

**MODELO MATEMÁTICO PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE
LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN COLOMBIA**

JANNETH ORDUZ PRADA

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

2011

**MODELO MATEMÁTICO PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE
LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN COLOMBIA**

JANNETH ORDUZ PRADA

**Tesis de grado para optar al título de
Magister en Ingeniería Química**

Director

Ph.D. Humberto Escalante Hernández

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

2011

Dedicatoria

*Con todo cariño dedico este triunfo a Dios quien todo lo puede,
a Ricardo por su amor y comprensión
mis hijos Camilo Andrés y Julián David, los tesoros de mi vida,
a mis padres Martha Cecilia y Hermes,
mis hermanos Norberto, Fernando y Amparo y,
a la memoria de Jorge Uriel*

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa los más sinceros agradecimientos a:

Ph.D. Humberto Escalante Hernández, Director de la tesis, por su valiosa colaboración en el desarrollo y conclusión de este trabajo.

A la doctora Marianny Yajaira Combariza, directora del Centro de estudios e Investigaciones Ambientales – Ceiam y el grupo de trabajo del centro donde se desarrollo el estudio.

A todo el equipo de trabajo que participó en el desarrollo del estudio.

A Colciencias por el financiamiento de las actividades que permitieron concluir con éxito este trabajo.

A mi familia por su apoyo y comprensión.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEÓRICO	23
1.1 ACTIVIDAD AGRÍCOLA EN COLOMBIA.....	23
1.1.1 Cultivos Transitorios.....	25
1.1.2 Cultivos Permanentes.....	26
1.2 RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA.....	27
1.2.1 Variables climáticas.....	28
1.2.2 Variables edáficas.....	31
1.3 BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA COMO FUENTE DE ENERGÍA	34
1.4 POTENCIAL ENERGÉTICO (PE) DE LA BIOMASA.....	36
2. MODELOS MATEMÁTICOS.....	46
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN	46
2.2 ANTECEDENTES SOBRE LA APLICACIÓN DE MODELOS PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO (PE) DE LA BIOMASA RESIDUAL.....	49
2.3 MODELOS PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA (MRAC)	51
3. MODELO PARA CALCULAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA RESIDUAL Y EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA.....	56
3.1 MODELO DE POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL.....	56
3.2 MODELO DE RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA DE LAS ESPECIES CULTIVADAS	58
3.2.1 Desarrollo de los CFC y CFE.....	59
3.2.2 Modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC).....	63
3.2.3 Análisis de sensibilidad del modelo.....	64
4. METODOLOGÍA	65
4.1 SELECCIÓN DE LAS ESPECIES AGRÍCOLAS BASE DE ESTUDIO.....	65

4.2 ANÁLISIS DE LA COMPOSICION FISICOQUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL...	66
4.3 CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL	68
4.4 MODELO DE RENDIMIENTO	69
4.4.1 Selección de la base de registros de los sitios cultivados por especie.	70
4.4.2 Cálculo de los Coeficientes de Favorabilidad Climática y Edáfica.....	70
4.4.3 Identificación de las características edáficas y climáticas de las zonas de cultivos..	71
4.4.4 Determinación de los parámetros del modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC).....	72
4.4.5 Análisis de sensibilidad del MRAC.....	73
4.4.6 Validación del MRAC.	74
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
5.1 SELECCIÓN DE LAS ESPECIES BASE DE ESTUDIO	75
5.2 ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN FISICOQUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL PROVENIENTE DE LAS ESPECIES BASE DE ESTUDIO	78
5.2.1 Análisis próximo.....	80
5.2.2 Análisis elemental.....	82
5.2.3 Contenido energético.	83
5.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL	87
5.3.1 Masa de residuo.	87
5.3.2 Calculo del PE.	89
5.4 MODELO DE RENDIMIENTO AGRICOLA DE COSECHA (MRAC)	94
5.4.1 Variables climáticas. La columna denominada como GRID_CODE corresponde al código asignado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales - IDEAM a los diferentes rangos de clasificación.	94
5.4.2 Variables edáficas.	97
Fuente: Adaptado de mapa de Zonas Agroecológicas.....	98
5.4.3 MRAC para la especie arroz.....	102
5.4.4 MRAC para la especie Café.	110
5.4.5 MRAC para la especie Caña de azúcar.	116
5.4.6 MRAC para la especie Caña de panela	118
5.4.7 MRAC para la especie Palma de aceite.....	124

CONCLUSIONES.....	132
RECOMENDACIONES.....	134
BIBLIOGRAFIA.....	135
ANEXOS	141

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Diagrama de Krevelen	40
Figura 2. Alternativas tecnologías para la transformación energética de la biomasa	44
Figura 3 Etapas para el desarrollo de un modelo	49
Figura 4 Etapas metodologías del estudio	65
Figura 5. Aporte porcentual de la biomasa residual de las especies vegetales seleccionadas	88
Figura 6. Cantidad y tipo de biomasa residual generada de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	88
Figura 7. Potencial energético de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	92
Figura 8. Cantidad de biomasa residual Vs. Potencial Energético para las especies arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	92
Figura 9. Cantidad de RAC versus Potencial Energético para las especies arroz, café, caña de azúcar y caña de panela	93
Figura 10. Cantidad de RAI versus Potencial Energético para las especies arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	93
Figura 11. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie arroz: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes.....	105
Figura 12. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie arroz: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes	109
Figura 13. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie café: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) residuos vs. Términos independientes.....	112

Figura 14. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie café: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes	115
Figura 15. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie caña de azúcar: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes.....	117
Figura 16. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie caña de panela a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes.....	120
Figura 17. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie caña de panela: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes	123
Figura 18. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie Palma de aceite: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes.....	126
Figura 19. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie palma de aceite: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes	130

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Distribución de las Actividades Agrícolas por Departamento año 2006...	24
Tabla 2. Producción de Cultivos Transitorios en Colombia.....	25
Tabla 3. Producción de cultivos permanentes en Colombia	27
Tabla 4. Rangos de valores de rendimiento agrícola de cosecha para algunos cultivos en Colombia.....	34
Tabla 5. Características climáticas y edáficas seleccionadas para evaluar el Rendimiento agrícola de cosecha.....	61
Tabla 6. Presentación de una muestra del contenido en la base estadística del Ministerio de Agricultura, 2006.....	69
Tabla 7. Asignación del peso variables climáticas para plantas tipo C ₄	71
Tabla 8. Asignación del peso variables climáticas para plantas tipo C ₃	71
Tabla 9. Área, producción y tipos de residuos de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite.....	76
Tabla 10. Sitios de muestreo a nivel nacional de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite.....	78
Tabla 11. Caracterización de la biomasa residual de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	79
Tabla 12. Comparación de los resultados del análisis próximo y elemental de la biomasa residual de los cultivos base de estudio	84
Tabla 13. Comparación de la composición de muestras de biomasa versus combustible fósil de referencia.....	85
Tabla 14. Datos de la Fracción de residuo y poder calorífico por tipo de residuos de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	89
Tabla 15. Potencial energético por tipo de biomasa residual de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	90

Tabla 16. Comparativos del potencial energético de la biomasa residual agrícola con otros estudios.....	94
Tabla 17. Clasificación de la variable temperatura (Multianual).....	95
Tabla 18. Clasificación de la variable elevación.....	95
Tabla 19. Clasificación de la variable precipitación.....	95
Tabla 20. Clasificación de la variable radiación solar	96
Tabla 21. Clasificación de la variable pendiente	97
Tabla 22. Clasificación de la variable profundidad efectiva del suelo	97
Tabla 23. Clasificación de la variable textura.....	98
Tabla 24. Clasificación de la variable fertilidad	98
Tabla 25. Índices de Favorabilidad de las variables climáticas de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	100
Tabla 26. Índices de Favorabilidad de las variables edáficas de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	101
Tabla 27. Número de registros por especie cultivada	102
Tabla 28. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie arroz	103
Tabla 29. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie arroz	103
Tabla 30. Datos de la validación del MRAC de la especie arroz.....	107
Tabla 31. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie café	110
Tabla 32. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie café .	110
Tabla 33. Datos de la validación del MRAC de la especie café.....	114
Tabla 34. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie caña de azúcar	116
Tabla 35. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie caña de azúcar	116
Tabla 36. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie caña de panela	118
Tabla 37. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie caña de panela	119
Tabla 38. Datos de la validación del MRAC de la especie caña de panela	122

Tabla 39. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie palma de aceite	124
Tabla 40. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie palma de aceite	124
Tabla 41. Datos de la validación del MRAC de la especie palma de aceite	128
Tabla 42. Modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC) de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	131

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Condiciones climáticas y edáficas favorables para el desarrollo de especies agrícolas de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite	142
	161
Anexo 2. Teoría sobre análisis de regresión	
Anexo 3. Tablas de los valores de las variables de respuesta (rendimiento estándar) de las variables regresoras (CFC; CFE; CFC*CFE) y valores predicho de rendimiento estándar calculado con el modelo y del rendimiento aplicando el modelo generalizado	169
	180
Anexo 4. Artículos en eventos académicos internacionales	

TÍTULO: MODELO MATEMÁTICO PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN COLOMBIA*

AUTOR: Janneth Orduz Prada

PALABRAS CLAVES: Energía renovable, biomasa, residuos agrícolas, modelos, potencial energético

En el presente estudio se desarrolló un modelo matemático para evaluar el Potencial Energético, donde el primer término se calculó a partir del rendimiento agrícola de cosecha y el contenido energético corresponde al Poder Calorífico Inferior (PCI). Para calcular el rendimiento agrícola de cosecha se generó el Modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC), como resultado del análisis e interpretación que se hizo sobre la interrelación existente entre las variables climáticas y edáficas y su influencia en el crecimiento de la planta.

El modelo de Potencial energético se probó en cinco especies representativas del sector agrícola a nivel nacional, arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma. Teniendo en cuenta la relación directa del contenido energético de un material con respecto a su composición fisicoquímica se tomaron muestras de biomasa residual de las especies incluidas en el estudio y se evaluaron los parámetros correspondientes al análisis elemental, el análisis próximo y el Poder Calorífico Inferior. El documento presenta análisis integral de los resultados considerando su clasificación en Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) y Residuos Agroindustriales (RAI).

Tomando como referencia la información estadística del sector agrícola en el 2006 sobre área cultivada y producción de las especies estudiadas y aplicando los modelos de rendimiento agrícola de cosecha y de PE se generaron 38 041 749 toneladas de residuo húmedo /año y 292 589,93 TJ/año respectivamente.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández.

TITLE: MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING THE POTENTIAL OF BIOMASS ENERGY IN COLOMBIA AGRICULTURAL WASTE*

AUTHOR: Janneth Orduz Prada

Keywords: Renewable energy, biomass, agricultural waste, models, potential energy

In the present study developed a mathematical model to evaluate the energy potential (PE) of agricultural waste biomass as a function of residue mass and energy content, where the first term was calculated from crop yields and crop energy content for the calorific value (NCV). To calculate the harvest crop yield model was generated Agricultural Crop Yield (MRAC), as a result of the analysis and interpretation is done on the interrelationship between climate and soil variables and their influence on plant growth.

The potential energy model was tested in five species representing national agricultural sector, rice, coffee, sugar cane, cane sugar panela and palm oil. Given the direct relationship between energy content of a material with respect to its physicochemical composition samples were taken from residual biomass of the species included in the study and evaluated the parameters for the elemental analysis, the proximate analysis and calorific value. The document presents a comprehensive analysis of the results considering its classification in Agricultural Crop Residues (RAC) and agro-industrial residues (RAI).

Drawing on the statistical information of the agricultural sector in 2006 on acreage and production of the species studied and applied agricultural performance models of crop and PE were generated 38,041,749 tons of wet waste per year and 292 TJ 589.93/year respectively.

* Grade project.

** Chemical Physique Engineering's Faculty. Chemical Engineering School. Masters in chemical engineering
Director Humberto Escalante Hernández.

INTRODUCCIÓN

El consumo energético a nivel mundial ha aumentado notablemente ¹ y es satisfecho en su mayoría por combustibles de origen fósil, cuyo uso está asociado con la liberación de una ingente cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) óxidos de azufre y nitrógeno, generando importantes efectos negativos sobre el ambiente. Por lo anterior, los países buscan alternativas de energías renovables como la eólica, la solar, la mareomotriz y la contenida en la biomasa.

La biomasa es una fuente de energía renovable². La biomasa es la materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. Mediante el proceso de la fotosíntesis las plantas transforman la energía radiante en energía química, que se almacena en forma de moléculas orgánicas como la glucosa, conformando la materia orgánica. La biomasa está compuesta por moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno, y compuestos orgánicos formados por cadenas largas del tipo C_nH_m, responsables del contenido energético, el cual oscila entre 3000 y 3500 kcal/kg para los residuos lignocelulósicos y 2000 a 2500 kcal/kg para residuos urbanos (Secretaría de Energía de Argentina, 2004).

La biomasa residual son los subproductos orgánicos de origen vegetal o animal, que se generan en los procesos de transformación natural o artificial y que no forman parte del producto principal. Biomasa residual son la hojarasca y los tallos de los bosques, los residuos de los cultivos forestales y de las actividades agroindustriales y pecuarias, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado.

El inventario de fuentes generadoras de biomasa residual, el análisis de su

¹ En el 2005 el consumo mundial de energía primaria alcanzó los 465.2 cuatrillones de BTU (Ministerio de Minas y Energía, Plan Energético Nacional Contexto y Estrategias 2006-2025. Bogotá, abril de 2007).

² Se estima que la biomasa cubre aproximadamente el 14 % del total de energía consumida a nivel mundial.

composición y su correspondiente oferta energética son temas de investigación en las últimas décadas en países como Argelia, Argentina, Brasil, China, España, Estados Unidos, Grecia, India, México, Nigeria, Pilipinas, Tailandia y Uganda. Las proyecciones realizadas en diferentes estudios permiten inferir que para el año 2050 la biomasa aportará aproximadamente entre el 18 y el 30 por ciento del total de energía consumida (Silva E., 2004).

En Colombia, por su posición geográfica y variedades de climas y suelos, la actividad agrícola representa un renglón importante en la economía con una participación en el PIB del 8% (Minagricultura, 2006). En el 2006 se registraron 4 058 471 de hectáreas dedicadas a la agricultura (Ministerio de Agricultura Colombia, 2006) destacándose por tradición, producción y aporte económico los cultivos permanentes de la palma, café y los cultivos transitorios de la caña de azúcar, el arroz, la caña de panela, el maíz, el banano y el plátano. Estos cultivos son base de generación de gran cantidad de biomasa residual agrícola en el país. Estudios realizados por la Unidad de Planeación Minero Energética estiman que cerca de 29 millones de toneladas de residuos de cosecha provienen de las actividades agrícolas de la caña de azúcar, coco, café, palma de aceite, frijol y cebada; con una capacidad energética de 12 000 MWh/año (UPME, 2004).

La agronomía considera que todas las especies tienen unas condiciones climáticas y edáficas favorables para su desarrollo. La diferencia entre las condiciones óptimas y aquellas a las cuales se somete la planta influye en el rendimiento agrícola de cosecha. La cantidad de biomasa residual, para un área específica, corresponde al producto entre el rendimiento agrícola de cosecha (R_c) y el factor que relaciona la cantidad de residuo por tonelada de producto principal. Por consiguiente, para determinadas características de clima y suelo la biomasa residual generada por un cultivo se define como el producto de su rendimiento agrícola de cosecha por el factor de residuo.

Según el mapa de aptitud de uso de la tierra (IGAC, 2002) del territorio nacional, se estima una oferta de 10,4 millones de hectáreas de tierra aptas para el

desarrollo agrícola. La diferencia entre el área sembrada y la disponible para la actividad agrícola representa una oportunidad para aumentar ésta actividad y consecuentemente la oferta energética proveniente de la biomasa residual (UPME, Biofuels Consulting, 2007).

Dentro de los lineamientos para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia, se destacan las estrategias contempladas en el Plan Energético Nacional 2010 – 2050 que promueve el desarrollo de las energías no convencionales. De igual forma el Consejo Nacional de Política Económica y Social a través del CONPES 3510 de marzo 31 de 2008, respalda las iniciativas para potencializar el desarrollo de los cultivos para la producción de biocombustibles. Este panorama sugiere que el sector agrícola en Colombia representa una fuente importante de energía renovable.

Por consiguiente, para la planificación estratégica con el fin de potencializar la biomasa residual agrícola en Colombia, como una alternativa de energía renovable, es indispensable evaluar la disponibilidad del residuo, su contenido energético; e indiscutiblemente contar con herramientas que permitan predecir a futuro, o en un determinado suelo, la oferta de biomasa residual agrícola que se generará. En este orden de ideas la ingeniería puede dar un aporte importante, mediante el diseño de modelos para el cálculo de la oferta de biomasa residual agrícola, bajo determinadas condiciones de cultivo.

Considerando que en los estudios para proyectar la oferta de biomasa residual es importante incluir las áreas potenciales para el desarrollo de los cultivos, el objetivo del presente estudio de investigación se centró en desarrollar los modelos matemáticos de Potencial Energético y de Rendimiento Agrícola de Cosecha, con los cuales es posible inferir cada una de estas variables en aquellas zonas que presentan condiciones apropiadas para el desarrollo de algunas de las especies cultivables en Colombia.

Tomando como referencia los antecedentes a nivel mundial, en este trabajo se desarrolló un modelo para evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola en función de la masa de residuo y de su contenido energético. Así

mismo se propone un modelo que permite determinar el rendimiento agrícola de cosecha (R_c), por cultivo, como una función de las variables climáticas y edáficas. Es importante destacar que uno de los propósitos del presente estudio consistió en utilizar la base de información secundaria elaborada y disponible por instituciones del Gobierno, como por ejemplo, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam, la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, así como los gremios y centros de investigación asociados al sector. Dentro de la información de interés para el desarrollo del estudio se destacan los inventarios sobre especies cultivadas, localización y datos específicos del sector, información cartográfica relacionadas con las unidades agroecológica, de clima y suelo de Colombia.

El primer capítulo presenta un panorama general del sector agrícola considerando los aspectos económicos, las áreas destinadas al desarrollo de cultivos, la producción, los tipos de cultivos, los antecedentes y conceptos fundamentales relacionados con el rendimiento agrícola de cosecha, la oferta de biomasa residual agrícola y su potencial energético.

En el segundo capítulo se presenta la base conceptual de los modelos matemáticos como herramientas para realizar estimaciones, con niveles de certidumbre confiables, la identificación de los diferentes tipos de modelos y los criterios para su selección.

El capítulo tres se dedica al desarrollo de los modelos de Potencial Energético (PE) y rendimiento agrícola de cosecha (R_c), siendo éste último una herramienta fundamental para calcular la masa de residuo que se requiere introducir en el modelo de PE.

En el capítulo cuarto se describe el procedimiento seguido en el desarrollo del estudio, el cual se concentra en la selección de las fuentes de biomasa residual, la caracterización fisicoquímica y energética de los residuos de interés, la aplicación del modelo de PE, el procedimiento para obtener los parámetros del modelo de R_c .

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos junto con los análisis respectivos.

El anexo 1 presenta las condiciones climáticas y edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos. El anexo 2 corresponde a la base conceptual general sobre el análisis de regresión lineal y el anexo 3 contiene los resultados del proceso de obtención de las variables del modelo para cada una de las especies. Por otra parte, en el anexo 4 se presenta los artículos elaborados a partir de éste estudio y que fueron presentados en el Tercer Congreso Internacional de BioEnergía llevado a cabo en Brasil (junio de 2008) y en el Décimo Seminario Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (Cartagena, octubre de 2008).

El presente estudio se desarrolló en el marco del convenio de investigación suscrito entre la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, el Instituto IDEAM, COLCIENCIAS y la UIS, cuyo objetivo consistió en la elaboración del Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. La contribución del estudio de maestría al proyecto fue el desarrollo del modelo para calcular el rendimiento agrícola de cosecha y el potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola.

1. MARCO TEÓRICO

En éste capítulo se presenta un panorama general de la actividad agrícola haciendo énfasis en el área y la producción de las principales especies en Colombia, cuyos cultivos se clasifican según el ciclo del cultivo en transitorios o permanentes. Se desarrolla el concepto de rendimiento agrícola de cosecha R_c indicando los factores que influyen en su determinación, en especial, de las variables climáticas y edáficas a las cuales se someten los cultivos en las diferentes regiones del país.

Partiendo del concepto de Factor de Residuo se define el término de Potencial Energético de la biomasa residual (PE), se presentan algunos antecedentes sobre estudios realizados a nivel internacional donde se proyecta la biomasa residual como una alternativa importante desde el punto de vista energético considerando los volúmenes de generación. Igualmente, se analiza la influencia de la composición del material vegetal residual en su contenido energético y finalmente se presenta un marco general sobre las posibles vías de aprovechamiento.

1.1 ACTIVIDAD AGRÍCOLA EN COLOMBIA

Colombia, por su posición geográfica, la variedad de climas y suelos, ofrece condiciones favorables para el desarrollo de las actividades agropecuarias. El país cuenta con una superficie continental de 114 174 800 hectáreas, de las cuales 53 580 000 de hectáreas (44,77%) presentan características apropiadas para el desarrollo de la actividad agropecuaria; de ésta área se estima que 14 000 000 ha (12% del territorio nacional) corresponden a la extensión de tierra potencialmente cultivable (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). En la tabla 1 se presenta la distribución aproximada de las actividades agrícolas por departamento

en el año 2006, estimada a partir de información reportada por los productores y los gremios.

Tabla 1. Distribución de las Actividades Agrícolas por Departamento año 2006

Departamento	Cultivos transitorios y barbecho [ha]	Cultivos Permanentes [ha]	Área en Descanso [ha]	Total superficie agrícola [ha]
Total nacional	1 324 392	1 936 704	108 215	3 369 310
Antioquia	47 874	280 977	2 669	331 521
Atlántico	8 978	591	1 655	11 224
Bolívar	50 630	16 279	585	67 494
Boyacá	78 372	47 202	4 943	130 517
Caldas	6 202	88 320	738	95 260
Casanare	84 045	24 332	4 791	169 615
Cauca	30 084	134 740	4 791	169 615
Cesar	53 065	77 462	179	130 706
Córdoba	106 694	22 579	899	130 173
Cundinamarca	99 015	102 220	10 435	211 671
Huila	39 097	100 114	2 187	141 398
La Guajira	27 975	3 162	211	31 349
Magdalena	19 267	80 138	630	100 215
Meta	119 348	92 356	12 239	221 943
Nariño	82 330	82 964	4 620	169 914
Norte de Santander	66 941	73 125	4 841	144 907
Quindío	5 153	48 932	227	54 312
Risaralda	5 151	61 637	714	67 502
Santander	36 283	144 553	7 610	188 445
Sucre	80 321	4 870	7 629	92 821
Tolima	129 004	123 949	5 995	258 947
Valle	50 253	245 630	1 883	297 766
Otros Departamentos	98 308	80 393	26 977	205 678

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, *et. al.*, 2006.

En el 2006 el país reportó 4 058 470 hectáreas dedicadas a la agricultura, de las cuales el 60% se dedicaron al cultivo de especies permanentes y el 40% a las especies transitorias, dentro de los cuales se destacan, por su extensión, tradición,

producción y aporte económico los cultivos palma de aceite, café, caña de azúcar, arroz, caña panelera, maíz, banano y plátano (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006).

1.1.1 Cultivos Transitorios. Son aquellos cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un (1) año, llegando incluso a ser de sólo unos pocos meses, por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada, arroz), los tubérculos (papa), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayoría de hortalizas (tomate larga vida bajo invernadero) y algunas especies de flores a cielo abierto³. En Colombia los cultivos transitorios ocuparon un área de 1 639 960 de hectáreas y una producción que asciende a 8 684 778 toneladas. En la tabla 2 se presenta la distribución del área cosechada y producción para los cultivos transitorios de Colombia en el 2006.

Tabla 2. Producción de Cultivos Transitorios en Colombia

Cultivo	Área Cosechada [ha]	Producción [t]
Ajonjolí	5 885	4 699
Algodón	55 543	95 853
Arroz Riego	228 534	1 474 957
Arroz Sec. Mec.	164 595	788 812
Arroz Sec. Manual	62 283	97 810
Arroz total	455 412	2 361 579
Papa	161 853	2 999 881
Tabaco Rubio	9 059	17 660
Cebada	3 170	5 867
Fríjol	120 500	138 086
Maíz Tecnificado	148 302	576 806
Maíz Tradicional	450 846	785 706
Maíz Total	599 148	1 362 512
Sorgo	52 915	167 753
Soya	28 806	47 771
Trigo	17 132	39 782
Maní	2 807	4 230
Hortalizas	127 730	1 439 105
TOTAL	1 639 960	8 684 778

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, *et. al.*, 2006.

³ <http://www.minagricultura.gov.co/11contacto/glosario.aspx>

El área cosechada para maíz y arroz corresponde al 65% del total destinada para cultivos transitorios, ya que estos cereales tienen gran importancia en la canasta alimenticia de los colombianos y en el crecimiento de la industria de alimentos balanceados para consumo animal (Minagricultura, CCI, 2006).

Se estima un 9% del área en cultivos transitorios que casi en su totalidad son destinados a la agroindustria como son el algodón, el sorgo, el tabaco y la soya. Este bajo porcentaje se expresa como resultado de mayores condiciones de competitividad en otros sistemas productivos a los que se dedica mayor área tal como indican los datos.

1.1.2 Cultivos Permanentes. Son aquellos que después de plantados llegan en un tiempo relativamente largo a la edad productiva. Dan muchas cosechas y terminada su recolección no se los debe plantar de nuevo. Se incluyen en esta categoría los cultivos arbóreos y arbustivos y cultivos de flores a cielo abierto y bajo invernadero que cumplan estas condiciones (heliconias, rosas, claveles). Son ejemplos típicos de estos cultivos: el café, la caña de azúcar, el cacao y los árboles frutales⁴.

En orden de participación del área sembrada en cultivos permanentes, se encuentra en cuarto lugar la caña de azúcar con el 10% del área registrada para estos cultivos y el 6% del área total sembrada en el país durante 2006. Con una participación similar sigue en este orden la caña panelera. En la tabla 3, se observa el aporte de cada uno de los cultivos permanentes al total de área cosechada y producción para este grupo.

⁴ Ibid

Tabla 3. Producción de cultivos permanentes en Colombia

Cultivo	Área Cosechada [ha]	Producción [t]
Banano Exportación	44 031	1 513 854
Cacao	109 380	52 846
Caña Azúcar	185 521	2 415 117
Plátano Exportación	20 035	153 268
Tabaco Negro C.I.	5 613	9 057
Tabaco Negro Exp.	2 020	3 665
Palma de Aceite	185 165	712 120
Arracacha	10 035	111 194
Caña Miel	5 612	39 524
Caña Panela	242 364	1 536 865
Cocotero	15 120	117 429
Fique	18 157	21 512
Name	26 796	277 156
Plátano	366 266	3 040 457
Yuca	198 991	1 962 442
Frutales	197 870	3 256 110
Café	785 535	724 738
TOTAL	2 418 511	15 947 354

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, *et. al.*, 2006.

1.2 RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA

Las plantas mediante la fotosíntesis transforman la energía radiante en energía química y la almacenan en forma de moléculas orgánicas como la glucosa. Este proceso permite a las plantas fijar carbono en su estructura celular. El rendimiento agrícola de cosecha es la variable que mide la cantidad de producto principal de una especie que se obtiene por área cultivada. El rendimiento agrícola de cosecha depende del genotipo de la especie, las características climáticas y edáficas y de las prácticas de manejo a las cuales se someten los cultivos (Robasco, *et. al.*, 1985; Wallace. 1991; Summefield *et. al.*, 1991).

Una especie posee diferentes variedades, en las cuales se distinguen algunas características como por ejemplo, mayor adaptación a climas, mayor resistencia a periodos de escasas de lluvia, mayor producción de biomasa, menor exigencia al requerimiento de nutrientes, entre otras. Por tanto los procesos bioquímicos que regulan la productividad de una especie dependen de las características climáticas del entorno, como la temperatura, la humedad, la radiación y edáficas que las fija como por ejemplo la textura, la profundidad y la fertilidad.

1.2.1 Variables climáticas. Factor principal en la determinación de la vocación de los suelos, puesto que ejerce influencia permanente y continua sobre los demás factores del medio ambiente, determinando las características de la vegetación y su distribución, incluido el suelo y actividades que de ellos se derivan, como son las actividades agrícolas, pecuarias, forestales y sus residuos. Los elementos de clima varían fuertemente tanto en espacio como a través del tiempo (año). Como factores incontrolables únicamente pueden ser estudiados para conocer su variación de un lugar a otro y durante el año a fin de aprovechar sus beneficios al máximo, o bien, evitar sus daños.

La variable clima está determinada por parámetros como son la temperatura y la precipitación (Holdridge, 1979). La temperatura es el parámetro principal o dominante en razón a que no puede modificarse en condiciones de campo abierto, mientras que la falta o exceso de lluvias puede corregirse mediante prácticas de riego o drenaje (Millete, 1983).

- **Radiación.** Los efectos de la radiación solar y la luz sobre las plantas pueden ser de tipo fotocibernéticos, fotodestructivos y fotoenergéticos:

Efecto fotocibernético. Conjunto de procesos dentro del vegetal que utiliza la radiación como fuente de información para el control y regulación de la iniciación de la floración, el inicio de períodos de reposo, la apertura y cierre de estomas, el fototropismo, la fotonastias u orientación de algunos órganos de la planta hacia la

luz, la regulación de las tasas de respiración, la síntesis de diversos pigmentos fotosintéticos y de ácido ascórbico, la descomposición de proteínas y de grasas de reserva.

Efecto fotodestructivo. Se debe a la presencia de rayos UV que tienen la capacidad de afectar el proceso fotosintético, porque causan oxidación de cloroplastos, desnaturalización de proteínas, inhibición de citocromo-oxidasa. Estas acciones disminuyen el crecimiento y la productividad de las plantas.

Efecto fotoenergético. La fotosíntesis es el efecto fotoenergético que se da paso a la conversión de la energía lumínica en energía química. La forma como se fija el CO_2 en las plantas durante la fotosíntesis permite clasificar las plantas en tres grupos principales: plantas de ciclo C_3 , C_4 y plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas o plantas CAM. Las plantas tipo C_3 , en presencia de alta iluminación y temperatura cierran completamente sus estomas para evitar la deshidratación, interrumpiendo la fotosíntesis e incrementando la fotorrespiración. De ésta forma se disminuye considerablemente la cantidad de carbono fijado en forma de biomasa.

Las plantas tipo C_4 tienen la capacidad de fijar CO_2 en exceso mientras los estomas están abiertos y utilizarlo para continuar el proceso de la fotosíntesis aún cuando los estomas estén completamente cerrados en las horas del medio día. Otra ventaja adicional de las plantas C_4 consiste en que éstos vegetales no se saturan por exceso de luz y funcionan mejor a temperaturas comprendidas entre los 30 y 45°C, mientras que la fotosíntesis de los vegetales C_3 se satura cuando la intensidad de la radiación solar alcanza los 300 W/m^2 y requieren una temperatura adecuada entre 15-25°C. Ésta característica de los vegetales C_4 conlleva a que sean más competitivos en climas soleados y cálidos (Squire, 1990).

Las plantas tropicales están a menudo sometidas a altas intensidades luminosas que elevan la temperatura de sus hojas y producen excesivas pérdidas de agua por transpiración (Fernández, 2000).

Esta clasificación tiene especial importancia para ubicar una especie en un ambiente específico por estar directamente relacionada con el rendimiento de materia seca como resultado de diferentes respuestas a condiciones extremas como el estrés hídrico generado en horas del mediodía tropical.

- **Temperatura.** La temperatura juega un papel importante en todos los procesos químicos, físicos y biológicos de las plantas, de tal forma que la actividad biológica se duplica por cada aumento de 10°C (Diehl, 1988). El crecimiento óptimo de las plantas es el resultado de los efectos que ejercen las variaciones de temperatura sobre las funciones de las plantas como la respiración, la transpiración y la fotosíntesis (Fernández, 2000).

La variación de la temperatura del aire y del suelo puede influir en el sistema suelo – planta - clima, reduciendo la actividad respiratoria radicular, con lo que la absorción del agua y los nutrientes minerales se reduce significativamente.

Con el cierre de los estomas en las plantas causado por las altas temperaturas en el aire se reduce la transpiración. Asociado a éste efecto se disminuye el flujo de nutrientes desde la raíz hacia las hojas que se transporta a través del xilema, además de que se disminuye la movilidad dentro de las células fotosintéticas de la hoja debido al aumento en la viscosidad de las membranas y al descenso en la actividad de los transportadores y canales iónicos de las mismas. En estas condiciones, es probable que disminuya el contenido de fósforo, produciendo una acumulación de azúcares no fosforilados que inhiben la actividad fotosintética y por tanto afectan el rendimiento total de los cultivos. (Diehl, 1988).

- **Precipitación.** El agua es un factor importante en la fisiología de la planta por lo tanto su déficit es un factor limitante de la mayor parte de las funciones vitales como: germinación de las semillas, producción de los granos y frutos, crecimiento foliar, absorción de los nutrientes, la síntesis de proteínas, la apertura de los estomas (según especie), de la fotosíntesis por baja o nula asimilación de CO₂ (según la especie), entre otros. (Fernández, 2000). La sobresaturación prolongada de agua en los cultivos provoca cierta limitación en la respiración radicular que afecta la toma de nutrientes, entre otras cosas, por crear condiciones reductoras (acidez) en el suelo.

- **Altitud.** Variable fisiográfica que influye en la determinación del clima local en las regiones montañosas (Ochse, 1991). Existe un gradiente de disminución de la temperatura con la altitud evaluado en 0,6°C/100 m como promedio (Fernández, 2000). Por tanto, un ascenso en altitud implica un descenso de las temperaturas y normalmente un incremento de la precipitación, motivado por la condensación del vapor de agua contenido en las masas de aire ascendente. Además de disminuir la temperatura con la altitud también se disminuye la presión atmosférica y se aumenta la radiación solar.

1.2.2 Variables edáficas. Es el medio fundamental e imprescindible para la producción agropecuaria, de él depende el crecimiento y el desarrollo de las plantas y por consiguiente la productividad o rendimiento y la calidad de las cosechas, ya que les suministra agua, aire y nutrientes. Las propiedades del suelo (fertilidad, textura, drenaje, profundidad, entre otras) son consecuencia de los factores formadores del suelo, dentro de los que se incluyen: el clima (precipitación o lluvia, temperatura, radiación, otros), el material parental o roca madre, macro y microorganismos vegetales y animales, la topografía y la edad del suelo.

En general, las propiedades edáficas varían fuertemente en el espacio, mientras que sus variaciones a través del tiempo en interacción con los elementos climáticos son lentas y por lo tanto menos notorias. Sin embargo, algunas características del suelo pueden ser modificadas favorable o desfavorablemente mediante las prácticas de manejo.

- **Textura.** La importancia del estudio de la textura de los suelos radica en la determinación de su capacidad de almacenamiento y retención de agua, de la facilidad del movimiento del agua a través del perfil, la capacidad de abastecimiento de nutrientes y de aire a la planta y la facilidad de desarrollo de sus sistemas radiculares.

- **Profundidad efectiva.** La profundidad efectiva de un suelo es aquella hasta la cual puede desarrollarse libremente el sistema radicular, es decir, sin encontrar impedimentos físicos o químicos que le impida obtener las cantidades adecuadas de nutrientes, agua o aire. Según Cortés, de acuerdo a la profundidad efectiva los suelos pueden considerarse desde muy superficiales (< 25 cm) hasta muy profundos (mayor de 150 cm).

- **Fertilidad.** es el conjunto de características que determinan la capacidad productiva del suelo. La fertilidad depende del material parental (rocas que le dan origen), de las condiciones ambientales predominantes en el sitio, de las características fisiográficas (pendiente, topografía) del terreno y de sus características físicas, químicas y microbiológicas. Desde el punto de vista químico, la fertilidad de un suelo está relacionada con la disponibilidad de nutrientes minerales que tenga para las plantas y agronómicamente esta fertilidad puede evaluarse con base en la determinación del pH, del contenido de macronutrientes y micronutrientes.

- **Pendiente.** Variable fisiográfica que determina junto con la topografía el relieve o las formas que presenta un paisaje. En conjunto con la topografía la pendiente puede afectar el rendimiento de los cultivos en consideración a que determina su mecanización, la capacidad de uso y manejo de los suelos, el grado erosión, la movilidad del agua tanto interna como externamente, condiciona las prácticas agronómicas y finalmente, según su orientación, puede determinar la cantidad de radiación solar diaria sobre los cultivos.

La zonificación agrológica de Colombia, divide el territorio en zonas agrológicas, las cuales presentan características de climas y suelos similares. El estudio particular de cada variable que define las características de clima y suelo es específico y en cada caso se cuentan con rangos de clasificación. Atendiendo a las diferentes categorías de clima y suelo presentes en el territorio colombiano y que cada especie tiene un intervalo de condiciones climáticas y edáficas favorables para su desarrollo (ver anexo 1), es normal que el rendimiento de una especie cultivada en diferentes municipios no sea igual y que varíe en un rango determinado. En la tabla 4 se observan los rangos de rendimiento agrícolas de cosechas para algunas especies cultivadas en Colombia.

El desarrollo de cultivos sometidos a las diferentes condiciones climáticas y edáficas que se encuentran en las regiones del país pueden influir en el rendimiento agrícola de cosecha. Los cultivos de la caña de azúcar que se concentran principalmente en la región sur occidental (departamentos de Caldas, Cauca, Risaralda y Valle del Cauca), alcanzan valores de rendimiento agrícola de cosecha de 136 en los municipios de la Virginia, Pereira, Zarzal, valores cercanos entre 115 y 120 toneladas de producto principal por hectárea cultivada en Anserma, Belarcazar y Puerto Tejada. Los cultivos de caña que se localizan en los departamentos de César y Norte de Santander presentan rendimientos inferiores a 100 toneladas/ha.

Tabla 4. Rangos de valores de rendimiento agrícola de cosecha para algunos cultivos en Colombia

Especie	Rendimiento [t _{producto principal} /ha]		
	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio
Caña azúcar	136,00	98,00	113,00
Maíz Tecnificado	4,89	1,41	3,71
Café	16,00	3,00	7,00
Palma de aceite	23,14	3,86	14,45
Banano de exportación	54,00	28,00	39,00

Fuente: Ministerio de Agricultura. Anuario estadístico. 2006

En el caso de la palma los rangos del rendimiento se encuentran entre 3,86 y 23,14 toneladas de aceite/ha, con promedio de 14,45 toneladas de aceite/ha; destacándose los cultivos ubicados en el municipio de Tumaco (Nariño) con rendimientos de 23 toneladas de aceite/ha y los menores valores en Riohacha y Tibú donde se registran valores de 7,00 y 3,86 toneladas de aceite/ha respectivamente. Valores entre 12 y 14 toneladas producto principal/ha en los Llanos Orientales; los cultivos localizados en el Magdalena Medio presentan valores de rendimiento entre 18 y 20 toneladas producto principal/ha.

La variación en el rendimiento agrícola de cosecha conlleva a una variación en la masa de residuo. Lo anterior lleva a plantear la importancia de proyectar la oferta energética de la biomasa residual, apoyados en el análisis de procesos y la aplicación de modelos matemáticos en los cuales se incluyan las características propias de las zonas en estudio.

1.3 BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA COMO FUENTE DE ENERGÍA

La biomasa es la cantidad de materia viva presente en la biosfera, de variadas características físicas y químicas debido a su origen en los sistemas terrestres y

acuáticos. La biomasa es renovable porque forma parte del flujo natural y repetitivo de los procesos en la naturaleza (a escala de tiempo de vida humana) siendo las plantas quienes inician este proceso con la fotosíntesis, para captar la energía del sol.

La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica. Algunos ejemplos de biomasa son los residuos de los cultivos forestales, la hojarasca de los bosques, los residuos de las cosechas, las podas de zonas verdes urbanas, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado.

La agricultura genera cantidades considerables de materia orgánica residual provenientes de los procesos de corte y transformación de la cosecha, los cuales se denominan como Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) y los Residuos Agroindustriales (RAI) respectivamente.

Según estudios realizados en Centroamérica la producción de RAC es de un 60% y de RAI entre el 20 y el 40% (Biomass Users Network Centroamérica, 2002). De los RAC una parte permanece en el campo como nutrientes orgánicos naturales del ecosistema y la restante puede ser recolectada para diferentes propósitos; por ejemplo, como materia prima en la producción de abono, de materiales conglomerados, papel o como recurso energético.

La biomasa como fuente energética suple aproximadamente el 35% del consumo de la energía primaria en países subdesarrollados y alcanza un 14% del total de la energía consumida en el mundo. Gran parte de la población rural en los países en vía de desarrollo, que representan cerca del 50% de la población mundial, dependen de la leña como fuente de energía. (Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002; McKendry, 2002). En Suramérica el consumo de

biomasa para procesos de transformación y consumo propio, ha tenido una tasa de crecimiento favorable, siendo liderado por Argentina con 10,39% (OLADE, 2006). Colombia, en el año 2006, presentó una tasa de crecimiento en el consumo de biomasa de 2,38%, lo cual indica que el país ha comenzado a tomar conciencia sobre la importancia de explotar de forma más tecnificada y organizada esta fuente energética.

Factor de residuo. Es el indicador que relaciona la cantidad de residuo que se obtiene por unidad de producto principal; se mide en unidades de toneladas de residuo por toneladas de producto principal. Por ejemplo, del cultivo de banano se obtienen en campo el ráquis y el vástago en proporciones de 1 y 5 t residuo/t producto principal, respectivamente; en la etapa de limpieza y selección del producto principal se alcanza en promedio cinco toneladas de banano de rechazo (RAI)/tonelada de producto principal.

El producto entre el rendimiento agrícola de cosecha (t producto principal/ha) y el factor de residuo (t de residuo/ t producto principal), se obtiene la masa de residuo por área cultivada.

1.4 POTENCIAL ENERGÉTICO (PE) DE LA BIOMASA

El PE se define como la energía química de la biomasa que puede ser transformada para su aprovechamiento energético (Perera, 2005). El PE se mide en unidades de energía por unidad de tiempo y se obtiene del producto entre la masa de residuo y su contenido energético.

Conocer el potencial energético de la biomasa residual es importante al momento de plantear proyectos para el aprovechamiento energético de dichos residuos, por cuanto se tiene el conocimiento de la oferta disponible que puede ser aprovechada.

Los estudios realizados en los diferentes países se han dirigido hacia el cálculo del PE en las condiciones actuales de desarrollo de la actividad agrícola y a partir de esta información extrapolan los datos a las tierras que tiene el potencial para el desarrollo de cultivos. En general, se observa que los estudios se realizan para diferentes fuentes de generación de biomasa residual como por ejemplo, residuos forestales, agrícolas, animales, de ciudades. En los estudios agrícolas, se presentan el inventario de la oferta de biomasa y el cálculo del potencial energético de las zonas donde se desarrollan los cultivos y en algunos casos proyectado a la zonas que presentan condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos.

Voivantas *et al.* (2001) evaluaron el potencial energético de los residuos vegetales para la isla de Creta. Hoogwijk *et al.* (2003) realizaron estimativos del potencial energético global tanto para residuos vegetales como residuos animales. En países como China, India, Filipinas, Sri Lanka y Tailandia se han realizado estudios para evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola, del estiércol animal y de los residuos sólidos urbanos (Bhattacharya, *et. al.*, 2005; Ravindranath, *et. al.* 2005; Elauria, *et. al* 2005; Perera, *et. al* 2005; Sajjakulnukit *et. al.*, 2005). En estos países, los resultados de sus investigaciones han permitido establecer un potencial energético al 2010 entre 0,6 y 6,5 PJ, dependiendo del número de actividades agrícolas incluidas en cada caso. Smeets *et. al.*, 2007, proyectaron a nivel mundial el potencial de producción de bioenergía al 2050, tomando como fuente los cultivos energéticos, los residuos agrícolas y los forestales y los bosques; en el análisis se contemplaron los factores limitantes asociados con la demanda de alimentos, la madera de uso industrial, el uso de leña tradicional y la importancia de mantener los bosques existentes para la protección de la biodiversidad.

En España se han realizado representaciones cartográficas del potencial energético de los residuos agroforestales de la región de Navarra con el fin de

identificar zonas posibles para la ubicación de plantas de aprovechamiento de biomasa (Domínguez *et. al.*, 2003). En Estados Unidos se elaboró el atlas de los recursos energéticos renovables, contabilizando el potencial energético de la biomasa residual, tomando como muestra representativa rellenos sanitarios, estiércol animal, residuos forestales y de cosecha de cultivos como el maíz, el trigo y la cebada (Hewlett Foundation and The Energy Foundation, 2002).

A nivel de Suramérica, Brasil se ha interesado en la evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas; como ejemplo se puede citar el estudio realizado en el estado de Paraná, en el cual se buscaron fuentes alternativas de energía para suplir las necesidades energéticas que tiene esta región (Sordi A. *et. al.*, 2002). Schneider L., *et. al* 2001, mediante la aplicación de modelos evaluaron la producción de biomasa en el noreste de Brasil, teniendo como premisa las proyecciones sobre áreas ocupadas por cultivos energéticos para el 2050.

En Colombia el fomento en el estudio y aplicación de la biomasa se viene desarrollando como una iniciativa liderada entre el sector productivo, los gremios y el gobierno nacional; así por ejemplo, se destaca el avance obtenido en el estudios denominado “Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia”, realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética, registró en su contabilidad 29 millones t/año de biomasa residual agrícola, procedentes de bagazo de caña de azúcar y panelera, de cascarilla de arroz, de fibra del cocotero, de pulpa de café, de palma de aceite, de frijol, de caña de azúcar y de cebada, con una capacidad energética aproximada de 12 000 MWh/año.

La toma de decisión en cuanto al uso de la biomasa como fuente alterna de energía involucra el estudio de la composición fisicoquímica y del contenido energético, así como del análisis de las variables de localización y recolección del residuo con respecto a la planta de procesamiento y al lugar de utilización de la

energía convertida. Estos aspectos deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del proceso por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional. En este sentido los RAI tienen la ventaja de que se encuentran concentrados en los sitios de transformación de la cosecha, facilitando su aprovechamiento. En Colombia las actividades agroindustriales concentradas en zonas como la producción de caña de azúcar y panela, y la extracción del aceite de palma aprovechan la biomasa residual como fuente de energía.

Relación del contenido energético vs. Composición de la biomasa. Desde el punto de vista energético los combustibles son compuestos que poseen carbono, elemento que al reaccionar con el oxígeno libera energía en forma de calor. La calidad de un combustible se determina por la cantidad de energía que contiene y que puede liberar en el proceso de conversión energética.

En los combustibles el contenido energético depende del poder calorífico, término que se define como la energía liberada en forma de calor durante la reacción de oxidación para formar dióxido de carbono y agua. El contenido energético de un compuesto se enuncia en unidades de energía por unidad de masa como por ejemplo, Joule por kilogramo [J/kg] o calorías por gramo [cal/g]. Existen diferentes formas de expresar el contenido energético de los combustibles, Leach y Gowent, 1998 proponen los siguientes:

Energía primaria: Indica la cantidad de energía contenida en un material en su forma natural.

Energía entregada: Es la cantidad de energía liberada por un combustible para su consumo. La energía entregada puede corresponder a una fracción o la totalidad de la energía primaria del combustible. Por ejemplo, la energía liberada por la leña es el total de su energía primaria, mientras que para el carbón corresponde sólo a una fracción.

Energía útil: Es la cantidad de energía empleada en los usos finales descontando las pérdidas. La energía útil representa la cantidad de trabajo o calor que realmente fue útil en una determinada actividad.

Intensidad energética (consumo específico de combustible): Indica la cantidad de energía utilizada en un uso final específico por unidad de PIB. En términos globales, la intensidad energética es el valor medio de la energía necesaria para generar una unidad de riqueza.

En la biomasa, las cadenas largas del tipo C_nH_m , constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas responsables de su contenido energético (Bhattacharya P., *et. al.*, 2005), cuyos valores oscilan entre 3000 y 3500 kcal/kg para los residuos lignocelulósicos y 2000 a 2500 kcal/kg para residuos urbanos (Secretaría de Energía de Argentina, 2004; Mckendry P., Part 1, 2002; Skoulou V. y Zabaniotou A., 2007; Horta L., Silva E., 2003).

En la figura 1 se observa la influencia de los enlaces oxígeno – carbono (O/C) e hidrógeno - carbono (H/C) en el poder calorífico de diferentes combustibles sólidos como la turba, la lignita, el carbón, la antracita y la biomasa.

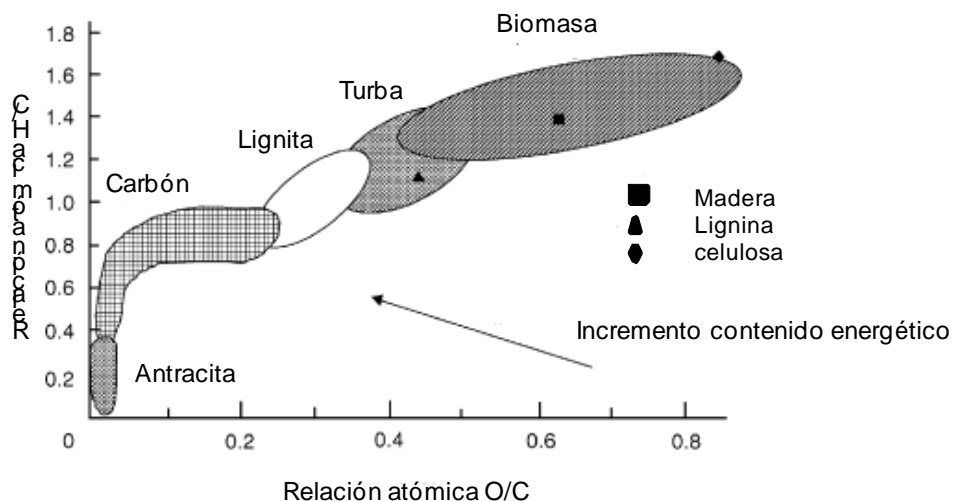


Figura 1 Diagrama de Krevelen

Las mayores relaciones de H/C y O/C implican mayores contenidos de moléculas de hidrógeno y carbono que influyen en la reducción del número de cadenas carbono – carbono, donde justamente se almacenan mayor cantidad de energía en los combustibles sólidos. Lo anterior explica el menor contenido energético que se encuentra en la biomasa.

Para el estudio del contenido energético de los combustibles sólidos es necesario establecer su composición fisicoquímica mediante los siguiente procedimientos: el análisis próximo y el análisis último o elemental (Álvarez M. *et. al*; 1984).

Análisis próximo. Permite determinar en la muestra el porcentaje en peso de la humedad, la materia combustible volátil, el carbono fijo y las cenizas.

- **Humedad (Hu).** Es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca.

El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 50% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de combustión directa, pirólisis o gasificación. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%.

Cuando los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy elevado es necesario, antes de ingresar al proceso de conversión de energía, implementar operaciones de secado las cuales incrementan los costos de su aprovechamiento energético. Por lo anterior, es recomendable que una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% sea aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia. (McKendry, 2002).

- **Material Combustible Volátil (MCV).** Está constituido por combinaciones de carbono, hidrógeno y otros elementos. El material combustible volátil se determina calentando la muestra en un crisol tapado durante siete minutos a 950 °C; a ésta temperatura se lleva a cabo un proceso de descomposición de la materia orgánica por ruptura de enlaces químicos (pirólisis). La pérdida en peso que sufre la muestra, una vez descontada su humedad, indica la cantidad de compuestos gaseosos producidos en la descomposición de la sustancia carbonosa (Castells *et. al.*, 2005). El contenido de material combustible volátil da una idea de la longitud de la llama, en el caso que esta biomasa se utilice en un proceso de incineración.

- **Carbono Fijo (CF).** Es la fracción de carbono residual que permanece luego de retirar de la muestra la humedad, las cenizas y el material volátil. Por consiguiente se puede calcular el porcentaje de carbono fijo = 100 – porcentaje de humedad – porcentaje de material volátil – porcentaje de ceniza. El carbono fijo es el compuesto que no destila cuando se calienta un combustible.

Desde el punto de vista energético, no todos los volátiles presentes en el material aportan energía. La cantidad de material volátil y carbono fijo presentes en la biomasa, permiten establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. La ocurrencia de uno u otro tipo de reacción depende del tipo de proceso utilizado para el aprovechamiento energético de la biomasa.

El contenido de materia volátil junto con el de Carbono Fijo, son los parámetros influyentes en la transformación energética contenida en la biomasa, dado que estos parámetros representan una medida de la facilidad con la cual la biomasa puede ser sometida al proceso de ignición y, de oxidación o gasificación, según la vía de aprovechamiento. Un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, son las ventajas que tiene la biomasa sobre los combustibles fósiles como el carbón (Cuiping, 2004).

- **Cenizas (Cz).** Corresponden a la cantidad de materia sólida no combustible presente en un material. El poder calórico de un material se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas. Las cenizas tienden a depositarse en las tuberías de las calderas e intercambiadores, ocasionando dificultad en la transmisión del calor. La eliminación de las cenizas presentes en un compuesto, implica el uso de tecnologías complejas y costosas (Castells *et. al.*, 2005; Couping; *et. al.*, 2004).

Análisis elemental. Con el análisis elemental se determina el contenido de compuestos simples que se gasifican y que aportan energía en las reacciones de combustión. Este análisis incluye cuantificar en la muestra el porcentaje en peso de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N) (Castells; *et. al.*, 2005). En la combustión de la biomasa, el azufre da lugar a las escorias perjudiciales y forma óxidos muy contaminantes. El nitrógeno no aporta energía, y si la cantidad es importante y la temperatura del proceso es elevada, se forma NO_x de origen térmico. La cantidad de oxígeno presente en la biomasa ayuda a reducir las necesidades de aire en la combustión, pero reduce su poder calorífico. El carbono de la biomasa puede proceder tanto de la materia orgánica como de los carbonatos presentes. Las relaciones H/C y O/C, determinan las eficiencias de conversión energética de los biocombustibles. La biomasa, en comparación con los combustibles fósiles, tiene un mayor contenido de oxígeno. El incremento del poder calorífico implica que disminuye la relación O/C y aumenta la relación H/C (Ptasinski; *et. al.*, 2007).

La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, mediante procesos de conversión térmicos y biológicos (ver Figura 2). La transformación energética de la biomasa genera principalmente biocombustibles y biogás, a partir de los cuales se puede obtener calor, electricidad o fuerza motriz (Mckendry; Parte 2, 2001).

La composición fisicoquímica es un aspecto importante a considerar cuando se evalúa su potencial energético y posteriormente en la selección de la tecnología para su aprovechamiento energético. El aprovechamiento de la biomasa seca (contenido de humedad menor al 50%) por medio de procesos termoquímicos depende de factores como el contenido de humedad, el valor calorífico, la concentración de carbono fijo y de los volátiles, el contenido de cenizas y de los metales alcalinos presentes. Por otra parte, para el aprovechamiento de la biomasa húmeda (mayor al 50%) por medio de la bioconversión, son de interés el contenido de humedad y la relación celulosa y lignina. (McKendry, Parte 1, 2002).

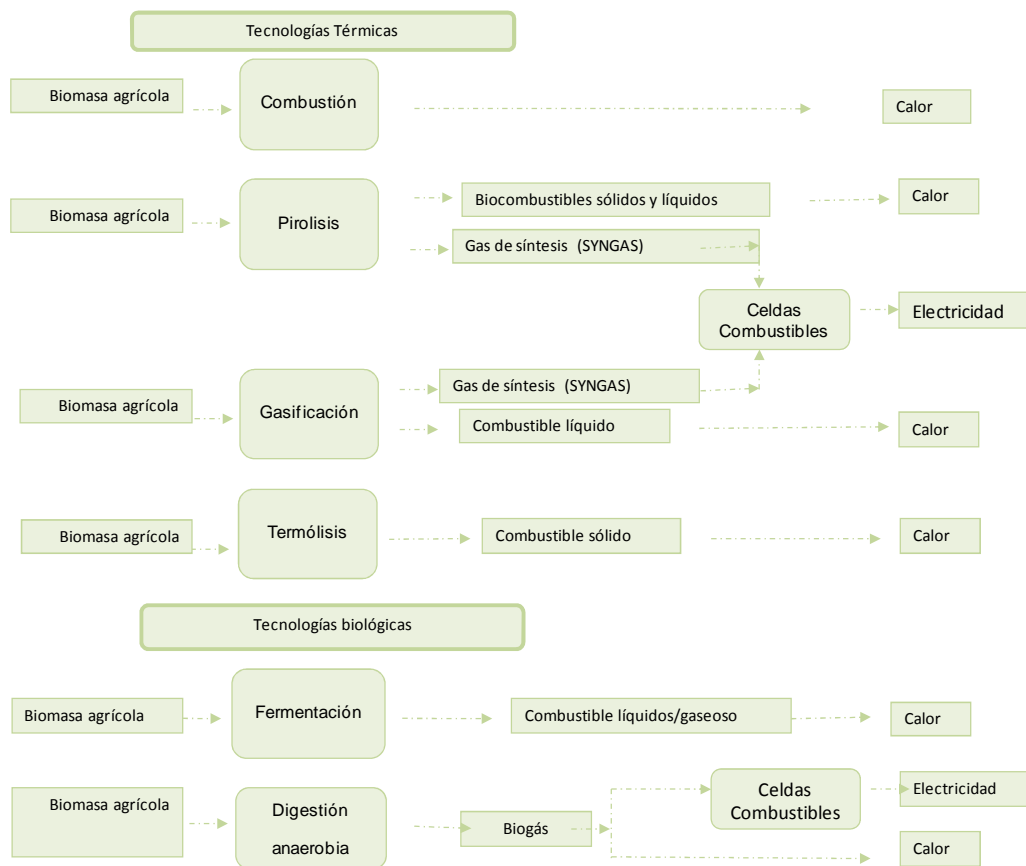


Figura 2. Alternativas tecnológicas para la transformación energética de la biomasa

Una de las ventajas en el uso de la biomasa como fuente de energía corresponde al aporte neutral de las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera, ya que existe una captura de dióxido de carbono que realizó la planta durante su crecimiento (Miltner M. *et. al.* 2006); así su uso como recurso energético no contribuye al calentamiento global, siempre y cuando exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía.

La toma de decisión en cuanto al uso de la biomasa como fuente alterna de energía, debe involucrar adicionalmente el análisis de las variables recolección y localización del residuo con respecto a la planta de procesamiento y al lugar de utilización de la energía convertida, para lograr un nivel de operación del proceso por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional. En este sentido los RAI tienen la ventaja de que se encuentran concentrados en los sitios de transformación de la cosecha, facilitando su aprovechamiento.

2. MODELOS MATEMÁTICOS

En este capítulo se presenta el marco de referencia sobre los modelos matemáticos, partiendo de su definición, clasificación y las etapas para su desarrollo. Se incluye un marco de referencia sobre las expresiones matemáticas empleadas para calcular el Potencial Energético (PE) de la biomasa residual y del rendimiento agrícola de cosecha (R_E).

2.1 CONCEPTUALIZACIÓN

Un modelo es la representación de un sistema mediante términos o símbolos específicos de las variables involucradas. Los modelos se han convertido en herramientas indispensables en el diseño y el funcionamiento de los procesos naturales y antrópicos, debido a que la parte experimental implica un elevado costo económico y largos periodos de tiempo para realizar la experimentación.

En la etapa de diseño de un modelo se deben analizar aspectos como el nivel de detalle requerido, si la expresión es muy sencilla o no se contemplan aspectos importantes, los resultados tendrán poca confiabilidad; si el modelo es muy abstracto la optimización tenderá a ser imposible. Por lo tanto, existe un modelo óptimo que se define como aquel que es el más simple pero que satisface las necesidades.

Adicionalmente es importante contemplar el análisis de los principios fisicoquímicos que describen el sistema, la capacidad de dividir el proceso en subprocesos más simples, así como las variables medidas y los datos disponibles para la validación del modelo.

Los modelos, como herramientas de análisis, deben permitir la omisión de ciertos detalles en el desarrollo de los fenómenos estudiados. La solución al problema matemático puede ser correcta y aún así estar en desacuerdo con los datos observados, debido a que no estaba probada la validez de las suposiciones básicas. Normalmente es bastante difícil afirmar con certeza si un modelo matemático es adecuado o no, antes de obtener algunos datos, mediante la observación. Para verificar la validez de un modelo, se debe deducir un cierto número de consecuencias del mismo y luego comparar con las observaciones los resultados calculados o predichos.

Existen diferentes tipos de modelos, los cuales se distinguen por que presentan algunas diferencias o semejanzas entre ellos como:

1. Modelos Empíricos. Éste tipo de modelo está restringido al dominio que contiene los datos utilizados para ajustar el modelo. El sistema a modelar debe existir necesariamente para poder obtener los datos requeridos.
2. Modelos Lineales. En lo posible se optan por utilizarlos en razón a que existe una teoría matemática ampliamente desarrollada para tratar modelos lineales, no siendo igual con los modelos no lineales.
3. Modelos Estacionarios. En éste tipo de modelos no se considera la evolución de las variables con el tiempo; es decir, que las derivadas parciales con respecto al tiempo son nulas. Este tipo de modelos es ampliamente utilizado en optimización.
4. Modelo Determinístico. En este tipo de modelos se supone que el resultado real está definido por las condiciones en las cuales se efectúa el experimento o procedimiento, por tanto la respuesta de este tipo de modelo está perfectamente determinada por las entradas y los parámetros el modelo.

La aplicación de éste tipo de modelos en la actividad agrícola, permite predecir el momento de ocurrencia de las fases fenológicas que suceden en el ciclo del cultivo: nacimiento o emergencia, aparición de flores, maduración, etc., por lo que incorporan los mecanismos más fundamentales de cada proceso. Poseen varios componentes o submodelos que tratan sobre: los estados fenológicos, el balance hidrológico, la producción de biomasa y granos, etc.

5. Modelos estocásticos. En éste tipo de modelo a pesar de conocer las entradas y los parámetros existe incertidumbre en su respuesta (por ejemplo, el modelo estadístico utilizado para predecir la población de un país). En este modelo, contrario al determinista, las condiciones experimentales solo determinan el comportamiento probabilístico de los resultados observables.

La diferenciación o conveniencia en el desarrollo de cada uno de las anteriores categorías depende de la disponibilidad de requerimientos de conocimiento, económicos y de tiempo. El desarrollo de un modelo contempla tres fases fundamentales: la definición del problema, el diseño del modelo y su evaluación.

En la primera fase, y teniendo como referente el objetivo propuesto se fijan las variables y los primeros principios del modelo. En la etapa de diseño se desarrolla el modelo, a partir de la observación de datos, y se estiman los parámetros. En la etapa final se realiza la evaluación y verificación respectiva del modelo, con lo cual se advierten posibles ajustes (ver figura 3).

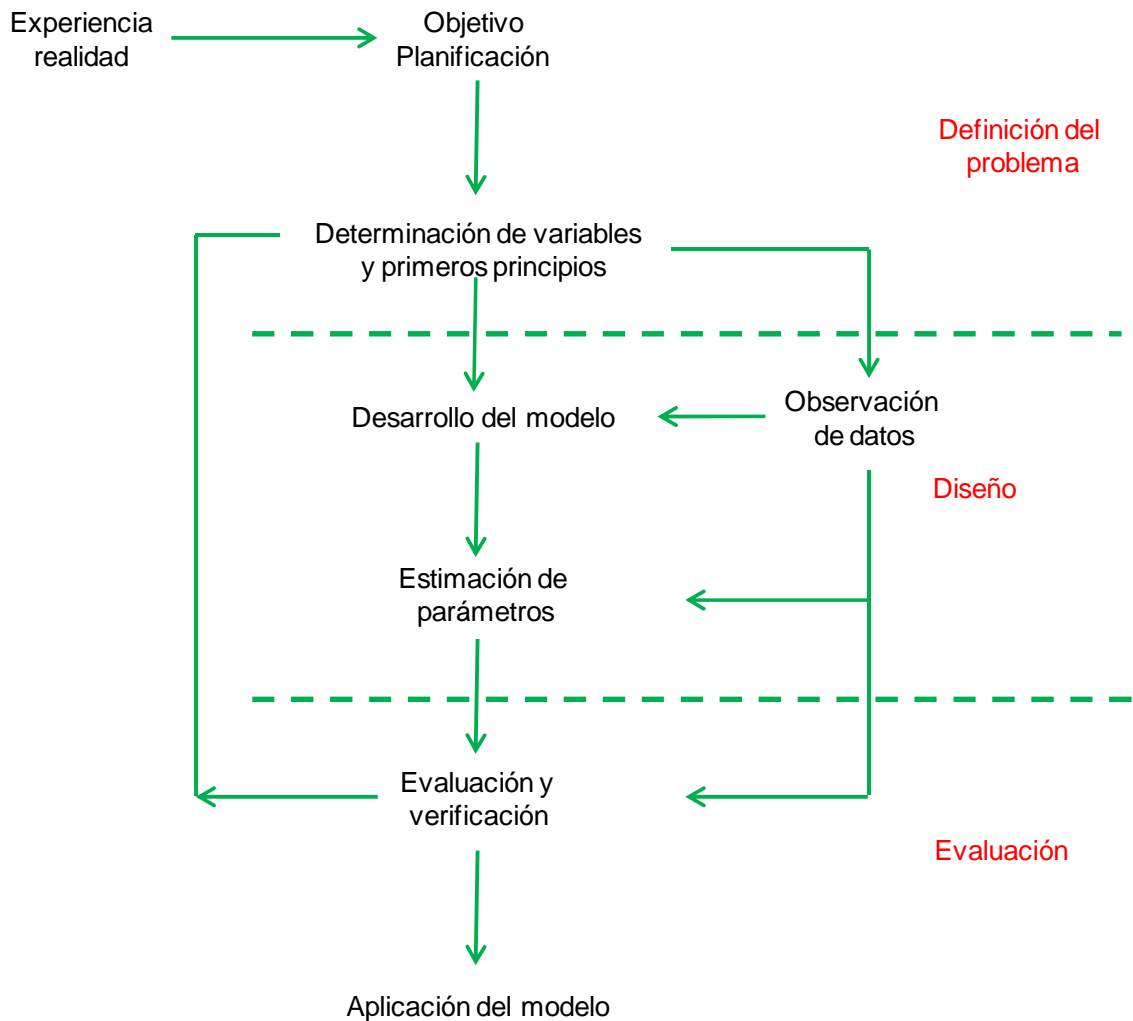


Figura 3 Etapas para el desarrollo de un modelo

2.2 ANTECEDENTES SOBRE LA APLICACIÓN DE MODELOS PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO (PE) DE LA BIOMASA RESIDUAL

El interés mundial en estimar la oferta energética de fuentes constituidas por materia orgánica ha conllevado al desarrollo de modelos de PE en función de la masa y su contenido energético. El estudio realizado en el marco del “Programa de investigación en energía, ambiente y clima de la región asiática” evaluó el potencial energético sostenible de la biomasa residual agrícola a partir de un

modelo, cuya estructura es una función de la masa de residuo y el poder calorífico inferior. El PE se reporta en unidades de energía/año.

En éste modelo la masa de residuo se obtiene en función de la producción (t/año), el factor de generación de residuo (tresiduo/tproducto) y el factor de aprovechamiento; el modelo no contempla el factor de humedad del residuo. Esta metodología se aplicó en cinco países asiáticos en los cuales se reportó la oferta energética, China, India, Filipinas, Sri Lanka y Thailandia; los resultados señalan una oferta energética igual a 5 307,2 PJ⁵, 6 565 PJ, 431 PJ, 64,6 PJ y 619 PJ, respectivamente.

Antolin G., *et. al.*, 2009 asociados al Departamento de Ingeniería Química y grupos de investigación de la Universidad de Valladolid (España) emplearon imágenes satélites para evaluar y georeferenciar el PE de la biomasa lignocelulósica forestal y agrícola en la región de Castilla y León, España. Como insumos utilizaron cartografía de usos del suelo, el inventario forestal nacional y el registro de industrias del sector generador de biomasa. Siendo la estructura del PE, la relación de la masa de residuo y su contenido energético, la masa de residuo se obtuvo a través de la reflectancia de la superficie de la tierra, variable que registra las imágenes de teledetección. En este estudio se definieron los puntos estratégicos para el aprovechamiento energético mediante la instalación de plantas con el fin de definir zonas estratégicas para su aprovechamiento.

En el estudio realizado en Colombia para identificar el potencial energético empleó un modelo de PE siguiendo la estructura general que incluye la masa de residuo y su contenido energético. En el citado estudio, la masa se calculó como una función del área cultivada, el rendimiento agrícola de cosecha y el factor de generación del residuo. No se consideró la humedad del residuo (UPME, 2003).

⁵ Especies agrícolas evaluadas: arroz, trigo, maíz, frijol, tubérculos, sorgo, otros cereales, algodón, bagazo

2.3 MODELOS PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA (MRAC)

Desde la década de los setenta se han desarrollado diferentes tipos de modelos para representar el desarrollo (fenología) y el crecimiento de los cultivos. Estos modelos son una alternativa de planeamiento estratégico de los sistemas agrícolas para alcanzar una alta eficiencia del sistema de producción mediante la optimización en el uso de los insumos, altos rendimientos y bajos costos (Forján H., 2002). Usualmente la evaluación del rendimiento de cultivos se ha realizado con modelos determinísticos y probabilísticos (Ravelo, 2004).

El desarrollo de modelos determinísticos ha permitido estudiar los efectos del ambiente y el manejo del cultivo sobre el crecimiento y los rendimientos de la cosecha. Los resultados obtenidos trabajando con estos modelos demuestran que pueden ser usados para predecir eventos fenológicos. Estos modelos presentan el rendimiento de cultivos combinando diferentes suelos, climas, cultivares y manejo. Estos modelos presentan un bajo error entre los valores estimados u observados (Forján H., 2002).

Para demostrar las posibilidades de aplicación de los modelos determinísticos es necesario realizar ensayos de los cultivos predominantes en la región, con los híbridos y variedades más difundidos, en diferentes fechas de siembra, con densidad y fertilizaciones variables, con diferentes contenidos de agua, durante varias campañas. La información obtenida alimenta el modelo y para una serie climática determinada se puede realizar el análisis de sensibilidad. Este tipo de análisis permite determinar de que modo combinar las distintas estrategias de manejo para optimizar el aprovechamiento de los recursos y mejorar la producción económica (Forján H., 2002).

La aplicación de los modelos determinísticos requiere disponer de estudios detallados de las características del suelo en el momento inicial y seguimiento de humedad durante el ciclo, seguimiento de los eventos fenológicos más relevantes de los cultivos: a) la evolución de la superficie foliar en distintos momentos; b) la evolución de la materia seca particionada de cada componente de la planta (hojas, tallo, espiga, etc.) y c) evolución del peso del grano. En cosecha, se determina el rendimiento y sus componente morfológicos, índice de cosecha.

Modelos que simulan el crecimiento de cultivos, demostrando alta confiabilidad bajo distintas condiciones de clima, suelo y manejo (Giraldo L.M., 2000) han sido aplicados y validados en diferentes condiciones en los países de Argentina, Costa Rica y Estados Unidos para diferentes cultivos.

Como ejemplo de modelos ecofisiológicos y desarrollo, se hace referencia al ORIZA 2000, Versión 2.12, 2004, desarrollado por investigadores del Internacional Rice Research Institute (IRRI), que permite realizar simulaciones en condiciones óptimas de nitrógeno y agua para obtener un rendimiento potencial, según las condiciones climáticas del lugar y simulaciones con situaciones limitantes de agua y nitrógeno; estima la evapotranspiración potencial y simula los balances de radiación y CO₂ en la planta para obtener la evolución en el tiempo de materia verde, seca, índice de área foliar, crecimiento de tallos, raíces, hojas y granos (Universidad Nacional de Entre Ríos, 2006).

El modelo CERES-Maize de DSSAT corresponde a la clase de modelos ecofisiológicos que permite utilizar el fotoperíodo y la temperatura para predecir el desarrollo fenológico del maíz. Este modelo posee un sistema de pronóstico detallado de las fases y número de hojas y un mecanismo sencillo de calibración y validación. Simula la iniciación de primordios foliares y la fecha de diferenciación panoja para predecir el número total de hojas. Evalúa la tasa de aparición de ápices foliares para predecir cuando aparecerá la última hoja, determina la fecha

de aparición de los estigmas y finalmente estima las tres fases de desarrollo entre aparición de los estigmas y la madurez fisiológica.

La aplicación del CERES en los cultivos de arroz ha permitido estimar los componentes de desarrollo y producción de diferentes variedades bajo ambientes tropicales y subtropicales (Villalobos R. 1998).

El modelo CropSyst simula para diferentes cultivos extensivos durante varios años, con un intervalo de ejecución diario el balance y absorción de nitrógeno y agua en el suelo, la fenología, la interceptación de radiación por la cubierta vegetal, el crecimiento y desarrollo del área foliar, la producción de biomasa y el rendimiento final, así como la producción y descomposición de residuos de cultivo y la erosión del suelo (Milera S., Crotti Ch., 2006).

Los modelos estadísticos representan relaciones observadas entre el comportamiento del cultivo y las variables del ambiente a través de ecuaciones matemáticas simples que expresan por ejemplo, la relación lluvia - rendimiento o la relación entre el rendimiento y la evapotranspiración. Es decir representan la relación que hay entre las variables climáticas y edáficas independientes y una variable de respuesta o salida dependiente. Estos modelos han despertado amplio interés por su capacidad para predecir la productividad de los cultivos sometidos a diferentes condiciones ambientales.

Como ejemplo de modelo estadístico de regresión lineal múltiple donde se relacionan la productividad agraria con las condiciones climáticas, se tienen los trabajos realizados por Iglesias *et al*, 1999 y 2005, quienes obtuvieron ecuaciones de tipo lineal y no lineal, que relaciona la producción agrícola con factores climáticos como la temperatura, la radiación, la precipitación y factores externos como la maquinización del cultivo: Este trabajo fue realizado para los cinco

cultivos más representativos de España, desde el punto de vista de producción global y tradición.

Rosbaco I. *et. al.* 2004 aplicaron técnicas de análisis multivariado para estudiar la incidencia de factores ambientales sobre el comportamiento de cultivos de soya, con el fin de determinar la capacidad productiva de la especie cuando se somete a distintas condiciones ambientales en Zavalla Argentina.

En España se estudió el rendimiento agrícola de cosecha de ciertos cultivos sometidos a diferentes condiciones climáticas y edáficas, a partir del uso de modelos de regresión lineal con el fin de determinar las variables climáticas que explican parte de la variación de la productividad agraria. Esta herramienta se empleó como soporte para incrementar la capacidad del sector agrario (www.infoagro.com).

Para alcanzar el objetivo propuesto en el presente estudio de investigación se desarrolló el modelo de potencial energético, cuya estructura se diseñó en función de la masa de residuo y su correspondiente contenido energético. Para calcular la masa de residuo se desarrolló el modelo de regresión lineal múltiple de rendimiento Agrícola de cosecha en función de las variables edáficas y climáticas que influyen en su producción.

El desarrollo de los modelos se realizó teniendo como marco de referencia la información estadística que el sector agrícola en Colombia, relacionada con las especies cultivadas, la localización y el rendimiento municipal, los factores de generación de residuos, características de clima y suelo del territorio y la clasificación del suelo en Colombia.

Considerando las características de la información disponible y la revisión bibliográfica realizada, el modelo de rendimiento agrícola de cosecha corresponde

a una regresión lineal múltiple, que relaciona los valores de rendimiento y las características de clima y suelo, variables que se conocen para las zonas donde actualmente se desarrollan los cultivos.

El análisis de regresión es un procedimiento estadístico el cual permite modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes (factores). La técnica empleada para obtener la ecuación se realiza por mínimos cuadrados. Para evaluar la sensibilidad del modelo se aplican tres procedimientos que consisten en la determinación de la prueba de hipótesis, verificación de la calidad del modelo y el análisis gráfico de los residuos (ver anexo 2).

3. MODELO PARA CALCULAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA RESIDUAL Y EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA

El desarrollo del modelo de Potencial Energético (PE) se fundamentó en una revisión sobre estudios similares realizados a nivel internacional, los cuales parten de relacionar la masa de residuo y su contenido energético. El modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC) que se generó en el marco del presente estudio, corresponde al resultado del análisis e interpretación que se hizo sobre la interrelación existente entre las variables climáticas y edáficas y su influencia en el crecimiento de la planta.

3.1 MODELO DE POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL

Los modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa se fundamentan en que la energía contenida en la materia es proporcional a su masa seca y por consiguiente puede expresarse en forma general como:

$$PE = (MR_s) * (E) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

PE : Potencial energético [TJ/año]

M_{rs} : Masa de residuo seco [t/año]

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

El término de masa de residuo seco se obtiene del producto entre el rendimiento agrícola de cosecha y el factor que relaciona la masa de residuo a masa de producto principal. La energía corresponde al Poder Calorífico Inferior⁶ (PCI),

⁶ El PCI puede obtenerse experimental o teóricamente mediante correlaciones matemáticas (Sheng Ch. y Azevedo J., 2002).

dadas en unidades de energía por unidad de masa de residuo seco. Por consiguiente la masa del residuo seco anual se expresa de la siguiente forma:

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

Donde:

M_{rs} : Masa de residuo seco [t/año]

A : Área cultivada [ha/año]

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

M_{rg} : Factor de residuo generado del cultivo [t de residuo/t de producto principal]

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

En la determinación de la masa de residuo se incluyó el factor relacionado con la humedad de la biomasa⁷, debido a que la forma más adecuada de aprovechamiento energético son los procesos termoquímicos como la combustión. La consideración de esta variable ajusta la disponibilidad energética neta de la biomasa, con lo cual se obtiene una mejor eficiencia en los procesos termoquímicos.

El Potencial Energético global de la biomasa residual agrícola (PE), conformada por los residuos de cosecha (RAC) y agroindustriales (RAI), para cada una las cinco especies del estudio se evaluó mediante la siguiente expresión:

$$PE = \alpha * A * R_c \sum_k^2 \sum_t^n Mrg_{i,k} * Y_{rs_{i,k}} * PCI_{i,k} \quad (\text{Ecuación 3})$$

⁷ Parámetro no incluido en los estudios consultados

Donde:

PCI: Poder Calórico Inferior del residuo [kJ/kg residuo seco]

α : Constante de conversión de unidades igual a $1 \cdot 10^{-6}$

El contador "**k**" hace referencia a la clasificación de la biomasa ya sea residual agrícola (RAI) y/o de cosecha (RAC). El contador "**i**" hace referencia al número de residuos en cada una de las clasificaciones. Por ejemplo, para el cultivo del banano los tipos de biomasa asociados a cada clasificación son:

- Residuos agrícolas de cosecha (RAC): Raquis y vástago
- Residuos agroindustriales: banano de rechazo

A partir de los datos de áreas cultivadas, los valores del rendimiento agrícola de cosecha **R_c**, reportados por el Ministerio de Agricultura de cada uno de los sitios donde se localizan los cultivos de una especie, el factor de residuo humedad **M_{rg}**, facilitado por los gremios y los datos de la fracción de residuo seco **Y_{rs}** y el Poder Calórico Inferior (PCI) obtenidos en el laboratorio, se calculó el potencial energético para las cinco especies vegetales incluidas en el estudio.

3.2 MODELO DE RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE COSECHA DE LAS ESPECIES CULTIVADAS

La masa de residuo del modelo de potencial energético está influenciada por el rendimiento agrícola de cosecha (**R_c**), variable que depende de las condiciones de clima, de suelo y las prácticas agrícolas a las cuales se somete el cultivo. El rendimiento agrícola de cosecha **R_c** en función de las características climáticas y edáficas:

$$R_c = f (\textit{Características climáticas, Características edáficas})$$

Para establecer la relación que se presenta en la anterior expresión, se creó un modelo de regresión lineal múltiple, donde la variable dependiente corresponde a R_c y las variables independientes o regresoras a las características climáticas y edáficas de las zonas donde se cultivan las especies.

Dado que las variables independientes corresponden a un conjunto de características que definen el clima (temperatura, radiación, precipitación, etc.) y el suelo (textura, profundidad, etc.), estas variables se organizaron en dos expresiones: el Coeficiente de Favorabilidad Climático (CFC) y el Coeficiente de Favorabilidad Edáfico (CFE). Este procedimiento se dedujo luego del análisis integral de las variables y su influencia en el desarrollo del cultivo y corresponde a un planteamiento original del presente estudio.

3.2.1 Desarrollo de los CFC y CFE. Cada expresión, CFE o CFC, mide la contribución global del conjunto de características climáticas o edáficas en el rendimiento agrícola de cosecha R_c . El CFC y el CFE, se definieron en función de dos términos: el Índice de Favorabilidad (IF) y el Factor de Importancia (γ).

Como se indicó en el numeral 1.2, cada especie vegetal presenta un excelente desarrollo y por ende un alto rendimiento a determinadas condiciones climáticas y edáficas; así por ejemplo en el caso del café se reportan valores experimentales de R_c entre 2,45 y 13,7 toneladas de producto principal/ha, dependiendo del sitio de cultivo.

- **Índice de Favorabilidad (IF).** Éste factor mide la cercanía que existe entre las condiciones climáticas y edáficas favorables para la especie y las encontradas en el sitio donde se desarrolla el cultivo. El valor de IF varía en el rango de cero a uno y su asignación se debe realizar apoyado en los siguientes aspectos:

a) Conocimiento de las condiciones edáficas y climáticas propicias para cada especie (ver anexo 1).

b) Consulta bibliográfica y el soporte de expertos en la ciencia de la agronomía.

- **Factor de importancia (x)**. Explica la influencia o aporte individual de cada una de las características de clima (temperatura, radiación, etc.) y suelo (textura, profundidad, etc.) en el rendimiento agrícola de cosecha. Al conjunto de características climáticas o edáficas, consideradas en el presente estudio se asignó un peso, hasta completar un 100%, con base en los siguientes aspectos:

a) Clasificación de los cultivos según el tipo fotosintético (plantas C_3 y C_4), teniendo en cuenta que esta diferencia metabólica favorece la amplitud de la adaptación ecológica y es responsable, de las diferencias de la productividad entre las especies agrícolas (Squire, 1990).

b) Relación individual de cada una de las características en el crecimiento y desarrollo de las plantas y sus efectos sobre la producción de materia seca.

c) Disponibilidad de las características que identifican el clima y el suelo en el trópico.

d) Posibilidad de manipulación de las variables a través de las prácticas agronómicas de los cultivos. Se asignaron los valores más altos a la altitud y pendiente, porque contribuyen de manera sustancial a la expresión o intensidad de las otras variables consideradas en el estudio. La temperatura y precipitación se le asignaron valores intermedios, por ser variables determinantes de la producción de materia seca; y a las variables edáficas profundidad y textura, por su importancia en la determinación de la disponibilidad neta de agua para los cultivos. Los valores más bajos se asignaron a la fertilidad y a la variable

radiación porque pueden modificarse, en cierta medida, por medio de las prácticas agronómicas.

Otra de las razones que sustenta la asignación de bajo peso a la variable radiación solar es que aunque es vital para los procesos responsables de producción de materia seca (al igual que la temperatura y la precipitación), en particular por estar ubicados en el trópico las radiaciones solares son constantes (Montaldo, 1985) y en este sentido no se muestra como limitante de las producciones de los cultivos.

- **Selección de las variables influyentes en el rendimiento agrícola de cosecha.** Partiendo del análisis de la influencia de las características que definen el clima y el suelo y que influyen en la generación de la biomasa agrícola se seleccionaron las siguientes:

Tabla 5. Características climáticas y edáficas seleccionadas para evaluar el rendimiento agrícola de cosecha

Variables climáticas	Variables Edáficas
Elevación (altitud)	Pendiente
Temperatura	Profundidad
Precipitación	Fertilidad
Radiación	Textura

Siendo el CFC y el CFE una función entre el factor de importancia y el índice de favorabilidad, las expresiones correspondientes son las siguientes:

$$CFC = IF_{Temperatura} \cdot Peso_{Temperatura} + IF_{Elevación} \cdot Peso_{Elevación} + IF_{Precipitación} \cdot Peso_{Precipitación} + IF_{Radiación} \cdot Peso_{Radiación}$$

(Ecuación 4)

La representación simplificada de la ecuación 4 es:

$$CFC = \sum_i^4 IF_i * \gamma_i \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

CFC: Coeficiente de Favorabilidad Climático para el cultivo, [adimensional]

IF_i: Índice de Favorabilidad de la variable climática *i*; siendo *i*: temperatura, elevación, precipitación y radiación

γ_i: Peso asignado de la variable *i*.

La expresión matemática para el CFE es:

$$FE = IF_{pend} * \gamma_{pend} + IF_{prof} * \gamma_{prof} + IF_{fert} * \gamma_{fert} + IF_{text} * \gamma_{text} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Simplificando la anterior ecuación se tiene:

$$CFE = \sum_j^4 IF_j * \gamma_j \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

CFE: Coeficiente de favorabilidad Edáfico para el cultivo, [adimensional]

IF_j: Índice de favorabilidad del rango de la variable *j*; siendo *j*: pendiente, profundidad, fertilidad y textura.

γ_j: Peso asignado de la variable *j*

3.2.2 Modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC). El modelo rendimiento agrícola de cosecha estandarizado⁸ se estructuró en función del coeficiente de favorabilidad climática, el coeficiente de favorabilidad edáfica y un tercer término que corresponde al producto entre el CFC y el CFE que evalúa la interacción entre las características climáticas y edáficas.

$$R_{ce} = \beta_1 * CFC + \beta_2 * CFE + \beta_3 * CFC * CFE \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

R_{ce} : Rendimiento agrícola de cosecha estandarizado [adimensional]

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Coeficientes de regresión

CFC, CFE , y $CFC * CFE$: Variables independientes o regresoras [adimensional]

Para establecer las correlaciones entre la variable dependiente y las variables independientes, se tomó como referencia los sitios donde actualmente se desarrollan los cultivos. Por lo cual fue necesario la información relacionada con el valor del rendimiento agrícola de las cosechas a nivel municipal y de las características edáficas y climáticas de las unidades agroecológicas en las cuales está dividido el territorio colombiano. Del proceso se obtiene un conjunto de “n” ecuaciones (donde “n” será igual al número de zonas agroecológicas que pertenecen a municipios donde existe el cultivo), con k variables desconocidas, que corresponden a los coeficientes de la regresión.

$$R_{ce} = \beta_{ji} * CFC_{ji} + \beta_{ji} * CFE_{ji} + \beta_{ji} * CFC_{ji} * CFE_{ji} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En términos del conjunto de datos, ecuación 9, el modelo se escribe en notación matricial como:

⁸ El Rendimiento Agrícola de Cosecha se estandarizó para mantener la consistencia adimensional de la ecuación.

$$Y = X * \beta + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde,

$$Y = \begin{bmatrix} R_{ces_1} \\ R_{ces_2} \\ \vdots \\ R_{ces_n} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & CFC_1 & CFE_1 & CFCXCFC_1 \\ 1 & CFC_2 & CFE_2 & CFCXCFC_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & CFC_n & CFE_n & CFCXCFC_n \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad y \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \cdot \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

Resolviendo el sistema por mínimos cuadrados, se obtienen los valores de los parámetros o coeficientes de regresión de la ecuación 8. Al obtener los parámetros de la ecuación, este modelo se usa para hallar el rendimiento agrícola teórico de zonas potenciales de desarrollo de los cultivos. Calculado el valor de rendimiento, se reemplaza en la ecuación 3 para calcular el valor del potencial energético respectivo.

3.2.3 Análisis de sensibilidad del modelo. Con el análisis de varianza se valoró el grado de significancia del modelo. Para analizar la variación de los datos se evaluó el comportamiento de parámetros adicionales como son los coeficientes de determinación, de correlación múltiple, el error estándar de estimación y la media del error absoluto. Mediante la confirmación de hipótesis se prueba la contribución de cada uno de los términos del modelo y por último se analizan los intervalos de confianza y predicción (ver anexo 2).

4. METODOLOGÍA

En la figura 4 se presentan las etapas metodológicas para el desarrollo de este trabajo de investigación.

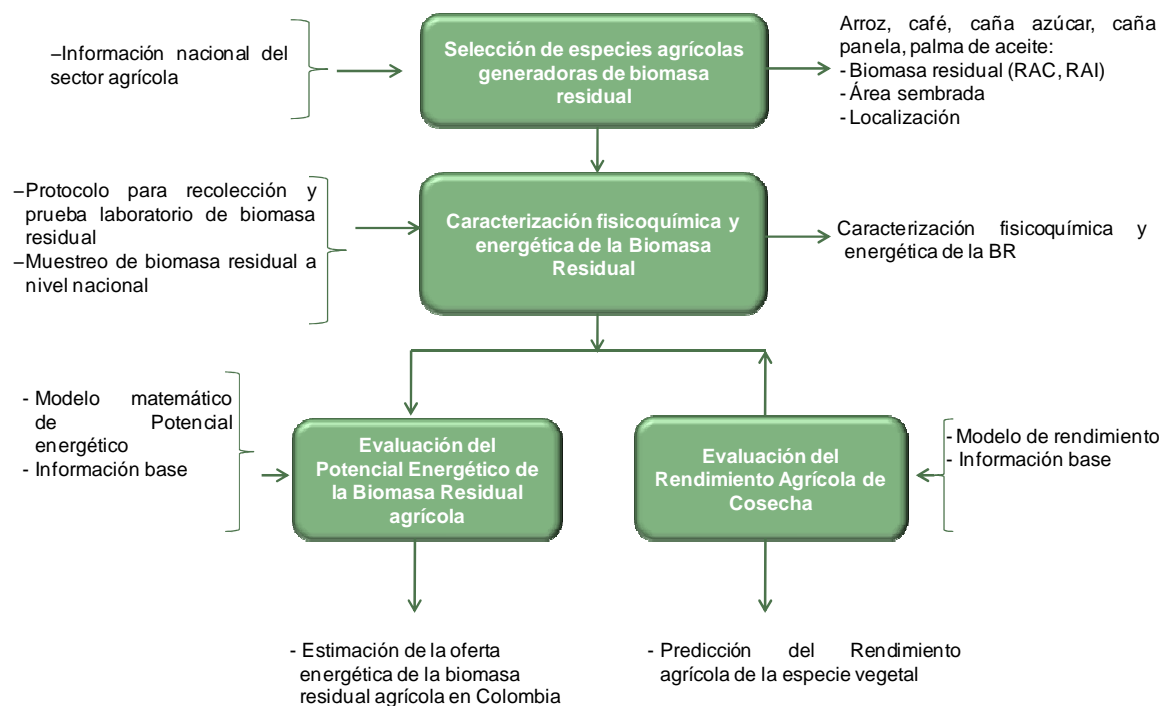


Figura 4 Etapas metodológicas del estudio

4.1 SELECCIÓN DE LAS ESPECIES AGRÍCOLAS BASE DE ESTUDIO

En la selección de las especies se evaluaron principalmente tres criterios: el área sembrada, la localización de los cultivos y la masa de residuo generada. Atendiendo a éstos criterios, se acudió a las fuentes de información directas

relacionadas con las actividades agrícolas como son el Ministerio de Agricultura y los gremios que representan éstas actividades en Colombia.

Inicialmente se realizó un reconocimiento general del sector a partir de información secundaria, para lo cual se tomó como referencia la información estadística reportada por el Ministerio de Agricultura en el Anuario Estadístico del 2006 que registró una base de 21 especies cultivadas, de las cuales 12 corresponden a cultivos transitorios y 9 permanentes. Estas actividades agrícolas se desarrollan en 4 058 471 de hectáreas en el territorio nacional y alcanzan una producción de 24 632 132 toneladas/año (ver tablas 2 y 3 del presente documento).

La información sobre el área cultivada a escala departamental y municipal, y la producción se obtuvo del anuario estadístico del 2006. Para la identificación de los principales residuos se realizaron los contactos con expertos de los gremios o entidades que se encargan de prestar el apoyo técnico a las actividades agrícolas (Cenicaña, Cenicafé, Cenipalma, Augura, Fedearroz y Fenalce, etc.). Como resultado de ésta etapa se seleccionaron cinco especies representativas de la actividad agrícola para el desarrollo del presente estudio.

4.2 ANÁLISIS DE LA COMPOSICION FISICOQUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL

El contenido de humedad y el poder calorífico inferior son datos necesarios para calcular el potencial energético (ver ecuación 3). Teniendo en cuenta la relación directa del contenido energético de un material con respecto a su composición se evaluaron los parámetros correspondientes al análisis elemental (carbono orgánico total, hidrógeno, oxígeno y azufre) y el análisis próximo (material volátil, carbono fijo y ceniza). El procedimiento llevado a cabo para obtener una muestra representativa, el procesamiento en el laboratorio y análisis de resultados consistió en:

- a. **Definición de la población estudio y selección de los puntos de muestreo.** Como población de estudio se tomaron los tipos de biomasa residual correspondiente a las especies seleccionados. La selección de los sitios de muestreo se realizó teniendo en cuenta la distribución geográfica de los cultivos, la facilidad de acceso y la autorización del gremio o representante del cultivo.
- b. **Recolección de muestras a nivel nacional.** El procedimiento en la toma, preservación, transporte y análisis de las muestras se realizó siguiendo los protocolos establecidos en el manual de calidad del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – Ceiam de la UIS. Para garantizar la reproducibilidad de los resultados las muestras se tomaron por duplicado.
- c. **Caracterización fisicoquímica y energética de las muestras.** En la caracterización de la biomasa residual se incluyó la evaluación de dos variables físicas (humedad, contenido sólidos), 8 químicas (las incluidas en el análisis próximo y el análisis último) y el contenido energético en todas las muestras recolectadas. La evaluación de la composición fisicoquímica se realizó en el laboratorio de aguas del Ceiam y los resultados se reportaron en porcentaje peso en base seca [%peso]. El contenido energético se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS y los resultados se reportaron en [kJ/kg].
- d. **Análisis de la composición.** Se realizó un análisis integral de los resultados teniendo en cuenta la clasificación de los residuos, RAC o RAI, y considerando la importancia de cada uno de los parámetros en el contenido energético de la muestra evaluada.

Se compararon los resultados de la composición de la materia vegetal residual que se genera en la actividad agrícola en Colombia con estudios similares

realizados a nivel internacional. Finalmente se compararon los resultados de la composición de la materia vegetal caracterizada con la composición de un combustible sólido de origen fósil tomado de referencia: el carbón mineral.

4.3 CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL

Para cada una de las especies seleccionadas se procedió a calcular el potencial energético de la biomasa residual aplicando el modelo de PE representado mediante la ecuación 3.

La evaluación de PE se realizó a cada uno de los registros de los cultivos relacionados en la base de datos alfanumérica realizada por el Ministerio de Agricultura⁹ y que se constituyó en la fuente principal de información para la elaboración del Anuario Estadístico del 2006. La base de datos alfanumérica contiene 3775 registros, correspondiente a 6 especies, de las cuales 2 corresponden a cultivos transitorios (maíz y arroz) y 6 a cultivos permanentes (banano, café, caña de azúcar, caña de panela, palma de aceite y plátano). La información se presenta a escala municipal, en el orden nacional. En la siguiente tabla se presenta una muestra de la información consignada en la base alfanumérica.

Para cada uno de los registros consignados en la base de información alfanumérica se realizaron los procedimientos para calcular el PE a partir de: el área cultivada, el rendimiento agrícola de cosecha (que varía de acuerdo con las características climáticas y edáficas propias del sitio donde se localicen los cultivos), el factor de residuo (RAC o RAI), la fracción de residuo seco (calculado con el porcentaje de humedad obtenido en el laboratorio) y el Poder Calorífico Inferior – PCI (obtenido en el laboratorio).

⁹ Hoja de cálculo en excel que contienen para cada especie, el registro donde se localizan los cultivos (a nivel municipal), las áreas, rendimiento y producción. La información consignada en la hoja de cálculo se recopiló de datos suministrados en entrevistas realizadas a los productores, gremios y la agroindustria.

Tabla 6. Presentación de una muestra del contenido en la base estadística del Ministerio de Agricultura, 2006

Departamento	Municipio	Grupo Cultivo	Especie	Nombre_Vulgar	Périodo	Área [ha]	Producción [t/año]	Rendimiento [tprod./ha]
Antioquia	ARGELIA	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	10	17	1,70
Antioquia	REMEDIOS	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	70	102	1,46
Antioquia	CHIGORODO	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	120	156	1,30
Antioquia	SAN JUAN DE UR	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	167	200	1,20
Antioquia	MURINDO	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	186	298	1,60
Antioquia	ZARAGOZA	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	625	651	1,04
Antioquia	SAN PEDRO DE	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	1500	1200	0,80
Antioquia	EL BAGRE	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	740	1310	1,77
Antioquia	VIGIA DEL FUER	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	780	1369	1,76
Antioquia	ARBOLETES	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	1468	1452	0,99
Antioquia	CACERES	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	860	1892	2,20
Antioquia	TURBO	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	1300	2050	1,58
Antioquia	NECHI	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	1500	2609	1,74
Antioquia	NECOCLI	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	2613	4480	1,71
Antioquia	MUTATA	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	31	100	3,23
Antioquia	CHIGORODO	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	124	558	4,50
Antioquia	TURBO	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	420	2060	4,90
Antioquia	YONDO	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	652	3170	4,86
Antioquia	PUERTO BERRIC	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	600	3900	6,50
Antioquia	NECHI	Transitorio	Oriza Sativa	Arroz	2006	4800	19575	4,08
Antioquia	BRICEÑO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	12	24	2,00
Antioquia	TOLEDO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	27	112	4,18
Antioquia	VALPARAISO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	40	160	4,00
Antioquia	BETANIA	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	50	200	4,00
Antioquia	FRONTINO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	40	200	5,00
Antioquia	ANDES	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	29	203	7,00
Antioquia	CHIGORODO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	73	730	10,00
Antioquia	LIBORINA	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	390	1170	3,00
Antioquia	URAMITA	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	150	1200	8,00
Antioquia	MUTATA	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	211	1448	6,86
Antioquia	JARDIN	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	250	1500	6,00
Antioquia	CANASGORDAS	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	517	3024	5,85
Antioquia	CHIGORODO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	3899	140361	36,00
Antioquia	CAREPA	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	7148	257329	36,00
Antioquia	TURBO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	10397	374296	36,00
Antioquia	APARTADO	Permanentes	Mussa Paradisaca	Banano	2006	11047	397690	36,00
Antioquia	LA ESTRELLA	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	50	40	0,80
Antioquia	MACEO	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	232	104	0,45
Antioquia	CONCEPCION	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	143	143	1,00
Antioquia	CAMPAMENTO	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	197	168	0,85
Antioquia	SAN FRANCISCO	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	221	193	0,88
Antioquia	SABANETA	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	137	247	1,80
Antioquia	BRICEÑO	Permanentes	Coffea arabica	Café	2006	532	266	0,50

4.4 MODELO DE RENDIMIENTO

En esta etapa se centró en la determinación de los parámetros del modelo, el análisis de sensibilidad y la validación del modelo de rendimiento agrícola de

cosecha (MRAC), β_1 , β_2 y β_3 , de la ecuación 8. Para obtener el conjunto de ecuaciones se llevaron a cabo los procedimientos para identificar los sitios donde se localizan los cultivos y sus respectivas características climáticas y edáficas, calcular los valores de las variables independientes CFC , CFE y $CFC + CFE$ y resolver el conjunto de ecuaciones; cada una de éstas etapas se describen a continuación:

4.4.1 Selección de la base de registros de los sitios cultivados por especie.

Para cada una de las especies seleccionadas en el estudio se identificaron los sitios donde se localizan los cultivos a nivel nacional a escala municipal. En ésta etapa se tomó como principal fuente de referencia la base de información alfanumérica que desarrolló el Ministerio de Agricultura para la elaboración del Anuario estadístico agropecuario del 2006. Considerando la escala espacial de la base alfanumérica la información se presentó a nivel municipal.

4.4.2 Cálculo de los Coeficientes de Favorabilidad Climática y Edáfica.

Para cada uno de los registros de los sitios cultivados y que cuentan con información sobre las características edáficas y climáticas, se realizaron los procedimientos para obtener los valores del Índice de favorabilidad (IF) y el Factor de importancia (γ).

El valor del factor de importancia asignado a cada una de las variables climáticas y edáficas se realizó siguiendo los criterios descritos en el numeral 3.2.1. En cada caso los valores son subjetivos y se asignaron teniendo en cuenta los criterios de un profesional experto en el tema¹⁰. Los valores se muestran en las tablas 7 y 8.

¹⁰ Teresa del Socorro Blanco T., Ingeniera Agrónoma; T.P. 14895 del Ministerio de Agricultura.

Tabla 7. Asignación del peso variables climáticas para plantas tipo C₄

Variables climáticas	Factor Importancia (%)	Variables Edáficas	Factor Importancia (%)
Elevación (altitud)	35	Pendiente	35
Temperatura	30	Profundidad	25
Precipitación	20	Fertilidad	15
Radiación	15	Textura	25
TOTAL	100	TOTAL	100

Tabla 8. Asignación del peso variables climáticas para plantas tipo C₃

Variables climáticas	Factor Importancia (%)	Variables Edáficas	Factor Importancia (%)
Elevación	35	Pendiente	35
Temperatura	25	Profundidad	25
Precipitación	30	Fertilidad	15
Radiación	10	Textura	25
TOTAL	100	TOTAL	100

4.4.3 Identificación de las características edáficas y climáticas de las zonas de cultivos. En esta etapa se desarrollaron los procedimientos computacionales para identificar las características climáticas y edáficas de cada uno de los sitios identificados en el numeral anterior, tomando como insumo los mapas de clima del

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y el mapa de zonas agroecológicas de Colombia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.

Apoyados en procedimientos computacionales se desarrollaron los geoprocursos que permitieron superponer la información climática y edáfica con la base estadística del Ministerio de Agricultura (archivo Excel), para cada una de las especies seleccionadas en el presente estudio.

Para realizar los procedimientos computacionales se desarrolló una caja de herramientas en ArcGis 9.2 que permitió extraer de cada uno de los mapas de las variables consideradas las condiciones predominantes correspondientes al área de cada cultivo geoposicionado.

4.4.4 Determinación de los parámetros del modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC). Calculados los coeficientes de favorabilidad climática y edáfica se correlacionaron con el valor de rendimiento agrícola de cosecha estandarizado R_{cfe} ¹¹, atendiendo a la estructura del modelo representado mediante la ecuación 8, obteniendo un conjunto de “n” ecuaciones por “k” variables, donde n es igual al número de registros obtenidos para cada una de las especies seleccionadas y “k” corresponde a las tres variables independientes, CFC , CFE y $CFC * CFE$.

El sistema de ecuaciones se resolvió por el método de mínimos cuadrados y se obtuvieron los valores de los parámetros del modelo. La resolución de las ecuaciones se realizó haciendo uso del software estadístico StatGraphics Centurion.

¹¹ El Rendimiento Agrícola de Cosecha se estandarizó para mantener la consistencia adimensional de la ecuación.

4.4.5 Análisis de sensibilidad del MRAC. Se realizaron los siguientes procedimientos para analizar de sensibilidad del modelo, los cuales se explican en detalle en el anexo 2:

- Pruebas de hipótesis de la regresión para verificar la significancia de los términos independientes en el modelo.
- Análisis de varianza que es un enfoque que permite analizar la significancia del modelo.
- Calidad de ajuste en la regresión para conocer que tanta de la variabilidad presente en el término dependiente fue explicada por el modelo, mediante la realización de estadísticos como el coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de determinación ajustados R_{aj}^2 , el error estándar y la prueba de Durbin-Watson.
- El análisis gráfico de los residuales. Los residuales representan la diferencia entre el valor calculado de la variable dependiente R_{cf} con el modelo y el valor de rendimiento del cultivo. El análisis gráfico de los residuales permite diagnosticar la calidad de ajuste del modelo. En la medida de que los residuales sean pequeños, el modelo describirá de mejor manera el comportamiento de la respuesta.

La validez de los resultados que se obtienen en el análisis de varianza depende de que los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de los residuales se cumplan. Para comprobar éstos supuestos se construyen los gráficos de: a) Distribución de probabilidad normal, b) residuales versus valor predicho (variable dependiente calculada) y c) residuales versus términos independientes.

El análisis de sensibilidad puede estar influenciada por las siguientes restricciones:

- No se incluye el componente relacionado con el factor tecnológico de cosecha (sistema de producción).
- Debido a limitaciones sobre el tipo y forma de la información disponible, a la escala espacial de trabajo, se decidió relacionar las variables edáficas y climáticas con la especie sin importar sus variedades existentes.
- La información sobre las características climáticas y edáficas de las áreas de estudio se reportan a escala 1:500 000.
- Los valores de rendimiento se registran a escala municipal

4.4.6 Validación del MRAC. Se calculó el rendimiento agrícola de cosecha mediante el MRAC obtenido para cada una de las especies incluidas en el estudio. Las estimaciones de los modelos se realizaron sobre registros no seleccionados para deducir los parámetros del MRAC en cada caso en particular. Se presenta el análisis de los residuales obtenidos en cada caso.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Partiendo de la selección de las especies base de estudio se identifican los tipos de biomasa residual y se analizan los resultados de la composición fisicoquímica y del contenido energético correspondiente. Para cada una de las especies se evalúa el Potencial Energético (PE) de la biomasa residual teniendo en cuenta las áreas cultivadas y el rendimiento agrícola de cosecha reportado por el Ministerio de Agricultura. Se obtienen los valores de los parámetros de la ecuación de rendimiento R_{CE} para cada una de las especies.

5.1 SELECCIÓN DE LAS ESPECIES BASE DE ESTUDIO

En la selección de las especies vegetales se atendió a la intención inicial de incluir las especies transitorias y permanente más representativas en el país, con respecto al área y la producción. Sin embargo, otro punto limitante lo constituyó la disponibilidad de la información en lo relacionado con la caracterización climática y edáfica de las zonas donde se desarrollan los cultivos. Como resultado del análisis se seleccionaron las siguientes especies: arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite.

En la tabla 9 se presenta para cada una de las especies seleccionadas, los datos sobre el área cultivada y la producción alcanzada en el 2006; adicionalmente se indican los tipos de residuos de acuerdo a la fuente de generación, RAC o RAI, y el factor residuo correspondiente.

Tabla 9. Área, producción y tipos de residuos de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Cultivo	Área ¹ [ha]	Producción [t/año]	Tipo de residuo	Origen del residuo	Factor de residuo ² [t _{residuo} /t producto principal]
Arroz	455 443,70	2 463 689,00	Tamo	RAC	2,35
			Cascarilla	RAI	0,20
Café	762 846,13	942 327,00	Pulpa	RAI	2,13
			Cisco		0,21
			Tallos	RAC	3,02
Caña de Azúcar	210 566,03	2 615 251,00	Hojas - Cogollo	RAC	3,26
			Bagazo	RAI	2,68
Caña panelera	242 364,00	1 514 878,00	Hojas - Cogollo	RAC	2,53
			Bagazo	RAI	3,75
Palma de Aceite	260 595,96	872 117,00	Cuesco	RAI	0,22
			Fibra		0,63
			Raquis de Palma		1,06
TOTAL	2 294 424,60				

Fuente:

¹: Ministerio de Agricultura (2006) Anuario Estadístico.

²: Datos obtenidos de los centros de investigación y federaciones relacionadas: Cenipalma, Cenicaña, Cenicafe, Augura, Fedearroz, Fenalce.

RAC: Residuo Agrícola de Cosecha RAI: Residuo Agrícola Industrial

Cada especie oferta entre dos ó tres clases de biomasa residual con lo cual se contabilizaron 12 tipos de biomasa residual, de las cuales 4 se obtienen en el sitio del cultivo – RAC y 8 en la transformación agroindustrial – RAI. Los RAC están constituidos fundamentalmente por hojas, cogollos y tallos, mientras que los RAI se generan en las diferentes etapas del proceso de transformación de la cosecha, como por ejemplo, la extracción del material de envoltura (bagazo en la caña, el cuesco de la almendra de palma, la cascarilla de arroz y el cisco del café) o de

algún subproducto orgánico que no corresponde al producto principal (pulpa de café y la fibra¹² de la palma de aceite). Dependiendo del tipo de materia vegetal la composición fisicoquímica, y por ende, energética puede variar de un residuo a otro.

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 9 y tomando como ejemplo la palma de aceite, se puede señalar que en su proceso agroindustrial se generan 1,06 toneladas de raquis¹³ en la etapa de desfrutación, 0,63 toneladas de fibra¹⁴ y 0,22 toneladas de cuesco¹⁵ en la sección de palmistería¹⁶, para un total de 1,91 toneladas de residuo por tonelada de aceite crudo.

En el caso del café se tiene que por cada tonelada de café procesado se obtienen 5,36 toneladas de residuos, de los cuales el 44% se generan en el proceso agroindustrial y el 56% en campo. Los residuos de acuerdo con su composición fisicoquímica tienen un potencial de aprovechamiento energético por la vía térmica o la vía biológica (ver figura 2)

Con base en los datos presentados en la tabla 9, el factor de residuo para los RAC varía entre 2,35 y 3,26 toneladas/tonelada de producto principal, mientras que en los RAI el rango de valores de éste factor se amplía desde 0,21 hasta 3,75 toneladas por tonelada de producto principal. De los residuos agroindustriales se destacan el bagazo que se obtiene en el proceso de molienda de caña para la producción de azúcar y panela, el cual alcanza factores de residuo de 2,68 y 3,75 toneladas por tonelada de producto principal respectivamente.

Estos resultados se aproximan significativamente con otros estudios, como por ejemplo para Centro América, donde la producción de RAC se reporta en 60%,

¹² Material celuloso del mesocarpio de la fruta de palma.

¹³ Soporte natural que sostiene el fruto de la palma

¹⁴ Material celuloso del mesocarpio de la fruta de palma.

¹⁵ Capa protectora de la almendra

¹⁶ Etapa del proceso en donde se extrae el aceite contenido en la almendra del fruto de palma

mientras que los desechos de proceso (RAI) varían entre el 20% y 40% (Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002).

5.2 ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL PROVENIENTE DE LAS ESPECIES BASE DE ESTUDIO

En la tabla 10 se presenta información sobre los sitios seleccionados a nivel nacional para realizar la toma de material vegetal representativo de la biomasa residual. Teniendo en cuenta el número de residuos y la toma por duplicado se recolectaron 26 muestras, las cuales se transportaron y procesaron siguiendo los procedimientos establecidos en el protocolo de calidad del laboratorio del Ceiam de la UIS.

Tabla 10. Sitios de muestreo a nivel nacional de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Subsector	Localización punto de muestreo			N° de muestras tomadas
	Zona de producción	Departamento	Municipio	
Arroz	Sur	Tolima	Guamo	4
Café	Eje cafetero	Antioquia Caldas	Andes Chinchiná	6
Caña de panela	Hoya del Río Suárez	Santander	Barbosa	4
Caña de azúcar	Occidente	Valle del Cauca	Palmira	4
Palma de aceite	Central	Santander	Puerto Wilches	6
Total				26

Tabla 11. Caracterización de la biomasa residual de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Residuo	Clasificación	Análisis básico [% peso]		Análisis próximo [% peso]			Análisis último [% peso]					Contenido energético
		Humedad	Sólidos Totales	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Poder calorífico Inferior [kJ/kg]
Arroz												
Tamo	RAC	73,59	26,41	57,38	20,07	22,55	42,68	4,91	28,25	1,58	0,08	13 537,42
Cascarilla	RAI	7,55	92,45	61,15	19,26	19,59	51,35	5,90	22,83	0,29	0,08	15 666,22
Café												
Pulpa	RAI	80,62	19,38	85,72	7,07	7,21	51,80	5,95	37,21	1,06	0,09	16 517,5
Cisco	RAI	10,42	89,58	98,82	0,51	0,67	57,69	6,63	33,10	0,53	0,03	19 264,57
Tallos	RAC	29,01	70,99	89,35	4,60	2,60	52,50	6,03	35,01	0,69	0,10	19 062,23
Caña de azúcar												
Hojas y cogollos verdes	RAC	69,46	30,54	81,49	8,95	9,57	50,06	5,76	33,66	0,92	0,09	16 018,1
Bagazo	RAI	43,49	56,51	91,72	4,81	3,47	58,73	6,75	30,66	0,38	0,04	19 374,24
Caña de panela												
cogollo y hojas verdes	RAC	68,50	31,50	84,86	7,87	7,28	38,21	4,39	49,01	1,10	0,04	16 018,1
Bagazo	RAI	43,39	56,61	96,79	1,61	1,60	49,27	5,67	42,87	0,58	0,04	19 374,24
Palma de aceite												
Cuesco	RAI	19,86	80,14	85,12	7,26	7,62	40,76	4,69	46,41	0,50	0,05	17 340,04
Fibra	RAI	33,24	66,76	85,85	6,98	7,16	56,97	6,55	28,14	1,13	0,09	18 584,22
Raquis	RAI	59,13	40,87	82,56	7,85	9,58	49,73	5,72	34,06	0,90	0,05	17 484,69

5.2.1 Análisis próximo. Incluye la evaluación de los parámetros de humedad, material volátil, carbono fijo y ceniza.

- **Humedad (Hu).** En general se observa que el contenido de humedad de los RAC varía en el rango de 29 a 74 % en peso, con menor concentración los tallos de café (29,01% peso), las hojas y cogollos de la caña de azúcar (68% en peso aproximadamente) y el tamo de arroz con 73,59 por ciento de humedad.

En los RAI el rango de humedad se amplía desde 7 hasta 80 % en peso, destacándose las muestras de la cascarilla de arroz (7,55 % en peso), el cisco de café¹⁷ (10,42 % en peso) y el cuesco de la palma aceite (19,86 % en peso) que comparadas con los muestras de fibra de la palma de aceite, el bagazo de caña de azúcar, caña de panela y la pulpa de café presentan las menores concentraciones de humedad y, en general, del conjunto de muestra evaluadas.

Concentraciones de humedad superiores al 50% en peso se registraron para la pulpa de café, el tamo de arroz, las hojas y cogollos de la caña y el raquis de palma. La selección del tipo de aprovechamiento energético depende de las propiedades fisicoquímicas y energéticas del residuo. El uso de material vegetal con altos contenidos de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material (Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002).

El material orgánico con contenido de humedad menor al 50% en peso se recomienda para aplicaciones en procesos termoquímicos como la combustión directa, la pirólisis o la gasificación, mientras que la biomasa con humedad superior al 50% en peso se recomiendan los tratamientos bioquímicos como la fermentación o digestión anaerobia. El aprovechamiento energético de la biomasa

¹⁷ Cáscara de la almendra del café

húmeda (con contenidos de agua superior al 50% en peso) por la vía térmica requiere de etapas previas de secado, incrementándose los costos operacionales del proceso de conversión (Mc Kendry, Part 1, 2002).

- **Material Volátil (MCV).** La concentración de éste parámetro es superior al 80% en peso para las muestras de los residuos provenientes del café, la caña de azúcar y panelera y la palma de aceite, destacándose los valores del cisco de café, la caña panelera y caña de azúcar con 98,82, 96,7 y 91,7% en peso respectivamente. En general se observa que el contenido de material volátil de todos los residuos es superior al valor correspondiente para el carbón, combustible fósil de referencia, tomado para realizar la comparación (Rojas A., Barraza J., 2008).

- **Carbono Fijo (CF).** Para las muestras provenientes del café, caña de azúcar, caña panelera y palma de aceite, la concentración de CF es inferior a 10 % en peso; el tamo y la cascarilla de arroz presentaron los mayores valores que corresponden a 20,07 y 19,29 % en peso, respectivamente. En todos los casos la concentración del CF es inferior a la concentración del CF del carbón tomado como muestra de comparación que es igual a 52,77 % en peso.

- **Ceniza.** Exceptuando los residuos provenientes del arroz, la concentración de ceniza en las restantes muestras es inferior al 10% del peso. Altos contenidos de cenizas en la biomasa dificultan su aprovechamiento energético por la vía térmica, en razón a que se reduce el poder calorífico; adicionalmente la deposición de ceniza en los tubos de la caldera o intercambiadores dificulta la transmisión del calor (Castells X. *et. al.*, 2005; Cuiping, 2004).

La cantidad de material volátil y carbono fijo presentes en la biomasa, permiten establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. Los resultados del conjunto de parámetros que definen el análisis próximo sugieren

que el bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, son las ventajas de la biomasa vegetal para su aprovechamiento energético. Liao, 2004, en el análisis de la composición de la biomasa realizada a 10 especies señala que, la biomasa residual agrícola, por sus contenidos de humedad, cenizas y material volátil, es adecuada para su aprovechamiento energético mediante procesos como la pirólisis o la gasificación.

5.2.2 Análisis elemental. Incluye la evaluación de cada uno de los elementos que conforman la materia combustible, carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

- **Contenido carbono.** La concentración del carbono varía entre 38 y 53 % en peso, con un valor promedio de 50%. Las mayores concentraciones se obtuvieron para el bagazo de la caña de azúcar (58,73%), el cisco de café (57, 69%) y la fibra de palma de aceite (56,97%). Los menores valores corresponden a los cogollos y hojas de caña panelera, el cuesco proveniente de la palma de aceite y el tamo de arroz, con concentraciones de 38,21, 40,76 y 42,68 % en peso, respectivamente; para los restantes nueve residuos el contenido de carbono es superior al 50%.

- **Contenido de oxígeno.** La composición del oxígeno en las muestras de biomasa residual es alta, con concentraciones que oscilan entre 23 y 49 % en peso de materia seca. Las menores concentraciones se obtuvieron para la cascarilla y el tamo de arroz y la fibra proveniente de la palma de aceite, alcanzando valores menores al 30% en peso. Los mayores contenidos de oxígenos se registraron para el cogollo y bagazo de caña panelera y para el cuesco de la palma de aceite, que alcanzaron concentraciones superiores a 40 % en peso.

- **Contenido de azufre.** La máxima concentración se alcanzó en las muestras de los tallos de café (0,1 % en peso); en las muestras restantes los resultados fueron

significativamente inferiores con lo cual se obtuvo un valor medio de 0,07 % en peso.

Los resultados del análisis elemental realizado a las muestras de materia orgánica de origen vegetal permiten inferir que su contenido de carbono y azufre es significativamente menor, comparado con la muestra de combustible fósil de referencia, mientras que el contenido de oxígeno se encuentra en mayor proporción en las muestras de residuos vegetales.

5.2.3 Contenido energético. Los resultados del contenido energético de las muestras de RAC y RAI oscilaron entre 13 500 y 19 000 kJ/kg; los mayores valores se registraron para el bagazo de caña de azúcar y panela (19 374 kJ/kg), el cisco (19 264 kJ/kg) y los tallos de café (19 062 kJ/kg), y la fibra que se genera en el procesamiento de la palma de aceite (18 584 kJ/kg). Se observa cierta tendencia a encontrar los menores valores de PCI en las muestras de RAC.

Al comparar los resultados del contenido energético de las muestras de biomasa con el PCI del carbón vegetal (26 805 kJ/kg), se cree que la presencia de un mayor número de enlaces C-O y C-H presentes en las muestras de materia orgánica influyen en su contenido energético.

Comparación de la composición con estudios similares. En la tabla 12 se presentan de forma consolidada los resultados de dos estudios realizados por investigadores para diferentes países europeos y asiáticos y los obtenidos en el presente estudio.

Nordin (1994), presenta la recopilación de la caracterización de algunas fuentes de biomasa, extraída de la literatura y de algunas bases de datos relacionadas con combustibles renovables. So Sander (1997) reportó la composición para algunas fuentes de biomasa como las pajas y maderas abundantes en Dinamarca y Cuiping (2004) caracterizó residuos de biomasa forestal y agrícola para China.

Tabla 12. Comparación de los resultados del análisis próximo y elemental de la biomasa residual de los cultivos base de estudio

Parámetro	Unidad	Europa		Asia	Colombia
		Nordin	So Sander	Liao <i>et al</i>	Este estudio
C	% p/p	44,00 - 58,80	47,00 – 52,00	38,52 - 50,15	38,21 - 58,73
H	% p/p	5,70 - 6,30	5,2 0- 6,40	6,13 - 8,36	4,39 - 6,75
O	% p/p	32,00 - 46,20	NR	39,03 - 46,66	22,83 - 49,01
N	% p/p	0,12 - 0,31	0,10 - 1,50	0,11 - 2,06	0,29 - 1,58
S	% p/p	0,009 - 0,26	0,10 - 0,20	0,02 - 0,39	0,04 - 0,10
Cenizas	% p/p	NR	NR	0,89 - 15,24	0,67 - 22,55
MCV	% p/p	NR	NR	61,00 – 76,00	57,38 - 98,82
PCI	MJ/kg	NR	NR	16,00 – 20,00	13,50 – 20,00

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y del PCI de la biomasa agrícola en Colombia coinciden con los rangos obtenidos para cada parámetro en los estudios usados para su comparación. En algunas variables se observan diferencias significativas, las cuales pueden asociarse a las variedades de las especies vegetales, las condiciones edáficas y climáticas en las cuales se desarrolla el cultivo, así como el manejo agronómico dado al residuo.

En el estudio desarrollado en China por Liao *et. al.*, 2004, para biomasa forestal y agrícola, los valores de PCI se varían entre los 16 -20 MJ/kg, y para Colombia todos los PCI están dentro de este mismo rango con valores de PCI por debajo de 12 MJ/kg. En Argentina (Secretaría de Energía de Argentina, 2004), un estudio para biomasa lignocelulósica reportó que su PCI oscila entre 3000 – 3500 kcal/kg y para los residuos urbanos entre 2000 a 2500 kcal/kg.

Comparación de la composición fisicoquímica y energética de la biomasa vs. combustible de referencia. En la tabla 13 se presentan los valores mínimo, promedio y máximo de los resultados de la caracterización fisicoquímica y

energética obtenidos para las muestras de material vegetal evaluadas en el presente estudio y los datos de la composición del carbón del Cerrejón, combustible convencional tomado como referencia para evaluar las diferencias que se pueden encontrar en la composición de un material energético con características renovables.

Tabla 13. Comparación de la composición de muestras de biomasa versus combustible fósil de referencia

Fuente de BR	Humedad	Análisis Próximo ¹			Análisis Básico ²					Contenido Energético [kJ/Kg]
		ceniza	CF	MCV	C	H	O	N	S	PCI
Mínimo	7,55	0,67	0,51	57,38	38,21	4,39	22,83	0,29	0,03	13.537,42
Promedio	44,86	8,24	8,07	83,40	49,98	5,75	35,10	0,81	0,07	17.353,46
Máximo	80,62	22,55	20,07	98,82	58,73	6,75	49,01	1,58	0,10	19.374,24
Carbón Cerrejón ³	-	11,68	52,77	35,6	73,74	5,3	8,53	1,18	0,79	26.805,88

¹, ²: %en peso en base seca.

³: Rojas A., Barraza J., 2008

Los datos presentados en la anterior tabla permiten establecer que:

Al comparar los resultados de los parámetros correspondientes al análisis elemental de las muestras de material vegetal con el carbón mineral, se observa la disminución en el contenido de carbono entre un 25 y 50% y un incremento en la concentración de oxígeno en una relación de 3 a 5.

Estas diferencias conducen a que el valor promedio de la relación O/C para el caso de la biomasa sea igual a 0,70 [kg O/kg C], con valores máximos y mínimos entre 0,60 y 0,83 [kg O/kg C]. Dado que la relación O/C para el carbón

corresponde a 0,70 [kg O/kg C], se observa un incremento significativo en una proporción que varía entre 5 y 7 veces.

El anterior análisis coincide con los resultados del poder calorífico inferior de la biomasa residual, cuyos valores se acercan entre un 50 y 75%, con valor promedio de 65 %, al contenido energético presente en el carbón mineral.

No obstante, la reducción en el contenido de azufre en los rangos comprendidos entre el 87 y el 96%, se muestra como una de las ventajas de la biomasa residual para considerarla como una fuente importante de energía renovable, por su contribución para disminuir el fenómeno de la lluvia ácida.

La reducción en el contenido de la ceniza entre el 6 y el 70%, en las muestras evaluadas (excepto para los residuos de arroz), es otro aspecto que favorece el uso de la biomasa como fuente de energía al aumentar la eficiencia de combustión.

La materia orgánica posee niveles altos de MCV, los cuales se encuentran en un rango desde 58 hasta el 98% en peso, dependiendo de la especie vegetal originaria; un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, son las ventajas que tiene la biomasa para su aprovechamiento energético.

El incremento en el contenido del MCV en las muestras de biomasa residual evaluadas en órdenes de magnitud que alcanzan hasta 180% comparado con el carbón de referencia, es un indicador que refleja la facilidad con la cual la biomasa puede ser sometida al proceso de ignición, oxidación o gasificación, según la vía de aprovechamiento.

En resumen, se concluye que desde el punto de vista de la composición de la biomasa residual que se genera en la actividad agroindustrial del sector del arroz,

el café, la caña de azúcar, la caña de panela y la palma de aceite, presentan características favorables para su aprovechamiento energético.

5.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL

Para cada uno de los registros consignados en la base estadísticas del Ministerio de Agricultura, se realizaron los procedimientos de cálculo para obtener cada uno de los términos del modelo de la ecuación 3 con el cual se evaluó el Potencial Energético (PE) de cada una de las especies contempladas en el presente estudio.

5.3.1 Masa de residuo. Para cada uno de los registros de base estadísticas del Ministerio de Agricultura, se realizaron los cálculos para estimar la masa de residuo a partir del área y el rendimiento agrícola de cosecha correspondiente y como factor de residuo los valores registrados en la tabla 9. Los resultados muestran un total de 38.041.749 toneladas de residuo húmedo /año, siendo la participación en orden descendentes la caña de azúcar (15 534 591 t/año), caña panelera (9 513 430 t/año), arroz (6 282 407 t/año), café (5 051 248 t/año) y palma de aceite (1 660 074 t/año). En la figura 5 se observan el aporte porcentual de cada especie a la generación de biomasa residual.

En la figura 6 se aprecia para cada una de las especies la cantidad de residuo según su clasificación como RAC o RAI.

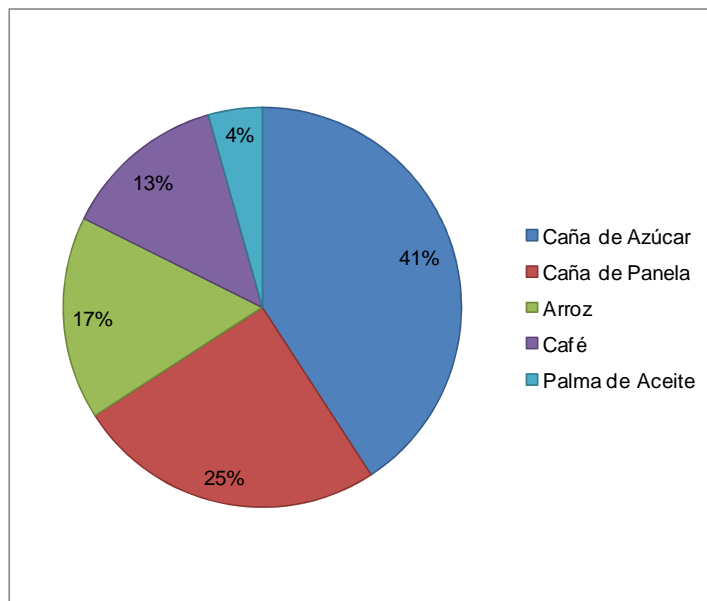


Figura 5. Aporte porcentual de la biomasa residual de las especies vegetales seleccionadas

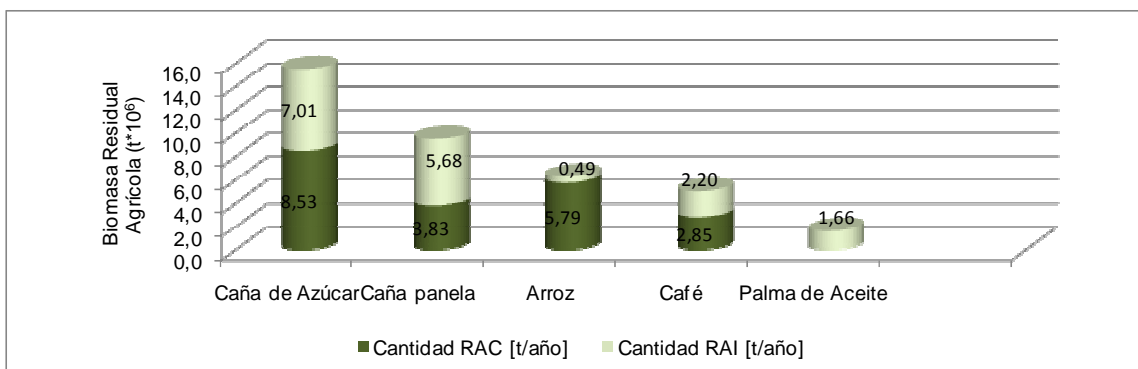


Figura 6. Cantidad y tipo de biomasa residual generada de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Del total de residuos, el 55% (20 997 623 t/año) corresponde a RAC y el restante 45% (17 044 126 t/año) a RAI. Con respecto a los RAC, el orden de participación es la caña de azúcar, el arroz, la caña de panela y el café con porcentajes de participación de 40,6 %, 27,6 %, 18,3 % y 13,6 %, respectivamente. Los residuos de hojas y cogollo de caña de azúcar y tamo de arroz en conjunto corresponden al 68% del total de la masa residual obtenida en el sitio de cosecha.

En los RAI, el porcentaje de participación en orden descendente corresponde al bagazo de caña (41,1 %) y panela (33,3 %), cisco de café (12,9 %), palma de aceite (9,7 %) y la cascarilla de arroz (2,9 %). El bagazo obtenido del procesamiento de la caña de azúcar y panela concentra el 75% de los RAI evaluados. (ver figura 6).

5.3.2 Calculo del PE. Calculada la masa de residuo vegetal se evaluó el potencial energético utilizando los datos de fracción de residuo seco y el PCI que se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Datos de la Fracción de residuo y poder calorífico por tipo de residuos de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Cultivo	Residuo	Tipo Residuo	Fracción Residuo Seco (Y_{RS})	Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]
Arroz	Tamo	RAC	0,2600	13 537,42
	Cascarilla	RAI	0,9245	15 666,22
Caña de Azúcar	Hojas y cogollos	RAC	0,3054	16 018,11
	Bagazo	RAI	0,5661	19 374,25
Caña de Panela	Hojas y cogollos	RAC	0,3054	16 018,11
	Bagazo	RAI	0,5661	19 374,25
Café	Pulpa	RAC	0,1938	18 517,53
	Tallos	RAC	0,7099	19 062,23
	Cisco	RAI	0,8958	19 264,57
Palma de Aceite	Raquis de Palma	RAI	0,4087	17 484,69
	Fibra	RAI	0,6676	18 584,33
	Cuesco	RAI	0,8014	17 340,03

En la tabla 15 se presenta la información sobre el PE obtenido por tipo de biomasa residual para cada una de las especies vegetales incluidas en el estudio. .

Tabla 15. Potencial energético por tipo de biomasa residual de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Espece	Residuo	Tipo Residuo	Cantidad de Biomasa [t / año]	Potencial Energético [TJ / año]	Potencial Energético [Tep / año]
Arroz	Tamo	RAC	5 789 668,89	20 699,41	496 388,80
	Cascarilla	RAI	492 737,78	7 136,53	171 139,77
	Total Espece		6 282 406,67	27 835,94	667 528,57
Café	Pulpa	RAI	2 008 192,41	7 206,79	172 824,81
	Cisco	RAI	193 459,67	3 338,57	80 061,69
	Tallos	RAC	2 849 595,91	38 561,52	924 736,72
	Total Espece		5 051 247,99	49 106,89	1 177 623,23
Caña de azúcar	Hojas, cogollos	RAC	8 525 718,26	41 707,22	1 000 173,23
	Bagazo	RAI	7 008 872,68	76 871,65	1 843 444,94
	Total Espece		15 534 590,94	118 578,88	2 843 618,17
Caña de panela	Bagazo	RAI	5 680 790,48	62 305,56	1 494 138,21
	Hojas, cogollos	RAC	3 832 639,97	18 749,01	449 616,54
	Total Espece		9 513 430,45	81 054,57	1 943 754,74
Palma de aceite	Cuesco	RAI	189 074,85	2 627,44	63 008,18
	Fibra	RAI	546 380,98	6 778,89	162 563,39
	Raquis de Palma	RAI	924 617,90	6 607,31	158 448,75
	Total Espece		1 660 073,73	16 013,65	384 020,32
TOTAL			38 041 749,77	292 589,93	7 016 545,03

Como se observa en la tabla anterior a la masa de residuos generados por las especies base de estudio corresponde un PE cercano a 292 600 TJ/año, de los cuales se tiene una contribución importante de la caña de azúcar especie que aporta el 41 % del total de PE; continua en orden de participación la caña de panela (28 %), el café (17 %), el arroz con el 10% y finalmente la palma de aceite con el 5 % (ver figura 7).

Asociando el PE con la fuente de origen del residuo se tiene que 41% del PE lo aportan los RAC y el 59% los RAI. En el caso de los RAC, la mayor contribución al PE corresponde a la caña de azúcar 35%, seguido del café 32%, el arroz 17% y la caña de panela con 16%. En el aprovechamiento de los residuos que se generan en el sitio del cultivo de caña de azúcar tienen la ventaja de que se localizan principalmente en la zona sur occidental del país.

En el caso de los RAI las actividades agrícolas de mayor influencia son la caña de azúcar 44%, la caña de panela 36% y la palma de aceite con el 9%, en las cuales se concentra el 90% de la oferta energética de los residuos vegetales que se generan en el proceso de transformación de la materia vegetal y obtención del producto principal respectivo. El 6% de la participación corresponde a los residuos de café y el 4% a los residuos de arroz. El PE obtenible de los RAI tiene una ventaja asociada al nivel de concentración de la materia orgánica para su aprovechamiento energético.

En la figura 8, se aprecia la relación entre el Potencial Energético (PE) y la masa de residuo total por especie. En las figuras 9 y 10 se observa la relación del PE por especie, según el tipo de residuo RAC o RAI.

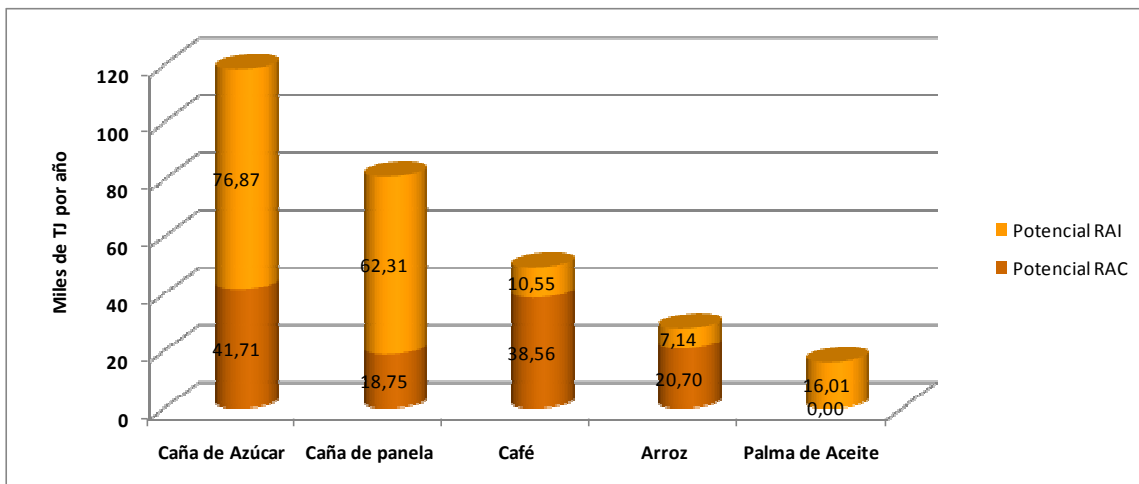


Figura 7. Potencial energético de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

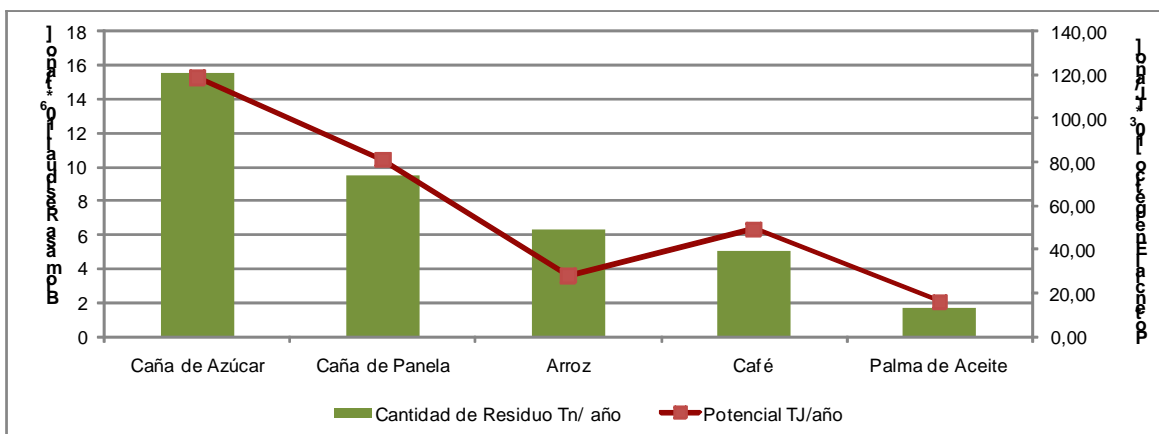


Figura 8. Cantidad de biomasa residual Vs. Potencial Energético para las especies arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

En general se puede indicar el comportamiento en la relación proporcional entre la cantidad de residuo y la oferta energética. Se destaca la contribución de los residuos de café al PE.

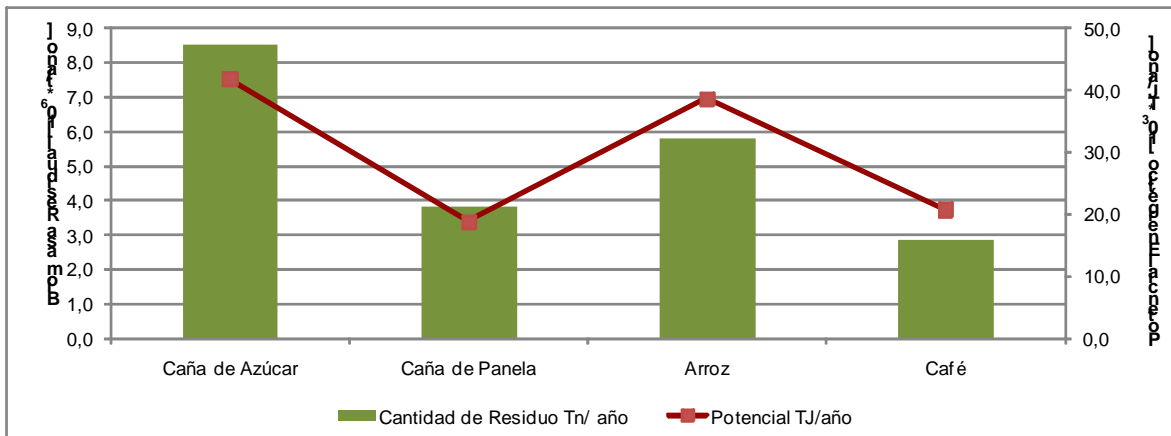


Figura 9. Cantidad de RAC versus Potencial Energético para las especies arroz, café, caña de azúcar y caña de panela

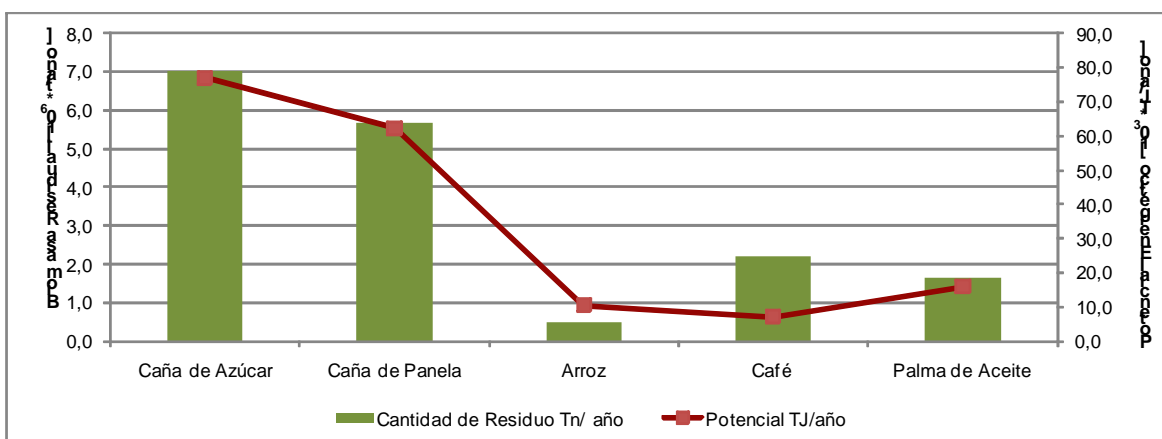


Figura 10. Cantidad de RAI versus Potencial Energético para las especies arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

En la figura 10 se observa la baja contribución de los RAI provenientes del café y el arroz a la oferta energética. A pesar de que la cantidad de cascarilla es menor (492.738 toneladas/año), su contribución al PE es superior que el aporte proveniente del cisco y el cuesco del café, cuyos residuos ascienden a 2 201 652 t/año.

En la siguiente tabla se presenta datos sobre la oferta energética de residuos vegetales que se generan en la actividad agrícola de algunas especies, reportados

por estudios realizados en algunos países.

Tabla 16. Comparativos del potencial energético de la biomasa residual agrícola con otros estudios

Especie cultivada	Colombia		Thailandia		Sri Lanka		Grecia		Paraná-Brasil	
	Biomasa residual [t/año]	PE [TJ/año]	Biomasa residual [t/año]	PE [TJ/año]	Biomasa residual [t/año]	PE [TJ/año]	Biomasa residual [t/año]	PE [TJ/año]	Biomasa residual [t/año]	PE [TJ/año]
Arroz	6 282 406,67	27 835,94	16 070 000	163 841	910 200	74 940	157 200	1 908	261 574	4 160
Caña de azúcar	15 534 590,94	118 578,88	35 110 000	233 160	457 250	7 130	N.I.	-	12 355 425	223 600
Palma de aceite	1 660 073,73	16 013,65	2 513 470	41 310	N.I.	-	N.I.	-	N.I.	-
Café	5 051 247,99	49 106,89	N.I.	-	N.I.	-	N.I.	-	N.I.	-
caña de panela	9 513 430,00	81 054,57	N.I.	-	N.I.	-	N.I.	-	N.I.	-
TOTAL	38 041 749	292 590,00	53 693 470	438 311	1 367 450	82 070	157 200	1 980	12 616 999	227 760

N.I. No incluido

-: Sin dato

5.4 MODELO DE RENDIMIENTO AGRICOLA DE COSECHA (MRAC)

A continuación se presentan las clasificaciones utilizadas para cada una de las variables climáticas y edáficas de importancia para la definición del MRAC.

5.4.1 Variables climáticas. La columna denominada como GRID_CODE corresponde al código asignado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales - IDEAM a los diferentes rangos de clasificación.

Tabla 17. Clasificación de la variable temperatura (Multianual)

GRID_CODE	Piso Térmico	Rangos de Temperatura [°C]
1	Cálido	> 24
2	Templado	18 - 24
3	Frío	12 - 18
4	Muy Frío	6 - 12
5	Extremadamente Frío	3 - 6
6	Nival	< 3

Fuente: Clasificación climática IDEAM

Tabla 18. Clasificación de la variable elevación

GRID_CODE	Elevación [msnm]¹	Piso Térmico
1	0 - 800	Cálido
2	800 - 1800	Templado
3	1800 - 2800	Frío
4	2800 - 3700	Muy Frío
5	3700 - 4500	Extremadamente Frío
6	> 4500	Nival

¹: Metros sobre el nivel del mar

Fuente: Clasificación climática IDEAM

Tabla 19. Clasificación de la variable precipitación

GRID_CODE	Provincia de Humedad	Precipitación [mm/año]
1	Árido	0 - 500
2	Muy Seco	500 - 1000
3	Seco	1000 - 2000
4	Húmedo	2000 - 3000
5	Muy Húmedo	3000 - 7000
6	Pluvial	> 7000

Fuente: Clasificación de precipitación IDEAM

Tabla 20. Clasificación de la variable radiación solar

GRID_CODE	Rango [kWh /m²]
2	3.0 - 3.5
3	3.5 - 4.0
4	4.0 - 4.5
5	4.5 - 5.0
6	5.0 - 5.5
7	5.5 - 6.0
8	6.0 - 6.5

Fuente: Clasificación de radiación solar IDEAM

5.4.2 Variables edáficas. En las tablas 21 a la 24 se presenta la clasificación realizada para identificar las características edáficas de los sitios donde se desarrollan los cultivos. Dada la amplia clasificación y combinación de clasificaciones presentes en el mapa de Zonas agroecológicas y el mapa de suelos de Colombia se determinó agrupar algunas de sus clasificaciones con el objeto de crear un número de combinatorias manejables.

Tabla 21. Clasificación de la variable pendiente

Código Asignado	Clase	Pendiente (%)
1	A nivel, ligeramente plana a ligeramente ondulada	0 - 3
2	A nivel, ligeramente plana a ligeramente ondulada	3 - 7
3	Moderadamente ondulada a fuertemente ondulada o Ligeramente quebrada a moderadamente quebrada	7 - 12
4	Moderadamente ondulada a fuertemente ondulada o Ligeramente quebrada a moderadamente quebrada	12 - 25
5	Fuertemente quebrada o ligeramente escarpada	25 - 50
6	Moderadamente escarpada a fuertemente escarpada	> 50

Fuente: Clasificación de pendientes mapa de Zonas Agroecológicas

Tabla 22. Clasificación de la variable profundidad efectiva del suelo

Clase de Profundidad de Suelo	Profundidad [Cm]	Código Asignado
Muy superficial	< 25	1
Superficial	25 - 50	2
Moderadamente Profunda	25 -100	3
Profunda	25 - 150	4
Muy Profunda	> 150	5

Fuente: Adaptado de mapa de Zonas Agroecológicas

Tabla 23. Clasificación de la variable textura

Código Asignado	Textura
1	Media
2	Gruesa
3	Fina

Fuente: Adaptado de mapa de Zonas Agroecológicas

Tabla 24. Clasificación de la variable fertilidad

Código Asignado	Nueva Clase	Descripción	Rango
1	Muy Baja	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos	<3,6
2	Baja	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos, pero menos críticos que los anteriores	3,6-5,1
3	Moderada	Acidez moderada y contenidos medios nutrientes.	5,2-,6,7
4	Alta y Muy Alta	Condiciones químicas adecuadas para el buen desarrollo de la mayoría de las plantas.	>6,8
5	Muy Baja a Baja	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos.	<3,6-5,1
6	Muy Baja a Moderada	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos. Acidez moderada y contenidos medios nutrientes.	<3,6-6,7
7	Muy Baja a Alta y Muy Alta	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos. Acidez moderada y contenidos medios nutrientes. Condiciones químicas adecuadas para el buen desarrollo de la mayoría de las plantas.	<3,6- >6,8
8	Baja a Moderada	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos. Acidez moderada y contenidos medios nutrientes.	3,6-6,7
9	Baja a Alta y Muy Alta	Deficiencia de nutrientes, alta acidez, alto aluminio y alta fijación de fosfatos. Acidez moderada y contenidos medios nutrientes. Condiciones químicas adecuadas para el buen desarrollo de la mayoría de las plantas.	3,6->6,8
10	Moderada a Alta y Muy Alta	Acidez moderada y contenidos medios nutrientes. Condiciones químicas adecuadas para el buen desarrollo de la mayoría de las plantas.	5,2->6,8

Fuente: Adaptado de mapa de Zonas Agroecológicas

En las tablas 25 y 26 se presentan los valores de los índices de favorabilidad climática y edáfica definidos para cada una de las especies seleccionadas, los cuales se calcularon con base en los criterios presentados en el numeral 4.4.2 y la asesoría del experto en el tema del desarrollo de cultivos.

Tabla 25. Índices de favorabilidad de las variables climáticas de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Variable: Temperatura							
Código	Piso Térmico	Rango [°C]	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	Cálido	> 24	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00
2	Templado	18 - 24	0,60	1,00	0,85	0,90	0,90
3	Frío	12 - 18	0,30	0,90	0,20	0,50	0,20
4	Muy Frío	6 - 12	0,20	0,50	0,10	0,30	0,10
5	Extremadamente Frío	3 - 6	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00
6	Nival	< 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variable: Precipitación							
Código	Provincia de Humedad	Rango [mm año]	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	Árido	0 - 500	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Muy Seco	500 - 1 000	0,60	0,50	0,75	0,40	0,30
3	Seco	1 000 - 2 000	0,75	0,95	1,00	1,00	0,95
4	Humedo	2 000 - 3 000	1,00	1,00	0,85	0,80	1,00
5	Muy Humedo	3 000 - 7 000	0,75	0,80	0,20	0,60	0,90
6	Pluvial	> 7 000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variable: Radiación							
Código	Rango [kWh/m ²]	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite	
1	3,0 - 3,5	0,50	0,70	0,80	0,80	0,70	
2	3,5 - 4,0	0,90	0,80	0,85	0,85	0,88	
3	4,0 - 4,5	1,00	1,00	0,90	1,00	0,90	
4	4,5 - 5,0	0,95	0,90	0,95	0,95	0,92	
5	5,0 - 5,5	0,80	0,85	1,00	0,92	1,00	
6	5,5 - 6,0	0,75	0,75	0,95	0,90	0,95	
7	6,0 - 6,5	0,60	0,60	0,90	0,88	0,85	
Variable: Altitud							
Código	Altitud msnm	Piso termico Relacionado	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	0 - 800	Cálido	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00
2	800 - 1 800	Templado	0,40	1,00	0,85	0,85	0,90
3	1 800 - 2 800	Frío	0,30	0,90	0,20	0,50	0,20
4	2 800 - 3 700	Muy Frío	0,20	0,50	0,10	0,30	0,00
5	3 700 - 4 500	Extremadamente Frío	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00
6	> 4 500	Nival	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 26. Índices de favorabilidad de las variables edáficas de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Variable: Pendiente						
Código	Rango [%]	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	0 - 3	0,95	0,60	1,00	0,80	1,00
2	3 - 7	1,00	0,70	0,90	0,90	0,90
3	7 - 12	0,92	0,80	0,20	1,00	0,70
4	12 - 25	0,80	0,85	0,20	0,92	0,00
5	25 - 50	0,00	1,00	0,00	0,90	0,00
6	> 50	0,00	0,85	0,00	0,70	0,00
Variable: Profundidad Efectiva						
Código	Clase de Profundidad de Suelo	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	Muy superficial	1,00	0,50	0,80	0,60	0,20
2	Superficial	0,95	0,80	0,85	1,00	0,40
3	Moderadamente Profunda	0,92	1,00	1,00	0,95	0,90
4	Profunda	0,80	0,90	0,90	0,85	1,00
5	Muy Profunda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
Variable: Fertilidad						
Código	Nueva Clase	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	Muy Baja	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
2	Baja	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
3	Moderada	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70
4	Alta y Muy Alta	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70
5	Muy Baja a Baja	0,50	0,50	0,50	0,50	0,80
6	Muy Baja a Moderada	0,60	0,60	0,60	0,60	0,80
7	Muy Baja a Alta y Muy Alta	0,65	0,65	0,65	0,65	0,80
8	Baja a Moderada	0,70	0,70	0,70	0,70	0,80
9	Baja a Alta y Muy Alta	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00
10	Moderada a Alta y Muy Alta	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Variable: Textura						
Código	Textura	Arroz	Café	Caña de azúcar	Caña panelera	Palma de aceite
1	Media	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	Gruesa	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95
3	Fina	0,80	0,80	0,92	0,90	0,90

Luego de consultada la base de información alfanumérica del Ministerio de Agricultura se identificaron los registros de los sitios donde se localizan los

cultivos, se realizaron los geoprocesos, para obtener información sobre las características climáticas y edáficas correspondiente. En la tabla 27 se lista el número de registros obtenidos por especie con información sobre las características climáticas y edáficas.

Tabla 27. Número de registros por especie cultivada

Especie cultivada	Número de registros
Arroz	163
café	339
Caña de azúcar	132
Caña de panela	78
Palma de aceite	138

Identificados los sitios donde se localizan los cultivos, definidos el Índice de Favorabilidad (IF) y el Factor de Importancia (γ) asignados a cada variable climática y edáfica, se realizaron los procedimientos de cálculo para obtener los CFC y CFE mediante las ecuaciones 5 y 7 respectivamente. En el anexo 3 se presentan los resultados del CFC y CFE obtenidos para las especies incluidas en el estudio.

Con los procedimientos anteriores se desarrolló el conjunto de ecuaciones para obtener los parametros del modelo de rendimiento agrícola de cosecha. En todos los casos, los datos se ajustaron al modelo de primer orden representado por la ecuación 8.

5.4.3 MRAC para la especie arroz. El modelo matemático de rendimiento agrícola de Cosecha expresado en función de las variables climáticas y edáficas se representa mediante la siguiente expresión:

$$R_{ce} = 0,00882 * CFC + 0,04097 * CFE - 0,00053 * CFC * CFE \quad (\text{ecuación 11})$$

En las tablas 28 y 29 se presentan los resultados de la regresión del modelo y análisis de varianza respectivamente, procedimientos mediante los cuales se evaluó la calidad con la cual el modelo explica la relación entre las variables dependiente e independientes y que tanta de la variabilidad presente en la variable dependiente es explicada por el modelo. La interpretación se realiza con base en el P-valor, de acuerdo con la explicación presentada en el anexo 2.

Tabla 28. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie arroz

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico	P-Valor
CFC	0,00882	0,00209	4,22019	0,0000
CFE	0,04097	0,00763	5,36898	0,0000
CFC * CFE	-0,00053	0,00014	-3,90079	0,0001

Dado que la significancia observada (p-valor) de cada uno de los coeficientes individuales de los parámetros es menor a la significancia predefinida ($\alpha = 0,05$) se comprueba que existe una relación importante entre éstos y la variable dependiente. De acuerdo al estadístico el orden de los términos por su contribución a la respuesta es: CFE, CFC y CFC * CFE.

Tabla 29. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie arroz

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F₀	P-Valor
Modelo	110,428	3	36,8093	6853,39	0,0000
Residuos	0,85935	160	0,00537		
Total	111,287	163			

R^2 : 99,23 %

R_{aj}^2 : 99,22 %

Error Estándar de Estimación: 0,07

Media del Error Absoluto: 0,05

Estadístico Durbin-Watson: 0,79

De los resultados del análisis de varianza (tabla 29) se observa que el p-valor es menor que la significancia predefinida ($\alpha = 0,05$), por lo cual se puede inferir que el modelo de regresión es significativo. Los coeficientes de determinación R^2 y R^2_{aj} muestran que el 99,22 % del rendimiento calculado (predicho) puede ser explicado por los factores climáticos y edáficos. El error estándar de estimación y la media del error absoluto tienen una magnitud pequeña, lo cual se interpreta que los residuos tienen un valor muy bajo .

Análisis gráfico de los residuales del MRAC para la especie arroz. La figura 11 presenta las gráficas para verificar los supuestos del modelo, relacionados con el cumplimiento de la distribución normal y de varianza constante de los residuos se observan a continuación.

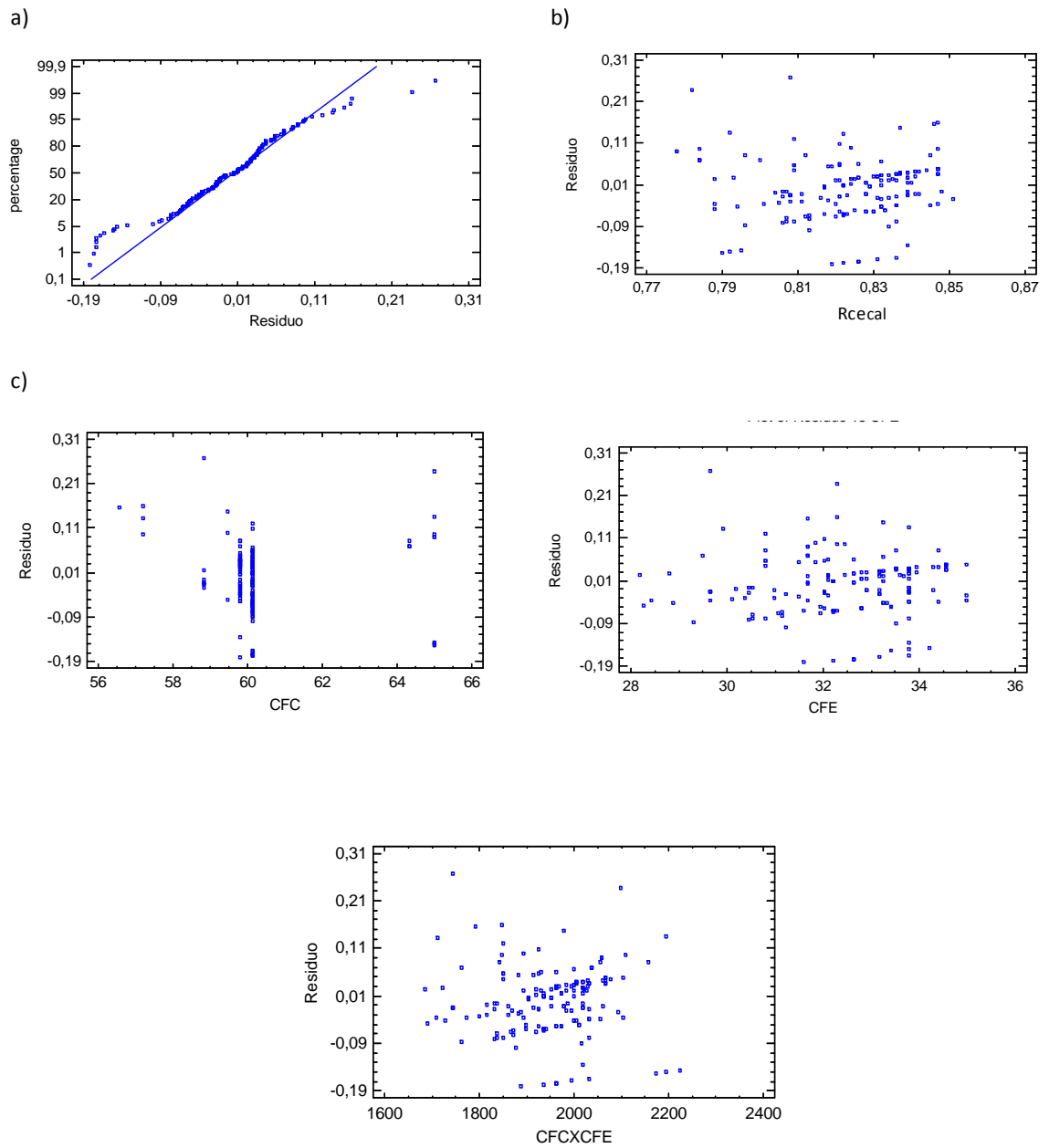


Figura 11. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie arroz: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

En la figura 11a se observa el procedimiento gráfico para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos. Se observa como la mayoría de los puntos tratan de ajustarse a la línea, por lo tanto se estima que no hay alteraciones significativas en el supuesto de normalidad de los residuos.

En la figura 11b se grafican los residuos vs. los valores del rendimiento calculado con el modelo, observándose que los puntos caen aleatoriamente dentro del rango mostrado, lo cual significa que el modelo se ajusta de igual manera a lo largo de los valores de la variable dependiente, con una varianza constante.

En la figura 11c se presentan las gráficas de los residuales versus cada una de las variables independientes incluidas en el modelo. Se observa como los datos cumplen con una dispersión aleatoria, por lo tanto se confirma el supuesto de varianza constante.

En el anexo 3 se presenta en forma tabulada los registros empelados para realizar la regresión, los valores de las variables regresoras o independientes CFC, CFE y CFC*CFE, el rendimiento del cultivo (R_c), el rendimiento estandarizado (R_{ce}), el rendimiento calculado (R_{calcul}) y los residuales para las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite.

Validación del MRAC para la especie arroz. En la tabla 30 se observan los valores de rendimiento del cultivo estandarizado y el rendimiento estandarizado calculado con el MRAC. LA diferencia entre estos dos valores se observa en la columna de los residuales del modelo.

Tabla 30. Datos de la validación del MRAC de la especie arroz

Municipio	CFC	CFE	CFC*CFE	Rendimiento Cultivo	Rendimiento cultivo estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
Maria\La Baja	58,83	29,66	1744,90	7,00	0,820	0,809	-0,010
Maria\La Baja	58,83	29,66	1744,90	7,00	0,820	0,809	-0,010
Maria\La Baja	58,83	29,66	1744,90	7,00	0,820	0,809	-0,010
Neiva	59,80	34,56	2066,84	6,90	0,810	0,848	0,040
Neiva	59,80	34,56	2066,84	6,80	0,800	0,848	0,050
Neiva	59,80	33,78	2019,75	6,90	0,810	0,841	0,030
Neiva	59,80	33,78	2019,75	6,80	0,800	0,841	0,040
Neiva	59,80	34,56	2066,84	6,90	0,810	0,848	0,040
Agrado	60,13	32,81	1972,85	7,50	0,880	0,829	-0,050
Agrado	60,13	32,20	1936,03	7,50	0,880	0,823	-0,060
Garzón	60,13	32,20	1936,03	6,90	0,810	0,823	0,010
Garzón	60,13	32,20	1936,03	6,90	0,810	0,823	0,010
Yaguara	59,80	32,64	1951,72	7,00	0,820	0,830	0,010
Cúcuta	65,00	31,68	2058,88	5,85	0,690	0,780	0,090
El Zulia	64,35	31,68	2038,29	6,06	0,710	0,785	0,070
El Zulia	64,35	31,68	2038,29	6,06	0,710	0,785	0,070
Los Patios	60,13	30,80	1851,85	6,38	0,750	0,811	0,060
Rionegro	65,00	33,78	2195,38	8,00	0,940	0,794	-0,150

Municipio	CFC	CFE	CFC*CFE	Rendimiento Cultivo	Rendimiento cultivo estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
Ambalema	60,13	33,78	2030,72	7,44	0,880	0,838	-0,040
Coyaima	59,80	33,51	2004,05	6,79	0,800	0,838	0,040
Coyaima	60,13	33,78	2030,72	6,79	0,800	0,838	0,040
Coyaima	60,13	33,78	2030,72	6,79	0,800	0,838	0,040
Natagaima	60,13	33,25	1999,16	7,43	0,870	0,833	-0,040
Piedras	60,13	32,64	1962,33	8,50	1,000	0,827	-0,170
Piedras	60,13	32,64	1962,33	8,50	1,000	0,827	-0,170
Piedras	60,13	32,64	1962,33	8,50	1,000	0,827	-0,170
Venadillo	60,13	32,90	1978,11	7,14	0,840	0,830	-0,010
Venadillo	60,13	32,03	1925,50	7,14	0,840	0,822	-0,020

En la figura 12 se observan las gráficas de los residuales del modelo, con lo cual se evalúa la distribución normal y la varianza constante los residuales del modelo.

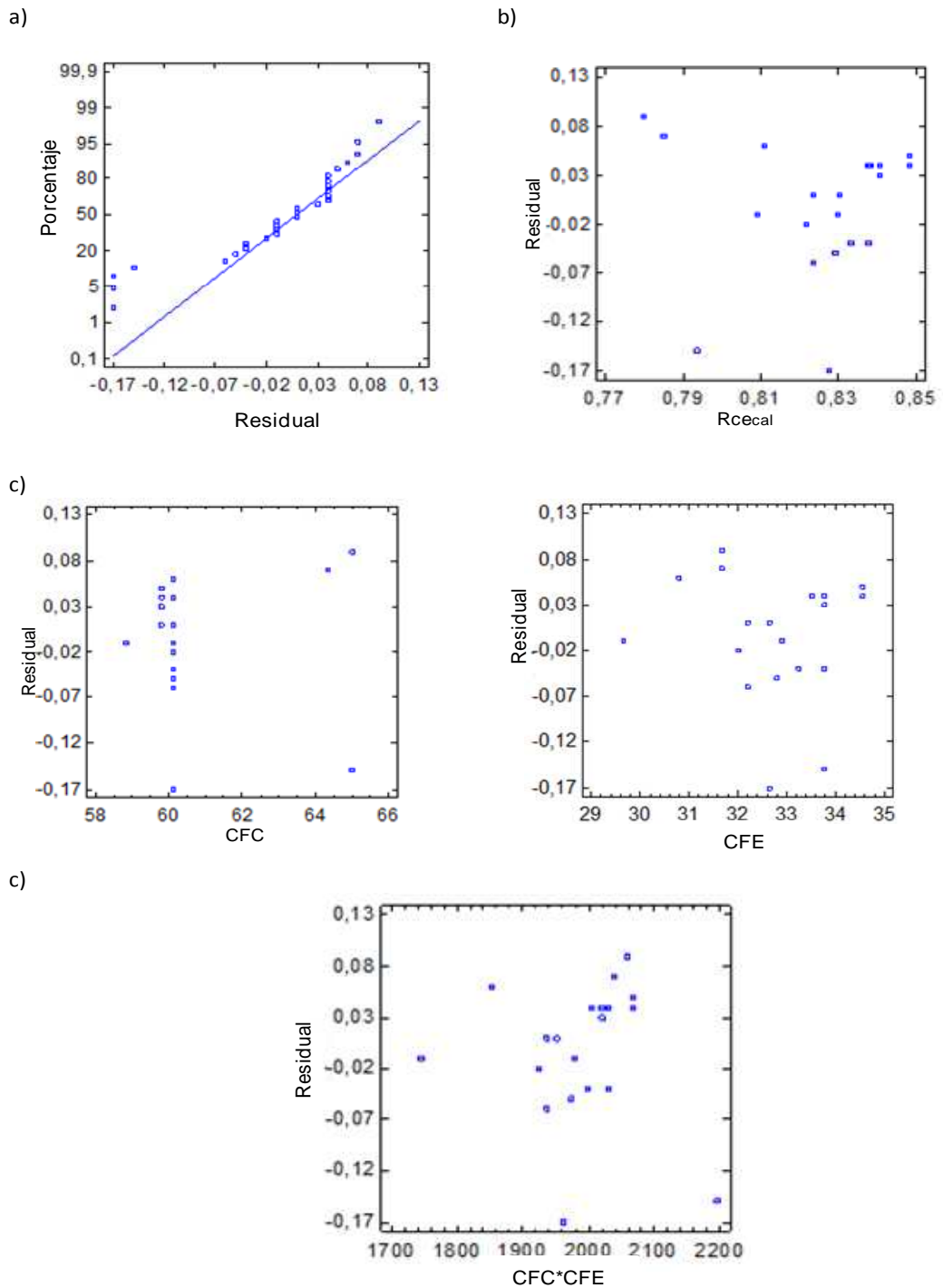


Figura 12. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie arroz: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

5.4.4 MRAC para la especie Café. El modelo de primer orden Rendimiento Agrícola de Cosecha en función de las variables climáticas y edáficas es:

$$R_{ce} = 0,00568CFC + 0,00886*CFE - 0,00014*CFC*CFE \quad (\text{ecuación 12})$$

Tabla 31. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie café

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico	P-Valor
CFC	0,00568	0,00135	4,19422	0,0000
CFE	0,00887	0,00386	2,29333	0,0224
CFC*CFE	-0,00013	0,00007	-1,82379	0,0691

Dado que los p-valor de los términos considerados están por debajo del nivel de significancia predefinida ($\alpha = 0.05$), se confirma que los términos explican la relación entre el valor de Rendimiento y las variables independientes (ver tabla 31). Los valores de los estadísticos presentados en la tabla anterior muestran que el CFC es el término que tiene una mayor contribución a la respuesta de la variable dependiente.

Tabla 32. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie café

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F ₀	P-Valor
Modelo	44,7117	3	14,9039	1194,78	0,0000
Residual	4,19132	336	0,0124742		
Total	48,903	339			

R²: 91,43 %

R_{aj}²: 91,38 %

Error Estándar de Estimación: 0,11

Media del Error Absoluto: 0,09

Estadístico Durbin-Watson: 0,67

En la tabla del análisis de varianza (Tabla 32) se observa que el p-valor es menor a 0,05, por lo tanto se concluye que el modelo de regresión es significativo y existe

una relación significativa de las variables del 95% de confiabilidad. El R_{aj}^2 indica que el modelo explica el 91,37 % de la variable dependiente (R_{aj}^2). El valor del error estándar de la estimación es muy bajo lo cual indica que la desviación estándar de los residuos es baja. El valor de la medio del error absoluto (MAE) es pequeño lo cual indica que el ajuste del modelo es bueno.

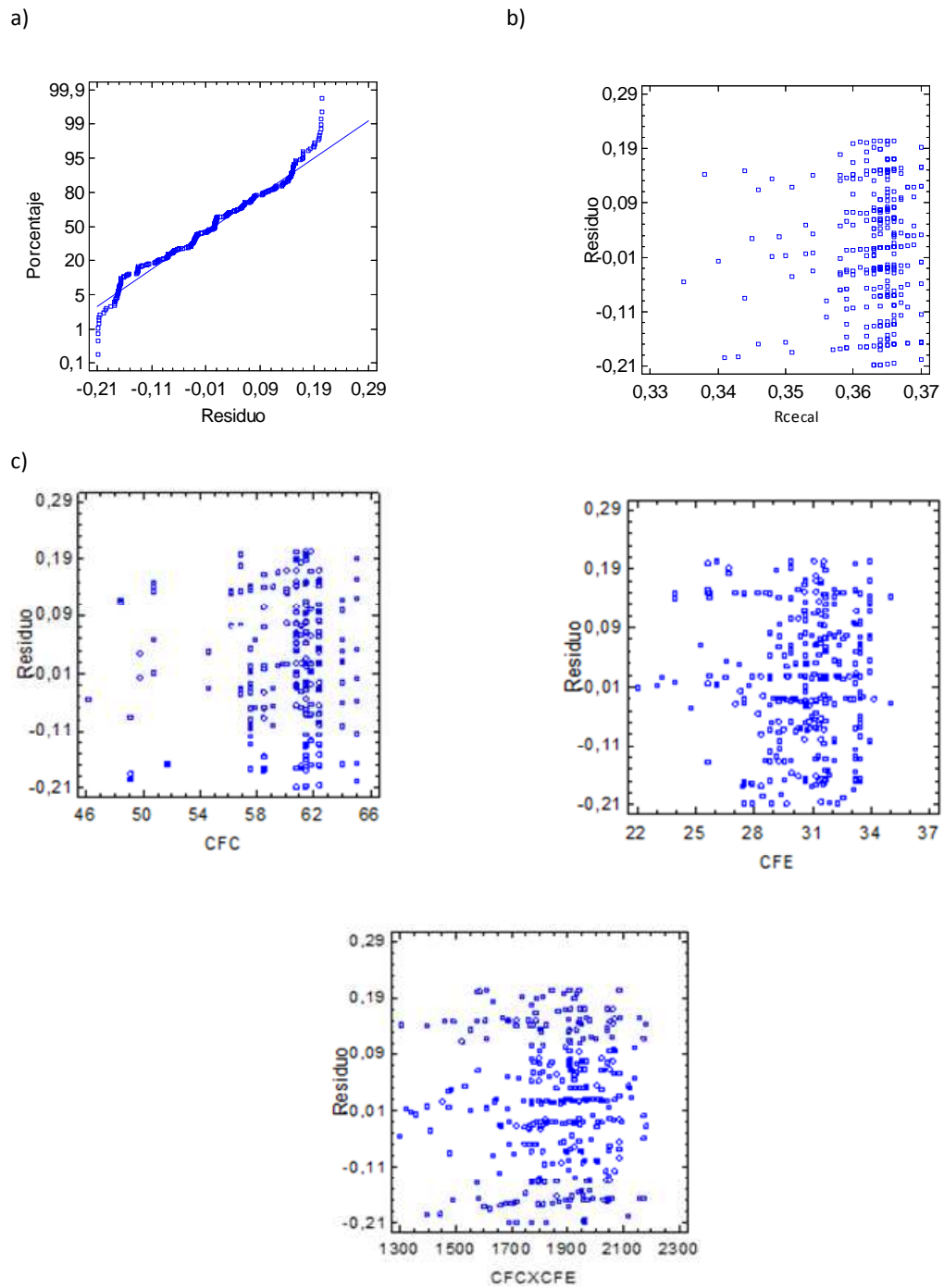


Figura 13. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie café: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) residuos vs. Términos independientes

En la figura 13 se observa el procedimiento gráfico para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos. Se muestra como la mayoría de los puntos siguen un ajuste lineal, por lo tanto se estima que no hay alteraciones significativas a dicho supuesto.

En la figura 13b se grafican los valores predichos de rendimiento contra los residuos del modelo; se observa como los puntos caen aleatoriamente dentro del rango mostrado, concluyendo que el supuesto de varianza constante de los residuos se cumple.

En la figura 13c e muestran las tres graficas correspondientes a cada una de las variables independientes analizadas contra los residuos. Se observa como los datos cumplen con una dispersión similar, por lo tanto se establece que el supuesto también de independencia de los residuos se cumple.

Validación del MRAC para la especie café. Los datos de la tabla 33 y figura 14 corresponden a la validación realizada al modelo obtenido

Tabla 33. Datos de la validación del MRAC de la especie café

Municipio	CFC	CFE	CFC*CFE	Rendimiento Cultivo	Rendimiento cultivo estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
Hispania	65,00	27,83	1808,63	4,89	0,357	0,37	0,013
Hispania	65,00	31,68	2058,88	4,89	0,357	0,37	0,013
Salgar	65,00	30,63	1990,63	6,78	0,495	0,37	-0,125
Salgar	61,10	31,59	1930,00	6,58	0,48	0,364	-0,112
San\Roque	65,00	28,61	1859,81	4,89	0,357	0,37	0,013
Pácora	65,00	30,10	1956,50	4,16	0,304	0,37	0,057
Vergara	65,00	33,95	2206,75	9,15	0,668	0,37	-0,304
Vergara	65,00	32,73	2127,13	9,15	0,668	0,37	-0,298
La Plata	64,03	31,06	1988,78	5,27	0,385	0,368	-0,017
La Plata	64,03	33,34	2134,43	5,27	0,385	0,369	-0,015
Pitalito	64,03	31,24	1999,98	6,17	0,451	0,368	-0,081
Pitalito	60,13	32,11	1930,76	6,17	0,451	0,363	-0,081
Teruel	63,38	30,63	1940,86	5,43	0,396	0,367	-0,032
Policarpa	64,03	31,59	2022,39	5,76	0,421	0,368	-0,051
Santa Rosa De Cabal	61,10	31,59	1930,00	5,42	0,396	0,364	-0,026
Cali	60,13	32,11	1930,76	4,49	0,328	0,363	0,042
La\Cumbre	64,03	32,38	2072,81	4,75	0,347	0,369	0,023
Pradera	59,48	30,54	1816,22	3,89	0,284	0,361	0,07
Yumbo	64,03	31,41	2011,19	4,5	0,329	0,368	0,024

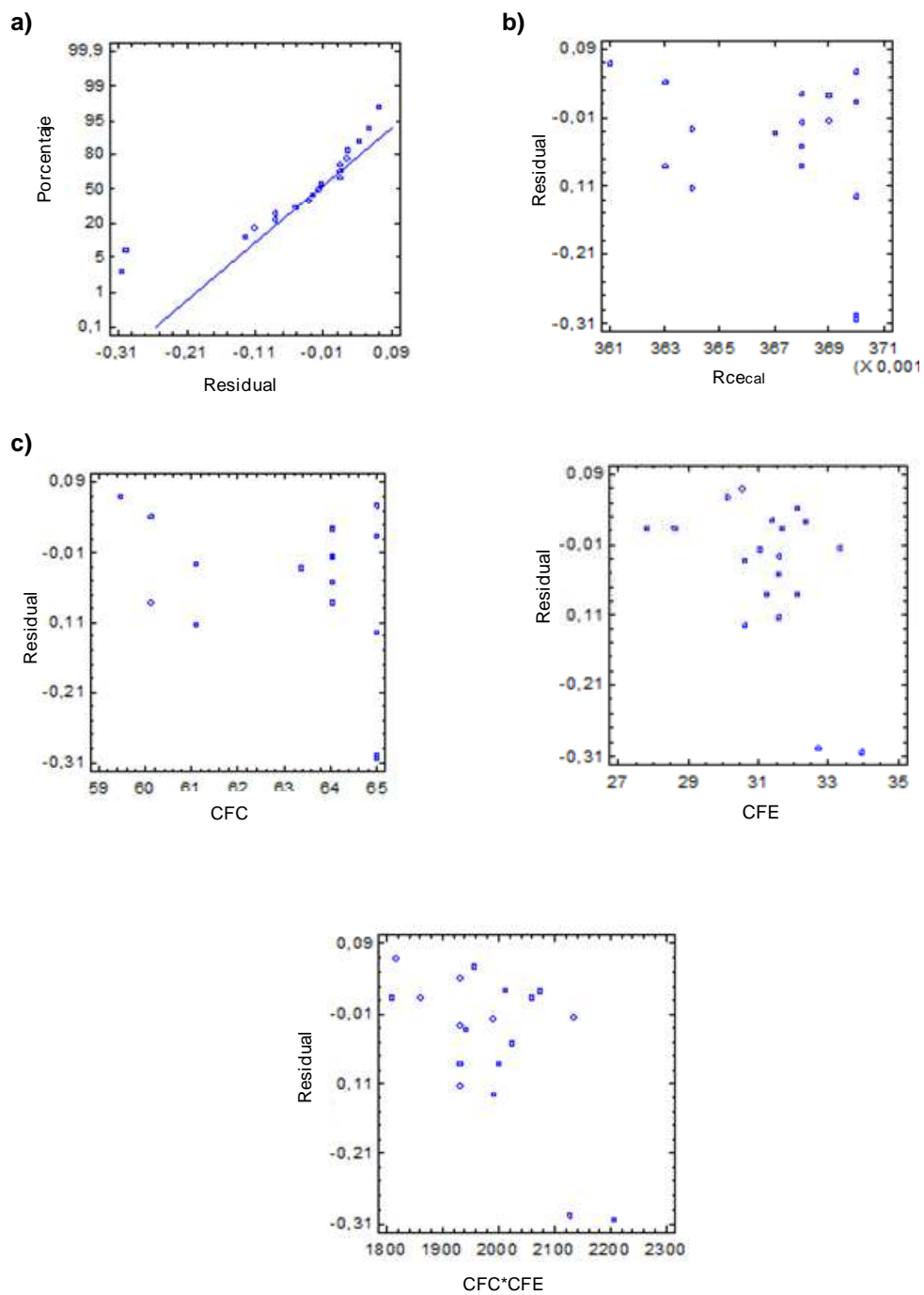


Figura 14. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie café: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

5.4.5 MRAC para la especie Caña de azúcar. El análisis estadístico se realizó con 132 registros. En las siguientes tablas se muestran los resultados de los cálculos estadísticos, obtenidos para el modelo matemático que permite calcular el rendimiento agrícola de cosecha en función las variables climáticas y edáficas, el cual se ajustó a la expresión de primer orden:

$$R_{ce} = 0,01039 \cdot CFC + 0,08052 \cdot CFE - 0,00127 \cdot CFC \cdot CFE \quad (\text{ecuación 13})$$

Tabla 34. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie caña de azúcar

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico	P-Valor
CFC	0,01039	0,00296	3,51561	0,0006
CFE	0,08052	0,01275	6,31483	0,0000
CFC*CFE	-0,00127	0,00024	-5,31983	0,0000

Dado que el p-valor de los términos independientes son cero, éstas variables son estadísticamente significativas en un 95% de nivel de confianza.

Tabla 35. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie caña de azúcar

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F ₀	P-Valor
Modelo	90,923	3	30,3077	3598,82	0,0000
Residual	1,08638	129	0,00842		
Total	92,0094	132			

R^2 : 98,82 %

R_{aj}^2 : 98,80 %

Error Estándar de Estimación: = 0,092

Media del Error Absoluto: 0,07

Estadístico Durbin-Watson: 0,52

Las factores que permiten evaluar la calidad del modelo, muestran que el 98,81% explican los la respuesta de la variable dependiente; que la desviación estándar del error es muy baja, así como la media del error absoluto.

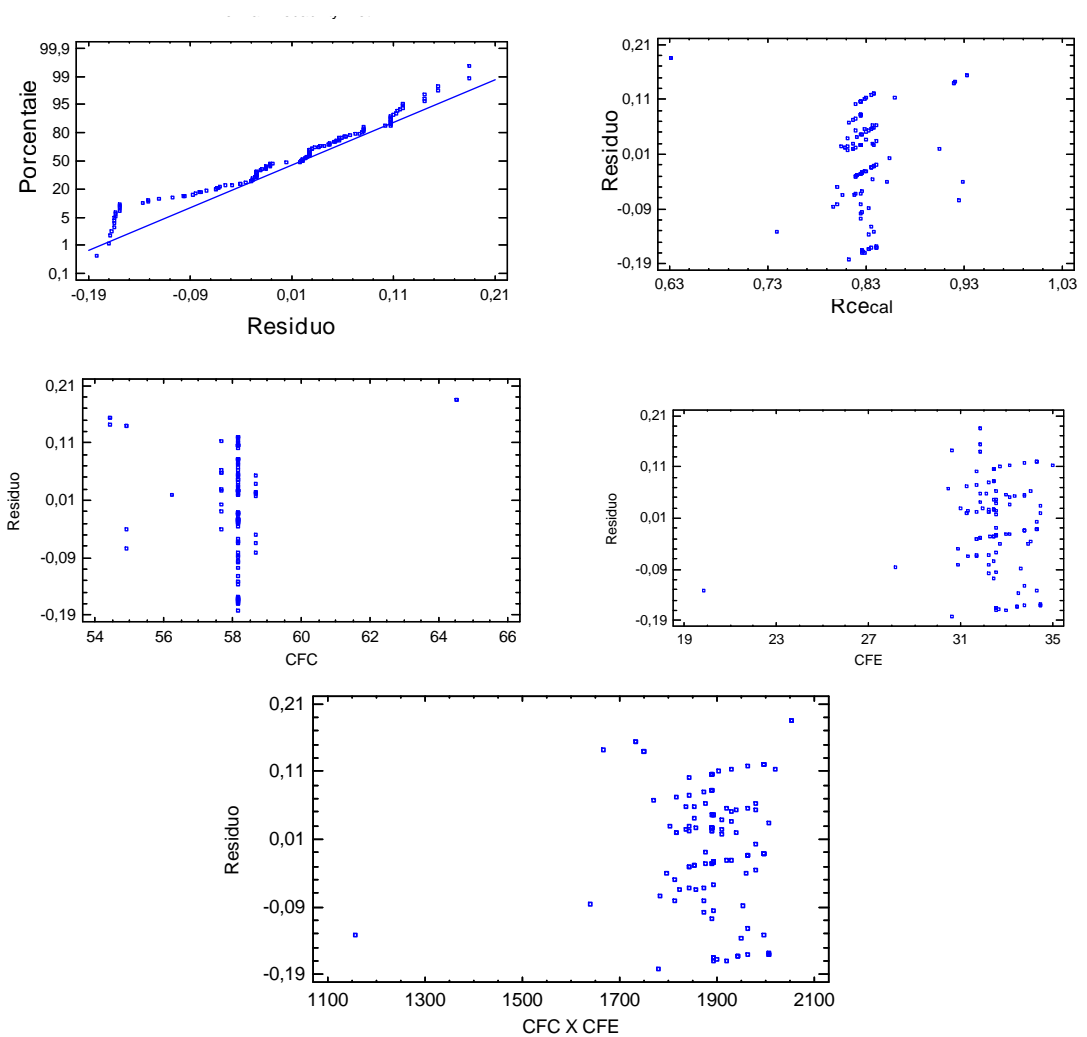


Figura 15. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie caña de azúcar:
a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

En la figura 15a se observa una tendencia en los puntos a tener un comportamiento lineal. En la figura 15b se observan unos nebulosa de puntos y algunos valores atípicos que influyen en la dispersión de los datos.

En la figura 15c las tres graficas correspondientes a cada una de las variables independientes analizadas contra los residuos, se observa que existe una tendencia a que la amplitud de la dispersión de los puntos en cada nivel del factor tiende a ser similar; también se observan algunos valores puntuales que pueden alterar veracidad del cumplimiento del supuesto de varianza constante.

5.4.6 MRAC para la especie Caña de panela. En este caso el número se contó con 78 registros con los cuales se desarrollaron los procedimientos de cálculo para obtener el modelo de rendimiento agrícola así:

$$R_{ce} = 0,00814 * CFC + 0,00555 * CFE - 0,00021 * CFC * CFE \quad (\text{ecuación 14})$$

Los resultados del análisis de regresión y de varianza para el modelo representado en la ecuación 13, se presentan en las tablas 36 y 37.

Tabla 36. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie caña de panela

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico	P-Valor
CFC	0,00814	0,00103	7,88468	0,0000
CFE	0,00555	0,00246	2,25384	0,0271
CFC*CFE	-0,00021	0,00005	-4,35257	0,0000

De los datos presentados en la columna del P-valor se observa que el mayor valor corresponde al término CFE; no obstante se encuentra por debajo de la

significancia predefinida (0,05), con lo cual se deduce que todos los términos son estadísticamente significativos en el nivel de confianza del 95%. Con respecto a los estadísticos se infiere que CFC es el término que tiene mayor contribución a la respuesta de la variable dependiente.

Tabla 37. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie caña de panela

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F ₀	P-Valor
Modelo	5,49742	3	1,83247	2576,21	0,0000
Residual	0,05335	75	0,00071		
Total	5,55077	78			

R^2 : 99,04 %

R^2_{aj} : 99,01 %

Error Estándar de Estimación: 0,03

Media del Error Absoluto: 0,02

Estadístico Durbin-Watson: 0,90

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (tabla 30), el modelo de regresión es significativo, dado que el p-valor es menor que la significancia predefinida (alfa = 0,05).

Los coeficientes de determinación R^2 y R^2_{aj} confirman que el modelo explica en un 99,01 % la variabilidad de los datos. El error estándar de estimación y la media del error absoluto tienen una magnitud pequeña.

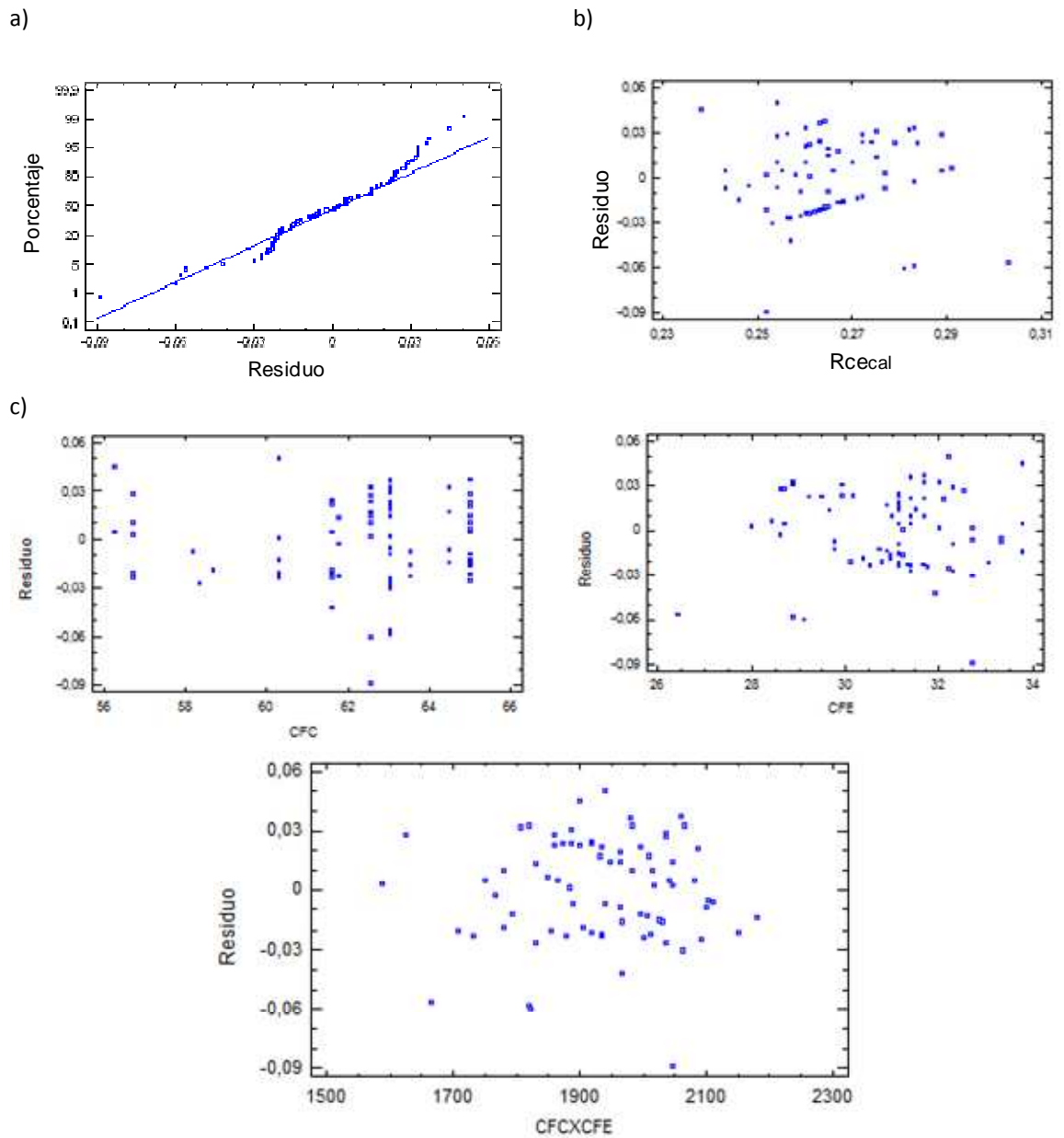


Figura 16. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie caña de panela a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

En la figura 16a se confirma la distribución normal de los residuos el cual se cumple al notar como los puntos siguen una tendencia hacia la línea recta representada en la figura. En la figura 16b se observa la distribución aleatoria de los residuos versus R_{resid} , lo cual garantiza la varianza constante de los residuos; similar comportamiento se presenta en la figura 16c, dado que los residuos caen aleatoriamente, con lo cual reafirma que varianza de los residuos permanece constante.

Validación del MRAC de la especie caña de panela. El análisis correspondiente se presentan en la tabla 38 y figura 17.

Tabla 38. Datos de la validación del MRAC de la especie caña de panela

Municipio	CFC	CFE	CFC*CFE	Rendimiento Cultivo	Rendimiento cultivo estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
Convención	64,51	31,68	2043,43	36,61	0,25	0,263	0,013
Convención	56,06	31,15	1746,35	36,61	0,25	0,255	0,005
Convención	56,06	31,15	1746,35	36,61	0,25	0,255	0,005
Convención	64,51	32,73	2111,17	36,61	0,25	0,254	0,004
Convención	64,51	31,15	2009,56	36,61	0,25	0,267	0,017
Convención	64,51	26,43	1704,74	36,61	0,25	0,307	0,057
Convención	64,51	30,87	1991,50	36,61	0,25	0,27	0,02
Convención	64,51	25,38	1637,01	36,61	0,25	0,315	0,065
Convención	64,51	25,38	1637,01	36,61	0,25	0,315	0,065
Convención	60,61	31,15	1888,08	36,61	0,25	0,262	0,012
Convención	52,16	33,34	1738,97	36,61	0,25	0,237	-0,013
Teorama	56,06	33,78	1893,51	28,29	0,193	0,238	0,045
Teorama	56,06	31,15	1746,35	28,29	0,193	0,255	0,062
Teorama	64,51	25,38	1637,01	28,29	0,193	0,315	0,122
Teorama	60,61	32,90	1994,15	28,29	0,193	0,249	0,056
Aguada	61,10	28,70	1753,57	41,60	0,284	0,281	-0,003
Aguada	61,10	30,87	1886,16	41,60	0,284	0,265	-0,019
Barbosa	61,10	31,75	1939,62	85,58	0,584	0,258	-0,326
Chipatá	61,10	32,38	1978,11	73,96	0,505	0,253	-0,252
Chipatá	61,10	31,15	1903,27	73,96	0,505	0,262	-0,243
Contratación	61,10	31,40	1918,24	64,81	0,442	0,261	-0,181
Guacamayo	57,20	31,94	1826,83	68,07	0,465	0,251	-0,214

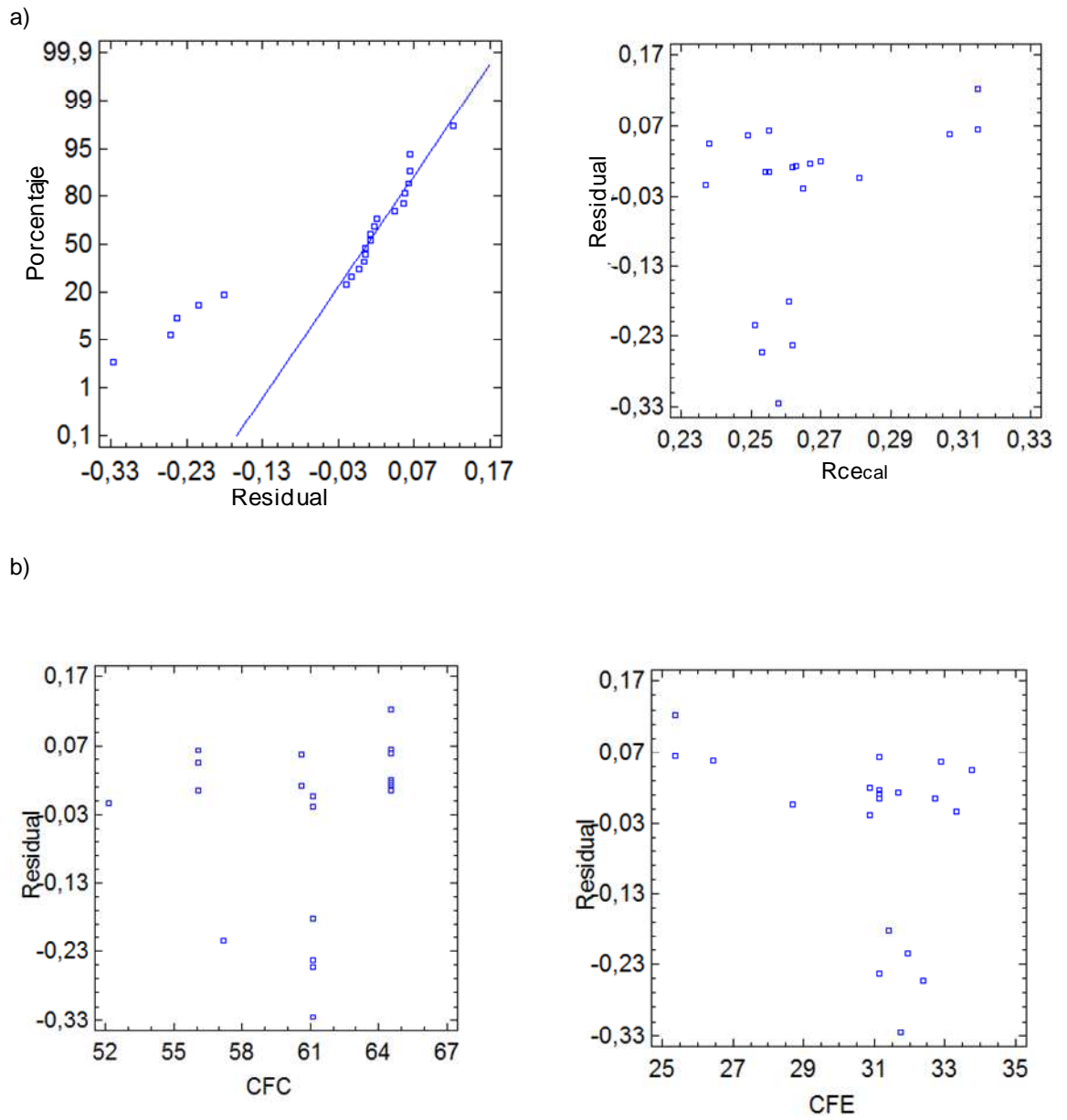


Figura 17. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie caña de panela: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

5.4.7 MRAC para la especie Palma de aceite. Haciendo uso de los 133 registros identificados a nivel nacional, el modelo de rendimiento es:

$$R_{ce} = 0,01609 \cdot CFC + 0,07090 \cdot CFE - 0,00133 \cdot CFC \cdot CFE \quad (\text{ecuación 15})$$

Tabla 39. Análisis de regresión modelo rendimiento para la especie palma de aceite

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico	P-Valor
CFC	0,01609	0,00256	6,29061	0,0000
CFE	0,07090	0,01570	4,51482	0,0000
CFC*CFE	-0,00133	0,00029	-4,63598	0,0000

Dado que la significancia observada (p-valor) de cada uno de los coeficientes individuales de los parámetros es menor a la significancia predefinida ($\alpha = 0,05$) se comprueba que existe una relación importante entre los términos independientes y la variable de respuesta (R_{ce}) en un nivel de confianza del 95%. De acuerdo con el estadístico los términos que tienen una mayor contribución a la respuesta son el CFC.

Tabla 40. Análisis de varianza del modelo de rendimiento para la especie palma de aceite

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F ₀	P-Valor
Modelo	53,1952	3	17,7317	647,51	0,0000
Residual	3,69689	135	0,0273844		
Total	56,8921	138			

R^2 : 93,50 %

R_{aj}^2 : 93,41 %

Error Estándar de Estimación: 0,17

Media del Error Absoluto: 0,13

Estadístico Durbin-Watson: 0,85

De la información presentada en la tabla 40 y de los coeficiente de calidad del modelo, se deduce que las variables climática y edáficas, se encuentran asociadas en forma directa de una manera muy fuerte con la variable dependiente (R_{ce}) en un 93,40%. Dado que el coeficiente de determinación ajustado R^2 tiende a ser menor que el coeficiente de determinación, todos los términos contribuyen de manera significativa al modelo.

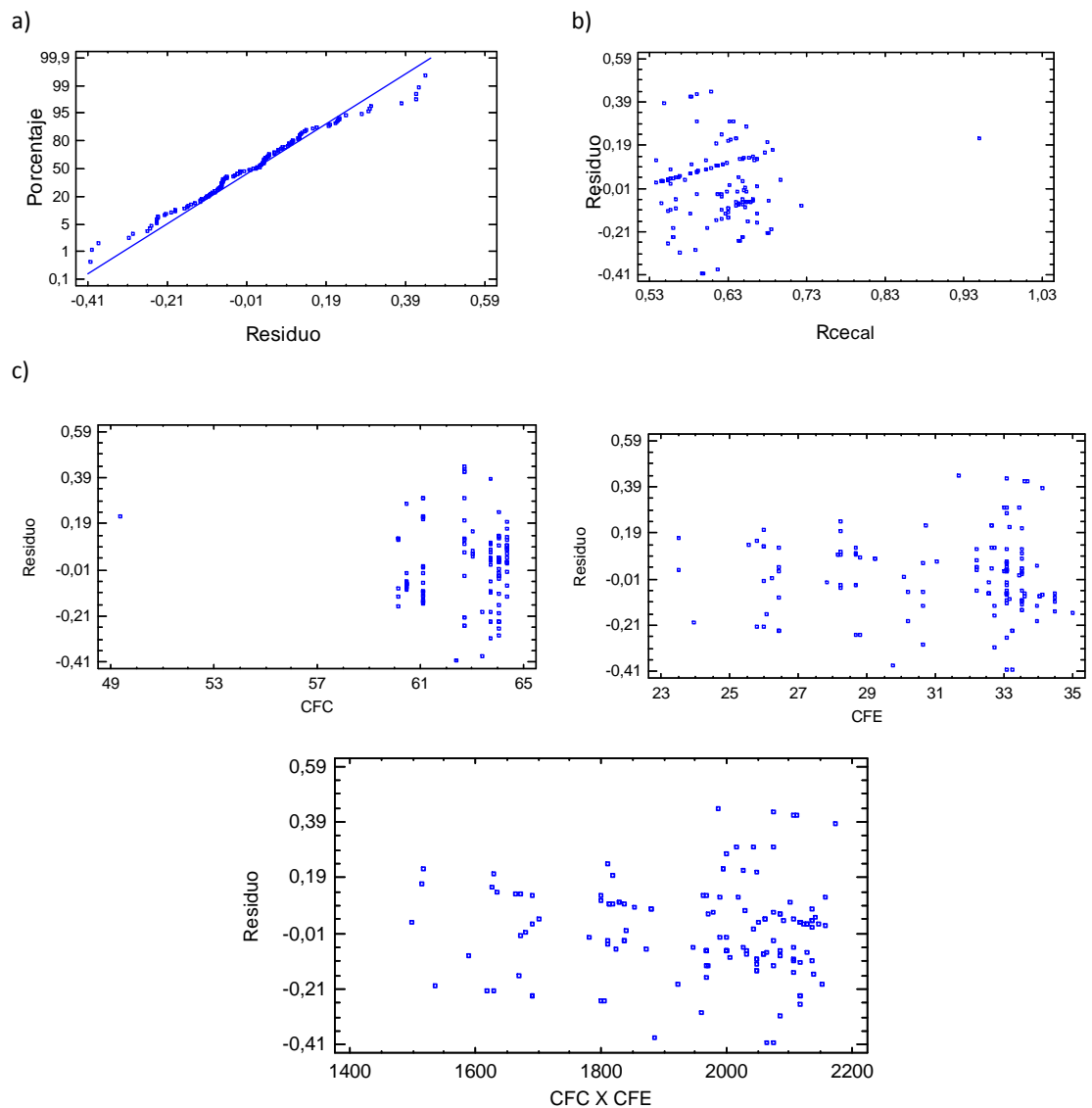


Figura 18. Gráficas de los residuales del MRAC para la especie Palma de aceite:
a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs.
Términos independientes

De las gráficas presentadas en la figura 18, en donde se observa como los puntos caen aleatoriamente dentro del rango mostrado se confirma que los residuos tienen una distribución normal y varianza constante e independencia de los

residuos. Los resultados de los procedimientos se presentan de forma tabulada para cada una de las especies incluidas en el presente estudio, con su correspondiente análisis.

En la siguiente tabla se presentan los valores de los parámetros de la ecuación que representa el MRAC de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Validación del MRAC para la especie palma de aceite. Los resultados de la validación del modelo se presentan en la tabla 34 y figura 19.

Tabla 41. Datos de la validación del MRAC de la especie palma de aceite

Municipio	CFC	CFE	CFC*CFE	Rendimiento Cultivo	Rendimiento cultivo estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
Maria\La Baja	60,45	33,08	1999,38	8,68	0,375	0,654	0,279
Aguachica	60,13	33,08	1988,63	15,23	0,658	0,663	0,005
Aguachica	60,13	33,08	1988,63	14,12	0,61	0,663	0,053
Agustín\Codazzi	61,10	33,51	2047,61	9,64	0,417	0,63	0,213
Agustín\Codazzi	61,10	33,51	2047,61	9,64	0,417	0,63	0,213
Agustín\Codazzi	61,10	33,16	2026,23	9,64	0,417	0,634	0,217
Agustín\Codazzi	61,10	32,64	1994,15	9,64	0,417	0,64	0,223
Becerril	61,10	33,51	2047,61	16,88	0,729	0,63	-0,099
Río De Oro	60,13	33,51	2014,94	18,32	0,69	0,658	-0,032
San Martín	60,13	32,73	1967,59	12,54	0,6	0,666	0,066
Riohacha	61,10	33,43	2042,27	7,71	0,55	0,632	0,082
El Difícil Ariguani	61,10	34,48	2106,42	16,88	0,729	0,621	-0,108
Fundación	60,45	34,13	2062,86	16,71	0,722	0,644	-0,078
Fundación	60,45	33,60	2031,12	16,71	0,722	0,648	-0,074
Zona Bananera (Prado)	60,45	32,20	1946,49	16,88	0,729	0,662	-0,067
Zona Bananera (Prado)	60,45	33,08	1999,38	16,88	0,729	0,654	-0,075
Cabuyaro	64,35	30,63	1970,72	12,05	0,521	0,581	0,06
Cabuyaro	64,35	29,23	1880,63	12,05	0,521	0,602	0,081
Castilla La Nueva	64,03	32,64	2089,62	12,05	0,521	0,56	0,039
Cumaral	62,73	32,20	2019,75	12,09	0,522	0,601	0,079
Granada	64,35	28,26	1818,69	12,96	0,56	0,615	0,055

Municipio	CFC	CFE	CFC*CFE	Rendimiento Cultivo	Rendimiento cultivo estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
Restrepo	63,70	28,70	1828,19	13,05	0,564	0,624	0,06
Restrepo	63,70	28,70	1828,19	12,59	0,544	0,624	0,08
Restrepo	63,70	28,70	1828,19	12,99	0,561	0,624	0,063
Restrepo	63,70	28,70	1828,19	13,21	0,571	0,624	0,053
San Carlos de Guaroa	64,03	33,08	2117,63	15,43	0,667	0,554	-0,113
San Carlos de Guaroa	64,03	33,08	2117,63	14,13	0,611	0,554	-0,057
San Carlos de Guaroa	63,70	33,51	2134,75	13,67	0,591	0,556	-0,035
San Carlos de Guaroa	63,70	23,54	1499,34	14,28	0,617	0,696	0,079
San Carlos de Guaroa	63,70	33,08	2106,88	15,43	0,667	0,563	-0,104
San Carlos de Guaroa	64,03	33,08	2117,63	13,99	0,604	0,554	-0,05
San Carlos de Guaroa	64,03	28,26	1809,51	15,43	0,667	0,622	-0,045
Tumaco	62,40	33,08	2063,88	23,14	1	0,599	-0,401
La Esperanza	63,70	32,73	2084,58	20,25	0,875	0,568	-0,307
La Esperanza	63,70	32,73	2084,58	20,25	0,875	0,568	-0,307
La Esperanza	63,70	32,73	2084,58	20,25	0,875	0,568	-0,307
La Esperanza	63,70	32,73	2084,58	20,25	0,875	0,568	-0,307
La Esperanza	63,70	32,73	2084,58	20,25	0,875	0,568	-0,307

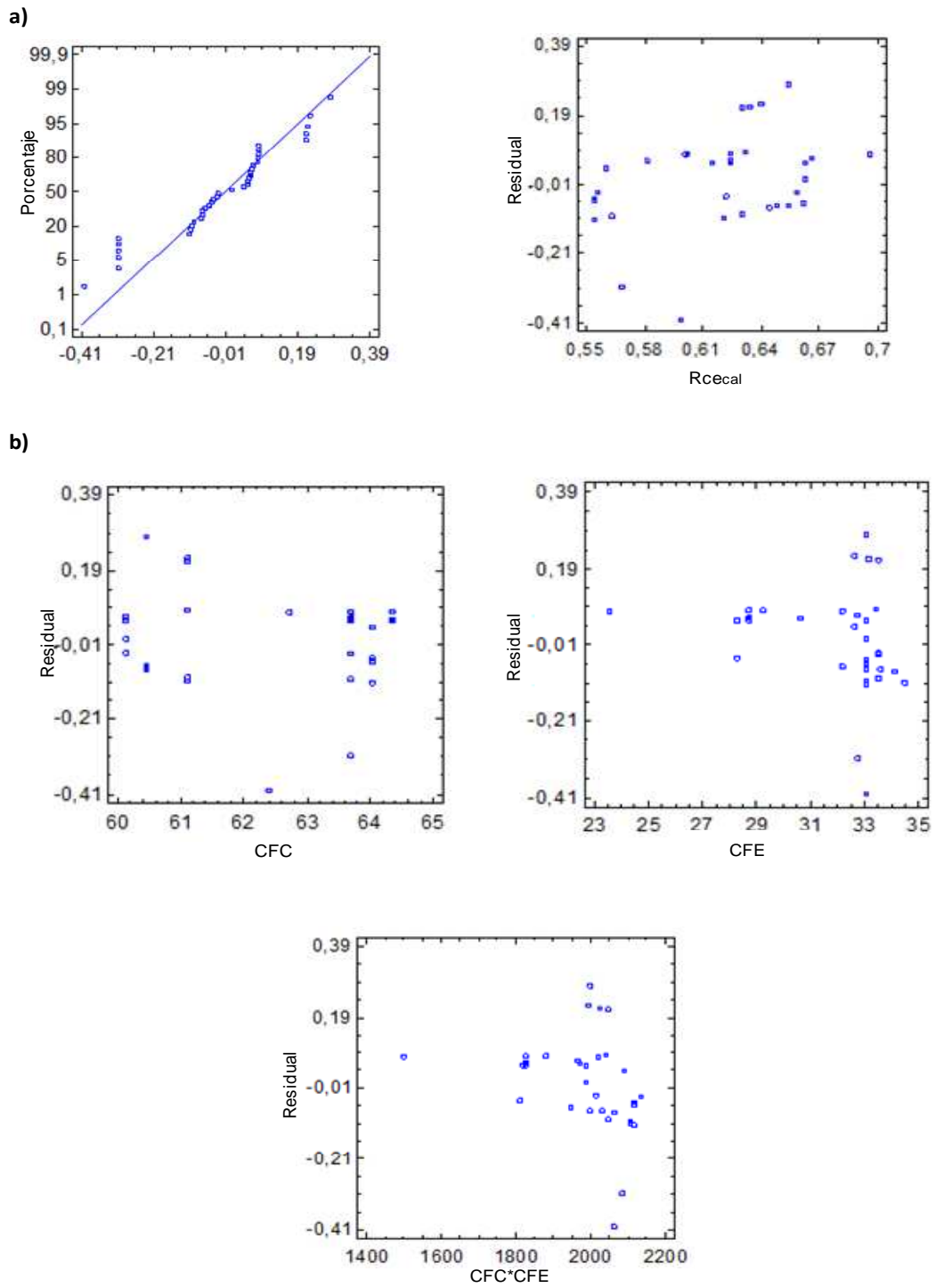


Figura 19. Gráficas de los residuales de la validación del MRAC para la especie palma de aceite: a) Distribución normal, b) Residuos vs. Rendimiento calculado, c) Residuos vs. Términos independientes

La tabla 42 sintetiza los valores de los parámetros obtenidos para el MRAC de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite. Se observa que el orden de magnitud de los dos primeros parámetros β_1 y β_2 son mayores que el tercero β_3 , lo cual significa que la variable respuesta es más sensible ante variaciones significativas de la primer y segunda variable del MRAC.

Tabla 42. Modelo de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC) de las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite

Modelo		$R_{cosecha} = \beta_1 * CFC + \beta_2 * CFE + \beta_3 * CFC * CFE$		
Cultivo	Ruta Fotosintética	Parámetros Ecuación Rendimiento		
		β_1	β_2	β_3
Arroz	C ₃	0,00883	0,04097	-0,00053
Café	C ₃	0,00568	0,00886	-0,00014
Caña de Azúcar	C ₄	0,01039	0,08052	-0,00128
Caña de panela	C ₄	0,00814	0,00555	-0,00021
Palma de Aceite	C ₃	0,01609	0,07090	-0,00133

CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica y energética de la biomasa residual, de cinco especies vegetales, indicó que efectivamente esta materia es rica en carbono, y por ende posee energía que puede ser utilizada. La caracterización fisicoquímica de esta biomasa servirá, al sector industrial, como apoyo para los estudios de selección de tecnologías de aprovechamiento energético de los residuos.

Al comparar los resultados de la caracterización fisicoquímica de los residuos de Colombia, con los datos reportados por estudios a nivel mundial se observaron algunas diferencias, las cuales se pueden atribuir a la variedad de la especie, a el manejo agronómico del cultivo y a las condiciones edafoclimáticas del sitio donde se produce la biomasa.

El modelo para evaluar el Potencial Energético (PE) de la biomasa residual agrícola se definió en función de la masa de residuo y el contenido energético. En el cálculo de la masa se incluyó el término correspondiente a la fracción de residuo seco, como una variable que influye en el aprovechamiento energético. Este modelo se estructuró tomando como referencia modelos evaluados en otros estudios a nivel nacional e internacional.

El Modelo de regresión estadística de Rendimiento Agrícola de Cosecha (MRAC) se desarrolló como una función de las variables climáticas y edáficas, las cuales influyen en el crecimiento de la planta y por ende en la generación posterior de residuos. Los resultados del ajuste de los modelos, obtenidos con análisis de la regresión y de varianza son favorables. El análisis gráfico de los residuales muestra la distribución normal de los errores en los valores centrales y leves desviaciones en los extremos. Las gráficas de residuales versus rendimiento calculado y de residuales versus los términos independientes presentan un buen

comportamiento aleatorio de los datos como es el caso de arroz, café y caña de panela; en el caso de la caña de azúcar y palma de aceite se observa que algunos puntos alejados alteran la aleatoriedad.No obstante lo anterior los resultados obtenidos con el modelo son representativos.

Este modelo es importante en Colombia ya que se convierte en una herramienta para la selección de sitios de cultivo, que permitan dar un buen rendimiento a las especies de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela, café y palma de aceite.

RECOMENDACIONES

Evaluar las oportunidades de aprovechamiento de la biomasa residual desde el punto de vista social, ambiental y económico dados los factores asociados con la localización, el nivel de concentración y el transporte de los residuos vegetales hasta el sitio de transformación energética (Estudio de disponibilidad).

Realizar un estudio de evaluación y selección de las vías de transformación y aprovechamiento energético de la biomasa residual según los resultados de la composición fisicoquímica obtenidos en este estudio.

Dado que los modelos de rendimiento agrícola de cosecha obtenidos para cada especie incluida en el estudio se caracterizaron por poseer idéntica estructura pero con diferentes valores de los parámetros de los términos independientes, se considera importante desarrollar un modelo de rendimiento agrícola de cosecha generalizado o único que permita hacer estimaciones con niveles de confianza aceptables.

BIBLIOGRAFIA

Álvarez M. y González C.. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. (1984). *Estequiometria*, Bucaramanga, 1984

Antolin G.. González L., Diez S., López R., Universidad de Valladolid. (2009). Evaluación del potencial de aprovechamiento energético de la biomasa en Castilla y León.

Bhattacharya S.C., Abdul Salam P., Runqing H., Somashekar H.I., Racelis D.A. Rathnasiri P.G., Yingyuad R. (2005). *An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in Selected Asian Countries for 2010. Biomass & Energy* 29, pp. 153-163.

Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA. (2002). *Biomasa, Manuales Sobre Energía Renovables para América Central*. San José C.R.; 1 ed. ISBN: 9968-904-02-3, pp. 5

Castells X.E., Cadavid C., Campos P.E., Flotats R.X., García M.J., Gaya F.J., Jurado G.L., Ruíz A. F., Cremades O. L., Velo G.E. (2005). *Tratamiento y Valorización energética de residuos*, Ediciones Díaz de Santos, ISBN:84-7978-694-9, España, p. 64.

Cortés L., Abdón y Malagón C., Dimas. (1984). *Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples*. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 360 p.

Cuiping L., Chuangzhi W., Yanyongjie, Haitao H. (2004). *Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels in China*. Biomass & Energy 27, pp. 119-130.

Diehl R. (1988). *Fitotecnia General*. Madrid: Mundi-Prensa. 805 p.

Elauria, J.C., Castro, M.L.Y., Elauria M.M., Bhattacharya S.C., Abdul P. (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in the Philippines*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 191–198.

Fernández - González, Federico. "Bioclimatología". Jesús Izco et al. (2000). Botánica. México: McGraw Hill, p 607-682,.

Ferrada Del Busto, P.M.; *Optimización con aplicaciones en Ingeniería Química*; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Gutierrez H. y De la Vara R. (2004). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Mc Graw Hill; México D.F. pp. 572.

Hewlett Foundation and The Energy Foundation, (2002). *Renewable Energy Atlas of the West, One guide to the region's resource potential*. ISBN 0-9721568-0, USA, pp. 36.

Holdridge, R.L. (1.979). *Ecología basada en las zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica. 216p.

Hoogwijk M., Faaij A, Broek R., Berdens G., Gielen D., Turkenburg W. (2003). *Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy*. Biomass and Bioenergy 25, pp. 119-133.

Himmelblau D. (1997). Principios básicos y cálculos en ingeniería Química. Prentice Hall Hispanoamericana S.A.; sexta edición; México.

- Horta Nogueira L.A., Silva Lora E.E. (2003). *Dendroenergía: Fundamentos e Aplicaciones*. Editora Interciencia. 2ª Edición. Rio de Janeiro, pág. 21-35.
- Junfeng L., Runqing H., Yanqin S., Jingli S., Bhattacharya S., Salam A. (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 167-177.
- Leach G, Gowen M. (1989). Manual de referencia sobre el sector energético residencial. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial Washington D.C.
- Liao C., Wu Ch., Yanyongjie, Huang H. (2004). *Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels in China*. Biomass and Bioenergy 27, 119-130.
- Mckendry P. (2002). *Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of biomass*. Bioresource Technology 83, pp. 37-46.
- McKendry P. (2002). *Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies*. Bioresource Technology 83, pp. 47-54.
- Milera S., Crotti Ch. (2006). Centro de Investigaciones, observación y monitoreo territorial y ambiental. *Implementación del modelo Cropsyst para la simulación del rendimiento del cultivo de maíz en una región de Argentina*. Argentina.
- Millette G.; CDMB. (1983). *Condiciones ambientales de cultivos*; Bucaramanga; 73p.
- Miltner M., Makaruk A., Harasek M., Friedl A. (2006). *CFD – Modelling for the Combustion of Solid Baled Biomass*. Fifth International Conference on CFD in the Process Industries. CSIRO, Melbourne – Australia. 13 – 15 December, pp. 1- 6.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporación Colombia Internacional CCI. (2006). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Bogotá, Colombia.

Montaldo P. (1985). *Agroecología del Trópico Americano*. Costa Rica: IICA. p 14.

Nordin A. (1994). *Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels*. Biomass and Bioenergy 6 : pp. 339 - 347.

Ochse J.J. (1991). *Cultivo y mejoramientos de plantas tropicales y subtropicales*. México. Editorial Limusa, 1991. Volumen I. 828 p.

Organización latinoamericana de Energía – OLADE (2006). *Informe de Estadísticas Energéticas*. <http://www.olade.org>

Perera K.C.K, Rathnasiri P.G., Senarath S.A.S, Sugathapala A.G.T, Bhattacharya S.C, Abdul Salam P., (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Sri Lanka*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 199–213.

Ptasinski K.J., Mark J.P., Anke P. (2007). Exergetic evaluation of biomass gasification. Energy 32, pp. 568 - 574.

Ravelo A. (2004). *Aplicaciones en agrometeorología y transferencia de información al usuario*. Buenos aires Argentina.

Ravindranath N.H, Somashekar H.I, Nagaraja M.S, Sudha P., Sangeetha G., Bhattacharya S.C., Abdul Salam P., (2005). *Assessment of sustainable non-plantation biomass resources potential for energy in India*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 178 – 190.

República de Colombia; Consejo Nacional de Política Económica y Social (2008). *Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia Conpes 3510*; Bogotá.

Rojas A., Barraza J. (2008). *Caracterización Morfológica del Carbonizado de Carbones Pulverizados: Determinación Experimental*. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Número 43, pp. 42 – 58.

Rosbaco I., Bisaro V., Romagnoli M. y Martignone R. (2004). *Métodos Estadísticos para la caracterización de ambientes climáticos y evaluación de respuestas de cultivos de soja*. Revista de investigaciones de la facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Rosario-Argentina.

Sajjakulnukit B., Yingyuad R., Maneekhao V., Pongnarintasut V., Bhattacharya S.C., Salam A. (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Thailand*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 214–224.

Secretaria de Energía de República de Argentina (2004). *Energías Renovables – Energía Biomasa*. <http://www.energia.gov.ar>

Skoulou V. and Zabaniotou A. (2007). *Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, pp.1698–1719.

Smeets E.M.W., Faaij A.P.C., Lewandowski I. M., Turkenburg W. C. (2007) *A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050*. Progress in Energy and Combustion Science 33 56–106

Sordi A., Souza S. N. M., Oliva C. A. (2002). *Potencial de Energia Primaria de Resíduos Vegetais no Paraná*. Agrener, 4 ° Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, Brasil, pp. 1 – 20.

So Sander (1997). *Properties of Danish Biofuels and the Requirements for Power Production*. Biomass and Bioenergy 12, pp 177 - 183.

Squire Geoffrey R. (1990). *The physiology of tropical crop production*. UK: CAB International. 236 p.

Summerfield, R.J.; Roberts, E.H.; Ellis, R.H.; Lawn, R.J.,(1991). *Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops, I. The development of simple models for fluctuating field environments*. Exp. Agric., 27: 11-31.

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, (2003). *Potencialidades de cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia*, resumen ejecutivo documento n° ANC-631 – 03. <http://www.upme.gov.co>

Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Ciencias Agropecuarias. (2009). *Cátedra de Climatología y Fenología Agrícola: Modelos de cultivos (Unidad 10)*. <http://www.cicytpp.org.ar/climatologiafca/docencia/apuntes/tema10.pdf>

UPME, BIOFUELS CONSULTING. (2007). *Desarrollo y Consolidación de Mercado de Biocombustibles en Colombia*; Informe final; Bogotá, Junio de 2007.

Voivontas, D., Assimacopoulos, D., Koukios, E. (2001). *Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method*. Biomass and Bioenergy, 20, pp. 101-112.

Wallace, DH., (1985). *Physiological genetics of plant maturity, adaptation and yield*. Plant Breed. Rev. 3: 21-168.

ANEXOS

Anexo 1

Condiciones climáticas y edáficas favorables para el desarrollo de especies agrícolas de arroz, café, caña de azúcar, caña de panela y palma de aceite.

Especie: Arroz

CARACTERISTICAS DESCRIPTIVAS

Familia: *Gramineae*

Nombre *Oriza sativa* L.

Científico:

Nombres Arroz.

Comunes:

Origen: Sureste de Asia

Distribución: 50°LN a 35° LS

Adaptación Desde las condiciones de Bosque muy húmedo templado frío (6°C a 12°, 1000 a 2000 mm); hasta las del Bosque muy seco tropical(>24°C; 500^a 1000 mm) y las de Bosque muy húmedo tropical (24°C; 4000 a 8000 mm)

Ciclo vegetativo: 100 a 130 días.

Tipo C₃

Fotosintético:

REQUERIMIENTOS DE CLIMA Y SUELO:

Altitud: 0 a 500 msnm (hay lugares en la India donde se cultiva a 2000 msnm).

Precipitación (Lluvia mm): 1000-4000 mm. El arroz es una planta de suelos húmedos e inundados. Para obtener un buen rendimiento son necesarios 200 - 300 mm de lluvia bien distribuidos por mes durante el ciclo de cultivo. Sin

embargo el requerimiento depende mucho del tipo de suelo: Los requerimientos de agua para el cultivo de arroz en suelos arenosos son tres veces mayores que en suelos arcillosos. El período más crítico por falta de agua son los 10 días anteriores a la floración. La falta de agua en este período es causa de una gran esterilidad en las flores y, en consecuencia, de reducidos rendimientos. Esa situación es irreversible, de manera que si también se supe suficiente agua luego de la floración la situación no mejorará y los rendimientos serán bajos. Contrariamente a esto, si durante la fase vegetativa se presentan períodos de escasez de agua, con tal que se suministre la suficiente en los 10 días previos a la floración se podrá contar todavía con una buena cosecha. Independientemente de la precipitación, el arroz se da muy bien bajo riego y en condiciones de inundación.

Humedad: El arroz se cultiva generalmente en área de alta humedad relativa.

Luz: Los requerimientos de luz en el arroz difieren según la fase de desarrollo del cultivo. Durante la fase vegetativa un sombreado que reduzca 25 al 75% de la luz solar directa afecta solo el rendimiento final. Por el contrario, durante la fase reproductiva el sombreado reduce notablemente el número de flores, y en consecuencia el rendimiento. El sombreado por cielo nublado durante el período de maduración también reduce el rendimiento ya que afecta el llenado del grano. Estudios han demostrado que ese período de aproximadamente 45 días, que va de 15 días antes de la floración hasta la cosecha, es posiblemente el más crítico para el rendimiento final. En este período, cuando la humedad no es el factor limitante, el cultivo debe contar con un alto índice de radiación (más de $40 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$) si se quiere lograr buenos rendimientos.

Temperatura: Los óptimos de temperatura están entre los 18°C y 40°C para la germinación; para el crecimiento de 25°C a 31°C; para floración de 30°C a 33°C y para maduración de 20 a 29°C. La temperatura mínima para el cultivo está entre el rango de los 12°C y los 19°C con excepción del período de floración donde el mínimo crítico es de 22°C. El rango de temperatura óptimo para fotosíntesis va de 25°C a 32°C. Para buenos rendimientos las mínimas para floración deberían ser superiores a 20°C. Temperaturas por debajo de 20°C durante los 10 a 11 días antes de la floración provocan un alto porcentaje de esterilidad. Con temperaturas nocturnas de 15°C durante el período vegetativo no hay iniciación floral. La temperatura es también el factor más importante en el período de maduración del arroz, que varía de 64 a 66 días en las regiones más frías y de 30 a 32 en las regiones más cálidas. El óptimo de temperatura depende del origen de la variedad. El período de maduración está inversamente correlacionado con la temperatura media diurna. Por esto, en los trópicos donde las temperaturas para el período de maduración son altas, se necesitan en el mismo tiempo altas intensidades de radiación solar. Una combinación de altas temperaturas y baja radiación solar, como suele ocurrir en áreas persistentemente cubiertas de nubes, determinará bajos rendimientos ya que en esas condiciones se dificulta el llenado del grano.

Fotoperiodo: La mayoría de las especies del trópico son fotoperiódicamente sensitivas. El arroz es una especie de día corto aunque hay variedades de día neutro.

Textura de suelo: Para el cultivo de arroz se prefieren suelos relativamente pesados, arcillo-limosos o franco-arcillosos, preferiblemente no calcáreos.

Profundidad del suelo: >50 cm.

Salinidad: El arroz es tolerante a la salinidad.

pH: Rango de 5.2 a 8.0.

Drenaje: Prefiere suelos de imperfecta a moderadamente drenados que aseguren una buena retención del agua, ya que por su especial habilidad de transferir el O₂ de las partes aéreas a las raíces, el drenaje no es un factor esencial para este cultivo.

Pendiente: De 0 a 4%; >4% marginal.

Rendimiento: Según el censo nacional arrocero del 2007 la producción nacional está entre 5,7-6,6 t/ha dependiendo de la variedad, del sistema de cultivo y de la región del país donde se ubique.

Bibliografía:

BENACCHIO SCOTTON, Sergio. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.

MORENO P. Gladis. Obtención de un modelo para la evaluación de los flujos de energía en la agricultura y su aplicación en el cultivo arroz riego en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado. 2001. p 80 y ss.

FEDEARROZ. III Censo Nacional Arrocero 2007. Bogotá: FEDEARROZ, febrero de 2008.

Espece: Café

Familia:	Rubiaceae
Nombre Científico:	<i>Coffea arabica</i> L.
Nombres Comunes:	Café.
Origen:	Tierras altas mayores a 1600 msnm de Etiopía.
Distribución:	22° LN a 26° LS. En Colombia la zona cafetera se encuentra entre los 1-11° LN en las laderas de las tres cordilleras que atraviesan el país de sur a norte.
Adaptación:	Desde las condiciones de Bosque muy húmedo templado frío (6°C a 12°, 1000 a 2000 mm); hasta las del Bosque muy seco tropical (>24°C; 500 ^a 1000 mm) y las de Bosque muy húmedo tropical (24°C; 4000 a 8000 mm). La zona cafetera colombiana se encuentra localizada en las laderas de las cordilleras que atraviesan el país de sur a norte y una latitud comprendida entre 1° y 10° de latitud norte, una franja altitudinal que va de los 1000 a 2000 msnm.
Ciclo vegetativo:	Perenne.
Tipo Fotosintético:	C ₃

REQUERIMIENTOS DE CLIMA Y SUELO:

Altitud: 0 a 500 msnm (hay lugares en la India y en Colombia donde se cultiva a 2000 msnm).

Precipitación (Lluvia mm): 1200-2000 mm. El café necesita de una estación seca bien definida para regular la producción. La diferenciación de las yemas florales ocurre hacia el final de la época lluviosa, y para lograr una buena producción en la época siguiente, en los dos últimos meses de esa época no deberían caer menos de 250 mm de lluvia. Luego necesita de un período seco, seguido de una fase de amplia disponibilidad hídrica para la apertura de las flores. En general el café necesita un período con escasa precipitación o también de sequía absoluta (siempre que este no pase de 60 días) en los meses anteriores a la floración, para dar una buena producción. Esto se debe a que la deficiencia de humedad estimula la floración en el cafeto. Al iniciarse la floración se entra en el período más crítico para el cultivo: Durante este período las lluvias deben estar bien distribuidas ya que tanto los excesos como las deficiencias causan una gran caída de flores. Sin embargo, un período de sequía intenso luego de iniciarse la floración es más perjudicial que un exceso de precipitación.

Humedad: El café se da bien en áreas con humedad relativa de media a alta, comprendida entre el 70 y el 85%. Índices superiores e inferiores a estos son perjudiciales para la especie

Luz: En su estado selvático el cafeto crece bajo la sombra. En plantaciones comerciales se cultiva tanto bajo sombra como a pleno sol, en este último caso, cuando la humedad atmosférica es bastante alta y el suelo es fértil. Depende

también del material genético que se siembre. Según Cenicafé en Colombia la radiación en la zona cafetera es de 300-450 cal/cm²/día.

Temperatura: En general en las mayores áreas cafeteras del mundo la temperatura media anual es de 21°C a 22°C. La temperatura es más importante que la luz en el control del crecimiento de las hojas y diferenciación de las flores. El café necesita crecer bajo un régimen de termoperíodo, siendo el óptimo para producción de 23°C de día y 17°C de noche. En general, temperaturas nocturnas inferiores a los 13°C y diurnas superiores a los 27°C son perjudiciales para el cafeto. En Colombia, la zona cafetera presenta una temperatura media muy uniforme a través del año para una misma región. Tiene una temperatura media que varía entre los 17°C y los 23°C. Regiones por fuera de estos límites se consideran como marginales. Las diferencias entre las temperaturas media y máxima pueden ser de 15°C.

Fotoperiodo: El cafeto es una especie de día corto y con períodos de iluminación superiores a las 12 horas se reduce e inhibe la floración.

Textura de suelo: Se cultiva en suelos de muy variado origen: Inceptisoles, oxisoles, aluviales, derivados de cenizas volcánicas. En general se prefieren suelos francos y franco-arcillosos.

Profundidad del suelo: En Colombia se prefieren suelos con profundidad efectiva mayor de 50 cm y con un horizonte orgánico igual o mayor a 20 cm.

pH: Rango de 4,8 a 6.0.

Drenaje: Requiere suelos bien drenados.

Pendiente: Desde plano a ligeramente ondulado con pendientes de hasta 7%, hasta abrupto con pendientes de más del 75%.

Rendimiento: 1,2 t/ha.

Bibliografía:

BENACCHIO SCOTTON, Sergio. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Guía ambiental para el sector cafetero. 2007. (Disponible en:

<http://www.cafedecolombia.com/servcaficultor/extensioytransferencia/guiaambiental%202007/guiaambiental.html>.

Consultado el: 5 de agosto de 2008).

Especie: Caña de Azúcar

Familia:	<i>Poaceae (Gramineae)</i>
Nombre Científico:	<i>Saccharum officinarum</i> L.
Nombres Comunes:	Caña, caña de azúcar.
Origen:	Nueva Guinea para caña de tallo grueso e India para caña de tallo delgado.
Distribución:	37°LN a 32° LS.
Adaptación:	Trópico y subtropical; zonas húmedas, subhúmedas y semiáridas.
Ciclo vegetativo:	10-24 meses.
Tipo Fotosintético:	C ₄

REQUERIMIENTOS DE CLIMA Y SUELO:

Altitud: 0-1600 m.

Precipitación (Lluvia mm): 1000-2200 mm bien distribuidos en el año, disponiendo de agua para riego complementario cuando el déficit hídrico anual sea superior a 150 mm. Para la zafra se requiere una época seca. Dependiendo del clima, las necesidades de agua de la caña de azúcar son de 1500 a 2500 mm, distribuidos de manera uniforme durante la temporada de desarrollo. Con una evapotranspiración durante la estación vegetativa, de 5 a 6 mm/día, el nivel de agotamiento puede ser del 65% del agua total disponible, sin tener efectos graves sobre los rendimientos.

Humedad ambiental: Prefiere humedades relativas alrededor de 50%.

Fotoperiodo: Es una especie de día largo, pero hay cultivares de día neutro. La mayoría de los cultivares no florecen a fotoperíodos mayores a 13 horas y menores a 12 horas. Las condiciones que inducen la iniciación floral son 12.4 horas de fotoperiodo y 20-25°C de temperatura nocturna.

Temperatura: Temperaturas umbrales para germinación 10 y 40°C, con un rango óptimo de 20-32°C.

El macollamiento se reduce a menos de 21°C y se incrementa a temperaturas alrededor de 26°C. Temperaturas ligeramente por arriba de 20°C son las más favorables para el crecimiento. El crecimiento activo se reduce mucho cuando la temperatura cae por debajo de los 10°C y si ésta es menor de 5°C, las hojas presentan una coloración rosada que viene a ser un síntoma similar al causado por la inundación. La fotorrespiración se incrementa cuando la temperatura se eleva por encima de los 35°C. Las temperaturas cercanas a los 38°C reducen la fotosíntesis y por lo tanto el crecimiento en general. La tasa y patrón de crecimiento del follaje está gobernada por la prevalencia de

temperaturas entre 21 y 38°C con una humedad relativa del 50%. Cuando la temperatura del suelo baja de 21°C, el crecimiento se limita y cesa a 12°C. Para crecimiento, el óptimo de temperatura del suelo se ubica en 26-27°C. Temperaturas altas del suelo reducen el crecimiento del sistema radicular. Bajas temperaturas y alta humedad son más favorables para una floración temprana que tiempo seco y soleado. Las temperaturas nocturnas por debajo de 18°C pueden prevenir la floración. Diferencias grandes entre temperaturas nocturnas y diurnas son muy favorables para la maduración. Una reducción gradual de temperaturas y humedad durante 4-6 semanas antes de la cosecha ayudan significativamente a la maduración. El crecimiento de la caña cesa entre 10-12°C y está considerada como la temperatura mínima para el comienzo de la maduración. La maduración se acelera también retirando el agua de riego de cultivos irrigados.

Luz: La intensidad de saturación de luz es 64.6 Klux. La caña tiene una alta habilidad para utilizar eficientemente la energía solar. En plantaciones de campo, la tasa fotosintética se incrementa hasta una completa intensidad natural de la luz. Por eso entre mayor sea la incidencia de la radiación, es mayor la producción que se puede esperar.

Textura de suelo: Tolera muy bien condiciones diversas del suelo. De manera general, se cultiva con éxito tanto en terrenos arcillosos muy pesados, como en terrenos extremadamente arenosos.

Profundidad del suelo: Debe ser mayor a 1,50 cm. 50 cm (óptimo); 10-50 cm (marginal). Normalmente, bajo un suministro de agua sin problemas, el 100% del agua se extrae de los primeros 1.2 a 2.0 m del suelo.

Salinidad: Medianamente tolerante a sales. La caña de azúcar es moderadamente sensible a la salinidad y la disminución en el rendimiento del cultivo por este factor es la siguiente: 0% para una conductividad eléctrica de 1.7

mmhos/cm; 10% para 3.3 mmhos/cm; 25% para 6.0 mmhos/cm; 50% para 10.4 mmhos/cm y 100% para 18.6 mmhos/cm.

pH: Rango 4.5-8.5 (óptimo 5.5-8.2). El óptimo va de 6.0 a 8.0. La caña se desarrolla bajo un pH de 5.0 a 8.5, siendo el óptimo alrededor de 6.5.

Drenaje: Requiere de suelos moderadamente drenados a bien drenados (lo óptimo).

Pendiente: Generalmente se prefiere establecer el cultivo de caña para la producción de azúcar entre los 0-800 msnm en suelos planos, con pendientes <3%

Rendimiento: 113 t/ha/año. (ASOCAÑA, 2007)

Bibliografía:

BENACCHIO SCOTTON, Sergio. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.

CASSALETT D., Clímaco et al. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali: CENICAÑA, 1995. p 46-58.

ASOCAÑA. Informe Anual 2007-2008. p 61.

Especie: Caña de Panela

Familia:	<i>Gramineae.</i>
Nombre Científico:	<i>Saccharum officinarum, S.barberi, S. robustum, S. sinense, S. spontaneum. L.</i>
Nombres Comunes:	Caña.
Origen:	Nueva Guinea.
Distribución:	
Adaptación	Se produce desde las condiciones del Bosque Seco Tropical (temperatura media >24°C; 1000-2000 mm) y Bosque Húmedo Tropical (Temperatura media >24°C; 2000-4000 mm) hasta Bosque Húmedo Subtropical (17-24°C; 1000-2000 mm) y el Bos que muy Húmedo (17-24°C; 2000-4000 mm).
Ciclo vegetativo:	100-120 días. Se considera un cultivo semiperenne.
Tipo Fotosintético:	C ₄
REQUERIMIENTOS DE CLIMA Y SUELO:	

Altitud: En Colombia se produce en tres zonas distintas de 0-800 msnm; 800-1200 msnm; 1200 a 1700 msnm; esto da origen a diversas características en el rendimiento del cultivo y la calidad de la panela.

Precipitación (Lluvia mm): La caña necesita de agua para su crecimiento, el mejor límite está entre 1250-1750 mm anuales. Con precipitación inferior de 1250 mm es necesario regar y con precipitación superior de 1750 mm es conveniente el drenaje.

Humedad: Prefiere humedades relativas alrededor de 50%.

Luz: Requiere de alto brillo solar y poca nubosidad ya que los rendimientos de caña, miel y panela se pueden reducir entre el 25 y 35%.

Temperatura: Rango de 20 a 30°C; las medias son entre 25-26,5°C. La temperatura alta es necesaria para el mejor crecimiento y la baja para la producción de sacarosa, la oscilación entre la temperatura diurna y la nocturna debe ser de 8°C

Fotoperiodo: Es una especie de día corto, pero hay cultivares de día neutro (Benacchio 1982).

La mayoría de los cultivares no florecen a fotoperíodos mayores a 13 horas y menores a 12 horas. Las condiciones que inducen la iniciación floral son 12.4 horas de fotoperiodo y 20-25°C de temperatura nocturna (Barandas, 1994).

Textura de suelo: Se adapta a diferentes tipos de suelo, los que más le convienen son los franco-arcillosos profundos y aluviones pesados. En general prefiere suelos pesados con subsuelos de naturaleza abierta

Profundidad del suelo: Mínimo de 40 cm si se tiene en cuenta que el 67% de las raíces se desarrollan en los primeros 40 cm de suelo.

Salinidad: Los suelos salinos, en general no son adecuados para el cultivo.

pH: 5.0-7,5.

Drenaje: El cultivo no resiste inundación.

Pendiente: puede sembrarse en terrenos con topografía desde plana con pendientes <3% hasta quebrada con pendientes entre el 25-50%.

Rendimiento: 6,5 t/ha

Bibliografía:

BENACCHIO SCOTTON, Sergio. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.

MOJICA P., Amilcar y PAREDES V., Joaquín. El cultivo de la caña panelera y la agroindustria panelera en el Departamento de Santander. Bucaramanga: Banco de la República: 2004. p 5 y ss.

RODRIGUEZ, Roberto. El cultivo de la caña y sus recomendaciones de manejo para suelos de tierra firme del Guaviare. CORPOICA- PRONATTA, San José del Guaviare: 2002. Boletín Técnico No. 29, p 10 y ss.

Especie: Palma de Aceite

Familia:	<i>Palmae.</i>
Nombre Científico:	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.
Nombres Comunes:	Palma de aceite, palma aceitera.
Origen:	Africa Tropical.
Distribución:	16°LN a 15° LS
Adaptación:	Se produce desde las condiciones del Bosque Seco Subtropical (18-24°C; 500-1000 mm) y Bosque muy Húmedo Subtropical (18-24°C; 1000-2000 m m) hasta las del Bosque Seco Tropical (>24°C; 1000-2000 mm)y el Bosque muy Húmedo Tropical (>24°C; 4000-8000 mm).
Ciclo vegetativo:	Perenne.
Tipo:	C ₃
Fotosintético:	

REQUERIMIENTOS DE CLIMA Y SUELO: Altitud: 0 – 400 msnm

Precipitación (Lluvia mm): Debe ser superior a 2000 mm. El déficit hídrico no debería superar los 150 mm. En general se cultiva en regiones donde la precipitación está en exceso de la evapotranspiración, al menos durante nueve meses al año. Estaciones secas con tres meses de precipitación inferiores a 100 mm constituirían el límite de las condiciones favorables para una producción económica. La intensidad de la estación seca está relacionada con el

aborto de flores cinco meses antes de la antesis, sin embargo lluvias fuertes en el período de la antesis afectan la producción de frutos y aceite.

Humedad: La humedad relativa debe ser mayor del 75%.

Luz: Necesita luz abundante, normalmente se cultiva a pleno sol. Debe haber más de 1500 horas de insolación al año, óptimo 2000 o más. Este factor es básico para la formación del follaje e inflorescencias. El aumento del rendimiento es de 5,7 Kg por cada aumento de 100 horas de insolación.

Temperatura: Rango de 10 a 35°C; óptimo para fotosíntesis de 25 a 30°C. Las temperaturas medias más favorables van de 25 a 28°C. La mínima debe ser superior a 18° C. Bajas temperaturas provocan el aborto de la inflorescencia antes de la antesis. Los rendimientos más altos se dan en regiones con la menor variación de las medias mensuales entre 1,1 a 3,8°C, sin embargo estas pueden estar entre 4,8 y 11,2°C

Fotoperiodo: Es una especie de día corto.

Textura de suelo: Se adapta a una gran cantidad de suelos excepto los muy pesados y los arenosos como por ejemplo los suelos franco y los franco-arcillosos.

Profundidad del suelo: Prefiere los suelos profundos y fértiles. Tiene un sistema radical extremadamente superficial, en esta especie las raíces realmente activas en la absorción de agua y nutrientes ocupa los 10 primeros centímetros del suelo.

pH: 4,2 a 7,5. La mayoría de las plantaciones con pH 4,2–6,0. Se da bien en suelos relativamente ácidos y tolera poco la alcalinidad.

Drenaje: Este cultivo requiere un buen drenaje tanto interno como externo. Sin embargo soporta excesos de agua, y aún inundación si ésta es de corta duración y el drenaje se efectúa fácil y rápidamente.

Pendiente: <3% (óptimo); 7-12% moderada y pendientes superiores al 12% ofrecen restricciones topográficas para el manejo agronómico del cultivo.

Rendimiento: 17,6 t de fruto/ha/año. (BERNAL, 2005)

Bibliografía:

BENACCHIO SCOTTON, Sergio. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.

BERNAL N., Fernando. El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Guía General para el Palmicultor. Tercera Reimpresión. Bogotá: FEDEPALMA-SENA-SAC, 2005.

HARTLEY, C.W.S. The palm oil. London: Longman, 1977. Second Edition. p 96-113.

Anexo 2

Teoría sobre Análisis de Regresión.

El Análisis de regresión tiene como objetivo modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes (factores). Si mediante un modelo matemático es posible describir tal relación, entonces este modelo puede ser usado para propósitos de predicción, optimización o control.

Considerando las variables X y Y , con las que se quiere explicar el comportamiento de Y con base en los valores que toma X . Para esto se mide el valor de Y sobre un conjunto de n valores de X , con lo que obtienen n parejas de puntos $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. A Y se le denomina la variable dependiente o de respuesta y a X se le designa como variable independiente o regresora. Cuando en situaciones prácticas, existen varias variables independientes que se supone influyen sobre una variable de respuesta Y , una manera de estudiar el comportamiento de Y con respecto a X es mediante un modelo de regresión que consiste en ajustar un modelo matemático de la forma:

$$Y = f(X)$$

Asumiendo que las variables X y Y están relacionadas linealmente y que para cada valor de X , la variable dependiente, Y , es una variable aleatoria. Es decir, que cada observación de Y puede ser descrita por el modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde ε es un error aleatorio con media cero y varianza σ . Se suponen que los errores aleatorios no están correlacionados. A la ecuación (1) se conoce como el modelo de regresión lineal simple.

La anterior expresión corresponde a un polinomio de primer orden, donde los β_j son los parámetros del modelo o coeficientes de regresión y ε es el error aleatorio,

con media cero, $E(\varepsilon) = 0$ y $V(\varepsilon) = \sigma$. En general la ecuación representa un hiperplano en el espacio de k dimensiones generado por las variables $\{X_j\}$.

El término lineal del modelo de regresión se emplea debido a que la ecuación es función lineal de los parámetros desconocidos B_0, \dots, B_k , donde B_0 es la ordenada respecto al origen, y B_j mide el cambio esperado de Y por cambio unitario de X_j cuando el resto de las variables regresoras se mantienen fijas o constantes.

Para estimar los parámetros de la regresión lineal múltiple se necesita contar con n datos ($n > k$), que tienen la estructura descrita en la siguiente tabla:

Tabla 6. Estructura de los datos para la regresión lineal múltiple

Y	X ₁	X ₂	X _k
y ₁	x ₁₁	x ₂₁		x _{k1}
y ₂	x ₁₂	x ₂₂		x _{k2}
.	.	.		.
.	.	.		.
.	.	.		.
y _n	x _{1n}	x _{2n}		x _{kn}

En la tabla se aprecia que para cada combinación de valores de las variables regresoras, (x_{1i}, \dots, x_{ki}) se observa un valor de la variable dependiente, y_i .

En términos de los datos, el modelo de regresión lineal múltiple puede escribirse de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_{ji} X_{ji} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(ecuación 2)

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ji} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Para estimar los valores de β_0, \dots , se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, la cual se denota mediante notación matricial:

1.1 SENSIBILIDAD DEL MODELO.

Para evaluar la sensibilidad del modelo de regresión se distinguen tres procedimientos, los cuales corresponden a la prueba de hipótesis, la calidad de ajuste y el análisis gráfico:

1.1.1 Prueba de hipótesis en regresión lineal múltiple. Las pruebas de hipótesis sobre los parámetros del modelo permite evaluar la contribución de los parámetros en el modelo, es decir verificar que hay una relación significativa entre la variable dependiente y las independientes. El procedimiento consiste en suponer una distribución de probabilidad para el término error ε_i , que generalmente asume distribución normal.

La hipótesis global más importante sobre un modelo de regresión múltiple es probar los valores de los coeficientes de las variables independientes para verificar la influencia de cada una sobre la variable dependiente:

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_A = \beta_j \neq 0 \text{ para al menos un } j = 1, 2, \dots, k$$

Al utilizar como criterio de rechazo la comparación de la significancia observada (P-valor) contra la significancia predefinida (α), se rechaza H_0 , si el P-valor es

menor que α (donde $\alpha = 0,05$). Los resultados de ésta prueba en la tabla denominada “Análisis de regresión del modelo”.

1.1.2 Análisis de varianza. Es un enfoque que consiste en analizar la significancia del modelo descomponiendo la variabilidad observada y a partir de ellos probar hipótesis. La variabilidad observada corresponde a aquella que se explica por el modelo (*suma cuadrada de la regresión, SC_R*) y la que no se explica por el modelo de regresión (*la suma cuadrada del error, SC_E*). El procedimiento se resume en la tabla de análisis de varianza.

Utilizando como criterio de rechazo de la prueba de hipótesis la comparación de la significancia observada (valor p) contra la significancia predefinida (α), se rechaza H_0 , si el valor p es menor que α . El valor de α es 0,05. Los resultados de ésta prueba se presentan en la tabla denominada resumen denominada “Análisis de varianza”. Con la varianza se obtiene una visión global pero no se puede distinguir los posibles factores que influyen o pueden influir en el proceso.

La validez del análisis de varianza está supeditada al cumplimiento de algunos requisitos. Se dice que el ANOVA es apto para comparar efectos de un fenómeno si los datos experimentales se ajustan al modelo, es decir, si las condiciones subyacentes al modelo están implícitas en los datos. Estas condiciones, que se denominan supuestos, y están constituidos por tres premisas:

- Independencia en los errores
- Distribución normal de los errores
- Homogeneidad de las varianzas de los tratamientos
- Aditividad o linealidad en los parámetros del modelo

1.1.3 Calidad de ajuste en regresión lineal múltiple. Es un procedimiento que se realiza para confirmar que el modelo permite hacer estimaciones con una

precisión aceptable. Así por ejemplo, explica que tanta de la variabilidad presente en la variable dependiente se explica por el modelo y si se cumplen los supuestos del residuo. La calidad de ajuste en la regresión se realiza mediante el análisis de los siguiente factores:

- **Coefficiente de determinación R^2 .** El que un modelo sea significativo no necesariamente implica que sea bueno en términos de que explique la variación de los datos. Por ello es importante tener mediciones adicionales a la calidad de ajuste del modelo, como las gráficas de residuales y el coeficiente de determinación. Con la información presentada en la tabla de análisis de varianza se puede calcular el coeficiente de determinación, R^2 y el coeficiente de determinación ajustado, R_{aj}^2

Coefficiente de correlación múltiple. Es la raíz cuadrada del coeficiente de determinación R^2 . Mide la intensidad de la relación entre la variable dependiente y el conjunto de variables regresoras ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$).

Coefficientes de derterminación R^2 y R_{aj}^2 . Son estadísticos útiles para medir la calidad global del modelo de regresión múltiple, dado que comparan la variabilidad explicada por el modelo frente a la variación total. El R_{aj}^2 es el término más adecuado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes.

es la relación que existe entre la suma de cuadrados de la regresión y la suma de cuadrados de la variable independiente. Este coeficiente puede interpretarse como un indicador de la proporción de la variabilidad total de la variable independiente que se debe al efecto de los factores analizados. Este valor por lo general se da en porcentaje, al multiplicar el coeficiente por 100.

- **Error estándar de estimación.** Es una estimación de la desviación estándar del error. En la medida que el modelo ajuste mejor la suma de los cuadrados del error SC_E será menor y en consecuencia el error estándar de estimación también será menor.

- **Media del error absoluto (*mae*).** Proporciona la media del valor absoluto de los residuos. Mientras mejor sea el ajuste los residuos serán más pequeños, y en consecuencia *mae* tenderá a ser pequeña.

- **Prueba de Durbin Watson:** Permite detectar autocorrelación entre los residuos. Cuando los residuos sucesivos están correlacionados positivamente el valor se aproximará a cero. Si los residuos no se correlacionan el valor se acercará a 2. Si los residuos se correlacionan de manera negativa el valor será mayor a 2 e incluso podría aproximarse a su valor máximo de 4.

1.1.4 Análisis gráfico de los residuos. El análisis gráfico de los residuos, que ofrece información adicional sobre la calidad del modelo ajustado. Con éste propósito se construyen las graficas de: a) probabilidad normal, b) residuos contra predichos o valores del término dependiente calculado y c). gráfica de residuos vs. cada una de las variables independientes o regresoras. La interpretación de las gráficas es la siguiente:

Gráfica de probabilidad normal. Con ella se verifica que los residuos siguen una distribución normal.

Gráfica de residuos vs. Predichos. Permite verificar el supuesto de varianza constante de los residuos. Si los puntos de la gráfica se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, se cumple el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza.

Gráfica de los factores independientes vs. Residuos. Permiten verificar el supuesto de la varianza constante, lo cual se comprueba gráficamente por que la amplitud de la dispersión de los puntos en cada nivel del factor tiende a ser similar. En la interpretación de ésta gráfica debe considerarse que diferencias pequeñas en estadística por lo general no son diferencias significativas, y también debe tenerse en cuenta la cantidad de observaciones, puesto que puede impactar la dispersión aparente.

Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de la banda horizontal, el supuesto se está cumpliendo. Si se detecta una tendencia o patrón no aleatorio claramente definido, es evidencia de que existe una correlación entre los errores y por lo tanto el supuesto de independencia no se cumple. Los resultados favorables que se evidencian en esta gráfica, explican de que se aplicó de forma correcta el principio de aleatorización o que conforme se fueron realizando las pruebas experimentales fueron apareciendo factores que afectaron la respuesta observada.

Anexo 3

Tablas de los valores de las variables de respuesta (rendimiento estándar) de las variables regresoras (CFC, CFE, CFC*CFE), y valor predicho de rendimiento estándar calculado con el modelo y del rendimiento aplicando el modelo generalizado

Tabla 1. Datos de los registros y variables empleadas en el MRAC de la especie arroz

Contador	Municipio	CFC	CFE	CFC X CFE	Rendimiento Real	Rendimiento real estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
1	MAHATES	58,83	29,66	1744,897	4,60	0,541	0,808	0,267
2	MARIA LA BAJA	58,83	29,66	1744,897	7,00	0,824	0,808	-0,016
3	MARIA LA BAJA	58,83	29,66	1744,897	7,00	0,824	0,808	-0,016
4	MARIA LA BAJA	58,83	29,66	1744,897	7,00	0,824	0,808	-0,016
5	MARIA LA BAJA	58,83	29,66	1744,897	7,00	0,824	0,811	-0,013
6	BELTRÁN	60,13	30,98	1862,372	7,00	0,824	0,788	-0,036
7	GIRARDOT	59,80	28,18	1684,865	6,50	0,765	0,793	0,028
8	GIRARDOT	59,80	28,79	1721,493	6,50	0,765	0,818	0,053
9	GIRARDOT	59,80	31,50	1883,7	6,50	0,765	0,847	0,082
10	NEIVA	59,80	34,56	2066,838	6,80	0,800	0,847	0,047
11	NEIVA	59,80	34,56	2066,838	6,90	0,812	0,824	0,012
12	NEIVA	59,80	32,11	1920,328	6,90	0,812	0,824	0,012
13	NEIVA	59,80	32,11	1920,328	6,80	0,800	0,847	0,047
14	NEIVA	59,80	34,56	2066,838	6,90	0,812	0,847	0,035
15	NEIVA	59,80	34,56	2066,838	6,80	0,800	0,839	0,039
16	NEIVA	59,80	33,78	2019,745	6,90	0,812	0,839	0,027
17	NEIVA	59,80	33,78	2019,745	6,80	0,800	0,839	0,039
18	NEIVA	59,80	33,78	2019,745	6,90	0,812	0,839	0,027
19	NEIVA	59,80	33,78	2019,745	6,80	0,800	0,834	0,034
20	NEIVA	59,80	33,16	1983,118	6,90	0,812	0,834	0,022
21	NEIVA	59,80	33,16	1983,118	6,80	0,800	0,841	0,041
22	NEIVA	59,80	33,95	2030,21	6,80	0,800	0,841	0,041
23	NEIVA	59,80	33,95	2030,21	6,90	0,812	0,847	0,035
24	NEIVA	59,80	34,56	2066,838	6,80	0,800	0,847	0,047
25	NEIVA	59,80	34,56	2066,838	6,90	0,812	0,828	0,016
26	AGRADO	60,13	32,81	1972,852	7,50	0,883	0,828	-0,055
27	AGRADO	60,13	32,81	1972,852	7,50	0,883	0,822	-0,061
28	AGRADO	60,13	32,20	1936,025	7,50	0,883	0,822	-0,061
29	AGRADO	60,13	32,20	1936,025	7,50	0,883	0,833	-0,050
30	AGRADO	60,13	33,43	2009,678	7,50	0,883	0,830	-0,053
31	AGRADO	59,80	32,81	1962,188	7,50	0,883	0,833	-0,050
32	AGRADO	60,13	33,43	2009,678	7,50	0,883	0,845	-0,038
33	AÍPE	59,80	34,39	2056,373	6,50	0,765	0,821	0,056
34	AÍPE	60,13	32,03	1925,503	6,50	0,765	0,832	0,067
35	AÍPE	60,13	33,25	1999,156	6,50	0,765	0,819	0,054
36	AÍPE	60,13	31,85	1914,981	6,50	0,765	0,826	0,061
37	AÍPE	60,13	32,64	1962,33	6,50	0,765	0,809	0,044
38	AÍPE	60,13	30,80	1851,85	6,50	0,765	0,796	0,031
39	ALTAMIRA	60,13	29,31	1762,414	7,51	0,884	0,807	-0,077
40	ALTAMIRA	60,13	30,54	1836,067	7,51	0,884	0,848	-0,036
41	CAMPOALEGRE	58,83	33,78	1986,814	7,26	0,855	0,832	-0,023
42	CAMPOALEGRE	58,83	32,11	1889,018	7,26	0,855	0,842	-0,013
43	CAMPOALEGRE	58,83	33,16	1950,784	7,26	0,855	0,839	-0,016

44	CAMPOALEGRE	59,80	33,78	2019,745	7,26	0,855	0,820	-0,035
45	CAMPOALEGRE	59,80	31,68	1894,165	7,26	0,855	0,834	-0,021
46	CAMPOALEGRE	59,80	33,16	1983,118	7,26	0,855	0,807	-0,048
47	GARZÓN	60,13	30,54	1836,067	6,90	0,812	0,835	0,023
48	GARZÓN	60,13	33,60	2020,2	6,90	0,812	0,828	0,016
49	GARZÓN	60,13	32,81	1972,852	6,90	0,812	0,822	0,010
50	GARZÓN	60,13	32,20	1936,025	6,90	0,812	0,822	0,010
51	GARZÓN	60,13	32,20	1936,025	6,90	0,812	0,822	0,010
52	GARZÓN	60,13	32,20	1936,025	6,90	0,812	0,806	-0,006
53	GIGANTE	60,13	30,45	1830,806	7,00	0,824	0,832	0,008
54	GIGANTE	60,13	33,25	1999,156	7,00	0,824	0,788	-0,036
55	GIGANTE	60,13	28,44	1709,805	7,00	0,824	0,847	0,023
56	HOBO	60,13	35,00	2104,375	7,50	0,883	0,806	-0,077
57	PAICOL	60,13	30,45	1830,806	6,90	0,812	0,804	-0,008
58	PAICOL	60,13	30,19	1815,023	6,90	0,812	0,822	0,010
59	PAICOL	60,13	32,20	1936,025	6,90	0,812	0,817	0,005
60	PAICOL	60,13	31,68	1904,459	6,90	0,812	0,832	0,020
61	PAICOL	60,13	33,25	1999,156	6,90	0,812	0,828	0,016
62	PAICOL	60,13	32,81	1972,852	6,90	0,812	0,822	0,010
63	PAICOL	60,13	32,20	1936,025	6,90	0,812	0,840	0,028
64	PALERMO	58,83	32,90	1935,343	7,00	0,824	0,839	0,015
65	PALERMO	59,80	33,78	2019,745	7,00	0,824	0,829	0,005
66	PALERMO	59,80	32,64	1951,723	7,00	0,824	0,837	0,013
67	RIVERA	59,80	33,51	2004,048	6,80	0,800	0,830	0,030
68	RIVERA	59,80	32,81	1962,188	6,80	0,800	0,831	0,031
69	RIVERA	60,13	33,16	1993,895	6,80	0,800	0,806	0,006
70	TESALIA	60,13	30,45	1830,806	7,53	0,886	0,813	-0,073
71	TESALIA	60,13	31,15	1872,894	7,53	0,886	0,820	-0,066
72	TESALIA	60,13	31,94	1920,242	7,53	0,886	0,822	-0,064
73	TESALIA	60,13	32,20	1936,025	7,53	0,886	0,809	-0,077
74	TESALIA	60,13	30,80	1851,85	7,53	0,886	0,823	-0,063
75	TELLO	60,13	32,29	1941,286	7,50	0,883	0,845	-0,038
76	TELLO	59,80	34,39	2056,373	7,50	0,883	0,830	-0,053
77	TELLO	59,80	32,81	1962,188	7,50	0,883	0,831	-0,052
78	VILLAVIEJA	59,80	32,90	1967,42	6,80	0,800	0,825	0,025
79	VILLAVIEJA	60,13	32,46	1951,808	6,80	0,800	0,832	0,032
80	VILLAVIEJA	60,13	33,25	1999,156	6,80	0,800	0,826	0,026
81	VILLAVIEJA	60,13	32,64	1962,33	6,80	0,800	0,847	0,047
82	VILLAVIEJA	60,13	35,00	2104,375	6,80	0,800	0,832	0,032
83	VILLAVIEJA	60,13	33,25	1999,156	6,80	0,800	0,826	0,026
84	VILLAVIEJA	60,13	32,64	1962,33	6,80	0,800	0,844	0,044
85	VILLAVIEJA	60,13	34,56	2078,07	6,80	0,800	0,842	0,042
86	VILLAVIEJA	60,13	34,39	2067,548	6,80	0,800	0,829	0,029
87	YAGUARA	59,80	32,64	1951,723	7,00	0,824	0,778	-0,046
88	CÚCUTA	60,13	30,80	1851,85	5,85	0,689	0,784	0,095

89	CÚCUTA	57,20	32,29	1846,845	5,85	0,689	0,778	0,089
90	CÚCUTA	56,55	31,68	1791,221	5,85	0,689	0,784	0,095
91	CÚCUTA	59,48	33,25	1977,544	5,85	0,689	0,796	0,107
92	CÚCUTA	57,20	29,93	1711,71	5,85	0,689	0,784	0,095
93	CÚCUTA	65,00	31,68	2058,875	5,85	0,689	0,784	0,095
94	CÚCUTA	65,00	32,46	2110,063	5,85	0,689	0,809	0,120
95	CÚCUTA	65,00	31,68	2058,875	5,85	0,689	0,809	0,120
96	EL ZULIA	60,13	32,03	1925,503	6,07	0,714	0,792	0,078
97	EL ZULIA	64,35	31,68	2038,286	6,07	0,714	0,836	0,122
98	EL ZULIA	64,35	33,51	2156,529	6,07	0,714	0,813	0,099
99	EL ZULIA	64,35	31,68	2038,286	6,07	0,714	0,807	0,093
100	EL ZULIA	64,35	31,68	2038,286	6,07	0,714	0,817	0,103
101	LOS PATIOS	60,13	30,80	1851,85	6,38	0,751	0,836	0,085
102	LOS PATIOS	60,13	30,80	1851,85	6,38	0,751	0,821	0,070
103	LOS PATIOS	57,20	32,29	1846,845	6,38	0,751	0,821	0,070
104	SAN CAYETAN	59,48	31,85	1894,279	6,16	0,725	0,808	0,083
105	RIONEGRO	65,00	34,21	2223,813	8,00	0,942	0,794	-0,148
106	RIONEGRO	65,00	33,43	2172,625	8,00	0,942	0,823	-0,119
107	RIONEGRO	65,00	33,78	2195,375	8,00	0,942	0,801	-0,141
108	SABANA DE TE	65,00	33,78	2195,375	5,59	0,657	0,805	0,148
109	IBAGUÉ	60,13	33,78	2030,722	7,76	0,913	0,816	-0,097
110	ALVARADO	60,13	31,24	1878,155	7,76	0,913	0,788	-0,125
111	AMBALEMA	60,13	33,78	2030,722	7,44	0,876	0,820	-0,056
112	AMBALEMA	60,13	31,15	1872,894	7,44	0,876	0,837	-0,039
113	AMBALEMA	60,13	30,54	1836,067	7,44	0,876	0,837	-0,039
114	AMBALEMA	60,13	31,59	1899,198	7,44	0,876	0,841	-0,035
115	AMBALEMA	60,13	33,78	2030,722	7,44	0,876	0,836	-0,040
116	AMBALEMA	60,13	32,03	1925,503	7,44	0,876	0,836	-0,040
117	GUAYABAL(A	60,13	32,11	1930,764	6,47	0,762	0,836	0,074
118	COELLO	59,80	30,36	1815,678	7,11	0,837	0,821	-0,016
119	COELLO	59,80	28,88	1726,725	7,11	0,837	0,839	0,002
120	COELLO	59,80	32,03	1915,095	7,11	0,837	0,818	-0,019
121	COELLO	59,80	29,66	1773,818	7,11	0,837	0,831	-0,006
122	COELLO	59,80	30,10	1799,98	7,11	0,837	0,839	0,002
123	COELLO	59,80	31,24	1868,003	7,11	0,837	0,836	-0,001
124	COELLO	59,80	28,26	1690,098	7,11	0,837	0,836	-0,001
125	COYAIMA	59,80	31,68	1894,165	6,79	0,799	0,817	0,018
126	COYAIMA	59,80	33,51	2004,048	6,79	0,799	0,832	0,033
127	COYAIMA	59,80	33,51	2004,048	6,79	0,799	0,832	0,033
128	COYAIMA	60,13	34,30	2062,288	6,79	0,799	0,832	0,033
129	COYAIMA	60,13	33,78	2030,722	6,79	0,799	0,851	0,052
130	COYAIMA	60,13	33,78	2030,722	6,79	0,799	0,841	0,042
131	COYAIMA	60,13	33,78	2030,722	6,79	0,799	0,812	0,013
132	COYAIMA	60,13	32,11	1930,764	6,79	0,799	0,825	0,026
133	ESPINAL	59,80	33,78	2019,745	8,26	0,973	0,828	-0,145
134	FLANDES	59,80	33,78	2019,745	7,18	0,845	0,828	-0,017
135	FLANDES	59,80	31,50	1883,7	7,18	0,845	0,811	-0,034
136	GUAMO	60,13	33,16	1993,895	7,25	0,853	0,821	-0,032
137	GUAMO	59,80	33,78	2019,745	7,25	0,853	0,821	-0,032

Tabla 4. Datos de los registros y variables empleadas en el MRAC de la especie caña de panela

Contador	Municipio	CFC	CFE	CFC X CFE	Rendimiento Real	Rendimiento real estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
1	ANGOSTURA	60,288	30,783	1855,800	41,606	0,284	0,264	-0,020
2	ANGOSTURA	61,750	31,325	1934,319	41,606	0,284	0,262	-0,022
3	ANGOSTURA	60,288	29,750	1793,553	41,606	0,284	0,272	-0,012
4	ANORÍ	60,288	31,238	1883,231	38,090	0,260	0,261	0,001
5	ANORÍ	61,750	28,613	1766,822	41,753	0,285	0,283	-0,002
6	CAMPAMENTO	65,000	33,075	2149,875	39,995	0,273	0,252	-0,021
7	GUADALUPE	65,000	32,095	2086,175	35,014	0,239	0,260	0,021
8	SANROQUE	60,288	32,200	1941,258	29,886	0,204	0,254	0,050
9	SANROQUE	65,000	29,225	1899,625	38,237	0,261	0,284	0,023
10	SANTO DOMIN	65,000	28,613	1859,813	38,237	0,261	0,289	0,028
11	VEGACHÍ	61,750	29,663	1831,659	38,237	0,261	0,275	0,014
12	YALÍ	65,000	31,395	2040,675	38,237	0,261	0,266	0,005
13	YARUMAL	60,288	31,150	1877,956	41,606	0,284	0,261	-0,023
14	YOLOMBO	58,338	31,395	1831,506	41,606	0,284	0,257	-0,027
15	YOLOMBO	61,588	31,395	1933,540	35,014	0,239	0,261	0,022
16	YOLOMBO	63,050	32,288	2035,727	41,460	0,283	0,256	-0,027
17	YOLOMBO	56,713	30,520	1730,866	41,460	0,283	0,260	-0,023
18	YOLOMBO	63,050	32,725	2063,311	41,460	0,283	0,253	-0,030
19	YOLOMBO	56,713	30,100	1707,046	41,460	0,283	0,263	-0,020
20	CHITARAQUE	65,000	31,150	2024,750	41,460	0,283	0,268	-0,015
21	MONQUIRÁ	58,663	30,363	1781,140	41,460	0,283	0,264	-0,019
22	MONQUIRÁ	65,000	31,238	2030,438	41,460	0,283	0,267	-0,016
23	SAN JOSÉ DE F	63,050	32,008	2018,073	37,504	0,256	0,258	0,002
24	SANTAÑA	63,050	29,488	1859,187	37,504	0,256	0,279	0,023
25	TOGÜÍ	63,050	31,675	1997,109	35,014	0,239	0,261	0,022
26	MARQUETALIA	61,588	31,150	1918,451	35,014	0,239	0,263	0,024
27	MARQUETALIA	63,050	31,150	1964,008	36,625	0,250	0,265	0,015
28	MARQUETALIA	63,050	28,875	1820,569	36,625	0,250	0,283	0,033
29	VICTORIA	65,000	31,500	2047,500	36,625	0,250	0,265	0,015
30	GONZÁLEZ	63,050	33,338	2101,929	37,065	0,253	0,248	-0,005
31	ALBÁN	56,713	28,683	1626,656	35,746	0,244	0,272	0,028
32	BITUIMA	56,713	31,395	1780,489	35,746	0,244	0,254	0,010
33	CAPARRAPÍ	63,050	29,925	1886,771	35,746	0,244	0,275	0,031
34	CAPARRAPÍ	61,588	31,150	1918,451	34,867	0,238	0,263	0,025
35	CAPARRAPÍ	61,588	33,775	2080,118	34,867	0,238	0,243	0,005
36	CAPARRAPÍ	63,050	31,150	1964,008	36,039	0,246	0,265	0,019
37	CAPARRAPÍ	61,588	31,395	1933,540	41,606	0,284	0,261	-0,023
38	CAPARRAPÍ	61,588	30,958	1906,595	41,606	0,284	0,265	-0,019
39	CAPARRAPÍ	61,588	31,150	1918,451	41,606	0,284	0,263	-0,021
40	CAPARRAPÍ	63,050	31,150	1964,008	40,141	0,274	0,265	-0,009
41	GUADUAS	56,713	28,000	1587,950	40,141	0,274	0,277	0,003
42	GUADUAS	56,713	28,000	1587,950	40,141	0,274	0,277	0,003
43	GUA Y ABALDI	61,588	31,920	1965,873	43,804	0,299	0,257	-0,042
44	GUA Y ABALDI	62,563	30,170	1887,511	36,332	0,248	0,272	0,024

45	LA PALMA	62,563	31,675	1981,667	36,625	0,250	0,260	0,010
46	LA PALMA	56,225	31,150	1751,409	36,625	0,250	0,255	0,005
47	LA PALMA	62,563	32,725	2047,358	36,625	0,250	0,252	0,002
48	LA PEÑA	62,563	31,150	1948,822	36,625	0,250	0,265	0,015
49	NIMAIMA	62,563	29,925	1872,183	36,625	0,250	0,274	0,024
50	NIMAIMA	62,563	30,870	1931,304	36,625	0,250	0,267	0,017
51	NIMAIMA	62,563	28,875	1806,492	36,625	0,250	0,282	0,032
52	NOCAIMA	64,513	31,150	2009,564	36,625	0,250	0,267	0,017
53	NOCAIMA	58,175	33,338	1939,409	36,625	0,250	0,243	-0,007
54	QUEBRADA\NE	56,225	33,775	1898,999	28,275	0,193	0,238	0,045
55	SASAIMA	65,000	28,700	1865,500	41,606	0,284	0,289	0,005
56	SASAIMA	65,000	30,870	2006,550	41,606	0,284	0,271	-0,013
57	SASAIMA	63,050	26,425	1666,096	52,594	0,359	0,303	-0,056
58	SASAIMA	64,513	32,725	2111,172	38,090	0,260	0,254	-0,006
59	ÚTICA	64,513	33,775	2178,910	38,090	0,260	0,246	-0,014
60	ÚTICA	65,000	30,975	2013,375	38,090	0,260	0,270	0,010
61	ÚTICA	62,563	32,533	2035,315	33,256	0,227	0,254	0,027
62	VIANI	64,513	32,008	2064,884	33,256	0,227	0,260	0,033
63	VIANI	63,050	31,395	1979,455	33,256	0,227	0,263	0,036
64	VILLETA	65,000	31,675	2058,875	33,256	0,227	0,264	0,037
65	YACOPI	65,000	28,438	1848,438	41,606	0,284	0,291	0,007
66	YACOPI	63,538	30,958	1966,962	41,606	0,284	0,268	-0,016
67	YACOPI	63,538	31,658	2011,438	41,606	0,284	0,262	-0,022
68	AÍPE	63,050	31,763	2002,626	41,606	0,284	0,260	-0,024
69	ISNOS	65,000	32,200	2093,000	41,606	0,284	0,259	-0,025
70	ISNOS	65,000	30,713	1996,313	41,606	0,284	0,272	-0,012
71	ISNOS	63,538	29,750	1890,241	41,606	0,284	0,277	-0,007
72	SANAGUSTIN	63,538	31,675	2012,550	41,606	0,284	0,262	-0,022
73	SANAGUSTIN	63,050	32,288	2035,727	33,256	0,227	0,256	0,029
74	CONSACA	62,563	31,675	1981,667	33,256	0,227	0,260	0,033
75	EL\PEÑOL	65,000	32,288	2098,688	39,262	0,268	0,259	-0,009
76	EL\PEÑOL	62,563	32,725	2047,358	49,957	0,341	0,252	-0,089
77	EL TAMBO	62,563	29,120	1821,820	49,957	0,341	0,281	-0,060
78	EL TAMBO	63,050	28,875	1820,569	49,957	0,341	0,283	-0,058

Tabla 5. Datos de los registros y variables empleadas en el MRAC de la especie palma de aceite

Contador	Municipio	CFC	CFE	CFC X CFE	Rendimiento Real	Rendimiento real estandarizado	Rendimiento estandarizado calculado	Residual
1	CANTAGALLO	64,35	26,43	1700,449	13,884	0,600	0,643	0,043
2	MARIA\LA BAJA	60,45	33,08	1999,384	8,678	0,375	0,654	0,279
3	BELÉN DE LOS ANDAQUÍ	62,73	33,08	2074,629	6,757	0,292	0,590	0,298
4	VALLEDUPAR	61,10	33,51	2047,614	16,869	0,729	0,630	-0,099
5	VALLEDUPAR	49,40	30,71	1517,198	16,869	0,729	0,950	0,221
6	AGUACHICA	60,13	32,73	1967,591	19,276	0,833	0,666	-0,167
7	AGUSTÍN CODAZZI	61,10	33,51	2047,614	9,649	0,417	0,630	0,213
8	AGUSTÍN CODAZZI	61,10	32,64	1994,151	9,649	0,417	0,640	0,223
9	AGUSTÍN CODAZZI	61,10	33,16	2026,229	9,649	0,417	0,634	0,217
10	AGUSTÍN CODAZZI	61,10	32,64	1994,151	9,649	0,417	0,640	0,223
11	BECERRIL	61,10	30,63	1871,188	16,869	0,729	0,661	-0,068
12	BECERRIL	61,10	33,51	2047,614	16,869	0,729	0,630	-0,099
13	BOSCONIA	61,10	33,51	2047,614	17,841	0,771	0,630	-0,141
14	BOSCONIA	61,10	33,51	2047,614	17,841	0,771	0,630	-0,141
15	BOSCONIA	61,10	35,00	2138,500	17,841	0,771	0,615	-0,156
16	BOSCONIA	61,10	34,48	2106,423	17,841	0,771	0,621	-0,150
17	EL COPEY	60,45	34,48	2084,014	16,545	0,715	0,640	-0,075
18	LA JAGUA DE IBIRICO	61,10	32,55	1988,805	15,434	0,667	0,641	-0,026
19	LA JAGUA DE IBIRICO	61,10	30,10	1839,110	15,434	0,667	0,666	-0,001
20	RÍO DE ORO	60,13	32,73	1967,591	18,327	0,792	0,666	-0,126
21	LA PAZ	61,10	33,51	2047,614	17,355	0,750	0,630	-0,120
22	LA PAZ	60,45	30,19	1824,834	17,355	0,750	0,681	-0,069
23	SAN ALBERTO	63,70	33,25	2118,025	18,327	0,792	0,560	-0,232
24	SAN ALBERTO	63,70	30,19	1922,944	18,327	0,792	0,603	-0,189
25	SAN DIEGO	61,10	33,95	2074,345	17,355	0,750	0,626	-0,124
26	SAN DIEGO	60,45	33,16	2004,673	17,355	0,750	0,652	-0,098
27	SAN MARTÍN	63,70	32,20	2051,140	12,542	0,542	0,575	0,033
28	SAN MARTÍN	60,13	32,64	1962,330	12,542	0,542	0,667	0,125
29	SAN MARTÍN	63,70	33,51	2134,746	12,542	0,542	0,556	0,014
30	SAN MARTÍN	60,13	33,08	1988,634	12,542	0,542	0,663	0,121
31	SAN MARTÍN	60,13	32,73	1967,591	12,542	0,542	0,666	0,124
32	PARATEBUENO	62,73	25,99	1630,066	20,733	0,896	0,680	-0,216
33	PARATEBUENO	62,73	28,70	1800,208	20,733	0,896	0,645	-0,251
34	PARATEBUENO	62,73	28,79	1805,696	20,733	0,896	0,644	-0,252
35	PARATEBUENO	62,73	25,81	1619,089	20,733	0,896	0,682	-0,214
36	RIOHACHA	61,10	32,99	2015,536	7,706	0,333	0,636	0,303
37	RIOHACHA	61,10	33,43	2042,268	7,706	0,333	0,632	0,299
38	DIBULLA	61,10	33,43	2042,268	14,463	0,625	0,632	0,007
39	ALGARROBO	60,45	34,48	2084,014	16,869	0,729	0,640	-0,089
40	ALGARROBO	60,45	34,04	2057,567	16,869	0,729	0,644	-0,085
41	ARACATACA	60,45	33,08	1999,384	15,735	0,680	0,654	-0,026
42	EL DIFÍCIL (ARIGUANÍ)	61,10	34,48	2106,423	16,869	0,729	0,621	-0,108
43	EL RETÉN	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	-0,075
44	FUNDACIÓN	60,45	32,20	1946,490	16,707	0,722	0,662	-0,060
45	FUNDACIÓN	60,45	34,13	2062,856	16,707	0,722	0,644	-0,078

46	FUNDACIÓN	60,45	33,60	2031,120	16,707	0,722	0,648	-0,074
47	PIVUJAY	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	-0,071
48	PUEBLOVIEJO	60,45	33,51	2025,831	16,383	0,708	0,649	-0,059
49	SAMÁNGEL	60,45	34,04	2057,567	16,869	0,729	0,644	-0,085
50	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,60	2031,120	16,869	0,729	0,648	-0,081
51	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	-0,075
52	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	-0,071
53	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	-0,071
54	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	-0,075
55	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	-0,071
56	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	-0,075
57	VILLA VICENCIO	64,03	26,43	1691,861	14,463	0,625	0,649	0,024
58	VILLA VICENCIO	63,70	33,08	2106,878	14,463	0,625	0,563	-0,062
59	VILLA VICENCIO	62,73	33,08	2074,629	14,463	0,625	0,590	-0,035
60	ACACIAS	63,70	33,51	2134,746	12,056	0,521	0,556	0,035
61	ACACIAS	63,05	25,81	1627,478	12,056	0,521	0,676	0,155
62	ACACIAS	63,70	33,51	2134,746	12,056	0,521	0,556	0,035
63	ACACIAS	64,03	33,51	2145,638	12,056	0,521	0,547	0,026
64	ACACIAS	63,05	33,95	2140,548	12,056	0,521	0,569	0,048
65	ACACIAS	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,033
66	ACACIAS	64,03	32,20	2061,605	12,056	0,521	0,566	0,045
67	ACACIAS	63,05	33,08	2085,379	12,056	0,521	0,581	0,060
68	ACACIAS	63,70	28,70	1828,190	12,056	0,521	0,624	0,103
69	ACACIAS	63,05	32,20	2030,210	12,056	0,521	0,592	0,071
70	ACACIAS	63,05	33,08	2085,379	12,056	0,521	0,581	0,060
71	BARRANCA DE UPIA	64,35	33,08	2128,376	14,463	0,625	0,545	-0,080
72	CABUYARO	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,033
73	CABUYARO	64,03	32,20	2061,605	12,056	0,521	0,566	0,045
74	CABUYARO	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,033
75	CABUYARO	64,35	29,23	1880,629	12,056	0,521	0,602	0,081
76	CABUYARO	64,35	28,79	1852,476	12,056	0,521	0,608	0,087
77	CABUYARO	64,35	30,63	1970,719	12,056	0,521	0,581	0,060
78	CABUYARO	64,35	29,23	1880,629	12,056	0,521	0,602	0,081
79	CASTILLA LA NUEVA	64,03	26,43	1691,861	12,056	0,521	0,649	0,128
80	CASTILLA LA NUEVA	63,70	33,08	2106,878	12,056	0,521	0,563	0,042
81	CASTILLA LA NUEVA	64,03	28,70	1837,518	12,056	0,521	0,616	0,095
82	CASTILLA LA NUEVA	63,70	31,06	1978,681	12,056	0,521	0,590	0,069
83	CASTILLA LA NUEVA	64,03	32,64	2089,616	12,056	0,521	0,560	0,039
84	CUMARAL	62,73	33,51	2102,072	11,084	0,479	0,584	0,105
85	CUMARAL	63,70	33,51	2134,746	11,084	0,479	0,556	0,077
86	CUMARAL	62,73	25,99	1630,066	11,084	0,479	0,680	0,201
87	CUMARAL	62,73	32,20	2019,745	11,084	0,479	0,601	0,122

88	FUENTE DE ORO	64,35	33,08	2128,376	12,056	0,521	0,545	0,024
89	GRANADA	64,35	28,18	1813,061	12,056	0,521	0,617	0,096
90	GRANADA	64,35	23,54	1514,638	12,056	0,521	0,686	0,165
91	GRANADA	64,35	25,99	1672,296	12,056	0,521	0,650	0,129
92	GRANADA	64,35	28,26	1818,692	12,056	0,521	0,615	0,094
93	PUERTO LÓPEZ	64,03	25,55	1635,839	12,056	0,521	0,662	0,141
94	PUERTO LÓPEZ	63,70	28,26	1800,321	12,056	0,521	0,629	0,108
95	PUERTOLLERAS	64,35	28,26	1818,692	9,649	0,417	0,615	0,198
96	PUERTOLLERAS	64,35	33,51	2156,529	9,649	0,417	0,538	0,121
97	RESTREPO	62,73	28,70	1800,208	12,056	0,521	0,645	0,124
98	RESTREPO	63,70	28,70	1828,190	12,056	0,521	0,624	0,103
99	SAN CARLOS DE GUAROA	64,35	25,99	1672,296	15,434	0,667	0,650	-0,017
100	SAN CARLOS DE GUAROA	64,03	33,08	2117,627	15,434	0,667	0,554	-0,113
101	SAN CARLOS DE GUAROA	63,70	33,51	2134,746	15,434	0,667	0,556	-0,111
102	SAN CARLOS DE GUAROA	63,70	23,54	1499,339	15,434	0,667	0,696	0,029
103	SAN CARLOS DE GUAROA	63,70	33,08	2106,878	15,434	0,667	0,563	-0,104
104	SAN CARLOS DE GUAROA	64,03	28,26	1809,507	15,434	0,667	0,622	-0,045
105	SAN MARTÍN	64,35	33,51	2156,529	12,056	0,521	0,538	0,017
106	SAN MARTÍN	64,35	33,08	2128,376	12,056	0,521	0,545	0,024
107	SAN MARTÍN	64,35	32,99	2122,746	12,056	0,521	0,546	0,025
108	SAN MARTÍN	64,03	25,99	1663,850	12,056	0,521	0,656	0,135
109	SAN MARTÍN	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,033
110	SAN MARTÍN	64,35	28,18	1813,061	12,056	0,521	0,617	0,096
111	SAN MARTÍN	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,033
112	SAN MARTÍN	62,73	33,08	2074,629	12,056	0,521	0,590	0,069
113	TUMACO	62,40	33,08	2063,880	23,140	1,000	0,599	-0,401
114	TUMACO	63,38	29,75	1885,406	23,140	1,000	0,617	-0,383
115	TUMACO	62,40	33,25	2074,800	23,140	1,000	0,597	-0,403
116	EL ZULIA	63,38	33,95	2151,581	17,355	0,750	0,560	-0,190
117	LA ESPERANZA	63,70	32,73	2084,583	20,248	0,875	0,568	-0,307
118	TIBÚ	62,73	33,69	2113,048	3,864	0,167	0,582	0,415
119	TIBÚ	62,73	33,60	2107,560	3,864	0,167	0,583	0,416
120	TIBÚ	62,73	31,68	1986,814	3,864	0,167	0,608	0,441
121	TIBÚ	63,70	34,13	2173,763	3,864	0,167	0,548	0,381
122	TIBÚ	62,73	33,08	2074,629	3,864	0,167	0,590	0,423
123	BARRANCA BERMEJA	64,03	30,63	1960,766	20,479	0,885	0,589	-0,296
124	BARRANCA BERMEJA	64,03	26,43	1691,861	20,479	0,885	0,649	-0,236
125	BARRANCA BERMEJA	64,03	26,43	1691,861	20,479	0,885	0,649	-0,236
126	BARRANCA BERMEJA	64,03	23,98	1534,999	20,479	0,885	0,685	-0,200
127	BARRANCA BERMEJA	64,03	26,43	1691,861	20,479	0,885	0,649	-0,236
128	PUERTO WILCHES	64,03	26,08	1669,452	18,859	0,815	0,655	-0,160
129	PUERTO WILCHES	64,03	33,08	2117,627	18,859	0,815	0,554	-0,261
130	PUERTO WILCHES	60,13	26,43	1588,803	18,859	0,815	0,724	-0,091
131	RIONEGRO	63,70	33,25	2118,025	18,327	0,792	0,560	-0,232
132	SABANA DE TORRES	64,03	28,70	1837,518	15,157	0,655	0,616	-0,039
133	SABANA DE TORRES	64,03	26,25	1680,656	15,157	0,655	0,652	-0,003
134	SABANA DE TORRES	64,03	28,70	1837,518	15,157	0,655	0,616	-0,039
135	SABANA DE TORRES	64,03	27,83	1781,496	15,157	0,655	0,629	-0,026
136	SABANA DE TORRES	64,03	28,26	1809,507	15,157	0,655	0,622	-0,033
137	SAN VICENTE DE CHUCU	64,35	30,63	1970,719	16,383	0,708	0,581	-0,127
138	VILLA NUEVA	64,03	28,26	1809,507	8,863	0,383	0,622	0,239

44	FUNDACIÓN	60,45	32,20	1946,490	16,707	0,722	0,662	0,563
45	FUNDACIÓN	60,45	34,13	2062,856	16,707	0,722	0,644	0,562
46	FUNDACIÓN	60,45	33,60	2031,120	16,707	0,722	0,648	0,562
47	PIVJAY	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	0,563
48	PUEBLOVIEJO	60,45	33,51	2025,831	16,383	0,708	0,649	0,562
49	SANÁNGEL	60,45	34,04	2057,567	16,869	0,729	0,644	0,562
50	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,60	2031,120	16,869	0,729	0,648	0,562
51	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	0,563
52	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	0,563
53	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	0,563
54	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	0,563
55	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	32,55	1967,648	16,869	0,729	0,658	0,563
56	ZONA BANANERA (PRADO)	60,45	33,08	1999,384	16,869	0,729	0,654	0,563
57	VILLAVICENCIO	64,03	26,43	1691,861	14,463	0,625	0,649	0,538
58	VILLAVICENCIO	63,70	33,08	2106,878	14,463	0,625	0,563	0,520
59	VILLAVICENCIO	62,73	33,08	2074,629	14,463	0,625	0,590	0,533
60	ACACIAS	63,70	33,51	2134,746	12,056	0,521	0,556	0,518
61	ACACIAS	63,05	25,81	1627,478	12,056	0,521	0,676	0,548
62	ACACIAS	63,70	33,51	2134,746	12,056	0,521	0,556	0,518
63	ACACIAS	64,03	33,51	2145,638	12,056	0,521	0,547	0,513
64	ACACIAS	63,05	33,95	2140,548	12,056	0,521	0,569	0,526
65	ACACIAS	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,515
66	ACACIAS	64,03	32,20	2061,605	12,056	0,521	0,566	0,518
67	ACACIAS	63,05	33,08	2085,379	12,056	0,521	0,581	0,528
68	ACACIAS	63,70	28,70	1828,190	12,056	0,521	0,624	0,533
69	ACACIAS	63,05	32,20	2030,210	12,056	0,521	0,592	0,530
70	ACACIAS	63,05	33,08	2085,379	12,056	0,521	0,581	0,528
71	BARRANCA DE UPIÁ	64,35	33,08	2128,376	14,463	0,625	0,545	0,511
72	CABUYARO	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,515
73	CABUYARO	64,03	32,20	2061,605	12,056	0,521	0,566	0,518
74	CABUYARO	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,515
75	CABUYARO	64,35	29,23	1880,629	12,056	0,521	0,602	0,525
76	CABUYARO	64,35	28,79	1852,476	12,056	0,521	0,608	0,527
77	CABUYARO	64,35	30,63	1970,719	12,056	0,521	0,581	0,520
78	CABUYARO	64,35	29,23	1880,629	12,056	0,521	0,602	0,525
79	CASTILLA/LA NUEVA	64,03	26,43	1691,861	12,056	0,521	0,649	0,538
80	CASTILLA/LA NUEVA	63,70	33,08	2106,878	12,056	0,521	0,563	0,520
81	CASTILLA/LA NUEVA	64,03	28,70	1837,518	12,056	0,521	0,616	0,530
82	CASTILLA/LA NUEVA	63,70	31,06	1978,681	12,056	0,521	0,590	0,526
83	CASTILLA/LA NUEVA	64,03	32,64	2089,616	12,056	0,521	0,560	0,517
84	CUMARAL	62,73	33,51	2102,072	11,084	0,479	0,584	0,531
85	CUMARAL	63,70	33,51	2134,746	11,084	0,479	0,556	0,518
86	CUMARAL	62,73	25,99	1630,066	11,084	0,479	0,680	0,550
87	CUMARAL	62,73	32,20	2019,745	11,084	0,479	0,601	0,535

88	FUENTE DE ORO	64,35	33,08	2128,376	12,056	0,521	0,545	0,511
89	GRANADA	64,35	28,18	1813,061	12,056	0,521	0,617	0,529
90	GRANADA	64,35	23,54	1514,638	12,056	0,521	0,686	0,546
91	GRANADA	64,35	25,99	1672,296	12,056	0,521	0,650	0,537
92	GRANADA	64,35	28,26	1818,692	12,056	0,521	0,615	0,528
93	PUERTO LÓPEZ	64,03	25,55	1635,839	12,056	0,521	0,662	0,541
94	PUERTO LÓPEZ	63,70	28,26	1800,321	12,056	0,521	0,629	0,535
95	PUERTO LLERAS	64,35	28,26	1818,692	9,649	0,417	0,615	0,528
96	PUERTO LLERAS	64,35	33,51	2156,529	9,649	0,417	0,538	0,509
97	RESTREPO	62,73	28,70	1800,208	12,056	0,521	0,645	0,543
98	RESTREPO	63,70	28,70	1828,190	12,056	0,521	0,624	0,533
99	SAN CARLOS DE GUAROA	64,35	25,99	1672,296	15,434	0,667	0,650	0,537
100	SAN CARLOS DE GUAROA	64,03	33,08	2117,627	15,434	0,667	0,554	0,515
101	SAN CARLOS DE GUAROA	63,70	33,51	2134,746	15,434	0,667	0,556	0,518
102	SAN CARLOS DE GUAROA	63,70	23,54	1499,339	15,434	0,667	0,696	0,550
103	SAN CARLOS DE GUAROA	63,70	33,08	2106,878	15,434	0,667	0,563	0,520
104	SAN CARLOS DE GUAROA	64,03	28,26	1809,507	15,434	0,667	0,622	0,532
105	SAN MARTÍN	64,35	33,51	2156,529	12,056	0,521	0,538	0,509
106	SAN MARTÍN	64,35	33,08	2128,376	12,056	0,521	0,545	0,511
107	SAN MARTÍN	64,35	32,99	2122,746	12,056	0,521	0,546	0,511
108	SAN MARTÍN	64,03	25,99	1663,850	12,056	0,521	0,656	0,540
109	SAN MARTÍN	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,515
110	SAN MARTÍN	64,35	28,18	1813,061	12,056	0,521	0,617	0,529
111	SAN MARTÍN	64,03	33,08	2117,627	12,056	0,521	0,554	0,515
112	SAN MARTÍN	62,73	33,08	2074,629	12,056	0,521	0,590	0,533
113	TUMACO	62,40	33,08	2063,880	23,140	1,000	0,599	0,537
114	TUMACO	63,38	29,75	1885,406	23,140	1,000	0,617	0,534
115	TUMACO	62,40	33,25	2074,800	23,140	1,000	0,597	0,536
116	EL ZULIA	63,38	33,95	2151,581	17,355	0,750	0,560	0,521
117	LA ESPERANZA	63,70	32,73	2084,583	20,248	0,875	0,568	0,521
118	TIBÚ	62,73	33,69	2113,048	3,864	0,167	0,582	0,531
119	TIBÚ	62,73	33,60	2107,560	3,864	0,167	0,583	0,531
120	TIBÚ	62,73	31,68	1986,814	3,864	0,167	0,608	0,536
121	TIBÚ	63,70	34,13	2173,763	3,864	0,167	0,548	0,516
122	TIBÚ	62,73	33,08	2074,629	3,864	0,167	0,590	0,533
123	BARRANCA BERMEJA	64,03	30,63	1960,766	20,479	0,885	0,589	0,524
124	BARRANCA BERMEJA	64,03	26,43	1691,861	20,479	0,885	0,649	0,538
125	BARRANCA BERMEJA	64,03	26,43	1691,861	20,479	0,885	0,649	0,538
126	BARRANCA BERMEJA	64,03	23,98	1534,999	20,479	0,885	0,685	0,547
127	BARRANCA BERMEJA	64,03	26,43	1691,861	20,479	0,885	0,649	0,538
128	PUERTO WILCHES	64,03	26,08	1669,452	18,859	0,815	0,655	0,539
129	PUERTO WILCHES	64,03	33,08	2117,627	18,859	0,815	0,554	0,515
130	PUERTO WILCHES	60,13	26,43	1588,803	18,859	0,815	0,724	0,572
131	RIONEGRO	63,70	33,25	2118,025	18,327	0,792	0,560	0,519
132	SABANA DE TORRES	64,03	28,70	1837,518	15,157	0,655	0,616	0,530
133	SABANA DE TORRES	64,03	26,25	1680,656	15,157	0,655	0,652	0,539
134	SABANA DE TORRES	64,03	28,70	1837,518	15,157	0,655	0,616	0,530
135	SABANA DE TORRES	64,03	27,83	1781,496	15,157	0,655	0,629	0,533
136	SABANA DE TORRES	64,03	28,26	1809,507	15,157	0,655	0,622	0,532
137	SAN VICENTE DE CHUCU	64,35	30,63	1970,719	16,383	0,708	0,581	0,520
138	VILLANUEVA	64,03	28,26	1809,507	8,863	0,383	0,622	0,532

Anexo 4

Artículos en eventos académicos internacionales

ATLAS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN COLOMBIA

Humberto Escalante H.*, Ph.D. en Ingeniería Química; *Profesor Titular Escuela
Ingeniería Química UIS* escala@uis.edu.co

Janneth Orduz P.*, Estudiante Maestría Ingeniería Química, UIS
yorduz@uis.edu.co

Dionisio Laverde C., Ph.D. en Ingeniería Metalúrgica; COLCIENCIAS
dlaverde@colciencias.gov.co

Henry Josué Zapata, Físico; UPME henry.zapata@upme.gov.co

Luz Dary Yepes, Ing. Forestal; IDEAM luzdary@ideam.gov.co

*Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), Universidad
Industrial de Santander A.A. 678 Bucaramanga - Colombia.

Resumen

Se construyó un atlas que muestra en forma espacial el Potencial Energético (P.E.) de tres sectores generadores de Biomasa Residual BR, designados como Biomasa Residual Vegetal (BRV), Biomasa Residual Animal (BRA) y Biomasa de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos (BRSOU). Para calcular el PE se desarrollaron modelos matemáticos en función de la *masa residual* y el *contenido energético*. Mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfico – SIG, se llevó a cabo el proceso de generación de los mapas de Colombia a escala 1:500.000 para representar espacialmente a nivel municipal, departamental y nacional la localización de las fuentes de BR, la cantidad de BR, el PE y la densidad del PE. Se presenta una síntesis del proceso de construcción del Atlas, describiendo las principales etapas metodológicas como fueron la definición de la muestra representativa, la cuantificación y caracterización fisicoquímica y bacteriológica de la BR, la definición de los modelos matemáticos para cuantificar el PE y la descripción del SIG.

Palabras Clave: Atlas, Potencial, Energía, Biomasa Residual, SIG.

Abstract

There is a atlas that shows by a special way the Energy Potential P.E. from three generating sectors of Residual Biomass BR, designated Vegetal Residual Biomass

BRV, Animal Residual Biomass BRA and Urban Solid Waste Organics Biomass BRYOU. To compute PE there were developed mathematical models like function of the *residual mass* and the *energy content*. By the Geographic Information System SIG application, process generation of colombian maps at scale 1:500.000 were made for representing spatially municipal, departamental and national sectors the BR source location, BR amount, PE and PE density. It shows a synthesis of the Atlas construction process, describing the main stages methodological like the representative sample definition, the BR physico-chemical and bacteriological quantification and characterization, the mathematical models definition for quantifying the PE and SIG description.

Keywords: Atlas, Potential, Energy, Residual Biomass, SIG

INTRODUCCIÓN.

La tendencia mundial por mitigar los impactos ambientales de los residuos agroindustriales, ha motivado el estudio de las energías renovables y la utilización y aprovechamiento de los residuos orgánicos de diferentes fuentes. En el año 2005, las energías renovables representaron el 5.9% (2,75 cuatrillones de BTU) del consumo de energía primaria a nivel mundial, con un crecimiento interanual del 1.12% [UPME, 2005]. Biomasa es toda materia orgánica que proviene naturalmente de árboles, plantas, desechos de animales, de las actividades agrícolas (Residuos Agrícolas de Cosecha – RAC y Residuos Agroindustriales - RAI) y de los residuos urbanos (aguas negras, residuos orgánicos, actividades de poda). Actualmente existen desarrollos tecnológicos para convertir la biomasa en energía. La biomasa es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el hombre y actualmente contribuye entre un 10 y un 14% del total de suministro de la energía mundial [Bhattacharya, S.C., 2005 y McKendry P., 2001].

Mediante la digestión, la combustión o la descomposición natural, se convierte la energía solar, presente en la biomasa, en energía química. La biomasa tiene bajo contenido de carbono y azufre, pero elevado contenido de oxígeno y de compuestos volátiles, responsables de su poder calorífico; características que hacen de estos productos atractivos para ser aprovechados energéticamente [Secretaría de Energía de Argentina, 2004]. Por otra parte el aporte al calentamiento global por las emisiones de CO₂ en la combustión de la biomasa es neutral. El aprovechamiento energético de la Biomasa Residual (BR) ha sido ampliamente investigado en países asiáticos y Estados Unidos, previa identificación y cuantificación de biomasa tanto de origen natural como las

provenientes de las actividades agrícolas, pecuarias y los residuos sólidos y líquidos municipales [PERERA, et al, 2005; RAVINDRANATH, et al, 2005; SKOULO y ZABANIOTOU, 2007; FLORA y RIAHI-NEZHAD, 2006; SAJJAKULNUKIT, et al, 2005; BHATTACHARYA, et al-1; BHATTACHARYA, et al-2],.

Colombia cuenta con una extensión de 114.174.800 hectáreas, de las cuales el 44.78% (51.131.284 Ha) tienen una vocación agropecuaria, que se distribuyen en un 7% (3.612.47 Ha) a la actividad agrícola y un 76% (38.944.373 Ha) a la actividad pecuaria [Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006]. Estas actividades generan gran cantidad de Biomasa Residual (BR), clasificada como: Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC), Residuos Agroindustriales (RAI) y Biomasa Residual Animal (BRA).

El proyecto “Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia”, realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en el año 2003, como una primera aproximación al estudio de la biomasa como fuente no convencional de energía, reporta 29 millones ton/año de subproductos, conformados principalmente por bagazo de caña de azúcar y panelera, cascarilla de arroz, fibra del cocotero, pulpa de café y palma de aceite y por RAC del frijol, caña de azúcar y cebada, registrándose un Potencial Energético (PE) cercano a doce mil (12000) MWh/año. Estas cifras permiten inferir que en Colombia la BR puede considerarse como una fuente alternativa de energía.

Otra fuente importante de BR identificada la constituye los Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos (RSOU) que se generan en las zonas urbanas, especialmente en los denominados centros de acopio de alimentos, las plazas de mercado y las actividades de Poda de las zonas verdes. Colombia está dividida en 32 departamentos, que comprende 1.085 municipios, generadores de cerca de 21.000 ton/día de RSOU [IDEAM; 2008].

Para evaluar en el país el potencial de energía que puede aportar la BR, como fuente alternativa de energía, se requiere avanzar en la identificación y localización de las fuentes, en el fortalecimiento de una base de información, en los consolidación de inventarios y distribución, en la caracterización fisicoquímica y bacteriológica representativa a las condiciones edafoclimáticas de las diferentes regiones del país, en la construcción de modelos para valorar su PE y en su representación geoespacial. La conjugación final de los anteriores aspectos en un Atlas del PE para Colombia, apoyado en un SIG, se proyecta como una

herramienta clave para afianzar la base de información, que facilitará dimensionar el alcance de la BR como fuente alternativa de energía., sobre la cual se pueda avanzar en la etapa subsiguiente de la investigación relacionada con el análisis tecnológico para su aprovechamiento.

En resumen, el propósito fundamental del estudio consiste en presentar el proceso de construcción del Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual de los sectores Vegetal, Animal y de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia, utilizando para su representación espacial una herramienta SIG.

Potencial Energético.

China, India, Filipinas, Sri Lanka y Tailandia han realizado estudios para evaluar el P.E de la biomasa residual vegetal, agrícola, del estiércol animal y de los residuos sólidos urbanos [BHATTACHARYA, et al, 2005 (1)]. Los resultados de estas investigaciones, han permitido realizar proyecciones de 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 fines de identificar zonas posibles para la ubicación de plantas de aprovechamiento de biomasa, [DOMINGUEZ, et al, 2003]. En Estados Unidos se elaboró el atlas de los recursos energéticos renovables, contabilizando el P.E. de la biomasa residual, tomando como muestra representativa a: Landfill, Estiércol animal, residuos forestales y de cosecha de cultivos como el maíz, el trigo y la cebada. [THE HEWLETT FOUNDATION AND THE ENERGY FOUNDATION, 2002]. Brasil se ha interesado en la evaluación del PE de los residuos agrícolas de Paraná; con el fin de buscar suplir algunas necesidades energéticas que tiene esta región [SOUZA, et al, 2002]. En los estudios anteriormente nombrados, la evaluación del PE de los residuos agrícolas, se realizó teniendo en cuenta la cantidad de biomasa residual húmeda, no siendo incluido el contenido de humedad del residuo en los modelos. En el presente estudio se considero importante la inclusión de este término en la ecuación, debido a que la forma más adecuada de aprovecharlo energéticamente es en procesos termoquímicos y entre estos el más directo es la combustión, y para obtener una mejor eficiencia en estos procesos termoquímicos se recomienda conocer: el contenido de humedad, el valor calorífico, la relación carbono fijo y volátiles, el contenido de cenizas y de metales alcalinos, [McKENDRY, (2001a)].

Para evaluar el PE de la biomasa residual agrícola, pecuaria y de los residuos sólidos urbanos y de poda en Colombia, se desarrolló un modelo matemáticos

para cada sector, los cuales están planteados en función de: “la masa del residuo” y de “su contenido energético”; los modelos aplicados para cada sector son:

- *Modelo de PE de la Biomasa Residual Vegetal – BRV.*

$$PE_{Biomasa-vegetal} = M_{residuo-seco} * PCI_{residuo} \quad (\text{ecuación 1})$$

En la ecuación la masa de residuo seco es función del área cosechada (A), el rendimiento del cultivo (Re), la cantidad de residuos generados (f_{p-e_i}) y del contenido de humedad (f_{h_i}) y se expresa como:

$$Masa_{Residuo-Seco} = A \cdot Re \cdot f_{p-e} \cdot f_h \quad (\text{Ecuación 2})$$

Teniendo en cuenta los “m” clases de residuos, los “n” números de especies cultivadas y los tipos de BR (RAC o RAI), la expresión general para el cálculo del PE es:

$$PEBV_{REAL} = K \cdot \sum_{i=1}^n Re_i \cdot A_i \cdot \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^m f_{p-e_{k,j}} \cdot f_{h_{k,j}} \cdot PCI_{k,j} \quad (\text{Ecuación 3})$$

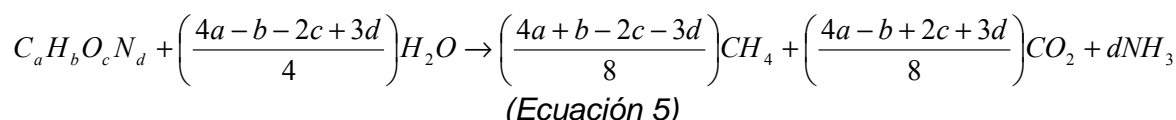
- *Modelo de PE de la Biomasa Residual Animal – BRA*

El modelo se planteó con base en la tecnología de digestión anaerobia, que es la principal aplicación para este tipo de residuo. La masa del residuo es función de los factores: el Número de Animales (NA), la cantidad de Materia Seca (MS), la Fracción Recuperable (fr), la Fracción de Sólidos Volátiles (fsv), la Producción de Biogás (YB) y el Poder Calórico Inferior del Residuo (PCI).

$$PB_{Animal} = \sum_{i=1}^n NA_i * MS_i * fr_i * fsv_i * YB_i * PCI \quad (\text{Ecuación 4})$$

- *Modelo de PE de la Biomasa Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos – BRSOU.*

Tomando como referencia los estudios presentados por [BHATTACHARYA et al, 2005 (1)], se desarrolló un modelo basado en un balance de masa que estima la cantidad de metano generado, a partir de la cantidad de carbono orgánico presente en los RSOU, que es accesible a la descomposición anaeróbica. La reacción global de descomposición del carbono orgánico, puede ser representada por la siguiente ecuación:



El modelo considera que el metano generado es colectado sin pérdidas. La estimación del PE se realiza considerando únicamente el poder energético del metano – CH₄ y se asume que el amoníaco NH₃ generado es muy poco y por tanto su PE bajo. La estructura matemática del modelo está conformada por tres grupos de variables de naturaleza diferente: a) La cantidad de RSOU generados, b) el producto de las variables: Fracción Orgánica de los RSOU de rápida biodegradación (FO), Fracción de Carbono Biodegradable de los RSOU de rápida biodegradación (FCB) y Fracción de Carbono biodegradado como Metano (FCM) y c) el Poder Calorífico Inferior del Metano (PCI_{CH₄}). El producto de la Masa de RSOU por el segundo grupo, permite estimar el carbono presente en los RSOU que es biodegradado. La expresión matemática para calcular el PE de los RSOU se expresa como:

$$PE = [RSOU] * [FO * FCB * FCM * (16/12)] * [PCI_{CH_4}] \quad (Ecuación 6)$$

Donde el factor 16/12 corresponde a la relación de la masa molar del metano (16g/mol) sobre la masa molar del carbono (12g/mol), factor que permite convertir la masa de carbono biodegradado en la masa de metano generado. El PCI_{CH₄}, permite conocer la energía que se libera cuando el metano generado es quemado, energía que corresponde al PE de los RSOU.

Caracterización Físicoquímica y Energética de la BR.

La BRV puede ser aprovechada como combustible sólido para la conversión energética por medio de procesos termoquímicos o biológicos donde sus principales productos son los biocombustibles y el biogás. [McKENDRY(2001), 2]. Tanto la selección del tipo de aprovechamiento energético como las dificultades que se puedan presentar en cualquier tratamiento posterior dependen de las propiedades físicoquímicas, Bioquímicas y energéticas del residuo, por lo cual en el aprovechamiento energético de estos residuos es de vital importancia su previa

caracterización. Para el aprovechamiento de la biomasa seca (contenido de humedad menor al 50%) por medio de procesos termoquímicos se recomienda conocer: el contenido de humedad, valor calorífico, proporciones de carbono fijo y volátiles, contenido de cenizas y metales alcalinos; mientras que para el aprovechamiento de la biomasa húmeda (mayor al 50%) por medio de la bioconversión son de interés el contenido de humedad y la relación celulosa y lignina. [McKENDRY(2001), 1].

Sistema de Información Geográfica -SIG.

Estudios realizados para las regiones de Castilla y León en España [Antolín Gregorio, 2002], en Estados Unidos [The Energy Foundation, 2002] y en la región de Andalucía [Fundación Sodean en año de 2006], muestran la representación espacial del PE basados en cartografía base digital. Un SIG permite la entrada, el manejo, el análisis y la salida o representación espacial de datos; su construcción comprende tres fases: a) Diseño Conceptual, b) Desarrollo y c) Implementación.

a). Fase de Diseño.

- *Recopilación y análisis de información.* Consiste en la recopilación de la información cartográfica base del estudio, a partir de la cual se define la escala de trabajo y la unidad mínima de mapeo. De forma individual para las tres fuentes de BR, se analizan las variables presentes en el modelo de PE, para identificar las variables alfanuméricas relacionadas con las entidades que tienen una posición geográfica y que permiten espacializar el modelo.

- *Generación del modelo espacial.* En esta etapa se identifican las relaciones entre las variables del sistema y el modelo entidad relación; se identifican las zonas en las que se presenta el desarrollo de la actividad en estudio y se realiza la asignación de atributos para las zonas. Relacionada la información alfanumérica y espacial se lleva a cabo el filtrado y la depuración de la información procesada anteriormente.

b). Fase de Desarrollo.

- *Automatización del modelo.* Con el objeto de facilitar la generación de la cartografía, se contempla la automatización de los procesos, garantizando así minimizar las fallas humanas, además de facilitar los ajustes requeridos durante el desarrollo del proyecto.

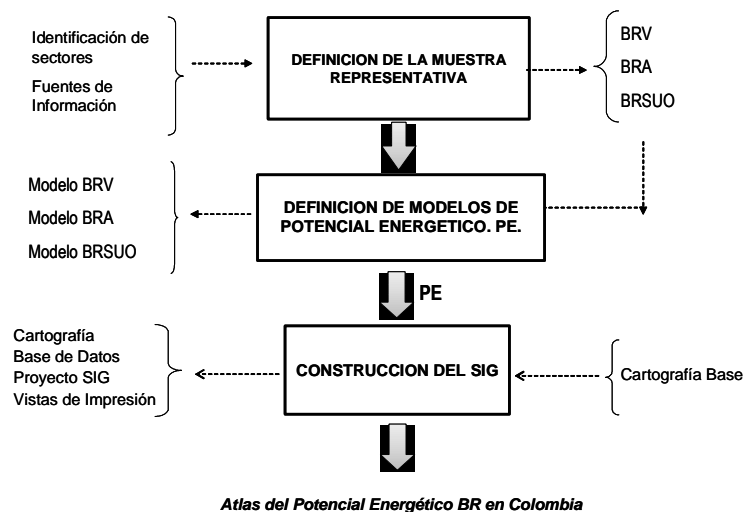
- *Ajustes de resultados.* En este proceso se verifica la coherencia de los productos generados, además de realizar los ajustes para la estructuración de la información para su entrega. Con la información organizada y corregida se procede a la generación de la Base de Datos de entrega con los resultados del proceso.

c). Fase de Implementación.

- *Publicación.* Corresponde a la fase final del proyecto, que tiene como objeto ajustar los productos generados para que puedan ser impresos y publicados. Esta fase cuenta con actividades de creación de metadatos de los productos, creación de las consultas espaciales que permiten una interacción directa con los resultados, generación y maquillaje para la impresión del atlas y organización de los productos para estructurarlos en un proyecto SIG de entrega.

METODOLOGÍA.

La muestra representativa de BR para el sector agrícola, correspondió a los RAC y los RAI de los cultivos de arroz, maíz (cultivos transitorios), caña de azúcar, caña panelera, palma de aceite, café, plátano y banano (cultivos permanentes), con base en la información reportada en el Anuario Estadístico Agropecuario Colombiano del año 2006, teniendo en cuenta criterios como: áreas cultivadas, participación del PIB agrícola y volumen de residuos generados. El sector pecuario, se representó por el estiércol generado por las cadenas productivas de la cría de bovinos, porcinos y el avícola. En cuanto a los RSOU, la selección se basó en el número de habitantes, dando lugar a escoger las 5 ciudades del país con mayor población. La gráfica 1 describe las etapas metodológicas desarrolladas para la construcción del Atlas y la tabla 1 resume para cada sector, las fuentes seleccionadas y el tipo de BR. La información relativa a censos, volúmenes de producción de BR, áreas cultivadas, rendimientos, así como la validación de información relativa a la fracción de BR, características fisicoquímicas, influencia de las condiciones climáticas etc. se obtuvo de entidades oficiales asociadas a los Ministerios de Ambiente, de Energía, de Agricultura, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (entidad oficial encargada de la generación y administración de la cartografía), el Departamento Nacional de Estadística – DANE, Planeación Nacional, gremios de los sectores en estudio, Institutos y centros de investigación entre otros.



Gráfica 1. Diagrama de la metodología aplicada en el estudio

Identificadas las fuentes representativas por sector, y con el fin de disponer de información específica de las propiedades fisicoquímicas y energéticas requeridas para el cálculo del PE, se tomó una muestra representativa de cada una de las fuentes para medir: la humedad, la fracción de sólidos volátiles y el PCI en BVA, la humedad y el PCI en BRV y del contenido de materia orgánica, la humedad y el poder calorífico en RSOU.

Evaluado el PE aplicando los modelos matemáticos descritos en las ecuaciones 3, 4 y 6 para cada zona geográfica del país, se desarrollaron los procesos cartográficos que permiten la representación espacial de la información. Para cada uno de los sectores, la aplicación de la herramienta SIG se estructuró de forma similar, diferenciándose en los procesos puntuales de generación de los mapas y los cálculos a realizar, haciendo uso de programa ArcGis Desktop el cual posee una personal geodatabase Access (que compila los datos de PE y la información espacial de la cartografía base) a partir de la cual se construyen los mapas, y mediante la implementación de una extensión desarrollada en C# para ArcMap 9.2, se posibilita la consulta de datos particulares de la información contenida en cada mapa generado.

La cartografía base tomada para el sector vegetal, fue el mapa de Unidades Agroecológicas, que describe las condiciones biofísicas de las diferentes zonas de Colombia, la cartografía base oficial de la División Político – Administrativa y fronteras de Colombia a escala 1:500.000, el mapa de uso y cobertura de la tierra para identificar las actuales zonas productoras. En los sectores Animal y de RSOU

se tomó el mapa de la División Política de Colombia. Teniendo en cuenta la escala de la cartografía base se trabajó a escala 1:500.000; como Unidad Mínima de mapeo - UMM se seleccionó un cuadrado de lado 1 cm en la escala de representación determinando ésta como una zona de área de 2.500 ha [IGAC, 2002], de acuerdo con los lineamientos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Tabla 1. Muestra representativa de BR seleccionada en el estudio.

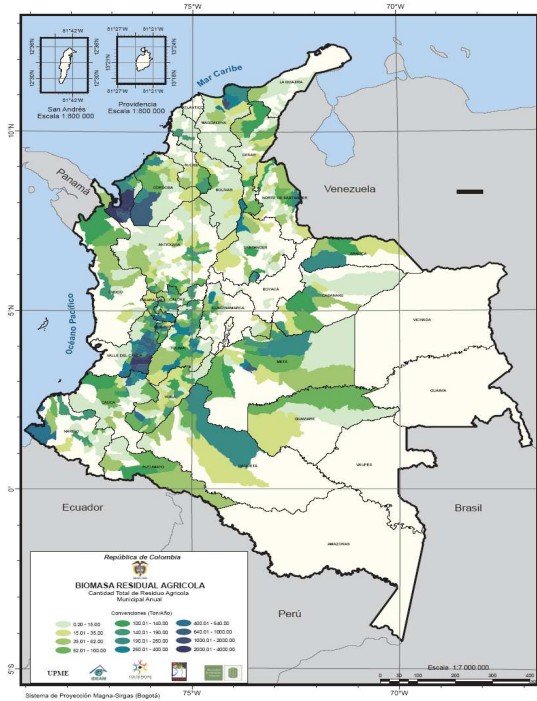
SECTOR	FUENTE GENERADORA	TIPO DE BIOMASA RESIDUAL	
Vegetal	Caña de azúcar (permanente)	RAC, Bagazo	
	Caña panelera (permanente)	RAC, Bagazo	
	Palma de aceite (permanente)	Raquis, Fibra, Cáscara	
	Café (permanente)	Pulpa, Cascarilla	
	Arroz (transitorio)	Paja, Cascarilla	
	Maíz (transitorio)	Rastrojo, Capacho, tuza	
	Plátano (permanente)		Hojas, Seudotallo
			Raquis, Plátano de Rechazo
	Banano (permanente)		Hojas, Seudotallo
		Raquis, Plátano de Rechazo	
Pecuario	Porcino	Estiércol	
	Bovino		
	Avícola		
RSOU	Bogotá	. Residuos Orgánicos plazas de mercado y centros de abastos. . Residuos Orgánicos de Poda	
	Medellín		
	Cali		
	Barranquilla		
	Bucaramanga		

Realizados los geoprosesos y asignados los atributos propios de cada sector se construyen los mapas en donde se representa a nivel municipal, la localización de fuente de BR, el PE. Con la información almacenada en la geodatabase se identificó la información más relevante para cada sector y a partir de ella se estructuró un árbol de consultas para la construcción de los mapas, los cuales se clasificaron y seleccionaron según su nivel de importancia, de manera que los mapas con la información más significativa entraron a formar parte del documento impreso y los demás quedaron almacenados dentro del sistema para ser consultados a través del SIG.

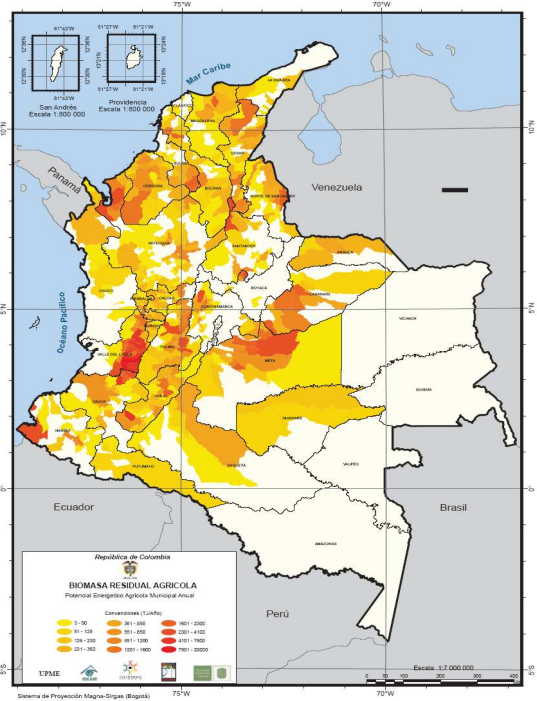
Para la utilización del SIG, se desarrolló una extensión que permite visualizar los mapas y consultar los datos asociados a ellos de una forma accesible para el usuario común. Adicionalmente contiene un modulo de administración de registros que junto con un desarrollo de transacciones a nivel de la base de datos que dinamiza el sistema al permitir la actualización y la edición de los datos contenidos en la geodatabase con lo cual se asegura así que la información se mantendrá actualizada al automatizar los procesos de cálculo del PE y de la generación de mapas. Los mapas seleccionados para el formato impreso fueron compilados de forma estructurada, conformando el ***Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia***, que permite la visualización a escala 1:7.000.000, sobre localización, cantidad de BR y el PE y la densidad del PE (oferta energética/unidad de área) para los sectores vegetal, animal y de RSOU y, de forma consolidada en todo el territorio colombiano.

RESULTADOS.

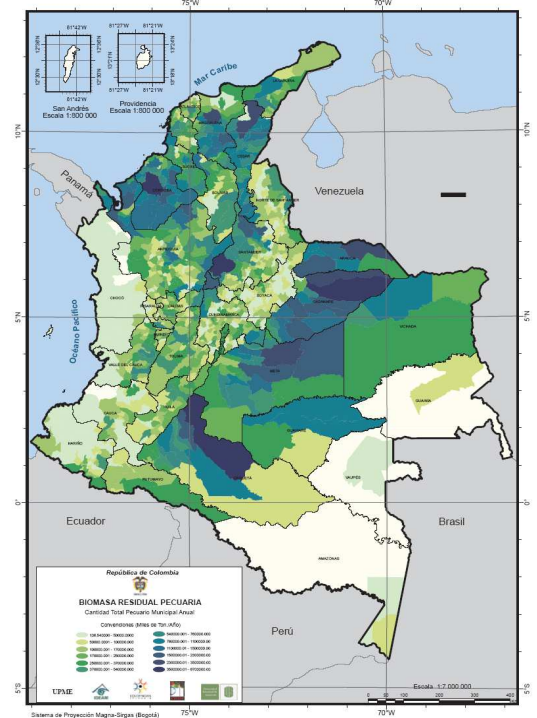
Los mapas se construyeron utilizando una escala de valores para la variable medida (BR y PE) distribuida en intervalos. Se utilizó una escala degradada de color de forma que su intensidad está directamente relacionada con la cantidad de BR o de PE en cada zona del país. Con base en las regiones geográficas de Colombia, en el análisis de los resultados se consideraron las siguientes: Caribe, Pacífica, Andina y Amazonía y Orinoquia. En las gráficas 2 a la 5 se presentan, como modelo del tipo de la consulta que se puede obtener en el Atlas, las vistas de impresión de Cantidad de BR y el PE para BRV y BRA.



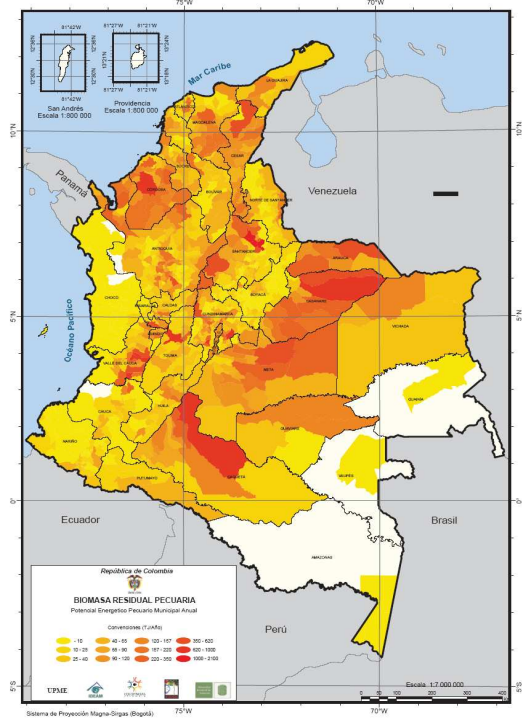
Gráfica 2. Mapa cantidad BRV (Ton/año)



Gráfica 3. Mapa de PE de BRV (TJ/año)

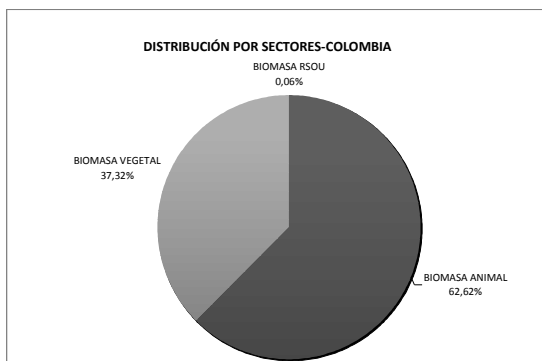


Gráfica 4. Mapa cantidad BRA

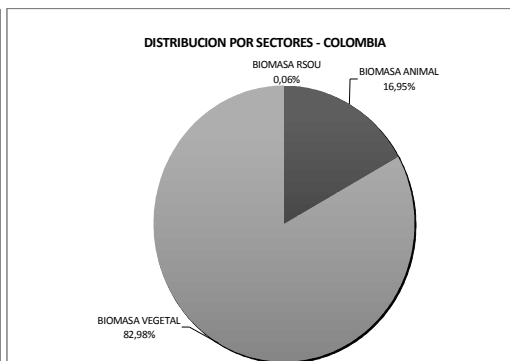


Gráfica 5. Mapa de PE de BRA

El SIG que se diseñó tiene múltiples opciones de consultas, sobre las diferentes alternativas de manejo de la información y cálculos realizados. Como un ejemplo de consulta entregada por el SIG, en las gráficas 6 y 7 se presenta el aporte porcentual, de cada uno de los tres sectores, tanto al total de la BR, como al PE Nacional.



Gráfica 6. Consolidado de cantidad BR (Ton/año)

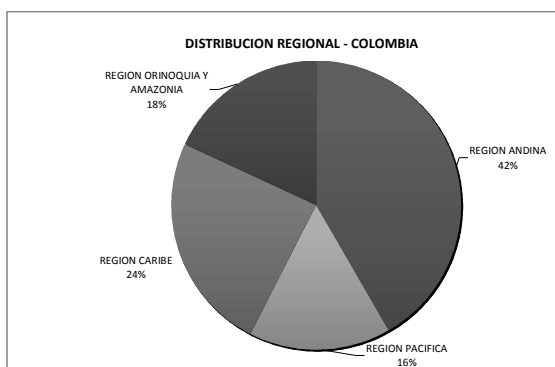


Gráfica 7. Consolidado PE de la BR (TJ/año)

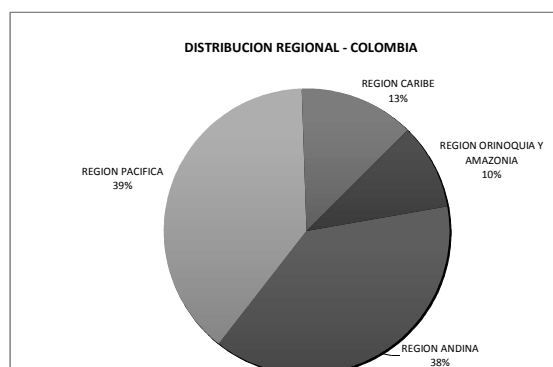
Observando la gráfica 6 el mayor aporte a nivel nacional esta dado por el sector animal con 99.423.979,45 ton/año, seguido del sector vegetal 59.244.603 ton/año y el aporte de los RSOU con 93.565 ton/año. Los tres sectores generan un total de 158.762.148 Ton/año de BR. Esta tendencia puede estar influenciada por el tamaño de la muestra representativa seleccionada para cada uno de los sectores. A futuro cuando la herramienta SIG se alimente con toda la información nacional esta representación podrá verse modificada. En cuanto a la gráfica 7 que muestra información del PE a nivel nacional, se puede interpretar que el sector vegetal representa la mayor participación con un 82,98 % (302.949,00 TJ/año), seguido del sector pecuario con 61.881,32 TJ/año y RSOU con 236,03 TJ/año. El PE total nacional asciende a 365.066 TJ/año. Estos resultados infieren que es notoria la participación del sector vegetal frente al sector animal a pesar del aporte significativo de este último en la cantidad de BR, evidenciándose un menor contenido energético de la BRA, como resultado de la transformación energética en el animal. Así mismo, la mayor participación del sector vegetal al PE, está favorecida debido a que en el estudio como muestra representativa se seleccionaron los cultivos más importantes y con mayor desarrollo agroindustrial.

Las gráficas 8 y 9 muestran la distribución porcentual de estos indicadores por regiones. En la gráfica 8, la distribución indica que en la región Andina se

concentra la mayor cantidad BR con 66.019.098 Ton/año, le sigue la Caribe con 38.883.733 Ton/año, la Orinoquía y amazonía 28.639.146 Ton/año y por último la región Pacífica con 25.220.169 Ton/año. No obstante los resultados anteriores, en la gráfica 9 que indica la participación en el PE total por regiones, se encuentra que la región Pacífica representa la mayor participación con 142.435 TJ/año, seguida de la región Andina 139.553 TJ/año, región Caribe 47.951 TJ/año y la Amazonía y Orinoquía con 35.125 TJ/año. Es claro que aún cuando la región pacífica alcanza el 16% de participación en el aporte al total de BR, representa una zona significativa en el PE contribuyendo con el 39% (142.435 TJ/año) del total del PE a nivel nacional (365.066 TJ/año).



Gráfica 9. Consolidado BR regional (Ton/año)



Gráfica 10. Consolidado PE regional (TJ/año)

CONCLUSIONES.

Se construyeron los modelos matemáticos para evaluar el Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia correspondiente a los sectores agrícola, pecuario y de RSOU. La estructura de los modelos conlleva a que el PE sea una función de la masa residual y de su poder calórico inferior.

Para una determinada muestra representativa de cada uno de los tres sectores bajo estudio y a partir de información secundaria suministrada por gremios y entidades gubernamentales del país, se calculó el PE de esta BR.

Se construyó una herramienta SIG, conformada por una personal geodatabase Access junto con una extensión de ArcMap 9.2, y una extensión en C# que permite visualizar los mapas y consultar los datos asociados a ellos de una forma accesible para un usuario común. El SIG permitió la construcción de 260 consultas

para la representación espacial tanto de la cantidad de BR como de su PE para los tres sectores.

El diseño y la construcción de este tipo de herramienta se constituye para cualquier región o comunidad que esté interesada en validar el potencial y la disponibilidad energética procedente de fuentes no renovables en un importante elemento de planeación que apoya y orienta la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFIA.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, UPME; Plan Energético Nacional; Contexto y Estrategias 2006-2025; Bogotá; abril de 2007.

BHATTACHARYA, S.C.; ABDUL SALAM P.; RUNQING HU; SOMASHEKAR H.I.; RACELIS D.A. RATHNASIRI P.G.; YINGYUAD R.; An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in Selected Asian Countries for 2010; Biomass & Energy; Elsevier; 153-163; 2005 (1).

McKENDRY P.; Energy Production from Biomasa (part 1): Overview of biomasa; ELSEVIER; Bioresource Technology; N°. 83; 2002.

SECRETARIA DE ENERGÍA, REPÚBLICA DE ARGENTINA; Energías Renovables – Energía Biomasa; Argentina; 2004.

PERERA, K.K.C.K; RATHNASIRI, P.G; SENARATH, S.A.S; SUGATHAPALA, A.G.T; BHATTACHARYA, S.C; ABDUL SALAM, P. Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Sri Lanka. Biomass and Bioenergy 29 (2005) 199–213.

RAVINDRANATH, N.H; SOMASHEKAR, H.I; NAGARAJA, M.S; SUDHA, P; SANGEETHA, G; BHATTACHARYA, S.C; ABDUL SALAM, P. Assessment of sustainable non-plantation biomass resources potential for energy in India. Biomass and Bioenergy 29 (2005) .

SKOULOU, V and ZABANIOTOU, A. Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1698–1719.

FLORA, J.R.V; RIAHI-NEZHAD, C. (2006). Availability of Poultry Manure as a Potential Bio-fuel Feedstock for Energy Production. The SC Energy Office 1201 Main Street, Suite 430 Columbia, SC 29201. Final Report.

SAJJAKULNUKIT, B; YINGYUAD, R; MANEEKHAO, V; PONGNARINTASUT, V; BHATTACHARYA, S.C; ABDUL SALAM, P. (2005). 'Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Thailand' Biomass and Bioenergy Vol. 29, pp. 214–224.

BHATTACHARYA, S.C; THOMAS, M.J; ABDUL SALAM, P. GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND THE MITIGATION POTENTIAL OF USING ANIMAL WASTES IN ASIA. *Energy* Vol. 22, No. 11, pp. 1079-1085, 1997 (2).

UPME; Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia; Bogotá; 2003.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM); Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero - Años 2000 y 2004, Módulo de Residuos; Bogotá; febrero de 2008.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL DE COLOMBIA, Anuario Estadístico Del Sector Agropecuario Y Pesquero, 2006; Bogotá, D.C.; 2007.

DOMINGUEZ B. 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), N°3, p. 1-10. ISSN: 1578-5157

THE ENERGY FOUNDATION; Renewable Energy Atlas of the West, One guide to the region's resource potential; 2002.

SOUZA, Samuel N.M., SORDI, Alexandre, OLIVA, Carlos A. Potencial de Energia Primaria de Resíduos Vegetais no Paraná. Campinas, Agrener- 4 ° Encontro de Energia no Meio Rural, 2002

McKENDRY,P. Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies. In: Bioresource Technology, N°. 83, p. 47-54, 2002.

ANTOLÍN GREGORIO; Evaluación del potencial de aprovechamiento energético de la biomasa en Castilla España; 2002.

FUNDACION SODEAN, Potencial y aprovechamiento energético de la biomasa del olivar en Andalucía; 2006

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI – IGAC; Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia, Capítulo I, Parte A; 2002; pág. 21

Agradecimientos.

La Universidad Industrial de Santander (UIS) como entidad ejecutora de este estudio, agradece a las siguientes entidades estatales de Colombia, por el apoyo: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS).

POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL VEGETAL (BRV) DEL SECTOR ARROCERO EN COLOMBIA.

HUMBERTO ESCALANTE H.

Profesor Titular Escuela Ingeniería Química UIS escala@uis.edu.co

JANNETH ORDUZ P.

Estudiante de Maestría Escuela Ingeniería Química UIS yorduz@uis.edu.co

FABIAN EMILIO VIÑA LOPEZ.

Ingeniero Químico – facavilo@gmail.com

Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM ceiam@uis.edu.co,

Universidad Industrial de Santander A.A. 678 Bucaramanga - Colombia.

RESUMEN:

Se evaluó el Potencial Energético (PE) de la Biomasa Residual Vegetal (BRV) del sector arrocero en Colombia, mediante un modelo matemático que involucra la masa de residuo y su contenido energético, representado por el Poder Calorífico Inferior (PCI). Los residuos generados por el arroz son: la Cascarilla y la Paja (Tamo), los cuales tienen un potencial para ser aprovechados energéticamente por medio de procesos termoquímicos y biológicos. Se estimó que el potencial energético de la BRV del sector arrocero es de 67.723 TJ al año, proveniente de 5.907.648 Tn de sus residuos al año. Se mostró la importancia del sector arrocero en Colombia como fuente constante de recursos agrícolas, que pueden tener un aprovechamiento energético dándole un valor agregado a sus residuos. Se analizó la disponibilidad anual y mensual de PE de la BRV del cultivo del arroz, lo que llevó a identificar periodos con mayor disponibilidad de recursos de biomasa en los departamentos con mayor PE.

The Energy Potencial PE of the Vegetal Residual Biomass BRV of the colombian rice sector was evaluated, by a mathematical model that involve mass residue and its energy content, represented by the Calorific Lower PCI. The rice residues are: quinine and straw (tamo), which have a potential to be energy seized by termochemical and biological processes. It was stimated the PE of BRV of the rice sector is 67.723 TJ at a year, coming from 5.907.648 Tn of its residues a year. It showed the importance of the colombian rice sector like constant source of

agricultural resources, they can have a energy use giving an added value to their waste. PE annual and monthly availability of the BRV of the rice cultivation was analysed, what allowed indentify the most avaiability periods of biomass resources at the departments whit the most PE.

PALABRAS CLAVES

Energías Renovables, Biomasa Residual Agrícola, Potencial Energético, Arroz.

INTRODUCCION.

A nivel mundial se está trabajando por aprovechar y desarrollar el uso de diversas fuentes de energía renovable. En el año 2006 Colombia registró una capacidad instalada de energías renovables de 0,35 MW. Según el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010, se plantea aumentar esta capacidad instalada de generación, con energías alternativas (excepto hidroeléctricas), hasta 6 MW y sustituir en parte el uso de combustibles fósiles, [DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2006].

La Ley colombiana 697 de 2001 denomina fuentes energéticas no convencionales de energía, aquellas que se encuentran disponibles, pero que son empleadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente. La biomasa es toda la materia orgánica de origen natural, como algas, arboles, plantas, residuos de cosechas y los generados por las actividades propias del ser humano, entre otras. La biomasa tiene energía solar almacenada, en los enlaces químicos de sus moléculas, que puede liberarse en forma de energía química al romper los enlaces carbonos - hidrógenos - oxígenos mediante procesos biológicos o termoquímicos. [McKENDRY (2001a)]

Colombia cuenta con 3.369.311 Ha dedicadas a la agricultura, [MINISTERIO DE AGRICULTURA COLOMBIA, 2006], que corresponden aproximadamente al 3% del territorio Nacional; destacándose su producción en caña de azúcar, palma de aceite, arroz, caña panelera, maíz, café, banano y plátano. Cada uno de los anteriores cultivos genera en promedio 2 ó 3 residuos, a lo largo de su agrocadena. Dentro de la BRV se destacan los residuos agrícolas los cuales se clasifican en dos grupos: a) Residuos Agrícola proveniente de las Cosechas (RAC) y b) Residuos provenientes del procesamiento industrial de los productos agrícolas (RAI). Los RAC y RAI pueden ser aprovechados como combustible sólido para la conversión energética, mediante procesos termoquímicos, o generadores de

biocombustibles y biogás mediante procesos biológicos. [McKENDRY (2001b)]. Por lo anterior se deduce que el aprovechamiento energético del residuo agrícola depende de sus propiedades fisicoquímicas, bioquímicas y energéticas.

Al ser Colombia un país con un importante desarrollo agrícola, es evidente que también cuenta con una importante oferta de biomasa agrícola, a la cual es necesario evaluarle su Potencial Energético. Sobre la energía de fuentes no convencionales en Colombia, existen algunos estudios, por ejemplo la Unidad de Planeación Minera y Energética [UPME, 2003], comenta que la energía primaria en Colombia se distribuye en 658 MWh/año para aceite combustible, 2.640 MWh/año para alcohol carburante, 11.828 MWh/año para residuos agroindustriales y de cosecha, 442 MWh/año para residuos de bosques plantados y 698 MWh/año para residuos de bosques naturales. Por otra parte estudios internacionales reportan que la producción energética de biomasa en Colombia es de 1.25 EJ/año, del cual se consume un 18,3%, ubicándolo en el octavo lugar de América Latina. [D. KLASS, 2004].

Dado que Colombia cuenta con excelentes recursos de biomasa, pero se desconoce su PE actual, el objetivo principal de este estudio fue evaluar la oferta energética de la BRV proveniente de una de las actividades agrícolas más importantes del país, la producción de arroz. La metodología y modelo matemático propuesto para el cálculo de este PE, puede ser extrapolado y aplicado a otros tipos de biomasa residual vegetal agrícola.

Al conocer el inventario de las diferentes fuentes de biomasa agrícola y evaluar su PE, se identifican las zonas del país con mayor disponibilidad de residuos y mayor potencial energético; facilitando la ejecución de las políticas sobre energías renovables planteadas en el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 y el Plan Energético Nacional 2006 -2025.

Potencial Energético

China, India, Filipinas, Sri Lanka y Tailandia han realizado estudios para evaluar el P.E de la B.R.V. agrícola, del estiércol animal y de los residuos sólidos urbanos [BHATTACHARYA, et al, 2005]. 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 fines de identificar zonas posibles para la ubicación de plantas de aprovechamiento de biomasa, [DOMINGUEZ, et al, 2003]. En Estados Unidos se elaboró el atlas de los recursos energéticos renovables, contabilizando el P.E. de la biomasa residual, tomando como muestra representativa ha: Landfill, estiércol animal, residuos forestales y de cosecha de cultivos como el maíz, el trigo y la cebada. [THE HEWLETT FOUNDATION AND THE ENERGY FOUNDATION, 2002]. 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 [SOUZA, et al, 2002]. En los estudios anteriormente nombrados, la evaluación del PE de los residuos agrícolas, se realizó teniendo en cuenta la cantidad de biomasa residual húmeda, sin incluir en los modelos el contenido de humedad del residuo. En el presente estudio se consideró importante la inclusión de este término en la ecuación, debido a que la forma más adecuada de aprovecharlo energéticamente es en procesos termoquímicos y entre estos el más directo es la combustión, y para obtener una mejor eficiencia en estos procesos termoquímicos se recomienda conocer: el contenido de humedad, el valor calorífico, la relación carbono fijo y volátiles, el contenido de cenizas y de metales alcalinos. [McKENDRY, (2001a)],

Para evaluar el PE de los RAC y RAI del arroz en Colombia, en el presente trabajo se plantea un modelo matemático en función de: “la masa del residuo” y de “su contenido energético”, así:

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

Para evaluar el PE, como primer paso se debe cuantificar la biomasa residual y para esto se tiene que la masa de residuo seco es función de: el área cosechada (A), el rendimiento del cultivo (Re), la cantidad de residuos generados (f_{p-e_i}) y del contenido de humedad (f_h). Por consiguiente la masa de residuo se puede expresar como:

$$Masa_{Residuo-Seco} = A \cdot Re \cdot f_{p-e} \cdot f_h \quad (1)$$

En el modelo, el Poder Calorífico Inferior (PCI), se ha incluido para evaluar el contenido energético del residuo, el PCI (KJ/ Tn de residuo seco), puede obtenerse experimentalmente o teóricamente. Para su medición en el laboratorio se utiliza una bomba calorimétrica; y a nivel teórico por ejemplo se puede utilizar la correlación propuesta por [CHANGDONG et al, 2002], que se basa en el análisis próximo del combustible.

Por lo anterior, el modelo propuesto para evaluar el PE se estructura así:

$$PEBV_{REAL} = A \cdot Re \cdot K \cdot \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n f_{p-e_{k,i}} \cdot f_{h_{k,i}} \cdot PCI_{k,i} \quad (2)$$

Donde:

PEBV: Potencial Energético Biomasa Vegetal Agrícola (TJ / año).

A: Extensión de tierra cultivada, representada por las hectáreas cosechadas del cultivo principal (Ha) en un año ó en un mes; depende de la disponibilidad de información.

Re: Rendimiento del cultivo en función del producto principal (Tn de producto principal/ Ha sembradas).

K: Constante de conversión de unidades. Su valor es $1 \cdot 10^{-6}$

$f_{p-e_{k,i}}$: Factor de generación de producto energético, es una relación entre la masa de residuo con respecto a la masa de producto principal. (Ton de residuo/ Ton de producto principal).

$f_{h_{k,i}}$: Factor de humedad. (Tn residuo seco/Ton de residuo húmedo).

Factor de humedad = 100 - % Humedad.

Para evaluar el PE de la BRV del cultivo del arroz, se identificaron dos residuos de interés energético: la paja y la cascarilla; los cuales corresponden al RAC y RAI respectivamente.

Debido a esto, en la ecuación 2, el contador k hace referencia a los dos grupos de residuos considerados; mientras que el contador i se refiere a cada uno de los residuos identificados y que pertenecen a cada uno de los grupos. Para calcular el PE de los residuos del arroz se utilizó el modelo propuesto anteriormente; que es también aplicable a diferentes biomásas residuales agrícolas, siempre y cuando se disponga de la información requerida en la ecuación 2.

METODOLOGIA

Políticamente, Colombia se encuentra dividida en 32 departamentos, que se subdividen en 1.070 municipios, todos estos predominantemente agrícolas; y debido a su variedad de climas, los hace aptos para la obtención de diferentes productos agrícolas. De los 32 departamentos colombianos, 19 están dedicados a la siembra, cosecha y producción de arroz.

Para el cálculo del PE de la BRV del cultivo de arroz se utilizó información secundaria, referente a áreas cosechadas, volúmenes de producción y rendimiento de los departamentos de Colombia. La información 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. El cálculo del PE se hizo a nivel departamental, anual y mensual. Adicionalmente se contó con información referente al comportamiento histórico del cultivo de arroz, en los últimos 13 años.

El arroz es una gramínea, de ruta fotosintética C3, con un ciclo de vida corto, y alto potencial en la generación de residuos en diferentes periodos del año. Con el apoyo de las federaciones y centros de investigación, se identificaron los factores de producción de los residuos de la agrocadena.

Debido a la variación en las condiciones edafoclimáticas de las zonas de cultivo de arroz, las características fisicoquímicas y energéticas como el análisis elemental que posee un residuo, pueden ser diferentes en cada una de ellas, por lo cual para un estudio con un nivel de detalle muy alto y alta sensibilidad, se recomienda realizar una caracterización de los residuos, 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 cultiva arroz; para el presente estudio los parámetros fisicoquímicos y energéticos como el porcentaje de humedad y el PCI

de cada uno de los residuos del arroz, fueron tomados de Database for Biomass and Waste, [Energy Research Centre of the Netherlands, 2003] y de publicaciones realizadas por investigadores de la Federación Nacional de Arroceros de Colombia, siendo datos veraces que le proporcionan confianza al resultado.

Mediante la ecuación 1, se determinó la producción de BRV agrícola del arroz. Para asociar la masa de residuos con su PCI, se elaboró una base de datos en Excel, con los parámetros necesarios para satisfacer la ecuación (2), y determinar el PE. Para evaluar el PE individual de los "n" RAC ó de los "n" RAI del cultivo de arroz se planteo la ecuación (3)

$$P E_{RAC - RAI} = A . R e . K . \sum_{i=1}^n f_{p-e_i} . fh_i . P C I_i \quad (3)$$

A partir del PE de los RAC y de los RAI, se calculó el PE total por departamentos, ofreciendo una información más detallada y con mayor precisión, que puede ser usada en la ejecución de los planes de aprovechamiento de residuos del arroz.

RESULTADOS

En la Tabla 1, se presentan los factores de producción y el valor del poder calórico inferior para cada uno de los residuos identificados para el cultivo de arroz.

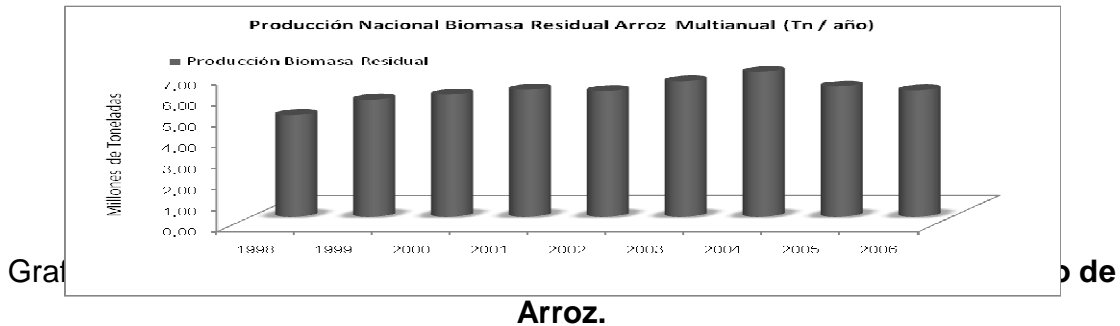
Tabla1. Información de Residuos Energéticos del Cultivo del Arroz

RESIDUOS	FACTOR DE PRODUCCION DE RESIDUO ENERGETICO	FACTOR DE HUMEDAD	PCI [KJ/Kg]
PAJA O TAMO SECA	2,35	0,85	13.400
CASCARILLA	0,2	0,8	15.412

[Fedearroz 2007], [Valverde, Et al. 2007]

Se observa en la Tabla 1, que por cada tonelada de arroz producido, se generan 0,2 toneladas de cascarilla, con un contenido de humedad del 20% que hace que esta variable presente un factor de 0,8 y un PCI de 15.412 kJ/kg, estos parámetros son los necesarios para satisfacer el modelo del potencial energético (Ecuación 2).

Con los factores de generación de residuos del arroz y con los registros históricos nacionales de cantidad de arroz producidos anualmente, proporcionados en la base de datos alfanumérica del Ministerio de Agricultura de Colombia, se evaluó el comportamiento histórico de la disponibilidad de biomasa residual agrícola del arroz como se muestra en la Gráfica 1.



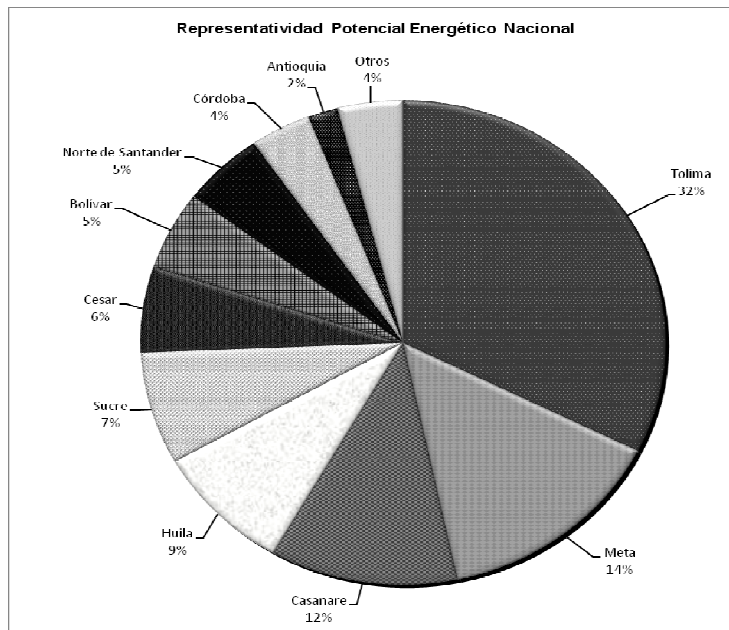
En la Gráfica 1, se observa que el cultivo de arroz en Colombia, en casi una década, ha sido muy constante y por ende ha generado una oferta alta y relativamente constante de biomasa residual. La producción anual promedio de residuos ha sido de 5.989.573 Tn, estos recursos no han sido aprovechados de manera eficiente; una mínima parte de la cascarilla producida se comercializa para establos, caballerizas, avicultura y para labores de jardinería. Otra parte de cascarilla se reduce, mediante una semiquema controlada al aire libre, para utilizarla como sustrato del cultivo de flores. Finalmente, el resto de la cascarilla se dispone en áreas rurales adyacentes a los molinos, causando un problema ambiental. La paja en algunas oportunidades es quemada en el campo ó es dejada como fertilizante natural para el suelo, sin previo tratamiento.

En Brasil y Tailandia ya se usa la cascarilla de arroz en procesos de cogeneración de energía. Los molinos que producen la cascarilla son movidos con la energía eléctrica y térmica generada. Sin embargo se ha encontrado que los proyectos de cogeneración a partir de cascarilla de arroz, sólo son viables para molinos cuya producción de cascarilla esté por encima de 100 Tn por día. [AENE Consultoria S.A.,2002].

A partir de la información de la Tabla 1 y con los registros para cada uno de los departamentos proporcionados en la base de datos alfanumérica del Ministerio de Agricultura de Colombia, y aplicando las ecuaciones (1), (2) y (3) se evaluó el PE nacional, como se presenta en la Tabla 2 y en la Gráfica 2.

Tabla 2. Potencial Energético Departamental de la Biomasa Residual Agrícola del Arroz en Colombia.

Nombre Departamento	Producción Arroz Blanco [t/ año]	Cantidad de Residuo [t/ año]			Potencial [TJ/año]		
		RAC	RAI	TOTAL	RAC	RAI	TOTAL
Tolima	750.148	1.762.848	150.030	1.912.877	20.078,84	1.849,80	21.928,64
Meta	331.165	778.238	66.233	844.471	8.864,13	816,63	9.680,75
Casanare	268.185	630.235	53.637	683.872	7.178,37	661,32	7.839,70
Huila	198.538	466.564	39.708	506.272	5.314,17	489,58	5.803,75
Sucre	174.526	410.136	34.905	445.041	4.671,45	430,37	5.101,82
Cesar	133.501	313.727	26.700	340.428	3.573,35	329,20	3.902,56
Bolívar	120.459	283.079	24.092	307.170	3.224,27	297,04	3.521,31
Norte de Santander	117.587	276.329	23.517	299.846	3.147,38	289,96	3.437,34
Córdoba	87.014	204.483	17.403	221.886	2.329,06	214,57	2.543,63
Antioquia	42.737	100.432	8.547	108.979	1.143,92	105,39	1.249,31
Otros (9 Dpts)	92.865	218.233	18.573	236.806	2.485,67	229,00	2.714,67
Total Colombia	2.316.725	5.444.303	463.345	5.907.648	62.010,61	5.712,86	67.723,47



Gráfica 2: Distribución por departamento del Potencial Energético de la Biomasa Residual del cultivo del Arroz.

En la Tabla 2, se presenta la información en cuanto a la producción de residuos y el potencial energético, para los principales 10 departamentos del país. Se observa que Colombia cuenta con 67.723,47 TJ al año de energía que proceden de 5.907.648 Tn de Biomasa Residual del cultivo de arroz.

De los 19 departamentos de Colombia que cultivan arroz, Tolima presenta la mayor oferta energética a nivel nacional, 21928,64 TJ, del cual 20.078,84 TJ son aportados por los RAC y 1.849,80 TJ por los RAI. Aunque el potencial energético de los RAI es bajo en comparación con el potencial de los RAC, cabe recordar que en la práctica durante la agrocadena del cultivo de arroz es más fácil acceder a la cascarilla, por estar localizado en un sitio único (El molino); mientras que la paja se dispersa a lo largo y ancho del campo cosechado.

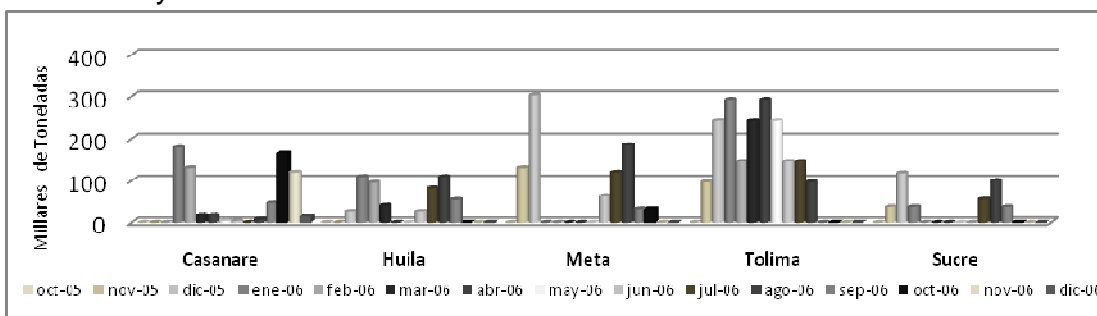
En la Gráfica 2, se representa el aporte porcentual que tiene cada uno de los departamentos en el potencial energético nacional, Tolima aporta aproximadamente un 32% del potencial nacional, el cual es un valor muy significativo, teniendo en cuenta que el siguiente departamento en orden de representatividad que es el Meta, solo llega a un 14%, que es menos de la mitad del aporte del Tolima, con esto se demuestra la importancia que tiene este departamento desde el punto de vista de oferta energética proveniente de residuos del arroz. El aporte que hacen los 9 departamentos restantes (agrupados en el término Otros) al potencial energético es bajo, ellos representan aproximadamente el 4% del potencial energético nacional, esto se debe a que en ellos no existe una producción continua de arroz durante el año, bien sea por la variación en las condiciones climáticas de la región ó por la cultura en la rotación de cultivos, evitando el desgaste de los nutrientes del suelo.

En Paraná - Brasil [SOUZA, et al, 2002] el cultivo de arroz blanco produce 261.574 Tn de residuos con un potencial energético de 4160 TJ; tomando como referencia que 1KWh de electricidad conlleva gasificar 3 Kg de biomasa vegetal, ésta energía puede ser convertida en electricidad, por medio de la instalación de pequeños sistemas Gasificador-Generador, con una potencia máxima de 600 KW. El ejemplo anterior permite extrapolar que en Colombia, para los departamentos de Tolima, Meta, Casanare, Huila y Sucre, que cuentan con un P.E mayor al obtenido por SOUZA, et al, se promueva y apoye la financiación de proyectos relacionados con el aprovechamiento energético de los residuos del cultivo de arroz.

El consumo energético para producir una tonelada de arroz blanco es de 95 KWh [UIS-IDEAM,1998]; por consiguiente con el potencial energetico anual que este

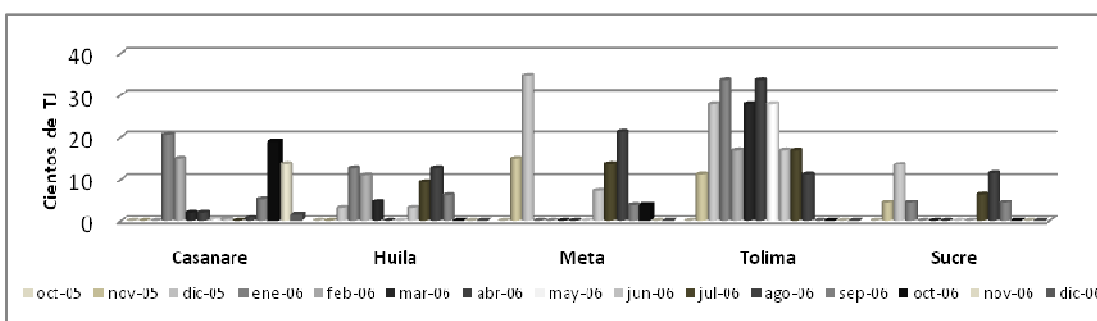
sector genera en Colombia (67.723,47 TJ ó 19000 GWh aproximadamente) se pueden desarrollar programas para la utilización esta biomasa residual como combustible en los hornos de las plantas procesadoras, ayudando a una reducción considerable en los costos energéticos de la producción.

A los 5 departamentos con mayor oferta de PE, se les analizó su comportamiento mensual en la oferta de BRV y PE, con el objetivo de conocer la disponibilidad de estos recursos durante el año. Los resultados obtenidos se muestran en las Gráficas 3 y 4.



Gráfica 3. Producción mensual de Biomasa Residual Arroz.

Tolima es el departamento de Colombia con mayor oferta energética, con un promedio mensual de 639,37 MWh, además cuenta con una buena disponibilidad de biomasa residual del arroz. Durante el año, desde noviembre de 2005 hasta septiembre de 2006, se identifican periodos con mayor disponibilidad. Por ejemplo en marzo, abril y mayo, se presenta una alta disponibilidad, debido a la periodicidad del ciclo productivo del arroz.



Gráfica 4. Potencial Energético Mensual Arroz.

En la Gráfica 4, se observa que marzo, abril y mayo son los meses con mayor oferta energética, 2788, 3346 y 2788 TJ respectivamente, siendo valores

considerables que llevan a plantear formas de aprovechamiento no continuas en este periodo de tiempo.

Con los resultados anteriores se muestra que Colombia es un país rico en recursos de biomasa agrícola proveniente del arroz. Se abre un panorama favorable para el aprovechamiento energético de dichos recursos, con plantas transformadoras para la biomasa, localizados en los departamentos con mayor disponibilidad de residuos. Este tipo de iniciativa ayuda a suplir las necesidades energéticas de las zonas no interconectadas del país.

En el momento de diseñar y ejecutar las alternativas de aprovechamiento energético, se debe tener en cuenta que la disponibilidad del residuo depende de su naturaleza, del lugar y de la periodicidad del cultivo.

CONCLUSIÓN

Se planteó un modelo para calcular el PE de la biomasa residual del cultivo de arroz en Colombia, función de la masa del residuo seco y de su poder calórico inferior. De acuerdo al modelo propuesto, en el país los 5.907.647 Tn/ año de biomasa residual del cultivo del arroz ofrecen 67.723 TJ/año de energía, los cuales podrían reemplazar el 5,5 % de la canasta energética nacional.

En Colombia el departamento del Tolima produce el mayor volumen de residuos del cultivo de arroz, los cuales pueden generar un potencial energético promedio mensual de 639,37 MWh. Esta energía podría ser aprovechada para la generación eléctrica ó para compensar en parte los requerimientos energéticos que tienen las plantas procesadoras para el secado del arroz.

La metodología usada para evaluar la oferta energética de la biomasa residual del arroz en Colombia, permite identificar las zonas de disponibilidad de este recurso energético.

Los resultados del trabajo sirven para la toma de decisiones a nivel gubernamental, sobre el aprovechamiento energético de este recurso.

BIBLIOGRAFIA

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](#), 167-177.

Changdong Sheng. J.L.T. Azevedo. 2004. Estimating the higher value of biomass fuels from basic analysis data.

D. Klass, 2004. Biomass for Renewable Energy and Fuels. Entech International, Inc. Barrington, Illinois, United States.

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), nº3, p. 1-10. ISSN: 1578-5157.

Hall, C. W. 1984. Energy Sources and Conversions Relating Foods, In: Food and Energy Resources, Edited by PIMENTEL, D. & HALL, C. W, Academy Press, INC., p.25-42, London,

McKendry, P. 2002. Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of biomass. In: Bioresource Technology, Nº. 83, p. 37-46,

McKendry, P. 2002. Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies. In: Bioresource Technology, Nº. 83, p. 47-54.

Souza, Samuel N.M., Sordi, Alexandre, Oliva, Carlos A. 2002. Potencial de Energia Primaria de Resíduos Vegetais no Paraná. Campinas, Agrener- 4^o Encontro de Energia no Meio Rural.

Valverde, Agustín. Sarria, Bienvenido. Monteagudo, José. Análisis Comparativo de las Características Físicoquímicas de la Cascarilla de Arroz. Universidad de Ibagué. Ibagué-Colombia. 2007

AENE Consultoria S.A. Proyecto de cogeneración con base en cascarilla de arroz, Estudio de Prefactibilidad. Bogotá. Colombia. 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. Bogotá-Colombia. Bogotá-Colombia, 2006.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO Y ENERGÉTICA. Plan Nacional de Energía 2006-2025. Bogotá-Colombia, 2006.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, Anuario Estadístico del Sector Agropecuario y Pesquero, Colombia, 2006.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia, Bogotá-Colombia, 2003.

THE HEWLETT FOUNDATION AND THE ENERGY FOUNDATION, Renewable Energy Atlas of the West. USA. 2002.

FEDERACIÓN NACIONAL DE ARROCEROS, FEDEARROZ. Revista Arroz, Edición No. 471 de noviembre y diciembre de 2007.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (UIS), INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 1998. Sistema de Información Para la Evaluación Ambiental de Sectores Productivos.

Páginas de Internet.

Energy research Centre of the Netherlands; 2003, Database for Biomass and Waste. Recuperado en enero 18 de 2008. Disponible en: <http://www.ecn.nl/phyllis>