

**EVALUACIÓN TECNOLÓGICA Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA
PARA EL APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS
RESIDUOS DEL CAFÉ**

EDWIN GUSTAVO ROJAS PUERTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

**EVALUACIÓN TECNOLÓGICA Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA
PARA EL APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS
RESIDUOS DEL CAFÉ**

EDWIN GUSTAVO ROJAS PUERTO

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

Director

PH.D. HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Al Doctor HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ, por su contribución en la realización de este proyecto

A los miembros del CEIAM

A la comunidad de la Escuela de Ingeniería Química: docentes, personal administrativo y operativo

A todas y cada una de las personas que contribuyeron en alguna forma a la realización de este proyecto

DEDICATORIA

A DIOS, dueño de mi vida

A mis padres LIGIA SUSANA y GUSTAVO, por el apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida

A mis hermanos ANDREA, WILLIAM Y DIANA, por sus palabras de aliento y ayuda

A mis abuelos, tíos, primos, amigos que de una forma u otra soñaron conmigo este proyecto de vida

A ERIKA MILENA, por su cariño, comprensión, ayuda, gracias por estar tan cerca de mí

A ISMAEL y ADELAIDA, por acogerme como en un segundo hogar

A LAURA por su ayuda

Al EQUIPO SELECCIÓN UIS DE VOLEIBOL, por compartir momentos de sano esparcimiento y alegría

A mis amigos EDUARDO, ROGER, FREDY, GAMBÁ, CAMILO, CHEPE, KAREN a todas mis amigas DIANA'S, YOLIMA, Y, YENNIFER, XIMENA, LILY, HERENIA, YULANY, NOHORA, en fin todos aquellos que compartieron CONMIGO momentos que nunca se borrarán de mi corazón...

EDWIN GUSTAVO

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN TECNOLÓGICA Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS DEL CAFÉ *

AUTOR: ROJAS PUERTO, Edwin Gustavo **

PALABRAS CLAVES: Residuos, Café, Tecnologías, Multicriterio, Combustible

DESCRIPCIÓN:

El interés por la producción y el uso de los combustibles, así como la preocupación por el medio ambiente y los precios elevados del petróleo, han llevado al estudio de ciertas variables (ambientales, sociales, económicas y tecnológicas), que permitan determinar cual es mejor conjunto de tecnologías, para la transformación de la biomasa en energía disponible.

Este trabajo permitió hacer un análisis, de las tecnologías aplicables a los residuos del café (pulpa, cascarilla y tallos), teniendo en cuenta dichas variables, mediante una herramienta informática de análisis multicriterio, para cada residuo, y posteriormente un diseño básico para el mismo, utilizando la tecnología más adecuada, mostrando como resultado, la aplicación de la termólisis para los residuos de cascarilla y tallo, y fermentación para la pulpa de café, con producciones de gas de síntesis con una fracción molar de 0.4 de metano y etanol de 0.75, respectivamente.

En Colombia las 5'051.248 ton/año de Biomasa Residual de café poseen un Potencial Energético de 49.106,89 TJ/año; los cuales equivalen a la producción de 49.106,89 Ton/año gas de síntesis y 317.120,112 Ton/año de etanol, los cuales podrían ser utilizados para la producción de electricidad y combustible líquido principalmente. El análisis económico muestra la viabilidad de estas dos tecnologías, lo cual permite afirmar que su implantación permitirá, solventar en parte la demanda energética.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Humberto Escalante Hernández.

ABSTRACT

TITLE: TECHNOLOGICAL EVALUATION AND CONCEPTUAL DESIGN OF A PLANT FOR THE ADVANTAGE OF THE POWER POTENTIAL OF THE RESIDUES OF THE COFFEE*

AUTHOR: ROJAS PUERTO, Edwin Gustavo **

KEY WORDS: Residues, Coffee, Technologies, Multicriterio, Fuel

DESCRIPTION:

Interest by production and use of fuels, as well as preoccupation by environment and prices elevated of petroleum, has taken to study of certain variables (environmental, social, economic and technological), that allows to determine what is better set of technologies, for the transformation of the biomass in available energy.

This work allowed to make an analysis, of the technologies applicable to the residues of the coffee (pulp, husk and stems), considering these variables, by means of a computer science tool of analysis multicriterio, for each remainder, and later a basic design for the same, using the adapted technology more, showing like result, the application of the thermolysis for the residues of husk and stem, and fermentation for the coffee pulp, with gas productions of synthesis with a molar fraction of 0,4 of methane and ethanol of 0,75 respectively.

In Colombia 5'051.248 ton/year of Residual Biomass of coffee owns a Power Potential of 49,106, 89 TJ/año; which are equivalent to the production of 49,106, 89 ton/year gas of synthesis and 317,120, 112 ton/year of ethanol, which could mainly be used for the production of electricity and liquid fuel. The economic analysis shows the viability of these two technologies, which allows to affirm that its implantation will allow, to resolve the demand partly energetics.

* Degree Work.

** Faculty of Physic Chemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Director: Dr. Humberto Escalante Hernández.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CAFÉ	3
1.1 Usos de los residuos del café	5
1.2 Tecnologías para el Tratamiento de los residuos de café.	5
1.3 ANÁLISIS MULTICRITERIO	8
2. METODOLOGÍA	10
3. RESULTADOS	15
3.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO	17
3.2 DISEÑO CONCEPTUAL	24
3.2.1 Termólisis de la cascarilla y el tallo	24
3.2.2 Fermentación de la Pulpa de Café	26
3.3 COSTOS	29
4. CONCLUSIONES	33
BIBLIOGRAFÍA	34
ANEXOS	38

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Producción anual de los residuos de café (2006)	4
Tabla 2. Parámetros de caracterización para los residuos de café	12
Tabla 3. Criterios, subcriterio e indicadores para el análisis multicriterio	13
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de los residuos de café	15
Tabla 5. Análisis Multicriterio: factor ambiental de la cascarilla de café	17
Tabla 6. Análisis Multicriterio: factor tecnológico de la cascarilla de café	18
Tabla 7. Análisis Multicriterio: factor económico de la cascarilla de café	18
Tabla 8. Análisis Multicriterio: factor social de la cascarilla de café	19
Tabla 9. Resultado Análisis Multicriterio de cascarilla de café	19
Tabla 10. Análisis Multicriterio: factor ambiental de los tallos de café	19
Tabla 11. Análisis Multicriterio: factor tecnológico de los tallos de café	20
Tabla 12. Análisis Multicriterio: factor económico de los tallos de café	20
Tabla 13. Análisis Multicriterio: factor social de los tallos de café	21
Tabla 14. Resultado Análisis Multicriterio del tallo de café	21
Tabla 15. Análisis Multicriterio: factor ambiental de la pulpa de café	21
Tabla 16. Análisis Multicriterio: factor tecnológico de la pulpa de café	22
Tabla 17. Análisis Multicriterio: factor económico de la pulpa de café	22
Tabla 18. Análisis Multicriterio: factor social de la pulpa de café	23

Tabla 19.	Resultado Análisis Multicriterio de la pulpa de café	23
Tabla 20.	Composición de fluidos de la fermentación	26
Tabla 21.	Propiedades de las corrientes del proceso de separación	28
Tabla 22.	Cálculo aproximado del costo de la planta basado en el equipo fundamental plantas de termólisis de la cascarilla y los tallos	29
Tabla 23.	Ingresos anuales correspondientes a la proyección estimada (cascarilla de café)	29
Tabla 24.	Proyección de flujo de caja (cascarilla de café)	30
Tabla 25.	Ingresos anuales correspondientes a la proyección estimada (tallos de café)	30
Tabla 26.	Proyección de flujo de caja (tallos de café)	30
Tabla 27.	Cálculo aproximado del costo de la planta basado en el equipo fundamental (pulpa de café)	31
Tabla 28.	Ingresos anuales correspondientes a la proyección estimada (pulpa de café)	31
Tabla 29.	Proyección de flujo de caja (pulpa de café)	31

LISTA DE DIAGRAMAS

		pág.
Diagrama 1.	Proceso de termólisis de la cascarilla y el tallo de café	24
Diagrama 2.	Proceso de termólisis de la cascarilla y el tallo de café (Simulación Hysys)	25
Diagrama 3.	Proceso de fermentación de la pulpa de café	26
Diagrama 4.	Proceso de destilación de los fluidos provenientes de la fermentación de la pulpa de café (Simulación en Hysys)	27
Diagrama 5.	Resultados proceso de fermentación de la pulpa de café	28

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. PROPIEDADES EN HYSYS	39
ANEXO B. DATOS MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL 2006	40

INTRODUCCIÓN

El interés por la producción y uso de los biocombustibles actualmente se ha venido incrementado, así como su impacto ambiental, social, tecnológico y económico, motivados por el interés que ciertos países han puesto en estos productos como alternativa energética, la preocupación por el medio ambiente y los elevados precios del petróleo. Es entonces cuando los residuos generados, por las industrias procesadoras de café juegan un papel importante, en la transformación de los mismos, con fines energéticos.

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, para el año 2004 en Colombia se sembró 680.580 Ton de café, cifra que no tiene en cuenta los residuos de tallos. Cerca del 90,5 por ciento del fruto es desperdiciado y los desechos generados son vertidos a las fuentes hídricas o empleados como abono^[33]. Hasta el momento, Brasil es el único país suramericano en el que se procesan estos residuos para extraer bio-etanol o se queman para la producción de energía. Colombia genera aproximadamente 5'051.258 ton/año^[19] de residuos (pulpa, cascarilla y tallos), los cuales representan un gran potencial como materia prima, en procesos de transformación de la biomasa en energía.

En la medida que toda la cadena de producción, transformación y utilización de residuos con fines energéticos, garanticen una rentabilidad aceptable y un combustible competitivo en el mercado, se podrán crear las condiciones para disponer de un combustible nacional amigable con el ambiente, elaborado con materia prima local y que adicionalmente genera empleos en los sectores agrícolas, industriales, comerciales y financieros.

El presente trabajo se sustenta en la necesidad de conocer el Potencial Energético (PE) presente en los residuos del café y plantear una tecnología para su

aprovechamiento; mediante un análisis tecnológico multicriterio apropiado, para determinar si es posible su aprovechamiento como alternativa energética.

1. CAFÉ

Según información del Ministerio de Agricultura, en el año 2006 el café fue el primer producto agrícola en extensión en Colombia con 780 mil hectáreas (Ha), que rindieron 724 mil toneladas métricas (Tm) de café pergamino. Este cultivo representa el 20% del área cosechada en Colombia y el 30% de los cultivos permanentes. Pese a que históricamente el café ha sido el producto líder en las exportaciones nacionales, actualmente ha sido relegado al tercer puesto ^[33].

El café perdió su tradicional primer lugar a manos del sector petróleo y sus derivados en el año 1990, y se ubicó en el tercer puesto a partir del 2001, año en el que el carbón superó el valor de sus exportaciones. Según cifras del DANE, actualmente estos tres productos representan el 45% del valor de las exportaciones colombianas, distribuidas en un 26% para el petróleo, 12% el carbón y 7% el café ^[33].

La agrocadena del café, comprende actividades agrícolas en finca: como siembra, recolección, beneficio y secado. En los diferentes momentos de esta última actividad el café se denomina café pergamino mojado, pergamino húmedo y pergamino seco. En seguida, el café pergamino seco se transporta a la trilladora, donde se procede extraerle la película o endocarpio que lo cubre, convirtiéndolo en café verde. Finalmente el café “verde” se somete al proceso de tostación; donde el grano adquiere su color café característico.

En cada etapa de la agrocadena del café se producen diferentes tipos de residuos con propiedades y características únicas para cada uno de ellos. Los RAC (residuos Agrícolas de Cosecha) corresponden a los residuos que se generan en el sitio de siembra y cosecha, y los RAI (Residuos Agroindustriales) son los residuos generados en el procesamiento de la materia prima. Para objeto del presente estudio se seleccionaron: la pulpa (RAI) y tallos (RAC) en la etapa de recolección y beneficio y la cascarilla (RAI) generada en el momento del trillado.

La siguiente tabla muestra la producción en toneladas por año de los residuos del café para el año 2006:

Tabla 1. Producción anual de los residuos de café (2006)

Cultivo	Residuo	Tipo de Residuo	Cantidad de Biomasa Tn/año ^[32]
Café	Pulpa	RAI	2008192
	Cisco	RAI	193460
	Tallos	RAC	2849596
	Total Cultivo		5051248

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el aprovechamiento energético de la biomasa residual generada en la cadena productiva del café. Se cuantificó el volumen de los RAC y los RAI en Colombia y a partir del modelo matemático ajustado por VIÑA F. y colaboradores se determinó el potencial energético (PE) de los residuos del café.

El modelo matemático para determinar el Potencial Energético de los residuos de café (PE) en TJ/año, se encuentra en función de: la Materia Seca (Mresiduo), y el Poder Calorífico Inferior del Residuo (PCI Residuo):

$$PE = m_{\text{residuo}} * PCI_{\text{residuo}}$$

Para el cálculo de la masa seca de residuo se tiene en cuenta el rendimiento del cultivo principal (Re), las hectáreas sembradas del cultivo (Ha), fracción de producto energético (Fp - e) y factor humedad (Fh). el modelo matemático general para el cálculo del potencial energético es entonces:

$$PE = Re * Ha * Fp - e * Fh * PCI$$

1.1 USOS DE LOS RESIDUOS DEL CAFÉ

Rajkumar Rathinavelu ^[1] y colaboradores, realizaron un estudio general de los usos más comunes de los residuos generados por la industria del café, los cuales constituyen una fuente de grave contaminación y problemas ambientales. En este trabajo se menciona la utilización de la pulpa en concentrado para animales, además de su uso como abono, el uso del agua residual drenada del extracto del café para la producción de biogás, que puede ser utilizado para generar electricidad, la cáscara de café para la generación de vapor debido a la cantidad de lignocelulosa contenida en ella, de este trabajo se concluye que los tratamientos térmicos para la cascarilla del café y la producción de biogás a partir de la pulpa, se muestran como una buena alternativa para su utilización como fuente de energía.

1.2 TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ

El aprovechamiento energético generado por los residuos de café, se realiza por medio dos tipos de conversión principalmente: Sistemas de conversión térmica, también llamada pirolítica, en donde se encuentran las tecnologías de pirolisis, gasificación, termólisis y combustión, y los sistemas de conversión bioquímicos, a la cual pertenecen las tecnologías de fermentación alcohólica y metánica. Estas tecnologías aprovechan la biomasa disponible y entregan como productos principalmente gases de síntesis, calor, vapor, alquitranes, aceite, carbón y CO₂.

COCHAUD, Thierry, estudio la termólisis de la cascarilla de café, definiendo un rango de temperatura de operación para la termólisis entre 400 y 500 °C, además de los pretratamientos y el contenido de humedad del residuo para efectuar dicho proceso que es menor que 10%. Básicamente el proceso el proceso degrada la cascarilla al aumentar la temperatura en ausencia de oxígeno, las moléculas orgánicas complejas se degradan y se transforman en gases ligeros (H₂ CH₄ CO₂,

CO) e hidrocarburos ligeros. Los gases de síntesis se acondicionan para ser aprovechados energéticamente. Este estudio muestra la complejidad del proceso y los parámetros que hay que tener en cuenta para la aplicación de esta tecnología.

Takahiro Murakami ^[29] y colaboradores determinaron que el combustible obtenido de la gasificación de los residuos de café, está directamente relacionado con la calidad de los productos del proceso de pirólisis, y que el aumento del tiempo de residencia en la gasificación solo aumenta una pequeña parte la eficiencia del mismo. La gasificación es en esencia la termoconversión de un sólido en un gas combustible. Como resultado de este proceso se obtiene un gas combustible de bajo poder calorífico entre 5.000 y 5.800 KJ/kg (1.200-1.400 Kcal/kg) con composición de: CO entre 20-26 %, CH₄ 1-4 %, N₂ 50-60 %, H₂ 5-10 % CO₂ 4-8 % y C_nH_m 0.1-0.5 % aproximadamente.

A. Domínguez ^[23] y colaboradores, realizaron un estudio del método de pirólisis y la temperatura de los productos obtenidos, así como su caracterización. Comparó la pirólisis tradicional, con la pirolisis asistida por microondas. Determino entonces, que la pirolisis de la cascarilla de café da como resultado una gran fracción de gas de síntesis, donde este aumento va a acompañada por la disminución de sólidos obtenidos y el aumento de la temperatura de pirólisis. La comparación de los métodos de pirolisis, mostró que la pirolisis asistida entrega mayor contenido de gas de síntesis, con un contenido rico en hidrogeno. De la pirolisis se obtienen productos sólidos (carbón vegetal), líquidos (Bio-aceite combustible) y gaseosos (combustible gaseoso de bajo o medio poder calórico), generados por el tratamiento de los residuos del café tratados, que contienen bajo contenido de humedad.

M. Saenger ^[22] y colaboradores, estudiaron la combustión de la cascarilla de café (62-75 % de material volátil), en un lecho fluidizado a escala piloto, mediante

medidas del peso perdido y temperatura de las partículas, devolatilización y combustión. El perfil axial de temperatura, fue medido en condiciones de combustión estacionaria, como una función del combustible alimentado. Los resultados obtenidos muestran que la devolatilización, comienza rápidamente en rango bajo de temperatura 170-200 °C; durante la alimentación del combustible, no se utilizó agua de refrigeración lo cual hizo que la pirólisis tomara lugar en el tubo alimentador, obstruyendo y generando que no se tuviera un flujo constante de combustible. El problema más grande observado fue la aglomeración de las cenizas en el lecho, debido a su baja temperatura de fusión, lo cual se le atribuye al contenido de K₂O (36-38%) en la cascarilla de café.

La oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire, libera agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial. No obstante, cuando la combustión no es completa, se forman monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, N₂O y otros materiales. Estos sí pueden generar impactos serios en la salud de los usuarios. También son gases de efecto invernadero, por lo que se debería minimizar su formación.

A.L. Orozco y colaboradores ^[3] estudiaron el mejoramiento de la fermentación de la pulpa de café, realizada por diferentes tipos de *Streptomyces*, analizando los compuestos obtenidos después de cada proceso. Las condiciones para realizar la fermentación fueron: Temperatura 27 - 32 °C, pH entre 4 y 5. En todas las etapas del proceso de producción de etanol, el de mayor costo es el de su purificación en torres de separación. Los principales productos obtenidos de la fermentación son: metanol, agua CO₂, etanol, 1-butanol, 1 propanol, 2 propanol, 2-pentanol y glicerol.

Debido a la variedad de procesos de conversión, es necesario determinar la caracterización y el potencial energético de los residuos de café concluir si es posible el aprovechamiento energético, con ayuda de una herramienta informática que permita extraer la “mejor” tecnología, para este fin.

1.3 ANÁLISIS MULTICRITERIO (AM)

Martínez, Eduardo ^[2] y colaboradores definieron los conceptos básicos para la decisión multicriterio. Para afrontar la habitual situación en un problema de toma de decisión, en la que son varios los objetivos o criterios que pretenden simultáneamente cubrirse, ha surgido en los últimos años la metodología multicriterio. La denominada AM es un campo interdisciplinario alimentado por fuentes muy diversas. En esencia, la AM es una optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un único agente decisor.

La elección entre soluciones eficientes es el verdadero problema de la AM, ya que en principio no hay ningún otro elemento de racionalidad "objetiva" que podamos manejar para descartar más soluciones. Nos vemos abocados a tener que hacer intervenir consideraciones de tipo subjetivo: las preferencias del decisor.

Un criterio clasificador en la AM atiende al número (finito o infinito) de alternativas a considerar en la decisión, existiendo métodos muy diferentes según cual sea el caso, aun cuando algunos de los fundamentos teóricos sean muchas veces aplicables a ambos tipos de situaciones. En primer lugar están aquellos problemas en los que las variables de decisión, y por tanto las funciones objetivo, pueden tomar un número infinito de valores distintos (valores en un continuo), conduciendo así a un número infinito de alternativas posibles del problema.

El problema general de la AM, es el de seleccionar aquella alternativa que "mejor" satisfaga las preferencias del decisor. Descartada en la AM la posibilidad de alcanzar una solución óptima, por tanto hemos de contentarnos con ese "mejor" entrecorillado para significar que su definición está abierta a diversas interpretaciones más o menos racionales.

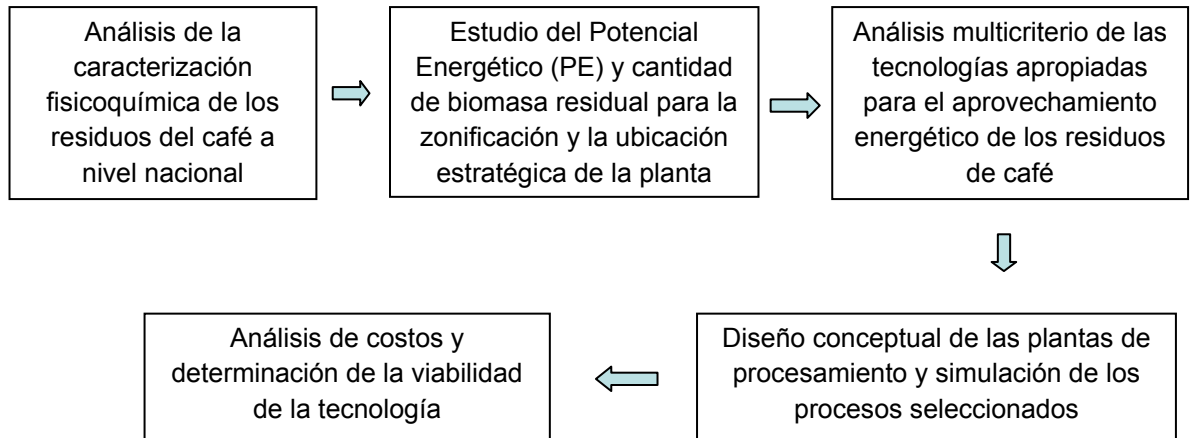
Ante la existencia de un número extenso de criterios, situación bien frecuente en la práctica, puede recurrirse sin embargo a estructurarlos en una jerarquía de criterios y subcriterios, incluso a varios niveles, que permita aliviar o hasta eliminar los inconvenientes mencionados.

Teniendo estos conceptos básicos, BARCO, L.²⁴ diseñó una herramienta informática, para la decisión tecnológica multicriterio de la cascarilla de arroz, asignado los criterios y sub-criterios necesarios, así como de las cuantificaciones de las variables cualitativas, que sirvieron como base para el análisis de este trabajo.

El presente trabajo busca entonces, caracterizar la biomasa residual de café, determinar su PE, analizar las tecnologías de conversión para los residuos de café, utilizando el análisis multicriterio como herramienta decisorio, teniendo en cuenta lo criterios ambiental, tecnológico, económico y social, con un posterior análisis de costos, para determinar la viabilidad de la tecnología encontrada como la “mejor” aplicada a cada residuo.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada, para el desarrollo del proyecto se en el siguiente diagrama de bloques:



El estudio se realizó con la colaboración de entidades que suministraron la información sobre el procesamiento del café y las cantidades de desechos producidos. Se identificaron requerimientos y condiciones de operación de cada proceso a partir del estado del arte de las diferentes tecnologías. La producción nacional de residuos de café se estimó a partir de los datos reportados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural para el año de 2006.

Los residuos del café se localizan a lo largo del sistema montañoso de Colombia, abarcando gran cantidad de departamentos, sobresaliendo los departamentos de Antioquia, Tolima, Caldas y Valle, los cuales concentran el 47% del total del área sembrada en café y el 50% de la producción nacional.

Según la Federación de cafeteros, en general las mayores diferencias regionales están relacionadas con el nivel de especialización y adaptación de variedades mejoradas (tecnificación) de café.

Para objeto de estudio y teniendo en cuenta la cercanía geográfica y homogeneidad en las características agroecológicas de las regiones productoras de café, se definieron 5 zonas productoras a saber:

- **Zona Centro:** está conformada por municipios de Cundinamarca y algunos del departamento del Meta, ubicados cerca de cordillera oriental. Se caracterizan por bajas extensiones sembradas y bajas producciones.
- **Costa Norte:** conformada por municipios más altos de Cesar, Magdalena y la Guajira. Se caracterizan siembras en pequeñas parcelas proporcionando bajas producciones.
- **Eje Cafetero:** es la zona más representativa, encontrando las mayores extensiones sembradas y mejores producciones, está conformada por municipios de los departamentos de Antioquia, Quindío, Caldas, Risaralda, Tolima y Huila.
- **Nor-Oriente:** pertenecen a esta zona los municipios que están sobre la cordillera oriental de los departamentos de Boyacá, Santander y Norte de Santander.
- **Occidente:** la conforman municipios del Valle de Cauca, Cauca, Nariño, y algunos de Caquetá. Presentan buenas producciones y variedad de climas.

Para la densificación de la biomasa residual de los residuos del café, se tomo como base el informe del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural para el año 2006, con el informe mensual para cada departamento.

Con el objetivo de analizar la composición del residuo se tomaron dos muestras, la cuales fueron tomadas como referencia par determinar el PE de cada residuo. Las muestras fueron tomadas en el municipio de Andes Antioquia en colaboración de CORPODIB.

La caracterización fisicoquímica se realizó en conjunto con laboratorios León teniendo en cuenta cada sector, escenario real y variables climáticas. Como

soporte en la selección de los parámetros se tienen referencias que reportan caracterizaciones de diferentes tipos de biomasa residual [BHATTACHARYA Y COL, 2005; BHATTACHARYA Y COL, 1997; CARDONA Y COL, 2004; CERVANTES Y COL, 2007; FLORA & RIAHI-NEZHAD, 2006; GUIA AMBIENTAL, 2002; PERERA Y COL, 2005].

La Tabla 1 muestra los parámetros definidos para la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual del café.

Tabla 2. Parámetros de caracterización para los residuos de café

TIPO DE ANÁLISIS				
Análisis Básico	Análisis Próximo en Base Seca	Análisis Último en Base Seca	Otros Parámetros	Análisis Energético en Base Seca
Humedad Sólidos Totales	Material Volátil Carbono Fijo Cenizas	Carbono orgánico total Hidrogeno Oxigeno Nitrógeno Azufre	Sólidos Volátiles Totales Materia orgánica Relación C/N Grasa Proteína	Poder calorífico inferior

El contenido energético de los RAI y los RAC se expresaron mediante el poder calorífico Inferior (PCI); el cual se realizó en una bomba calorimétrica, en el Laboratorio de la escuela de Ingeniería Metalúrgica (UIS) siguiendo la norma ASTM D 3286-73e y la ISO 1928-76.

El potencial energético (PE) para la biomasa residual del café fue determinado a partir del modelo matemático ajustado de Viña F. y colaboradores descrito anteriormente. Para la ubicación de la planta de aprovechamiento energético de los RAC y los RAI se calculó el PE de los residuos de café en Colombia teniendo en cuenta los municipios de cada departamento con mayor producción del RAC y RAI.

Para el aprovechamiento energético de la biomasa residual de café, se utilizó la herramienta informática desarrollada por BARCO L. descrita en el análisis multicriterio. La tabla 3 muestra cada uno de los criterios, indicadores y niveles evaluados por el análisis multicriterio:

Tabla 3. Criterios, subcriterio e indicadores para el análisis multicriterio

Criterio	Indicador (1)	Nivel 2	Nivel 3	
Ambiental	Entorno afectado			
	Descargas	Gaseosas		
		Líquidas		
		Sólidas		
	Contaminación sonora			
Paisaje				
Tecnológico	Materia Prima	Disponibilidad		
		Características FQ	Humedad, Lignina, Celulosa, Sólidos volátiles, Cenizas	
	Proceso	Madurez		
		Generación de subproductos de valor agregado		
		Complejidad	Operacional	
			Pretratamientos	
			Postratamientos	
		Infraestructura	Área requerida	
			Riesgos	
			Capacidad mínima	
Económico	Costos	Construcción		
		Mantenimiento		
		Operación	Servicios	
	Transporte			
	Eficiencia de la tecnología	Especificidad hacia el producto		
Social	Generación de empleos			

En el diseño conceptual se realizó basado en los resultados obtenidos a partir del análisis multicriterio. Con el software de diseño Hysys 3.2 se realizó la simulación de los procesos para cada residuo, ajustando las corrientes de entrada, composición del alimento y condiciones de operación.

El análisis económico se realizó tomando como base un incremento de los costos producción y de operación de un 10 y 6% respectivamente. La depreciación de los equipos, se realizó tomando el valor del cociente entre el costo total estimado para los equipos y su vida útil. El cálculo aproximado de los costos de la tecnología, se realizó basado en el método de análisis de costos del equipo fundamental.

3. RESULTADOS

En la tabla 4 se muestran los resultados promedio obtenidos para la caracterización de los RAV y los RAI.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de los residuos de café

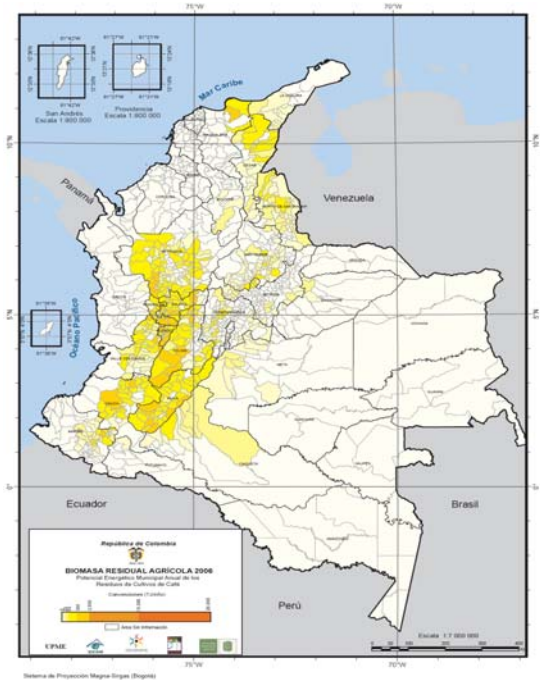
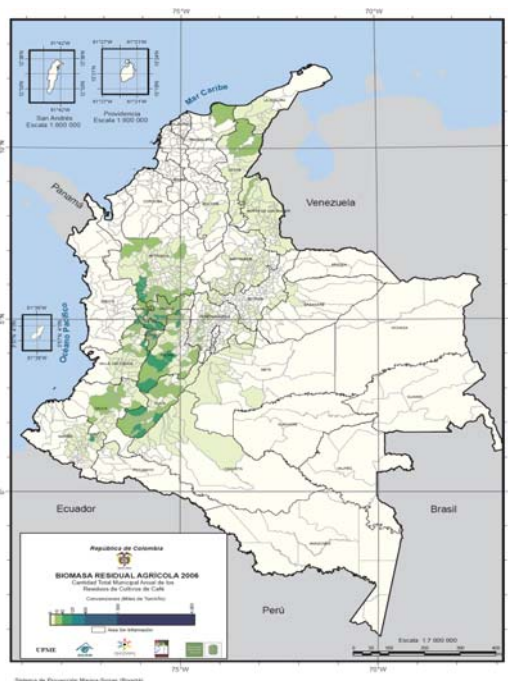
TIPO DE ANÁLISIS		Café		
Análisis Básico		Pulpa	Cisco	Tallos
Humedad	% p/p	80,62	10,42	29,01
Sólidos Totales	% p/p	19,38	89,58	70,99
Análisis Próximo en Base Seca				
Material Volátil MV	% p/p	85,72	98,82	NR
Carbono Fijo CF	% p/p	7,07	0,51	NR
Cenizas	% p/p	7,21	0,67	2,6
Análisis Último en Base Seca				
Carbono Orgánico Total	% p/p	51,8	57,69	NR
Hidrógeno	% p/p	5,95	6,63	NR
Oxígeno	% p/p	FD	FD	NR
Nitrógeno	% p/p	1,06	0,53	0,69
Azufre	% p/p	FD	FD	NR
Otros Parámetros				
Sólidos Volátiles Totales SVT	% p/p	17,98	88,98	NR
Materia Orgánica	% p/p	89,31	99,46	NR
Relación C/N	Adimensional	48,75	108,9	NR
Grasa	% p/p	1,37	0,28	0,4
Proteína	% p/p	6,64	3,32	4,31
Análisis Energético en Base Seca				
Poder Calorífico Inferior	KJ/kg	18517,5	19264,57	19062,23

La caracterización fisicoquímica en primer lugar, muestra que los residuos de cascarilla y tallos poseen un contenido bajo de humedad 10.42 y 29.01 % respectivamente, lo que supone que los tratamientos térmicos para su aprovechamiento energético son la mejor opción y lo corrobora el hecho de que su PCI es mas alto que la pulpa de café que contiene un 80.62 % de humedad, que podría utilizarse en un proceso de fermentación.

A continuación se muestran los mapas con los resultados que representan la densidad de la cantidad anual municipal-departamental de los residuos del café, así como su potencial energético.

Cantidad Total Municipal Anual de Residuos de Cultivos de Café

Potencial Energético Municipal Anual de Residuos de Cultivos de Café



Los mapas 1 y 2 muestran que la zona con mayor cantidad de residuos y de potencial energético, corresponde al eje cafetero, donde la producción anual de café, es la más representativa en todo el país.

Por lo anterior, la ubicación de las tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa residual de café debe hacerse en esta zona, debido a que la mayoría de materia prima se encuentra allí y esto disminuiría costos adicionales de transporte.

3.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO

A continuación se muestran los resultados para el análisis multicriterio para cada uno de los residuos:

Tabla 5. Análisis Multicriterio: factor ambiental de la cascarilla de café

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia				Puntaje	Clasificación
	0,57	0,26	0,10	0,07		
	Paisaje	Descargas	Contaminación Sonora	Entorno afectado		
	Número de Orden Parcial					
1. Fermentación	3	2	1	1	2,40	3
2. Combustión	3	5	4	3	3,61	5
3. Pirólisis	1	1	2	1	1,10	1
4. Gasificación	2	3	5	5	2,77	4
5. Termólisis	1	4	2	3	2,01	2

La tabla 5 muestra que evaluado el factor ambiental de la cascarilla de café, se muestra como resultado que la pirólisis es la mejor opción, y esto es debido a su utilización de sus productos en otros tratamientos térmicos.

Tabla 6. Análisis Multicriterio: factor tecnológico de la cascarilla de café

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0,75	0,25		
	Materia Prima	Proceso		
	Número de Orden Parcial			
1. Fermentación	3	3	5,25	4
2. Combustión	1	1	1,75	1
3. Pirólisis	3	5	5,75	5
4. Gasificación	1	4	2,50	2
5. Termólisis	3	2	5,00	3

Tabla 7. Análisis Multicriterio: factor económico de la cascarilla de café

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0,67	0,33		
	Costos	Eficiencia de la Tecnología		
	Número de Orden Parcial			
1. Fermentación	4	5	4,33	5
2. Combustión	3	3	3,00	3
3. Pirólisis	2	4	2,67	2
4. Gasificación	5	1	3,67	4
5. Termólisis	1	2	1,33	1

La tabla 6 muestra la combustión como el mejor proceso, según el criterio tecnológico esto se debe principalmente al desarrollo de la tecnología y la caracterización fisicoquímica de la cascarilla de café. La tabla 7 presenta al proceso de termólisis como la mejor opción, debido a los bajos costos de pretratamiento de la materia prima y consumo de energía.

Tabla 8. Análisis Multicriterio: factor social de la cascarilla de café

Alternativa Tecnológica	Clasificación
1. Fermentación	2
2. Combustión	4
3. Pirólisis	3
4. Gasificación	5
5. Termólisis	1

La tabla 8 muestra que la termólisis de la cascarilla de café, genera la menor cantidad de empleos para el tratamiento de este residuo, lo cual supone una disminución de los gastos de mano de obra.

Tabla 9. Resultado Análisis Multicriterio de cascarilla de café

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia				Puntaje Final	Jerarquía
	0,55	0,28	0,12	0,06		
	Criterio Ambiental	Criterio Tecnológico	C. Económico	C. Social		
	Puntaje Valoración Parcial					
Fermentación	3	4	5	2	3,46	3
Combustión	5	1	3	4	3,59	5
Pirólisis	1	5	2	3	2,35	2
Gasificación	4	2	4	5	3,50	4
Termólisis	2	3	1	1	2,11	1

Siendo evaluados todos los criterios y subcriterios, el análisis multicriterio (tabla 9) de la cascarilla de café, determinó que la mejor tecnología aplicable es la termólisis.

Tabla 10. Análisis Multicriterio: factor ambiental de los tallos de café

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia				Puntaje	Clasificación
	0,57	0,26	0,10	0,07		
	Paisaje	Descargas	Contaminación Sonora	Entorno afectado		
	Número de Orden Parcial					
1. Fermentación	3	2	1	1	2,40	3
2. Combustión	3	5	4	3	3,61	5
3. Pirólisis	1	1	2	1	1,10	1
4. Gasificación	2	3	5	5	2,77	4
5. Termólisis	1	4	2	3	2,01	2

La tabla 10 muestra que evaluado el factor ambientad, al igual que la cascarilla, para los tallos, la pirólisis es la mejor opción, y esto es debido a su utilización de sus productos en otros tratamientos térmicos.

Tabla 11. Análisis Multicriterio: factor tecnológico de los tallos de café

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0,75	0,25		
	Materia Prima	Proceso		
	Número de Orden Parcial			
1. Fermentación	4	3	6,75	4
2. Combustión	1	1	1,75	1
3. Pirólisis	5	5	8,75	5
4. Gasificación	1	4	2,50	3
5. Termólisis	1	2	2,00	2

Tabla 12. Análisis Multicriterio: factor económico de los tallos de café

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0,67	0,33		
	Costos	Eficiencia de la Tecnología		
	Número de Orden Parcial			
1. Fermentación	4	5	4,33	5
2. Combustión	3	3	3,00	3
3. Pirólisis	2	4	2,67	2
4. Gasificación	5	1	3,67	4
5. Termólisis	1	2	1,33	1

La tabla 11 muestra la combustión como el “mejor” proceso, esto se debe principalmente al desarrollo de la tecnología y la caracterización fisicoquímica de los tallos de café. La tabla 12 presenta al proceso de termólisis como la mejor opción, debido a los bajos costos de pretratamiento de la materia prima y consumo de energía.

Tabla 13. Análisis Multicriterio: factor social de los tallos de café

Alternativa Tecnológica	Clasificación
1. Fermentación	2
2. Combustión	4
3. Pirólisis	3
4. Gasificación	5
5. Termólisis	1

La tabla 13 muestra que la termólisis de los tallos de café, al igual que la cascarilla genera la menor cantidad de empleos para el tratamiento de este residuo, lo cual supone una disminución de los gastos de mano de obra.

Tabla 14. Resultado Análisis Multicriterio del tallo de café

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia				Puntaje Final	Jerarquía
	0,55	0,28	0,12	0,06		
	Criterio Ambiental	Criterio Tecnológico	C. Económico	C. Social		
Puntaje Valoración Parcial						
Fermentación	3	4	5	2	3,46	3
Combustión	5	1	3	4	3,59	4
Pirólisis	1	5	2	3	2,35	2
Gasificación	4	3	4	5	3,78	5
Termólisis	2	2	1	1	1,83	1

Siendo evaluados todos los criterios y subcriterios, el análisis multicriterio (tabla 14) de los tallos de café, determinó que la mejor tecnología aplicable es la termólisis.

Tabla 15. Análisis Multicriterio: factor ambiental de la pulpa de café

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia				Puntaje	Clasificación
	0,57	0,26	0,10	0,07		
	Paisaje	Descargas	Contaminación Sonora	Entorno afectado		
Número de Orden Parcial						
1. Fermentación	1	2	1	1	1,26	1
2. Combustión	2	3	4	3	2,53	4
3. Pirólisis	2	1	2	1	1,67	2
4. Gasificación	2	4	5	5	3,03	5
5. Termólisis	1	5	2	3	2,27	3

La tabla 15 muestra que evaluado el factor ambiental, para la pulpa de café, la fermentación es la mejor opción, y esto es debido a su utilización de sus productos en otros procesos de transformación de energía, así como las descargas de los procesos entregadas.

Tabla 16. Análisis Multicriterio: factor tecnológico de la pulpa de café

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0,75	0,25		
	Materia Prima	Proceso		
	Número de Orden Parcial			
1. Fermentación	2	2	3,50	3
2. Combustión	2	1	3,25	2
3. Pirólisis	2	4	4,00	5
4. Gasificación	1	5	2,75	1
5. Termólisis	2	3	3,75	4

Tabla 17. Análisis Multicriterio: factor económico de la pulpa de café

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0,67	0,33		
	Costos	Eficiencia de la Tecnología		
	Número de Orden Parcial			
1. Fermentación	1	1	1,00	1
2. Combustión	4	3	3,67	3
3. Pirólisis	3	5	3,67	3
4. Gasificación	5	2	4,00	5
5. Termólisis	2	3	2,33	2

La tabla 16 muestra la gasificación como el mejor proceso, esto se debe principalmente al desarrollo de la tecnología, aunque implicaría altos costos de pretratamiento. La tabla 17 presenta al proceso de fermentación como la mejor opción, debido a los bajos costos de pretratamiento de la materia prima y la caracterización fisicoquímica de la pulpa de café, de donde sobresale su contenido de humedad.

Tabla 18. Análisis Multicriterio: factor social de la pulpa de café

Alternativa Tecnológica	Clasificación
1. Fermentación	1
2. Combustión	4
3. Pirólisis	3
4. Gasificación	5
5. Termólisis	2

La tabla 18 muestra que la fermentación de la pulpa de café, genera la menor cantidad de empleos para el tratamiento de este residuo, lo cual supone una disminución de los gastos de mano de obra. El aumento del número de empleos para las demás tecnologías esta dado por el incremento de operaciones de pretratamiento de la materia prima.

Tabla 19. Resultado Análisis Multicriterio de la pulpa de café

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia				Puntaje Final	Jerarquía
	0,55	0,28	0,12	0,06		
	Criterio Ambiental	Criterio Tecnológico	C. Económico	C. Social		
Puntaje Valoración Parcial						
Fermentación	1	3	1	1	1,56	1
Combustión	4	2	3	4	3,32	4
Pirólisis	2	5	3	3	3,01	2
Gasificación	5	1	5	5	3,88	5
Termólisis	3	4	2	2	3,11	3

Siendo evaluados todos los criterios y subcriterios, el análisis multicriterio (tabla 19) de la pulpa de café, determinó que la mejor tecnología aplicable es la fermentación. Desde un comienzo podría haberse descartado la posibilidad de un tratamiento térmico de la pulpa de café debido a su contenido de humedad, lo cual implicaría un aumento de los costos de pretratamiento.

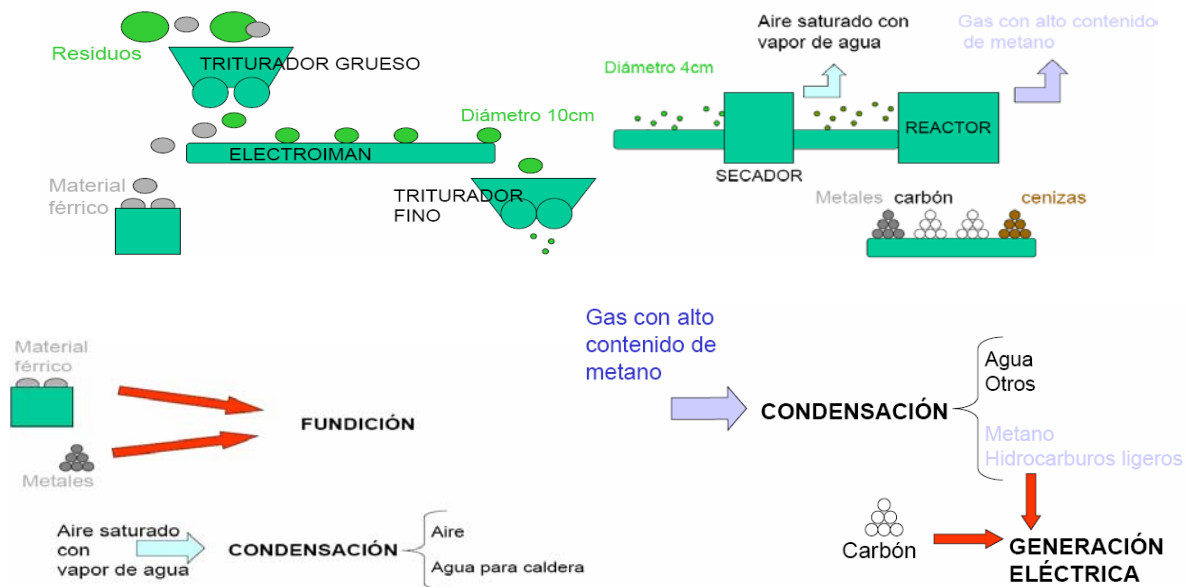
En resumen, las anteriores tablas muestran, que la mejor tecnología para la transformación de los residuos de la cascarilla y los tallos es la termólisis. Por el contrario la fermentación se muestra como la mejor alternativa para el manejo de la pulpa de café con fines energéticos, y lo afirma el hecho que el contenido de humedad (ver tabla 4) para el mismo es grande, con respecto a los otros dos, lo cual supone mayor costo de pre-tratamiento, mantenimiento y operación entre otros, para la utilización de procesos de conversión térmica.

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño se hizo con una base de cálculo de 360.000 ton/año de residuo y los años tomados como 360 días.

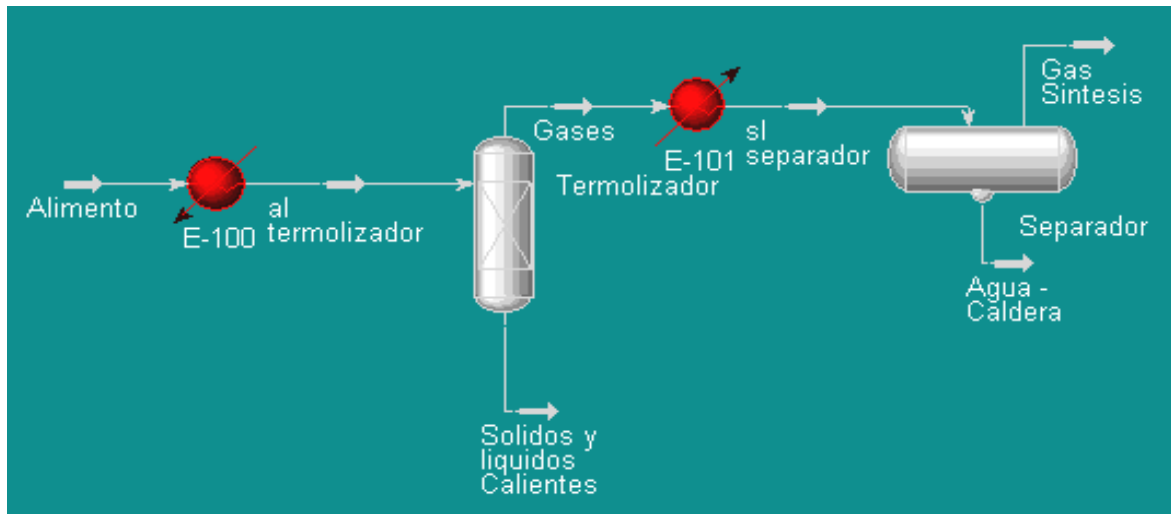
3.2.1 Termólisis de la cascarilla y el tallo. Siguiendo las etapas nombradas, el diagrama de proceso de termólisis para la cascarilla y los tallos es:

Diagrama 1. Proceso de termólisis de la cascarilla y el tallo de café



El siguiente diagrama muestra la Simulación en Hysys del proceso de termólisis, teniendo en cuenta que el precalentador E-100 y el reactor en conjunto, forman o simulan al termolizador: que opera a 400 °C.

Diagrama 2. Proceso de termólisis de la cascarilla y el tallo de café (Simulación Hysys)



Dependiendo de la energía suministrada los productos obtenidos se pueden controlar:

- Energía en exceso: producción de carbón y Dióxido de carbono
- Energía limitada: producción de hidrocarburos livianos (metano).

Los resultados obtenidos de la Simulación en Hysys muestran:

1000 Ton/día Cascarilla → 355.79 Ton/día Gas de Síntesis

1000 Ton/día Tallo → 281.792 Ton/día Gas de Síntesis

El gas de síntesis obtenido se puede utilizar para la generación de energía eléctrica debido a la contracción de gas metano que es aproximadamente 0.4 (fracción mol.).

3.2.2 Fermentación de la Pulpa de Café. A partir de los balances de masa realizados por A.L. Orozco, se determinó que de 1000 Ton/día de pulpa de café se producen 794.67 Ton/día de fermentado. La composición de los fluidos después de la fermentación, se encuentra dada en la siguiente tabla:

Tabla 20. Composición de fluidos de la fermentación (FUENTE: A.L. Orozco ^[3])

de Fermentacion		
Temperature	30.00	C
Pressure	102.0	kPa
Molar Flow	2185	kgmole/h
Comp Mass Frac (Ethanol)	0.1373	
Comp Mass Flow (Ethanol)	6413.0253	kg/h
Comp Mass Frac (H2O)	0.7381	
Mass Flow	4.672e+004	kg/h
Comp Mass Flow (H2O)	34482.3981	kg/h

El diagrama de proceso de una planta de fermentación esta dada por:

Diagrama 3. Proceso de fermentación de la pulpa de café

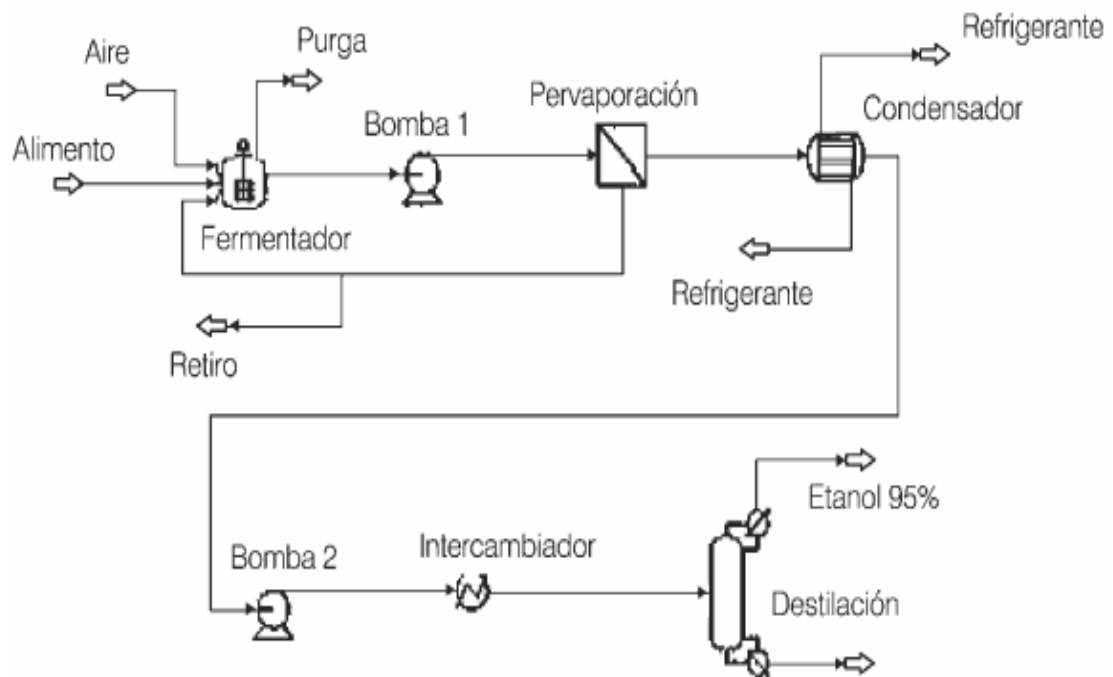


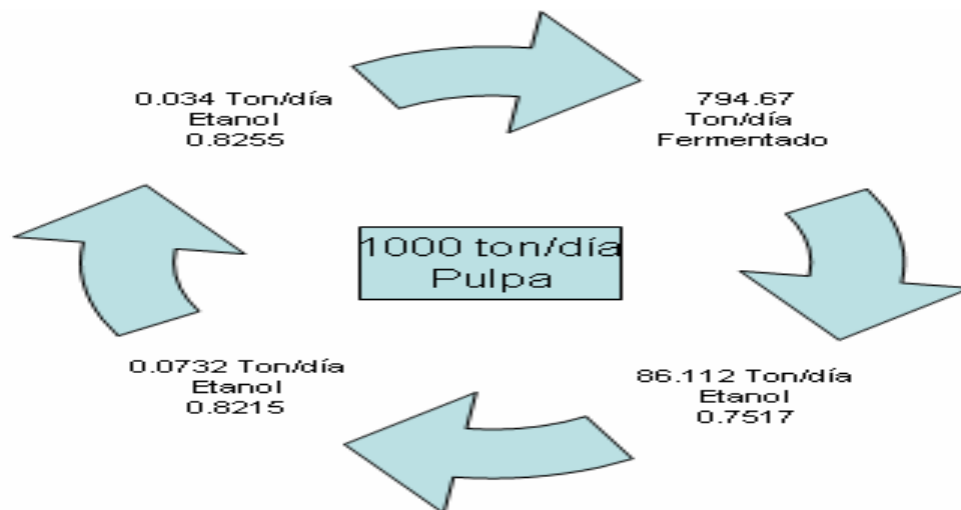
Tabla 21. Propiedades de las corrientes del proceso de separación

CORRIENTE	TEMPERATURA °C	PRESION kPa	CORRIENTE	TEMPERATURA °C	PRESION kPa
de fermentacion	30	102	8	77,3	100
agua lavado	20	102	9	77,3	100
CO2	30,27	101,3	10	77,66	91,25
al fermentador	33,23	101,23	11	98,17	99
fondo	30,03	102	12	101	105
S	140	102	13	30	102
1	87,33	100	14	30	102
2	30,03	102	15	30,03	102
3	100	101,5	16	30	102
4	100,2	102	17	30	102
5	51,22	97	19	30	102
6	51,22	97	20	30	102
7	82,63	100			

La tabla 21 muestra las propiedades de las corrientes de entrada y salida en los equipos del sistema de separación, para la Simulación en Hysys.

Los resultados para el proceso de fermentación de la pulpa de café se resumen en el siguiente diagrama:

Diagrama 5. Resultados proceso de fermentación de la pulpa de café



La cantidad más representativa de etanol producido, es de 86.112 Ton/día de etanol con una fracción mol de 0.7517. Dicho resultado muestra que el alcohol producido se encuentra dentro del rango comercial de concentración, que oscila entre 70 y 95 fracción mol.

3.3 COSTOS

A continuación se presenta el análisis de costos para cada una de las tecnologías encontradas como “mejor”, en el análisis multicriterio.

Tabla 22. Cálculo aproximado del costo de la planta basado en el equipo fundamental plantas de termólisis de la cascarilla y los tallos

COMPONENTES	COSTOS (US\$)
Compra del equipo ³⁶	62100000
Instalación del equipo adquirido	22410000
Instrumentación (instalada)	17280000
Tuberías (instaladas)	19710000
Eléctrica (instalada)	12420000
Edificios (incluyendo servicios)	12420000
Mejoras	4860000
Centros de servicio (instalado)	37260000
Terreno	2430000
Ingeniería y supervisión	24840000
Expensas de construcción	29700000
Pago de Contratista	4860000
Contingencia	19710000
TOTAL	270000000

El costo aproximado para las plantas de termólisis, es de \$270.000.000, este valor no se debe tomar como exacto, pues no se consideran los valores totales de todos los equipos implementados.

Tabla 23. Ingresos anuales correspondientes a la proyección estimada (cascarilla de café)

PRODUCTO	UNIDADES (TON)	PRECIO (US\$)/TON ³⁶	PRECIO TOTAL DÓLARES
Gas de síntesis	355,79	67000	23837930

Tabla 24. Proyección de flujo de caja (cascarilla de café)

RUBROS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 16	AÑO 17
Ingresos por ventas	0	23837930	26221723	90524499,5	99576949,5
Costes de producción	0	18457881	19565353,9	41731496,2	44235385,9
Depreciación	0	6000000	6000000	6000000	6000000
Bancos	271000000	0	0	0	0
UTILIDAD BRUTA	-265000000	-264380049	-263723680	-25994985,7	23346577,8

La tabla 24 muestra la proyección del flujo de caja, para la termólisis de la cascarilla de café, con un saldo negativo para 16 años, en los cuales se paga la totalidad de la deuda adquirida.

Tabla 25. Ingresos anuales correspondientes a la proyección estimada (tallos de café)

PRODUCTO	UNIDADES (TON)	PRECIO (US\$/TON) ³⁶	PRECIO TOTAL DÓLARES
Gas de síntesis	281,792	67000	18880064

Tabla 26. Proyección de flujo de caja (tallos de café)

RUBROS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 20	AÑO 21
Ingresos por ventas	0	18880064	20768070,4	104971595	115468754
Costes de producción	0	18457881	19565353,9	52685052,4	55846155,6
Depreciación	0	6000000	6000000	6000000	6000000
Bancos	271000000	0	0	0	1
UTILIDAD BRUTA	-265000000	-259422183	-264219466	-25095373,5	28527225,1

La tabla 26 muestra la proyección del flujo de caja, para la termólisis de los tallos de café, con un saldo negativo para 20 años, en los cuales se paga la totalidad de la deuda adquirida.

Tabla 27. Cálculo aproximado del costo de la planta basado en el equipo fundamental (pulpa de café)

COMPONENTES	COSTOS (US\$)
Compra del equipo ³⁵	72967,73
Instalación del equipo adquirido	26331,833
Instrumentación (instalada)	20304,064
Tuberías (instaladas)	23159,323
Eléctrica (instalada)	14593,546
Edificios (incluyendo servicios)	14593,546
Mejoras	5710,518
Centros de servicio (instalado)	43780,638
Terreno	2855,259
Ingeniería y supervisión	29187,092
Expensas de construcción	34897,61
Pago de Contratista	5710,518
Contingencia	23159,323
TOTAL	317251

El costo de la planta de fermentación es de aproximadamente \$ 317.251. Este valor corresponde a los equipos de separación (separadores y torres de destilación) utilizado, para la concentración del etanol.

Tabla 28. Ingresos anuales correspondientes a la proyección estimada (pulpa de café)

PRODUCTO	UNIDADES (TON)	PRECIO (US\$/TON) ³⁴	PRECIO TOTAL DOLARES
Etanol	29958,912	424	12702578,69

Tabla 29. Proyección de flujo de caja (pulpa de café)

RUBROS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Ingresos por ventas	0	12702578,69	13972836,56	15370120,2	16907132,2
Costes de producción	0	126913,3808	134528,1836	142599,875	151155,867
Depreciación	0	31725,1	31725,1	31725,1	31725,1
Bancos	320000	0	0	0	0
UTILIDAD BRUTA	-288274,9	12255665,31	26062248,58	41258043,8	57982295,1

La tabla 29 muestra la proyección del flujo de caja para la fermentación de la pulpa de café, en la cual se observa que solo se tiene un saldo negativo para el primer año, que corresponde a la instalación y puesta en marcha de la tecnología.

4. CONCLUSIONES

- En Colombia las 5'051.248 ton/año de Biomasa Residual de café poseen un Potencial Energético de 49.106,89 TJ/año; los cuales equivalen a la producción de 49.106,89 Ton/año gas de síntesis y 317.120,112 Ton/año de etanol, los cuales podrían ser utilizados para la producción de electricidad y combustible líquido principalmente.
- Las tecnologías para la transformación de la biomasa obtenidas mediante análisis multicriterio, fue la termólisis para los residuos de cascarilla y tallos, y fermentación para la pulpa del café, de las cuales se obtiene productos que se encuentran en concentraciones entre los rangos comerciales.
- A partir de 1000 Ton/día de residuo de cascarilla de café y 1000 Ton/día tallos de café se obtienen 355.79 y 281.792 Ton/día de Gas de Síntesis respectivamente con un contenido de metano aproximadamente de 0.4. A partir de la misma cantidad de residuo de pulpa de café se obtienen: 86.112 Ton/día de etanol con una fracción mol de 0.7517, 0.034 Ton /día de etanol con una fracción mol 0.8255 y 0.0732 Ton /día de etanol con una fracción mol 0.8215.
- El análisis de costos, muestra que la implementación de las tecnologías, termólisis para los residuos de cascarillas y tallo de café, y fermentación para la pulpa de café, son rentables desde el punto de vista económico, puesto que aunque las dos primeras tardan más tiempo en recuperar el capital invertido (17 y 21 años), tienen un buen margen de utilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Rajkumar Rathinavelu, Giorgio Graziosi, International Coffee Organization, (2005) Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café. Documento WP-Board No. 942/03, Costa Rica
- [2]. Martínez, Eduardo y Escudey, Mauricio (eds.) (1997), Evaluación y decisión multicriterio: reflexiones y experiencias, Santiago, USACH, UNESCO (www.UNESCO.org)
- [3]. A.L. Orozco, M.I. Pérez, O. Guevara, J. Rodríguez, M. Hernández, F.J. González-Vila, O. Polvillo, M.E. Arias, (2007), Biotechnological enhancement of coffee pulp residues by solid-state fermentation with *Streptomyces*. Py–GC/MS analysis, *Biochemical Engineering Journal* 6 (2000) 153–162, Science Direct (www.sciencedirect.com)
- [4]. C.Z. Wu , H. Huang, S.P. Zheng, X.L. Yin, (2001), An economic analysis of biomass gasification and power generation in China, *Bioresource Technology* 83 (2002) 65–70, Science Direct (www.elsevier.com/locate/bej)
- [5]. GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO *SECRETARÍA DE ECOLOGÍA*, (2004), Energía a partir de Biomasa un concepto innovador para la utilización descentralizada de fuentes de energía regenerativas, México, Proyecto de apoyo a la Gestión de Residuos Sólidos.
- [6]. H. Liu, G.M. Jiang, H.Y. Zhuang, K.J. Wang, (2007), Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues, Science Direct, (www.sciencedirect.com)
- [7]. E. Biaginia, A. Fantei , L. Tognotti, (2007), Effect of the heating rate on the devolatilization of biomass residues, Elsevier (www.elsevier.com)
- [8]. Takuya Yoshida, Yoshito Oshima, Yukihiko Matsumura, (2003), Gasification of biomass model compounds and real biomass in supercritical water, Elsevier (www.elsevier.com)

- [9]. Taro Sonobe, Nakorn Worasuwanarak, (2007), Kinetic analyses of biomass pyrolysis using the distributed activation energy model, Science Direct (www.sciencedirect.com)
- [10]. S. Consonni , M. Giugliano, M. Grosso, (2004), Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste Part A: Mass and energy balances, Elsevier (www.elsevier.com)
- [11]. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central FOCER, (2002), Manuales sobre energía renovable Biomasa, Costa Rica. (<http://www.bun-ca.org>)
- [12]. Hitofumi Abe, Akio Katayama, Bhuvneshwar P. Sah, Tsuyoshi Toriu, Sat Samy, Phon Pheach, Mark A. Adams, Pauline F. Grierson, (2007), Potential for rural electrification based on biomass gasification in Cambodia, Science Direct (www.sciencedirect.com)
- [13]. Zhongyang Luo, Shurong Wang, Yanfen Liao, Jinsong Zhou, Yueling Gu, Kefa Cen, (2003), Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel, Science Direct (www.sciencedirect.com)
- [14]. Ministerio de Medio Ambiente, (2002) Guía para Selección de Tecnologías de Manejo Integral de Residuos Sólidos, Fotolito América Ltda., Pág. 119-179, Bogotá, D. C. – Colombia
- [15]. Jay B. Cameron, Amit Kumar, Peter C. Flynn, (2006), The impact of feedstock cost on technology selection and optimum size, Elsevier Biomass and Bioenergy 31 (2007) 137–1 (www.elsevier.com/locate/bej)
- [16]. Elias, Xavier, Aplicaciones de la valorización energética de los residuos
- [17]. Peter McKendry, (2001), Energy production from biomass (part 1): overview of biomasa, Bioresource Technology 83 (2002) 37–46 (www.elsevier.com/locate/bej)
- [18]. Peter McKendry, (2001), Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, Bioresource Technology 83 (2002) 47–54 (www.elsevier.com/locate/bej)

- [19]. Peter McKendry, (2001), Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, *Bioresource Technology* 83 (2002) 55–63 (www.elsevier.com/locate/bej)
- [20]. Antonio C. Caputo, Mario Palumbo, Pacifico M. Pelagagge, Federica Scacchia, (2004), Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: Effects of logistic variables, Elsevier, *Biomass and Bioenergy* 28 (2005) 35–51 (www.elsevier.com/locate/bej)
- [21]. M. Saenger, E.-U. Hartge, J. Werther, T. Ogada, Z. Siagi, (1999), Combustion of coffee husks, Elsevier *Renewable Energy* 23 (2001) 103–121, (www.elsevier.com/locate/renene)
- [22]. Domínguez, J.A. Menéndez, Y. Fernández, J.J. Pis, J.M. Valente Nabais, P.J.M. Carrott, M.M.L. Ribeiro Carrott, Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas, Science Direct, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 79 (2007) 128–135 (www.sciencedirect.com)
- [23]. Barco, Lina, Diseño de una herramienta matemática, para el análisis tecnológico de la cascarilla de arroz, Bucaramanga(2008), Universidad Industrial de Santander
- [24]. Michaël Becidan , Øyvind Skreiberg, Johan E. Hustad, (2006), Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples, Science Direct, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 78 (2007) 207–213 (www.sciencedirect.com)
- [25]. Michaël Becidan , Øyvind Skreiberg, Johan E. Hustad, (2006), Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples: Intra-sample temperature distribution and effect of sample weight (“scaling effect”), Science Direct, *Fuel* 86 (2007) 2754–2760 (www.sciencedirect.com)
- [26]. R. Zimmermann, R. Dorfner, A. Kettrup, (1998), Direct analysis of products from plant material pyrolysis, Elsevier, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 49 (1999) 257 – 266 (www.elsevier.com/locate/renene)

- [27]. Ondrej Masek, Miki Konno, Sou Hosokai, Nozomu Sonoyama, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi, A study on pyrolytic gasification of coffee grounds and implications to allothermal gasification, Elsevier (www.elsevier.com/locate/biombioe)
- [28]. Takahiro Murakami, Guangwen Xu, Toshiyuki Suda, Yoshiaki Matsuzawa, Hidehisa Tani, Toshiro Fujimori, (2006), Some process fundamentals of biomass gasification in dual fluidized bed, Fuel (<http://www.fuelfirst.com>)
- [29]. J.B. Ulloa, J.H. van Weerd, E.A. Huisman, J.A.J. Verreth, (2003), Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: the Costa Rican situation, Elsevier Waste Management 24 (2004) 87–97 (www.elsevier.com/locate/wasman)
- [30]. Ashok Pandey, Carlos R. Soccol, Poonam Nigam, Debora Brand, Radjiskumar Mohan, Sevastianos Roussos, (2000), Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses, Biochemical Engineering Journal 6 (2000) 153–162 (www.elsevier.com/locate/bej)
- [31]. PETER & TIMMERHAUS. (1991). Plant design and economics for chemical engineering. Mc. Graw-Hill. 4^a ed.
- [32]. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Anuario Estadístico (www.agrocadenas.gov.co)
- [33]. Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia CORPODIB, Aspectos económicos de la implementación de la tecnología de producción de biodiesel a partir de aceite de palma (www.corpodib.com)
- [34]. Petroquímicos Nacionales Peña, Diseño de una columna de destilación con costos, (www.petronacionalespena.mx)
- [35]. COCHAUD, Thierry, Manejo de desechos sólidos. Costa Rica (www.belen.gov.cr)

ANEXOS

ANEXO A.
PROPIEDADES EN HYSYS

PROPIEDADES PROCESO DE TERMÓLISIS

E-100		
Feed Temperature	25.00	C
Product Temperature	400.0	C

E-101		
Feed Temperature	1355	C
Product Temperature	25.00	C

Termolizador		
Separator Type		
Vessel Temperature	1355	C
Vessel Pressure	125.0	kPa
Vapour Molar Flow	159.1	kgmole/h
Liquid Molar Flow	38.81	kgmole/h

Separador		
Separator Type		
Vessel Temperature	25.00	C
Vessel Pressure	110.0	kPa
Liquid Molar Flow	7.239	kgmole/h

PROPIEDADES PROCESO DE FERMENTACIÓN

MIX-100		
Product Molar Flow	2320	kgmole/h
Product Mass Flow	4.929e+004	kg/h
Product Volume Flow	52.29	m3/h
Product Temperature	30.03	C
Product Pressure	102.0	kPa
Equalize Pressures	No	

T-101		
Convergence	Converged	
Number of Trays	17.00	

T-100		
Convergence	Converged	
Number of Trays	10.00	

ven CO2		
Separator Type		
Vessel Temperature	30.03	C
Vessel Pressure	102.0	kPa
Liquid Molar Flow	2180	kgmole/h
Duty	0.0000	kJ/h

T-103		
Convergence	Converged	
Number of Trays	61.00	

T-102		
Convergence	Converged	
Number of Trays	5.000	

ANEXO B.
DATOS MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL 2006
AREA SEMBRADA

Área sembrada producción rendimiento Departamento 2006					
Departamento	Área Sembrada	Sacos	Producción	Rendimiento	%
	(ha)	(60kg)	(t)	(kg/ha)	
Antioquia	126.303	1.980.792	118.848	941	16,4
Boyacá	10.832	96.624	5.797	535	0,8
Caldas	89.138	1.430.518	85.831	963	11,8
Cauca	67.989	845.460	50.728	746	7
Cesar	21.142	180.445	10.827	512	1,5
Cundinamarca	50.904	567.666	34.060	669	4,7
Huila	95.113	1.328.580	79.715	838	11
Guajira	4.389	24.156	1.449	330	0,2
Magdalena	18.338	129.235	7.754	423	1,1
Nariño	26.761	410.652	24.639	921	3,4
Norte de Santander	32.139	289.872	17.392	541	2,4
Quindío	43.985	700.524	42.031	956	5,8
Risaralda	56.174	857.538	51.452	916	7,1
Santander	41.248	567.666	34.060	826	4,7
Tolima	105.098	1.364.814	81.889	779	11,3
Valle	84.127	1.304.424	78.265	930	10,8
Total Nacional	873.683	12.078.000	724.738	830	100%

POTENCIAL ENERGÉTICO ANUAL

Cultivo	Residuo	Tipo de Residuo	Potencial Energético TJ/año	Potencia MWh
Café	Pulpa	RAI	7206,79	228,53
	Cisco	RAI	3338,57	105,87
	Tallos	RAC	38561,52	1222,78
	Total Cultivo		49106,89	1557,17

SUPERFICIES PLANTADAS

Superficies Plantadas												
Periodo	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Enero	832	2.081	778	828	813	658	1.231	824	924	1.171	1.100	1.102
Febrero	924	323	676	594	710	740	541	808	788	770	1.023	888
Marzo	456	651	500	645	670	592	482	778	644	811	726	713
Abril	815	670	824	1.088	687	1.055	978	942	1.078	738	873	779
Mayo	1.114	745	836	1.300	640	1.114	869	1.112	972	1.091	955	1.087
Junio	1.506	858	1.078	1.077	740	1.092	718	1.052	1.077	954	948	1.174
Julio	1.128	622	946	1.279	806	811	654	868	1.072	774	738	821
Agosto	760	620	686	824	757	436	660	751	661	722	646	1.142
Septiembre	731	937	772	879	776	501	766	778	795	465	676	813
Octubre	1.221	1.333	1.023	1.510	741	940	1.243	1.064	1.137	1.106	1.131	1.024
Noviembre	2.190	1.303	1.271	1.666	882	1.366	1.537	1.380	1.176	1.368	1.237	1.242
Diciembre	2.020	1.047	1.314	1.093	890	1.314	1.257	1.257	1.244	1.373	1.066	1.294
Total Producción Año Civil	13.697	11.190	10.704	12.783	9.112	10.619	10.936	11.614	11.568	11.343	11.119	12.079
Producción Año Cafetero	12.964	12.938	10.779	12.122	10.868	9.512	10.519	11.950	11.712	11.053	11.532	11.953
Superficie Plantada (miles Ha)	1.100	1.100	1.100	869	869	850	805	865	871	887	883	874