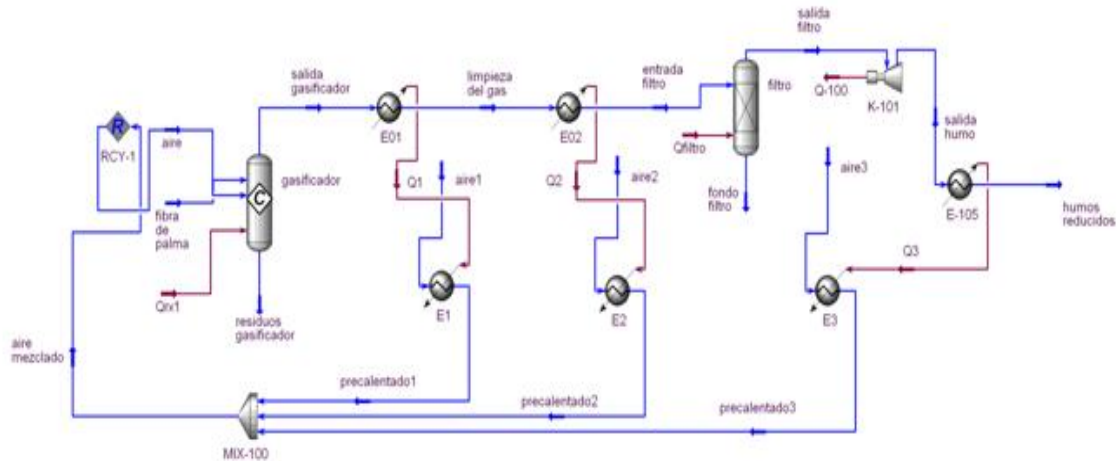
Tabla. 5 Condiciones del vapor en las distintas corrientes en el sistema de cogeneración de RPA.

Condiciones del vapor	
Temperatura a la salida de la caldera	260°C
Presión a la salida de la caldera	20 bar
Temperatura a la salida de la turbina	135.3°C
Presión a la salida de la turbina	3,16bar
Potencia generada (KW/h)	138,78

Unidad de gasificación de fibra de palma africana

En la Figura 5 se muestra la simulación del sistema de Gasificación alimentado con Fibra de Palma de Aceite.

Figura 5. Simulación del Sistema de Gasificación (HYSYS 3.2)



En el sistema de Gasificación igualmente se alimentan 3000 kg/ de fibra, y se le inyecta a 180 Kmol/h de aire. La temperatura de operación es 900 °C. El gas de salida tiene una temperatura de 900°C y es llevado a un proceso de enfriamiento y filtrado. El calor es retirado con dos corrientes de aire fresco a 25°C y este aire precalentado se devuelve al gasificador. El gas pasa por un sistema de filtrado para asegurar que no lleve parte de los residuos de la gasificación y se inyecta a un motor de combustión interna que produce 138.3 KW.

De la combustión del gas se generan humos a 50°C parte del calor se retira para precalentar otra corriente de aire de alimento.

Tabla 6. Condiciones del gas a la salida del gasificador

CONDICIONES DEL GAS A LA SALIDA DEL GASIFICADOR	
Flujo molar (Kmol/h)	617,6
Temperatura (C)	900
Presión (Kpa)	101,3
Densidad (Kg/m3)	0,2397
COMPOSICION FRACCION MOLAR	
CO	0,2989
CO2	0,0603
H2	0,227
N2	0,4138

La composición final del gas está influenciada por múltiples factores como, la composición de la alimentación, el contenido de agua, la temperatura de reacción (600-1100)°C y el grado de oxidación de los productos de la pirolisis.

4. GASIFICACION Vs COGENERACION

Para la selección de la tecnología de aprovechamiento energético de la FPA, se realizó una selección, tomando como referencia las características de los procesos de gasificación y cogeneración de FPA bajo las mismas condiciones de operación.

4.1 CRITERIO AMBIENTAL

Tabla 7. Gases producidos en la de combustión y gasificación de RPA

COMPUESTO	COMBUSTIÓN	GASIFICACIÓN
C	CO ₂ (sin valor energético)	CO (con valor energético)
H	H ₂ O (sin valor energético)	H ₂ (con valor energético)
N	NO, NO ₂ (reducen capa ozono)	NH ₃ /N ₂ (eliminan en lavado húmedo)
S	SO ₂ /SO ₃ (lluvia ácida)	COS, H ₂ S (se convierten en S sólido)
AGUA	H ₂ O (sin valor energético)	H ₂ (con valor energético)
CENIZAS	Cenizas volantes se mezclan con caliza formando gran cantidad de residuos	Cenizas volantes/escorias se comercializan

El volumen de gases producidos por la gasificación es mucho menor y la concentración de contaminantes menor, con lo cual los sistemas de depuración son más pequeños y actúan de forma más eficiente.

4.2 CRITERIO TECNOLÓGICO

Tabla 8. Condiciones de proceso en la combustión y gasificación de los RPA

COMBUSTIÓN	GASIFICACION
Temperatura de operación desde 300 °C hasta 1200°C, para los distintos tipos de residuo	Temperatura de operación superior a 800°C.
Eficiencia de destrucción alta, sujeta a un control estricto.	Eficiencia de destrucción completa.

<p>Una humedad alta del residuo afecta a los requerimientos de energía</p>	<p>El proceso no se ve afectado por el contenido de humedad del residuo, ya que se inyecta aire durante el proceso.</p>
<p>Requiere un estricto control para la remoción de dioxinas y furanos, contenidos en los residuos o formados en la destrucción de residuos clorados.</p>	<p>La atmósfera reductora evita la formación de dioxinas y furanos, y por la alta temperatura son destruidos totalmente.</p>

Con la gasificación se obtiene un combustible que puede ser empleado en una amplia variedad de aplicaciones con equipos convencionales diseñados para gases combustibles debidamente adaptados, de manera que es posible transportarlo a una cierta distancia del lugar de generación.

Si el objetivo es producir electricidad y vapor, el rendimiento termodinámico global utilizando un gas sintético, que se expanda en motores térmicos, que se expanda en motores térmicos tras una combustión y aproveche la energía sobrante en los gases calientes para producir vapor, es muy superior en la gasificación que en la combustión

4.3 CRITERIO ECONÓMICO

Para evaluar este parámetro se tuvo en cuenta un análisis económico donde se destacan aspectos como la producción, capacidad, equipos principales y costos de inversión para la generación de energía por medio de las tecnologías de cogeneración empleando una turbina de vapor, y la de gasificación con motor de combustión interna.

Para este estudio se partió de asumir condiciones de trabajo y variables energéticas similares en las simulaciones de dichas tecnologías.

En la tabla 9. Se resumen los resultados de las variables más importantes del análisis económico de las tecnologías de cogeneración y gasificación de RPA.

Tabla 9. Variables básicas del análisis económico.

variable	cogeneración	gasificación
capacidad	35MW	61,2MW
costo de inversión	76,80E6\$	96,16E6\$
Producción	216,3GWh/año	462,4GWh/año

A continuación en la tabla 11 se presenta un resumen de los equipos más importantes en las tecnologías de cogeneración y gasificación de RPA.

Tabla 10. Equipos principales de las tecnologías de cogeneración y gasificación de RPA.

cogeneración	gasificación
caldera de vapor	Gasificador
turbina	motor de combustión interna
tratamiento de agua	Filtro
	intercambiador de calor

En los Principales equipos utilizados en la cogeneración y en la gasificación de RPA se ha encontrado que la tecnología de la gasificación posee un número mayor de equipos Tabla 10, siendo esta la de mayor costo de instalación.

Esto repercute en la capacidad de la planta, ya que a mayor capacidad mayor costo de puesta en marcha y en la cogeneración a mayor potencia en Mw menor es el costo de \$/Kwh generado.

Después de realizar el análisis comparativo de las tecnologías para el aprovechamiento energético de RPA se puede decir que la gasificación es una buena alternativa según el aspecto ambiental y tecnológico, sin embargo aun representa un alto costo la puesta en marcha por la complejidad de sus equipos.

CONCLUSIONES

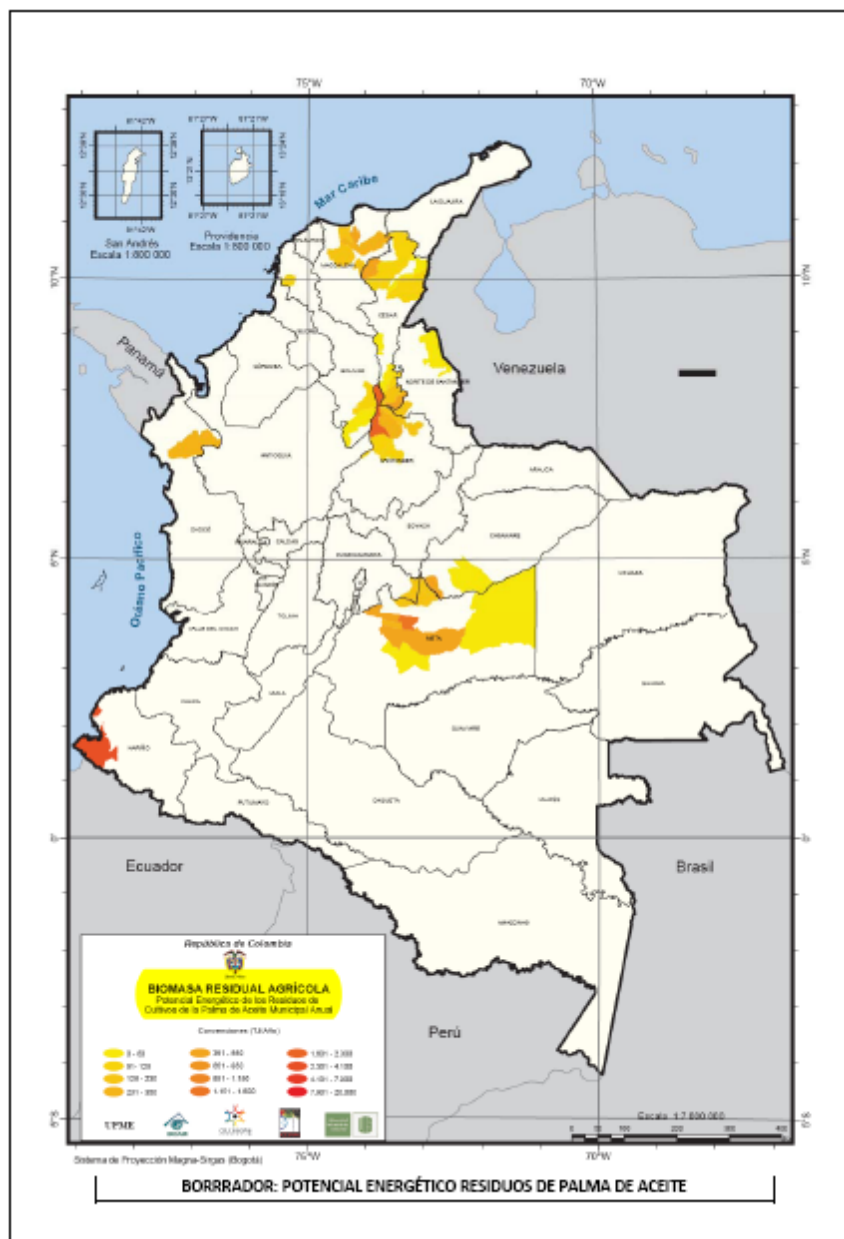
1. De acuerdo al modelo utilizado para calcular el PE, en el país las 867.554,8 Ton/año de RPA ofrecen 15747,57 TJ/año de energía los cuales podrían reemplazar el 1,28% de la demanda nacional; siendo la fibra el residuo más representativo (42,33% del potencial total) por su alto valor de PCI.
2. En Colombia el municipio de Tumaco produce el mayor volumen de residuos de la extracción de aceite de palma, los cuales pueden generar un potencial energético anual de 2820,37 TJ. Esta energía podría ser aprovechada para la generación eléctrica o para compensar los requerimientos energéticos que tienen las plantas extractoras de aceite de palma.
3. Se propone un diseño de gasificación como tecnología de aprovechamiento energético de biomasa residual de palma de aceite, en el cual se sustituya el sistema de caldera convencional con el fin de producir vapor de la turbina para generar electricidad a razón de 138.3KW; y así lograr como resultado gases limpios sin contenido de cenizas y con un alto porcentaje de volátiles que favorece la velocidad global del proceso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. CUIPING. Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels in China. Biomass and Bioenergy Tomo 27, 2004; pag.119-130.
- [2] Gómez Alexander, Klose Wolfgang, Rincón Sonia, Wiest Wolfgang. Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. PALMAS - Vol. 25 No. Especial, Tomo II, 2004. Pág. 388-397
- [3] Eduardo Del Hierro Santa Cruz. Ingeniero Químico. Asesor Industrial. Aprovechamiento de los sub-productos de palma de aceite. PALMAS, Volumen 14, Numero Especial, 1993. Pág. 149-152
- [4] IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. BESEL, S.A. (Departamento de Energía). Biomasa: Edificios. Madrid. 2007. Pág. 25-33
- [5] T.M.I. Mahlia, M.Z. Abdulmuin, T.M.I. Alamsyah, D. Mukhlisien. An alternative energy source from palm wastes industry for Malaysia and Indonesia. Energy Conversion and Management Tomo 42 ,2001. Pag. 2109-2118
- [6] Husain, Z.A. Zainal, M.Z. Abdullah. Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. Biomass and Bioenergy 24, 2003. Pag. 117 – 124.
- [7] S. Prasertsana, B. Sajjakulnukitb. Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers. Renewable Energy 31,2006. Pag 599–610
- [8] F.R.P. Arrieta, F.N. Teixeira, E. Yáñez, E. Lora, E. Castillo. Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies. Biomass and Bioenergy 31, 2007. Pag 503–511.
- [9] FEDEPALMA. Anuario Estadístico 2007. La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia y el mundo. Pág.46-51.
- [10] Base Estadística Nacional del Ministerio de Agricultura en el año 2008.
- [11] POSSCHELLE GUY L., YOOK BOON KHAI. Uso Energético de Desechos tales como: Fibra, Cascara y Racimos. Mesa Latinoamericana de Palma Aceitera. pág. 227- 243.

- [12] CEIAM, Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales. “*Atlas del Potencial Energético de la Biomasa en Colombia*”. Informe Caracterización de los Residuos
- [13] ESCALANTE, H. D; ORDUZ, J; LAVERDE, D; ZAPATA, H; YEPES, L. Oferta energética de la biomasa residual en Colombia, XI Seminario Internacional del medio ambiente y desarrollo sostenible, CEIAM-ASEDUIS-UIS, Cartagena, Colombia, 2008.
- [14] Oficina Regional para Centro América de Biomass Users Network (BUN-CA). Manual sobre energía renovable. BIOMASA, 2002. Pág.4-18.
- [15] P. MCKENDRY. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology 83, 2002. Pag 37–46
- [16] BHATTACHARYA, S; SALAM, A; RUNQING, H; SOMASHEKAR, L; RACELIS, D; RATHNASIRI, P; YINGYUAD, R. (2005). An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010. Biomass and Bioenergy 29, 2005. Pag. 153–166
- [17] DOMÍNGUEZ BRAVO, J., CIRIA, P., ESTEBAN, L. S., SÁNCHEZ, D., LASRY, P. (2003): “Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España)”, GeoFocus (Informes y Comentarios), nº 3. ISSN: 1578-5157. Pag 1-10.
- [18] Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia. 2003. Pág. 91-105
- [19] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. Bogotá-Colombia. 2006.
- [20] MINISTERIO DE AGRICULTURA, Anuario Estadístico Agropecuario 2006.
- [21] THE HEWLETT FOUNDATION AND THE ENERGY FOUNDATION, Renewable Energy Atlas of the West. 2002
- [22] SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; SORDI, Alexandre; SIQUEIRA, Jair A Cruz; KOLLING, Evandro Marcos; ZANIN, Alexandre. Potencial de energía primaria de residuos vegetais no Paraná. In: 4º Encontro de Energia no Meio Rural AGRENER 2002, 2002, Campinas. AGRENER 2002, 2002. v. I.

ANEXO 1. MAPA DEL PE DE LOS RESIDUOS DE PALMA DE ACEITE



ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE PALMA DE ACEITE

TIPO DE ANÁLISIS	Unidades	TIPO DE RESIDUO		
		Cuesco	Fibra	Raquis
Análisis Básico				
Humedad	% p/p	19,86	33,24	59,13
Sólidos Totales	% p/p	80,14	66,76	40,87
Análisis Próximo en Base Seca				
Material Volátil MV	% p/p	85,12	85,85	82,56
Carbono Fijo CF	% p/p	7,26	6,98	7,85
Cenizas	% p/p	7,62	7,16	9,58
Análisis Último en Base Seca				
Carbono Orgánico Total	% p/p	40,76	56,97	49,73
Hidrógeno	% p/p	4,69	6,55	5,72
Oxígeno	% p/p	46,41	28,14	34,06
Nitrógeno	% p/p	0,50	1,13	0,90
Azufre	% p/p	0,05	0,09	0,05
Análisis Bromatológico				
Grasa	% p/p	0,16	0,43	0,41
Proteína	% p/p	3,12	7,14	5,59
Celulosa	% p/p	48,35	31,34	37,64
Hemicelulosa	% p/p	11,48	2,48	4,69
Lignina	% p/p	58,30	45,83	48,42
Otros Parámetros				
Sólidos Volátiles Totales SVT	% p/p	74,03	61,97	36,95
Materia Orgánica	% p/p	70,26	98,22	85,73
Relación C/N	Adimensional	81,50	50,46	55,62
Análisis Energético en Base Seca				
Poder Calorífico Inferior	kJ/kg	17340,04	18584,22	17484,69

ANEXO 3. ORDEN JERÁRQUICO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEPARTAMENTAL DE ACEITE DE PALMA 2006

Orden Jerárquico del Potencial Energético Departamental de Aceite de Palma 2006						
Orden	Nombre Departamento	Nombre Municipio	Área Cosechada Ha	Producción Tn/ año	Cantidad de Residuo Ton/año	Potencial Energético Tj/año
1	Meta	SAN CARLOS DE GUAROA	28699	91837	152280	1468,945717
		SAN MARTIN	13104	32760	52381,2744	505,2879476
		ACACIAS	11445	28613	47928,2265	462,3323025
		CASTILLA LA NUEVA	7012	17530	22691,6235	218,8912736
		CUMARAL	6244	14361	27336,5442	263,6977903
		CABUYARO	4522	11305	21519,30544	207,5826868
		BARRANCA DE UPIA	3510	10530	20043,855	193,34998
		FUENTE DE ORO	1240	3100	4721,4414	45,54466195
		PUERTO LLERAS	1400	2800	5329,8	51,41310009
		PUERTO GAITAN	1123	2695	4276,0224	41,24799573
		GRANADA	500	1250	1903,5	18,36182146
		PUERTO LOPEZ	468	1170	2227,095	21,48333111
		SAN JUAN DE ARAMA	400	920	1751,22	16,89287574
		RESTREPO	328	820	1248,696	12,04535488
VILLAVICENCIO	101	302	574,59051	5,542699426		
2	Santander	PUERTO WILCHES	35500	138805	264215,3175	2548,712628
		SABANA DE TORRES	6956	21855	41600,6118	401,2939356
		RIONEGRO	3750	14250	27124,875	261,6559558
		SAN VICENTE DE CHUCURI	1500	5100	9707,85	93,64528944
		BARRANCABERMEJA	1200	5097	9701,7588	93,58653161
		SIMACOTA	100	150	285,525	2,754273219
3	Nariño	TUMACO	32000	153600	292377,6	2199,397485
4	César	SAN ALBERTO	8500	32300	61483,05	593,0868331
		EL COPEY	7500	25750	49015,125	472,8169026
		SAN MARTIN	4850	12600	24003,135	231,5425686
		BECERRIL	2300	8050	15323,175	147,8126627
		AGUSTIN CODAZZI	3620	7240	13781,34	132,9395874
		VALLEDUPAR	1440	5040	9593,64	92,54358016
		BOSCONIA	1170	4329	8240,2515	79,4883251
		RIO DE ORO	880	3344	6365,304	61,40193096
		AGUACHICA	650	2600	4949,1	47,74073579
		LA PAZ	680	2448	4659,768	44,94973893
		TAMALAMEQUE	925	2313	4402,7955	42,47089304

		CHIRIGUANA	600	2220	4225,77	40,76324364
		LA JAGUA DE IBIRICO	400	1280	2436,48	23,50313147
		PELAYA	145	363	690,9705	6,66534119
		CURUMANI	100	320	609,12	5,875782867
		SAN DIEGO	70	252	479,682	4,627179008
5	Magdalena	EL PIÑON	500	1750	3331,125	32,13318755
		ZONA BANANERA	9880	34580	65823,03	634,9517861
		EL RETEN	5020	17570	33444,495	322,617203
		ARACATACA	4750	15500	29504,25	284,6082326
		PUEBLOVIEJO	3460	11764	22392,774	216,0084676
		ALGARROBO	2559	8957	17048,69775	164,4576539
		PIVIJAY	2538	8883	16908,7905	163,10806
		SABANAS DE SAN ANGEL	630	2205	4197,2175	40,48781632
		FUNDACION	300	1040	1979,64	19,09629432
6	Casanare	VILLANUEVA	12400	22800	43399,8	418,6495293
		MANI	2000	3216	6121,656	59,05161781
		AGUAZUL	640	754	1435,239	13,84481338
		YOPAL	280	600	1142,1	11,01709288
		TAURAMENA	332	380	723,33	6,977492155
7	Bolívar	SIMITI	2500	6800	12943,8	124,8603859
		MARIA LA BAJA	2500	4500	8565,75	82,62819657
		SAN PABLO	800	2112	4020,192	38,78016692
		CANTAGALLO	600	1728	3289,248	31,72922748
		MAHATES	200	500	951,75	9,18091073
		ARJONA	160	312	593,892	5,728888295
8	Choco	CARMEN DEL DARIEN	3234	21021	43091,433	415,6749142
9	Cundinamarca	PARATEBUENO	3189	13713	26102,12445	251,7901491
10	Norte de Santander	LA ESPERANZA	2293	9631	18331,65675	176,8335216
		TIBU	2500	2000	3807	36,72364292
		EL ZULIA	330	1188	2261,358	21,81384389
11	Antioquia	YONDO	264	3432	6532,812	63,01777125
		MUTATA	90	990	1884,465	18,17820324
12	La Guajira	RIOHACHA	320	512	974,592	9,401252587
		DIBULLA	75	225	428,2875	4,131409828
13	Caquetá	BELEN DE LOS ANDAQUIES	385	539	1025,9865	9,897021767
14	Córdoba	LORICA	146	248	472,068	4,553731722
		SAN BERNARDO DEL VIENTO	8	14	26,649	0,2570655