

**PARTICIPACIÓN EN EL DISEÑO DE UN HORNO DE PIRÓLISIS PILOTO DE  
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES CON FUNCIONAMIENTO POR ETAPAS PARA  
PRODUCIR BIOCHAR EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I&D DE  
LA EMPRESA INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S**

**JONNY JAIR PANTOJA DÍAZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL  
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL  
SAN JUAN DE PASTO**

**2015**

**PARTICIPACION EN EL DISEÑO DE UN HORNO DE PIRÓLISIS PILOTO DE  
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES CON FUNCIONAMIENTO POR ETAPAS PARA  
PRODUCIR BIOCHAR EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I&D DE  
LA EMPRESA INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S**

**JONNY JAIR PANTOJA DÍAZ**

**Informe Final de la Pasantía presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Agroindustrial**

**Asesor: M. Sc. JESÚS GEOVANNY SOLARTE**

**Docente de la Facultad de Ciencias Agrícolas**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL  
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL  
SAN JUAN DE PASTO**

**2015**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de Grado son Responsabilidad de los autores.

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, Noviembre de 2015.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia quiero agradecer a DIOS por ser el fundamento principal de mi vida y de todos los proyectos que he emprendido a lo largo de mi carrera universitaria;

A mis padres por su amor, su apoyo y comprensión, por ser guías y consejeros; a mis hermanos por su cariño y complicidad en mi crecimiento personal; a Cynthia Sierra por su constante apoyo y colaboración;

A la Universidad de Nariño y la facultad de Ingeniería Agroindustrial, por ser el epicentro de mi desarrollo como profesional, a sus profesores y demás cuerpo institucional que con sus enseñanzas, permitieron forjarme como un ingeniero con sentido crítico y con ética profesional;

Al área de investigación y desarrollo de la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S. en cabeza del ingeniero Julio Muñoz Castro y la Universidad del Valle, por confiar en mis capacidades y darme la oportunidad de desarrollar mi pasantía empresarial en sus instalaciones;

Al ingeniero Jesús Geovanny Solarte Guerrero, asesor de la Universidad de Nariño, por su constante apoyo, su amistad y su interés de acompañarme durante todo el desarrollo de mi pasantía empresarial;

Al laboratorio de Materiales de la Universidad de Nariño, en cabeza de su encargada Jenny Mera, por permitirme continuar mi proceso de investigación en torno a la producción de carbón activado especializado

Y a todas las personas que de alguna u otra manera me colaboraron para cumplir a cabalidad con todos los objetivos planteados en este arduo trabajo investigativo.

**CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	22
1. TITULO .....	23
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	24
3. JUSTIFICACIÓN .....	26
4. MARCO REFERENCIAL.....	28
4.1 Historia del biochar.....	28
4.2. Biochar.....	32
4.3 Pirólisis .....	32
4.4 Parámetros de proceso .....	34
4.4.1 <i>Materias primas</i> .....	34
4.4.2 <i>Rangos de temperatura</i> .....	36
4.4.3 <i>Tamaño de partícula</i> .....	37
4.4.4 <i>Flujo de gas de arrastre</i> . ....	38
4.4.5 <i>Tiempo de residencia</i> .....	39
4.5 Estado del arte.....	40
5. OBJETIVOS .....	58
5.1 Objetivo General.....	58
5.2 Objetivos Específicos.....	58
6. METODOLOGÍA .....	59
6.1 Objetivo número uno .....	59

6.2 Objetivo número dos.....	59
6.3 Objetivo número tres.....	59
6.3.1. <i>Caracterización de materias primas.</i> .....	59
6.3.1.1. <i>Selección de muestra representativa.</i> .....	59
6.3.1.2. <i>Molienda.</i> .....	60
6.3.1.3. <i>Tamizado.</i> .....	60
6.3.2. <i>Adecuación de muestras para análisis próximo de biomasa.</i> .....	60
6.3.2.1. <i>Carbono fijo.</i> .....	60
6.3.2.2. <i>Cenizas.</i> .....	61
6.3.2.3. <i>Material Volátil.</i> .....	61
6.3.2.4. <i>Humedad.</i> .....	61
6.3.3. <i>Descripción de equipos de pirólisis a escala de laboratorio.</i> .....	63
6.3.3.1. <i>Mufla modificada con ingreso y salida de gases activantes.</i> .....	63
6.3.3.2. <i>Reactor de lecho fijo para tratamiento pirolítico de pequeñas muestras de materia prima.</i> .....	63
6.3.3.3. <i>Cilindros de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> con sus respectivos rotámetros</i> .....	64
6.3.4. <i>Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cáscara de coco.</i> .....	64
6.3.4.1. <i>Desarrollo experimental.</i> .....	65
6.3.4.2. <i>Diseño experimental.</i> .....	65
6.3.4.3. <i>Variables de control.</i> .....	66
6.3.4.3.1. <i>Concentración del KOH.</i> .....	66
6.3.4.3.2. <i>Temperatura de pirólisis.</i> .....	67
6.3.4.4. <i>Otras variables de proceso.</i> .....	68

6.3.4.4.1. <i>Tiempo de impregnación.</i> .....	68
6.3.4.4.2. <i>Relación cáscara de coco- solución impregnadora.</i> .....	68
6.3.5. <i>Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cuesco de palma.</i> .....	69
6.3.5.1. <i>Desarrollo experimental.</i> .....	70
6.3.5.2. <i>Diseño experimental.</i> .....	70
6.3.5.3. <i>Variables de control.</i> .....	70
6.3.5.3.1. <i>Temperatura de pirólisis.</i> .....	70
6.3.5.3.2. <i>Flujo y mezcla de gases activantes.</i> .....	71
6.3.5.4. <i>Otras variables de proceso.</i> .....	71
6.3.6. <i>Pruebas de Pirólisis a escala de laboratorio con otras biomاسas.</i> .....	71
6.3.6.1. <i>Desarrollo experimental.</i> .....	72
6.3.6.2. <i>Diseño experimental.</i> .....	72
6.3.6.3. <i>Variables de control.</i> .....	72
6.3.6.3.1. <i>Tipo de materia prima.</i> .....	72
6.3.6.3.2. <i>Temperatura de pirólisis.</i> .....	72
6.3.6.4. <i>Otras variables de proceso.</i> .....	73
6.3.6.5. <i>Pruebas de remoción de azul de metileno (AM).</i> .....	73
6.3.6.6. <i>Diagrama de proceso.</i> .....	74
7. RESULTADOS DE LA PASANTÍA .....	75
7.1. <i>Proposición de procesos de pirólisis acorde con la actual generación de biomasa agroindustrial en los departamentos de Valle, Cauca y Nariño</i> .....	75
7.1.1. <i>Introducción.</i> .....	75
7.1.2. <i>Estado actual de generación de biomasa en los departamentos de Nariño y Cauca.</i> 76	

7.1.2.1. Cultivos de arroz.....	77
7.1.2.2. Cultivos de maíz.....	77
7.1.2.3. Cultivos de banano. ....	78
7.1.2.4. Cultivos de café.....	79
7.1.2.5. Cultivo de caña de azúcar.....	80
7.1.2.6. Cultivo de caña panelera.....	80
7.1.2.7. Cultivo de palma de aceite.....	81
7.1.3. Distribución de residuos por tipo: Departamentos de Nariño y Cauca. ....	82
7.1.4. Análisis del diagnóstico.....	85
7.1.5. Estado actual de generación de cascarilla de arroz en la arrocería la esmeralda. ....	88
7.1.6. Implementación de la tecnología en la arrocería la esmeralda.....	89
7.1.7. Revisión sobre procesos de pirólisis. ....	91
7.1.7.1. Estudios de caso internacionales.....	91
7.1.7.1.1. Estudio de caso No.1.....	91
7.1.7.1.2. Estudio de caso No.2.....	93
7.1.7.1.3. Estudio de caso No.3.....	94
7.1.7.1.4. Estudio de caso No.4.....	96
7.1.7.2. Estudios de caso nacionales. ....	98
7.1.7.2.1. Estudio de caso No.1.....	98
7.1.7.2.2. Estudio de caso No.2.....	100
7.1.7.2.3. Estudio de caso No.3.....	102
7.1.7.2.4. Estudio de caso No.4.....	104
7.1.8. Análisis del proceso de pirólisis.....	111

7.1.8.1. <i>Temperaturas menores de 250°C</i> .....	111
7.1.8.2. <i>Temperaturas entre 250°C y 500°C</i> .....	112
7.1.8.3. <i>Temperaturas mayores de 500°C</i> .....	113
7.2. Desarrollar una vigilancia tecnológica de los equipos e implementos para los procesos de pirólisis de los residuos agroindustriales .....	113
7.2.1. <i>Equipos de pirólisis y patentes</i> .....	113
7.2.1.1. <i>Reactores de lecho fijo</i> .....	114
7.2.1.2 <i>Reactores de lecho fluidizado</i> .....	114
7.2.1.3. <i>Reactor de lecho fluidizado circulante</i> .....	117
7.2.1.4. <i>Reactores de caída libre</i> .....	119
7.2.1.5. <i>Reactores de abrasión para pirólisis</i> .....	120
7.2.1.6. <i>Reactores de vacío</i> .....	121
7.2.1.7. <i>Reactores Auger</i> .....	123
7.2.1.8. <i>Reactor de cono rotatorio</i> .....	125
7.2.2. <i>Reactor de la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S</i> .....	128
7.2.3. <i>Análisis de la vigilancia tecnológica</i> .....	132
7.2.4. <i>El Biochar y las perspectivas económicas</i> .....	138
7.3 Apoyar al equipo encargado de ejecutar un diseño experimental de un proceso de pirólisis a escala de laboratorio.....	141
7.3.1. <i>Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cascara de coco</i> .....	141
7.3.1.1. <i>Análisis de sensibilidad: Metodología de superficie de respuesta</i> .....	142
7.3.1.2. <i>Discusión</i> .....	145
7.3.2. <i>Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cuesco de palma</i> .....	146

7.3.2.1. <i>Resultados y discusión.</i> .....	148
7.3.3. <i>Pruebas de Pirólisis a escala de laboratorio con otras biomosas.</i> .....	149
7.3.3.1. <i>Resultados y discusión.</i> .....	151
8. CONCLUSIONES .....	153
RECOMENDACIONES.....	155
BIBLIOGRAFÍA .....	157
ANEXOS .....	172

**LISTA DE TABLAS**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1	Análisis próximo de la cascara de coco ..... 61
Tabla 2	Análisis próximo del cuesco de palma ..... 62
Tabla 3	Análisis de cenizas para las materias primas adicionales ..... 62
Tabla 4	Variables y niveles del diseño experimental ..... 65
Tabla 5.	Resultados de la experimentación: 1 etapa de la investigación. .... 142
Tabla 6.	Optimización de variables ..... 144
Tabla 7.	Resultados de la experimentación: 2 Etapa de la investigación ..... 146
Tabla 8	Resultados de la experimentación: 3 Etapa de la investigación ..... 149

**LISTA DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Reactor de lecho fijo. ....	114
Figura 2 Reactor de lecho fluidizado.....	115
Figura 3 Reactor de lecho fluidizado.....	116
Figura 4 Reactor de lecho fluidizado con recirculación de gases. ....	116
Figura 5 Reactor de lecho circulante para pirólisis. ....	118
Figura 6 Reactor de caída libre.....	119
Figura 7 Reactor ablativo .....	121
Figura 8 Reactor para pirólisis al vacío .....	123
Figura 9 Reactor auger con arena como portador de calor.....	124
Figura 10 Reactor auger con calentamiento externo por un horno .....	124
Figura 11 Reactor de cono rotatorio.....	126
Figura 12 Reactor de cono rotatorio con recirculación del material transportador de calor ....	126
Figura 13 Cuerpo metálico del horno rotatorio .....	128
Figura 14 Horno rotatorio completo.....	128
Figura 15 Vistas del cuerpo metálico con sus respectivas dimensiones .....	129
Figura 16 Seccionamiento individual de piezas con sus respectivas dimensiones .....	129
Figura 17. Sistema eléctrico para el calentamiento del horno rotatorio.....	130
Figura 18. Número de publicaciones por año.....	132
Figura 19 Número de publicaciones por Autor .....	133
Figura 20 Número de publicaciones por País.....	134

Figura 21	Número de publicaciones por centro de investigación .....	135
Figura 22	Red internacional de conocimiento sobre biochar según los artículos de la vigilancia tecnológica de la empresa .....	136
Figura 23.	Centros regionales de la IBI (Iniciativa de Investigación de Biochar). .....	137
Figura 24.	Diagrama de efectos principales para el rendimiento másico.....	143
Figura 25.	Superficie de respuesta estimada .....	144
Figura 26.	Rendimientos másicos y porcentajes de remoción en diferentes tipos de materias primas: 3 etapa de investigación. ....	150
Figura 27.	Cultivos Transitorios: Área cosechada .....	173
Figura 28.	Cultivos Transitorios: Producción municipal anual de biomasa.....	173
Figura 29.	Cultivos permanentes: Área cosechada.....	174
Figura 30.	Cultivos permanentes: Producción municipal anual de biomasa.....	174
Figura 31.	Cultivos de arroz: Área cosechada.....	175
Figura 32.	Cultivos de arroz: Producción municipal anual de biomasa .....	175
Figura 33.	Cultivo de Maíz: Área cosechada .....	176
Figura 34.	Cultivo de Maíz: Producción municipal anual de biomasa.....	176
Figura 35.	Cultivos de Banano: Área cosechada.....	177
Figura 36.	Cultivos de Banano: Producción municipal anual de biomasa .....	177
Figura 37.	Cultivos de Café: Área cosechada .....	178
Figura 38.	Cultivos de Café: Producción municipal anual de biomasa.....	178
Figura 39.	Cultivo de caña de azúcar: Área cosechada .....	179
Figura 40.	Cultivo de caña de azúcar: Producción municipal anual de biomasa .....	179
Figura 41.	Cultivo de caña panelera: Área cosechada.....	180

Figura 42. Cultivo de caña panelera: Producción municipal anual de biomasa .....	180
Figura 43. Cultivo de Palma de aceite: Área cosechada .....	181
Figura 44. Cultivo de Palma de aceite: Producción municipal anual de biomasa.....	181
Figura 45. Cultivos de plátano: Área cosechada .....	182
Figura 46. Cultivos de plátano: Producción municipal anual de biomasa .....	182
Figura 47. Cuarteo y Selección de muestra representativa.....	185
Figura 48. Molienda .....	185
Figura 49. Tamizaje.....	185
Figura 50. Curva termogravimétrica: Descomposición de la biomasa en el tiempo.....	186
Figura 51. Equipo de floculación VELO JLT4 de cuatro puestos .....	186
Figura 52. Balanza de precisión marca Pioneer modelo OHAUS.....	187
Figura 53. Secador de bandejas LAB TECH Modelo LD015F.....	187
Figura 54. Mufla modificada con ingreso y salida de gases activantes.....	188
Figura 55. Reactor de lecho fijo para tratamiento pirolítico de pequeñas muestras de materia prima. ....	188
Figura 56. Cilindros de CO <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> con sus respectivos rotámetros.....	189
Figura 57. Muestras de las materias primas adicionales .....	193
Figura 58. Curva de calibración .....	194
Figura 59. Pruebas de adsorción de azul de metileno en la tercera etapa de la investigación ..	194
Figura 60. Diferencias de la capacidad adsortiva entre la cascarilla de arroz y el palmiste .....	194

**LISTA DE CUADROS**

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Cantidad de biomasa residual producida por el sector agrícola en el departamento de Nariño .....	83
Cuadro 2. Cantidad de biomasa residual producida por el sector agrícola en el departamento del Cauca .....	84
Cuadro 3. Listado de Normas ASTM más usadas en el procesamiento de carbón activado .	183
Cuadro 4. Calibración de rotámetros para CO <sub>2</sub> .....	190
Cuadro 5. Calibración de rotámetros para N <sub>2</sub> .....	191
Cuadro 6. Matriz de experimentos normalizada y plan de experimentación real .....	192

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Producción municipal anual de biomasa en los departamentos de Cauca y Nariño ..	173
Anexo B. Normas ASTM E para caracterización de materias primas y carbón activado .....	183
Anexo C. . Caracterización de la biomasa y equipos del proceso .....	185
Anexo D Descripción de los equipos para pirólisis .....	188
Anexo E. Calibración de rotámetros .....	190
Anexo F. Diseño experimental .....	192
Anexo G. Muestras para análisis de cenizas .....	193
Anexo H. Pruebas de adsorción de azul de metileno .....	194

## RESUMEN

El objetivo de la pasantía fue participar en el desarrollo del prototipaje y puesta en marcha de un equipo de pirólisis con funcionamiento por etapas para producir biochar en el Área de Investigación y Desarrollo de la empresa INNOVATIVA INGENIERIA S.A.S. para ello fue necesario establecer un diagnóstico sobre el estado actual de generación de biomasa en el departamento de Nariño, Cauca y Valle; seguido de una vigilancia tecnológica de los equipos e implementos para los procesos de pirólisis y por último, la ejecución de pruebas experimentales a escala de laboratorio. Con base en los resultados obtenidos, se pudo identificar que algunos precursores de biochar son: la cascara de coco, el cuesco de palma, la cascarilla de arroz, el bagazo de caña de panela, la pelusa de coco y el palmiste, siendo los tres primeros los que presentan el mejor perfil para ser convertidos a enmiendas orgánicas, ya que al desarrollar una mejor estructura porosa, presentaron porcentajes de remoción de azul de metileno superiores al 80% y rendimientos que estaban alrededor de un 30%, lo cual favorecería su aplicación en campo para procesos de bioretención de nutrientes, agua y fertilizantes y su implementación como una tecnología carbono negativa. El diseño del equipo de pirólisis por el cual optó la empresa, corresponde a un horno rotatorio con alimentación semi continua y con ingreso y salida de gases activantes. Los protocolos de producción de biochar a partir de procesos de activación termofísico y termoquímico, presentaron ciertos aspectos técnicos que se deben considerar, al momento de elegir el prototipo de carbón que se desea obtener, puesto que las condiciones experimentales determinan su calidad y orientan su campo de aplicación.

**Palabras claves:** Pirólisis, Biochar, Enmiendas orgánicas, Sumideros de carbono, Rendimientos, Porcentajes de remoción de azul de metileno, Horno rotatorio.

## ABSTRACT

The objective of the internship was to participate in the development of prototyping and implementation of equipment pyrolysis operation in stages to produce biochar in the area of Research and Development of the company INNOVATIVA ENGINEERING S.A.S. for it was necessary in the first instance, establish a diagnosis on the actual state of biomass generation in the department of Nariño, Cauca and Valle; followed by a technological surveillance equipment and implements for pyrolysis processes and finally, the implementation of pilot tests at laboratory scale. Based on the results obtained, it was identified that some precursors of biochar are: coconut shell, the palm shell, husk rice, sugar cane bagasse, coconut fluff and palm kernel, the first three being those with the best profile to be converted to organic amendments, as to develop a better porous structure, presented removal percentages of methylene blue above 80% and yields were around 30%, which favor its application in the field for bioretention processes nutrients, water and fertilizer and its implementation as a negative carbon technology to become carbon sinks. The design of equipment pyrolysis selected by the company corresponds to a rotary kiln with semi continuous feeding and entry and exit of activating gases. Protocols biochar production from thermophysical and thermochemical processes activation, presented some technical aspects to consider, when choosing the prototype coal to be obtained, since the experimental conditions determine their quality and orient its scope.

**Keywords:** Pyrolysis, Biochar, Organic amendments, Carbon sinks, Yields, Removal percentages of methylene blue, Rotary kiln.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Carbón Activo:** Carbón que ha sido "activado" a alta temperatura mediante calentamiento en ausencia o presencia limitada de oxígeno (pirólisis), sometido a procesos físicos, químico y/o combinados, que da lugar a una estructura porosa interna enormemente desarrollada.

**Carbonización:** Proceso de formación de un material con un mayor contenido de carbono que el precursor orgánico. Suele ser un proceso de pirólisis que da lugar a un residuo carbonoso casi puro.

**Cenizas:** Contenido mineral del carbón activo. Se definen normalmente en % del peso de la muestra calcinada con respecto a la muestra que se examina.

**Humedad:** Porcentaje del peso de agua contenido en el carbón activo.

**Adsorbato:** Son aquellas sustancias absorbidas por un carbón activo o por otro material adsorbente.

**Adsorbente:** Material, como el carbón activo, en el que se verifica el fenómeno de la adsorción.

**Adsorción:** Adhesión de un finísimo estrato de moléculas, líquidas o gaseosas, a la superficie de sólidos (por ejemplo, carbón activo) con los que aquéllas entran en contacto.

**Desorción (o desadsorción):** Es lo opuesto a la adsorción. Se trata de un fenómeno en el que las moléculas adsorbidas abandonan la superficie del material adsorbente.

**Área superficial:** Es la cantidad de superficie referida al conjunto de los poros del carbón. Se la determina en base a una isoterma de adsorción, según el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET). Se expresa en  $\text{m}^2/\text{g}$ .

**Distribución granulométrica:** Se obtiene haciendo pasar una cantidad pesada de muestra a través de una serie de cedazos de laboratorio en sobreposición. Es el conjunto de las pesadas atrapadas en cada cedazo.

**Granulometría:** Se expresa normalmente en mesh, que indican las medidas de cedazo entre las que el carbón puede, respectivamente, pasar o quedar atrapado.

**Isotherma de adsorción:** Es la medida de la capacidad de adsorción en función de la concentración de la sustancia adsorbida (adsorbato) a una temperatura preestablecida. Puede representarse como una curva en un diagrama en el que se representa la cantidad adsorbida por unidad de peso del adsorbente, y la concentración en el punto de equilibrio adsorbato.

**Lecho fijo:** Proceso de adsorción en el cual el material adsorbente permanece fijo, en el interior de la columna, hasta su completa saturación.

**Lecho móvil:** Designa una operación a contracorriente dentro de una columna desadsorción individual. El carbón saturado es desplazado hasta el extremo inferior de la columna y el carbón fresco (o regenerado) se añade al extremo superior. El flujo del líquido se mueve de abajo a arriba, en dirección opuesta a la del carbón.

**Macroporos:** Se llaman así a los poros contenidos en el carbón activo cuyo diámetro sea superior a los 500 Angstroms.

**Mesoporos:** Poros contenidos en el carbón activo cuyo diámetro queda comprendido entre los 500 y los 30 Angstroms.

**Microporos:** Poros contenidos en el carbón activo cuyo diámetro sea inferior a 30 Angstroms.

**Volumen de los poros:** Suma de los macro, meso y microporos, en un carbón activo, o sea su volumen total. Se expresa generalmente en  $\text{cm}^3/\text{g}$ .

## INTRODUCCIÓN

Colombia se caracteriza por presentar una gran riqueza agropecuaria y agroindustrial, sin embargo su desarrollo en estos sectores se ha limitado por la falta de inversión en investigación, ciencia y tecnología, los cuales constituyen los pilares para lograr una transformación social productiva, que requiere de la integración de elementos como el capital, la tierra y el trabajo en pro del aumento de la productividad, la competitividad y el desarrollo sostenible.

La empresa Innovactiva Ingeniería S.A.S., se ha encaminado al aprovechamiento de subproductos de origen biológico hacia nuevos productos de interés para la industria, promoviendo así, el desarrollo de proyectos que apuesten por la competitividad y productividad del sector agroindustrial a través de la investigación, en temas relacionados con las tecnologías de transformación de la biomasa en forma limpia y sostenible. Por otro lado, la Universidad de Nariño desarrolla el que hacer investigativo en armonía con los postulados propios de la actividad científica, los cuales apuntan esencialmente a desarrollar proyectos que tengan como fin, la producción de conocimiento y el diseño y mejoramiento de procesos, en este contexto, la pasantía realizada converge con las directrices tanto de la institución como de la empresa, ya que la conjugación de los elementos que ofrecen ambas entidades, no solo acogen al estudiante, sino que le generan un reto personal para que desarrolle sus competencias interdisciplinarias hacia el uso adecuado y sostenible de los recursos de los cuales dispone, produciendo conocimiento y generando soluciones que tengan un impacto positivo dentro de la comunidad y dentro de las entidades en las cuales se desenvuelve.

## **1. TITULO**

“PARTICIPACIÓN EN EL DISEÑO DE UN HORNO DE PIRÓLISIS PILOTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES CON FUNCIONAMIENTO POR ETAPAS PARA PRODUCIR BIOCHAR EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I&D DE LA EMPRESA INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S”

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso indiscriminado de agroquímicos provenientes del petróleo, el inadecuado manejo de los residuos agroindustriales, las incorrectas técnicas de labranza y la escasa rotación de cultivos, son algunos de los principales factores que generan fenómenos de erosión, desertificación y el agotamiento apresurado de grandes extensiones de tierra. En Colombia la aplicación promedio de fertilizantes de síntesis química es de 499,4 kg/ha, mientras que el promedio en América Latina está alrededor de los 106,9 kg/ha, de los cuales la planta solo toma alrededor del 40%, el restante 60% se pierde por diferentes vías que contaminan el agua y el aire; es decir que Colombia hace uso de estos fertilizantes cuatro veces más que el promedio de los países latinoamericanos (Pérez, 2013).

Por otro lado, los costos de los agroinsumos en el país no dejan de ser alarmantes, pues sobrepasan entre un 30% y un 50% el precio mundial, además de seguir siendo controlados por entidades que tienen monopolizado el mercado sin una efectiva regulación por parte del Gobierno. Lo anterior, incide negativamente en los costos de producción de los campesinos, quienes gastan entre un 30% y un 40% de su presupuesto en plaguicidas y fertilizantes de síntesis química industrial, evidenciando la dependencia compulsiva de los agricultores nacionales hacia los agroquímicos, algo que no solo afecta el bolsillo, sino también el ambiente y la salud (Pérez, 2013).

El relieve de estos datos pone de manifiesto que los campesinos colombianos no conocen las características y requerimientos nutricionales de sus suelos y que este panorama debe llevar a retomar la investigación en el campo basada en la ciencia y la tecnología y más aún cuando se está de cara a la competencia internacional a la que han sido expuestos los agricultores a partir de la firma de los TLC.

Por otra parte, la inadecuada disposición de residuos procedentes tanto de las empresas como de los cultivos, han generado un fenómeno de acumulación y contaminación de inmensas proporciones, convirtiéndolo en un problema no solo ambiental, sino también económico, pues logísticamente demanda una inversión sin retorno; en el caso puntual de la cascarilla de arroz, según la arrocería la Esmeralda, ésta debido a su baja densidad y gran volumen, genera gastos de transporte que sobrepasan 8 veces el valor de la misma y 7 veces el de almacenamiento.

Actualmente en el país, los proyectos para la producción de biochar son casi nulos y la idea de incursionar en la implementación de nuevas tecnología que permitan cambiar la ruta de transformación de la biomasa, es aún incipiente, requiriendo inmediatamente de proyectos que promuevan el uso y aprovechamiento de la diversidad natural de forma integral, este constituye el caso de la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S, que ve en el aprovechamiento de la biomasa agroindustrial una oportunidad inaplazable de empezar a fabricar biochar con una tecnología de producción más sofisticada.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El país experimenta la necesidad de buscar alternativas de solución inaplazables, por lo tanto, en el panorama han surgido otro tipo de mecanismo menos perjudiciales para el suelo y más afines con el medio ambiente, como son la agricultura biológica y la agroecología y dentro de ellos la producción de biochar, el cual para la economía campesina constituye un aliciente que contribuye a reducir la dependencia a los insumos nocivos y a las fluctuaciones del mercado respecto a los precios de los fertilizantes derivados del petróleo.

La propuesta de la fabricación de carbón biológico activo a partir de diferentes tipos de biomasa, es especialmente interesante para el sector agrícola y agroindustrial, donde se generan una cantidad importante de residuos orgánicos cuya disposición actual no va más del relleno sanitario, como material de piso en galpones y pesebreras y en mayor proporción como fuentes de energía .

Es por tanto la importancia del biochar, el cual es una material que mejora ostensiblemente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, ya que sirve como un enmendador importante de carbono y nitrógeno del suelo, un bioretenedor de nutrientes y agua, que además de retenerlos, los libera lentamente a la rizósfera y un recalcitrante capaz de absorber grandes cantidades de dióxido de carbono y gases contaminantes en suspensión. Otras propiedades atribuidas al carbón biológico son las de mejorar la biomasa microbiana, ayudar a que el suelo tenga una estructura de baja densidad para aumentar el drenaje, la aireación y la penetración de las raíces, disminuir la disipación de herbicidas en el suelo, la filtración de agroquímicos en aguas subterráneas, así como reducir los fenómenos de lixiviación y percolación de los fertilizantes (Jha et al., 2010).

El carbón producido a partir de biomasa, es una promisoriosa enmienda de suelos que combina la durabilidad química en altas áreas superficiales y la capacidad de intercambio iónico, que en sinergia aumentan los rendimientos en muchos cultivos y mejoran la disponibilidad de nutrientes en suelos pobres (Major, 2006). Es preciso aclarar que los abonos orgánicos y las enmiendas no reemplazan los fertilizantes químicos; su efecto acondicionador se refleja en el mejoramiento del ambiente bioquímico del suelo, lo cual se traduce en un mejor aprovechamiento de los nutrientes aplicados al suelo, incrementando su eficiencia y disminuyendo las pérdidas por fijación, lixiviación y volatilización, así mismo, reduciendo el efecto de las sustancias tóxicas y promoviendo la actividad biológica del suelo (Sandoval, 2013).

Por lo tanto, la producción masiva de enmiendas orgánicas mediante procesos de pirólisis en condiciones de operación controladas, constituye una estrategia económicamente viable y compatible con las políticas públicas y ambientales, ya que además de servir como un mejorador de suelos e incrementar la capacidad productiva de los cultivos, altera el propio ciclo del carbono, al ser una tecnología carbono negativa capaz de ralentizar la velocidad a la que se devuelve fotosintéticamente el carbón fijado en el suelo a la atmosfera, participando simultáneamente en la disminución del cambio climático por el secuestro de carbono. Otra ventaja considerable, es que posibilita la obtención de energía representada en el gas y el aceite vegetal resultado de la pirólisis, el cual permite optimizar los procesos que incluyan la generación de potencia eléctrica.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1 Historia del biochar

El uso de biomásas agroindustriales y su procesamiento mediante procesos termoquímicos para su posterior aplicación en campo, es una emulación del fenómeno de la producción natural de carbón de hace millones de años, pues el carbón vegetal se hizo en primera instancia por calefacción de leña u otro material orgánico con un suministro limitado de oxígeno o pirólisis (Boullosa, N., 2010). En los molinos, la práctica habitual consistía en la quema directa de los residuo a espacio abierto, generando problemas ambientales no solo para el aire sino para el suelo; la aparición de regulaciones ambientales, entre ellos el protocolo de Kioto, originó la aparición de nuevos inconvenientes, ya que ahora los residuos tendrían que ser quemados en condiciones especiales, para lo cual el margen de utilidades y la falta de tecnología no propiciaba un cambio alentador. Por eso a partir de los ochenta se empezaron a realizar diferentes investigaciones para encontrar un valor agregado a lo que hasta ese momento se consideraba como un desecho (Quiceno & Mosquera, 2010).

Frente a este tipo de problemáticas, una de las alternativas que surgió, fue incursionar en los procesos de biotransformación que propendan por el uso de residuos agroindustriales procesados como fuente activa de nutrientes, entre ellos la tecnología de producción de biochar, el cual si bien fue un tema de investigación relacionado con la agricultura desde finales del siglo XIX, fue durante la década de los años ochenta, cuando se intensificó su investigación también en otros campos (Lehmann, 2009).

El interés originado por la aplicación del biochar en suelos, se debe principalmente a dos hechos: en primer lugar, debido al descubrimiento de partículas similares al carbón en suelos muy fértiles y de alto contenido en carbono del Amazonas en Brasil, denominados localmente

como *Terra preta do Indio* (Lehmann,2009) y en segundo lugar, debido a investigaciones publicadas que han demostrado la recalcitrancia de este material frente a otras enmiendas orgánicas y su contribución al incremento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Cheng, et al., 2008 y Sohi, et al., 2009).

La denominada *Terra preta* es consecuencia de prácticas de manejo de suelos ancestrales (500-2500 años BP) y parecidas al carboneo de leña y otros restos de biomasa, llevadas a cabo por culturas indígenas anteriores a la colonización europea (Petersen, et al., 2001). Este tipo de suelos han sido estudiados debido a su elevada fertilidad y por su popularidad entre las poblaciones cercanas debido a la productividad y calidad en cultivos de papaya y mango (Lehmann, et al., 2003a). El crecimiento de dichos cultivos es muy rápido, incluso tres veces mayor al comparado con cultivos de campos adyacentes fuera de la *Terra preta*. Si bien ha habido discusión en cuanto al origen de dichos suelos, actualmente se reconoce que se deben a las prácticas de manejo de las poblaciones indígenas (Lehmann. et al., 2003b).

Estos suelos se identifican por el color negro de su perfil edáfico y por sus altos niveles de materia orgánica y nutrientes como N, P, K y Ca. Estas características se atribuyen en parte a su elevado contenido en carbón. Se han encontrado concentraciones de 150 gC/kg de suelo frente a 20-30 gC/kg de suelo en suelos adyacentes (Glaser et al., 2001). La fuente de la elevada concentración de carbono se considera que son los restos de biomasa procedente de una combustión incompleta que se añade al suelo. Esta hipótesis se ha demostrado a partir de la similitud entre las partículas encontradas en estos suelos con las de biochar. A su vez, se han encontrado perfiles orgánicos de entre 1 a 2 metros de profundidad, lo cual ha sugerido la hipótesis de su utilidad como almacenamiento de carbono estable, demostrable debido al período

de tiempo pasado entre el abandono de estos suelos y su descubrimiento a finales del siglo pasado.

En adición a lo anterior, este tipo de suelos con estas características específicas, no solamente se han encontrado en Brasil, sino también en Ecuador, Perú y en zonas de la sabana surafricana (Lehmann, 2003b). El fenómeno de la *Terra preta* ha tenido un fuerte impacto en el campo de la ciencia del suelo, lo que se ha traducido en numerosas publicaciones científicas (Lehmann, 2009). De esta manera y en el contexto actual de cambio climático, ha surgido la posibilidad de desarrollo de antrosoles (suelos muy modificados por la intervención humana) para almacenamiento de carbono denominados como *Terra nova* (sumideros de CO<sub>2</sub>), y como mejora de suelos agrícolas en base a la utilidad del biochar como enmienda orgánica, a través de modernas técnicas de manejo similares a las que originaron la *Terra preta do Indio*.

Según Dominic et al., (2010) en el mundo se podría secuestrar de un modo sostenible el 12% de todas las emisiones de gases con efecto invernadero simplemente produciendo biochar; entre tanto, Rondon et al., (2006) recuerda que se ha demostrado que añadir biochar en ciertos suelos reduce las emisiones de metano y óxido nitroso en un 73%, que en su ausencia, acaban en la atmósfera. Por su parte, Jha et al. (2010) estableció que el biocarbón puede producir beneficios significativos cuando se aplica a suelos agrícolas en combinación con algunos fertilizantes, produciendo un incremento en el rendimiento de los cultivos, potencializando propiedades de retención de agua del suelo, conductividad hidráulica saturada y la disponibilidad de nutrientes, así como una disminución en la capacidad de disipación de los herbicidas en el suelo.

Una de las ventajas del uso del biochar como enmienda del suelo, es que el C puede ser almacenado durante cientos de años, dada la estabilidad del biochar, mejorando el crecimiento de las plantas y el secuestro de carbono en el suelo (Lehmann, et al., 2006). No obstante, se ha

encontrado que existe una fracción del biochar que no sería estable a largo plazo, de este modo se ha sugerido que el biochar estaría formado por componentes estables y otros que en cambio, serían degradables, por lo tanto serían las condiciones de la pirólisis, así como las características de la materia prima utilizada en la producción de biochar, los aspectos que determinarían la proporción de componentes relativamente lábiles en el biochar (Sohi et al., 2009).

Otros aspectos estudiados son el aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, en parte por la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), así como la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua, encontrándose que los suelos de la *Terra preta* presentan una capacidad de retención de agua superior en un 18% en comparación a los suelos adyacentes, lo cual permitiría reducir el laboreo mecánico y a su vez los costes en irrigación (Fowles, 2007, Glaser, 2002 y Glaser, et al., 2000). Según Major (2010) este material tiene la capacidad de reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados.

Otros estudios como los Steiner et al., (2008) han encontrado incrementos de la actividad microbiana en suelos enriquecidos con biochar, haciendo referencia a que debido a su estructura microporosa, se permite el establecimiento de colonias microbianas, sin embargo, debido a la falta de conocimiento en cuanto a que tipo de comunidad microbiana puede verse favorecida, se ha discutido el tipo de actividad que puedan realizar en el ecosistema edáfico.

Actualmente La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) estableció que el biochar constituye una potencial estrategia de mitigación importante de carbono, otorgando la posibilidad a los fabricantes certificados, la venta de créditos de

carbono como enmienda y para la reducción certificada de emisiones (CER), lo cual tendría un impacto directo en la economía de sus productores (Tenenbaum, 2009).

#### **4.2. Biochar**

El Biochar es carbón creado mediante la descomposición química de materia orgánica, acelerada por el calentamiento en ausencia de oxígeno o pirólisis; a diferencia del carbón, el biochar no es usado como combustible, sino para secuestrar carbono, a la vez que enriquece la composición del suelo donde es depositado (Boullosa, N. 2010). Éste tiene varios impactos importantes en los suelos, entre los más importantes están: (a) aumentar la capacidad del suelo para absorber nutrientes y agroquímicos, (b) retener la mayoría de los nutrientes que necesitan las plantas y liberarlos lentamente a la rizósfera, (c) tener una estructura de baja densidad que ayuda a aumentar el drenaje, aireación, y penetración de las raíces en el suelo y (d) favorecer las propiedades de retención de agua del suelo, conductividad hidráulica saturada y disminuir la disipación de herbicidas en el suelo (Jha, et al., 2010 y Warnock, et al., 2007).

Para Sciencemag (2012) dentro de las funciones dignas del biochar se puede considerar la provisión de compuestos que promueven el crecimiento de las plantas y resistencia a las enfermedades, la modificación de la dinámica de la asimilación de los nutrientes en la planta y el efecto sinérgico entre biochar y estiércol, indicando que en sus resultados experimentales alcanzó un incremento en la productividad de las plantas del 10 al 15%, especialmente en suelos de textura media y baja de pH.

#### **4.3 Pirólisis**

La pirólisis consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante (Fajardo, 2011). Es un proceso de transformación termoquímico conocido desde la antigüedad y que en los últimos años ha despertado un

renovado interés en la comunidad científica, ya que proporciona una opción viable para transformar los residuos agrícolas y forestales en productos de interés para la industria (Dufour, J., 2011).

Esta tecnología fue optimizada en la década de 1970 para maximizar el rendimiento de productos líquidos, dando lugar a lo que se conoce como pirólisis flash. En este proceso, la biomasa era tratada en condiciones anóxicas a temperaturas de 400–650 °C, con una velocidad de calentamiento muy elevada (103–104 °C/s), seguido por la rápida condensación de los vapores, obteniendo rendimientos de hasta un 80% en carbón y bio-aceites. Los aceites pirolíticos o bioaceites, son líquidos de color marrón oscuro, corrosivos y con olor a humo, que están formados por compuestos orgánicos polares y agua, su composición química es muy compleja, ya que están constituidos por una mezcla de más de 400 compuestos altamente oxigenados, incluyendo ácidos carboxílicos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas y especies aromáticas, junto con algunos carbohidratos poliméricos y fragmentos de lignina. Estos retienen hasta un 70% de la energía almacenada en la biomasa (16 MJ/Kg-1) pero presentan numerosos inconvenientes para su uso directo como combustibles, entre ellos cabe destacar su elevada acidez ( $\text{pH} = 2\text{-}3$ ), alta viscosidad (cP 35–1000 a 40 ° C) y reducida estabilidad química (Dufour J., 2011).

El carbón biológico por su parte, es un tipo de carbón que además de ser utilizado como combustible para el transporte, la industria, o cocinar, tiene varias otras aplicaciones, tales como la purificación del agua y la filtración. En el caso particular de su aplicación en campo, su uso está orientado a la captura de carbono a largo plazo y como un enmendador de suelos (Jha, et al., 2010).

Los dos diseños de equipos de pirólisis más comunes son: (1) los que presentan una disposición en forma de un horno abierto y (2) los que permiten la recuperación de subproductos, los cuales son cerrados.

En el primer caso se aprovecha la combustión parcial de la carga para iniciar la carbonización, utilizando como fuente de energía la leña pre secada, la cual es ubicada previamente en los recipientes de acero o retortas. En estos equipos se alcanzan rendimientos en carbón relativamente bajos que varían entre un 15 y un 20% en peso en relación al peso seco de la madera. Para este modelo de operación se usan diferentes tipos de hornos, desde el primitivo de fosa en el suelo, hasta hornos de ladrillos o bloques de hormigón.

En el segundo caso, lo que usualmente se emplea son hornos con calentamiento externo que pueden trabajar en forma continua o por cargas (batch). En estos procesos se obtienen los sólidos, los condensados y los gases producto de la pirólisis. Su rendimiento y composición están función de las condiciones específicas de reacción (FAO, 2002a).

La tendencia actual de las nuevas fábricas encargadas de la producción de carbón vegetal aspiran a mejorar los efectos medioambientales manteniendo o elevando al mismo tiempo el rendimiento y la calidad del producto; para ello han invertido en nueva tecnología que reemplace los viejos hornos o retortas de ladrillo o acero, buscando en muchos casos que esto se compense con el mayor rendimiento del carbón y en un mejoramiento de las emisiones que vienen a ser una prima adicional (FAO, 2002b).

#### **4.4 Parámetros de proceso**

##### ***4.4.1 Materias primas***

Existe una amplia variedad de biomásas con las cuales se ha desarrollado una experimentación a diferentes escalas mediante procesos de pirólisis, sin embargo la mayoría de

estudios se han centrado en la madera y sus derivados, residuos agrícolas, biomásas herbáceas, residuos sólidos municipales, residuos del procesamiento de alimentos, residuos industriales, entre otros, es decir aproximadamente alrededor de 100 especies de biomásas, de las cuales algunas de ellas son:

Madera y sus derivados: Aserrín de álamo, aserrín de picea, aserrín de muebles viejos, planta mandioca, aserrín de pino, madera de abeto Douglas, aserrín de madera dura, aceite de eucalipto, pinus radiata, mezclas de maderas, madera de haya, biomasa de madera comercial, aserrín de pino, roble rojo, madera de pino, especies de madera argentina, abedul, quebracho blanco, Pterocarpusindicus, Cunninghamialanceolata, Fraxinusmandshurica, residuos forestales y residuos de pino, madera de arce rojo.

Residuos agrícolas: Bagazo de la caña de azúcar, bagazo de sorgo de trigo, cáscara de girasol, Pinos ciprés, mazorca de maíz, mazorca y rastrojos de maíz, residuos de la caña de azúcar, pajas de residuos de verduras agrícolas, tallo del tabaco, hueso de semilla de albaricoque, pasta de aceite de colza, cáscara de coco, pelusa de coco, cascarilla de arroz, tallo de algodón, semilla de aceituna, residuos de te paja y tallos de orégano, vástago de racimos de frutas, conchas de palma, sorgo dulce y bagazo de sorgo dulce, residuos de uva, tallos de cereales, euphorbia rígida, bagazo de olivo, vástagos de frutos de la palma de aceite, cascara de aceituna, pulpa de manzana, residuos de la palma de aceite, semilla de colza, bagazo de olivo y uva, tallo del maíz, biomásas lignocelulósicas, semilla de cereza , tallo de algodón, bagazo de la caña de azúcar, bagazo de la caña de panela, residuos del cacao.

Subproductos industriales: Agramiza, papel de prensa, papel fino, bagazo de molino, musgo, pasta de semilla de algodón, pasta de jatropha, pasta de semilla de colza, bagazo de la planta de girasol, conchas de avellana, pasta de aceite de girasol.

Biomásas herbáceas: Semillas del capullo de algodón, gránulos de paja, hierbas de festuca-Lolium

Residuos industria de Alimentos: Granos de café, residuos de aceite de olivo, residuo del fruto de shea, licor negro.

Otros residuos: Sedimentos de aguas residuales

Dentro del proceso de pirólisis, es necesario tener en cuenta las condiciones de operación con el fin de optimizar los rendimientos de las diferentes fases (Giraldo O. 2012). Entre los aspectos relevantes que se debe tener en cuenta al momento de realizar procesos de pirólisis, se tiene: (i) tipo de reactor, (ii) escala del reactor (piloto o de laboratorio), (iii) tipo de biomasa, (iv) velocidad de calentamiento, (v) tipo de pirólisis, (vi) tamaño de partícula, (vii) tiempo de residencia, (viii) flujo de gas de arrastre, (ix) velocidad de alimentación, (x) dependencia de los rendimientos de los productos con respecto a la temperatura pico, (xi) flujo de gas de arrastre. A continuación se abordaran algunos de ellos.

#### ***4.4.2 Rangos de temperatura.***

Los rangos de temperatura han variado desde valores bajos (~200°C) hasta bastante elevados (~1100°C). Para Neves, et al. (2011) el rango típico de temperatura de pirólisis oscila entre 400°C a 700°C. Para H. S. Heo, et al. (2010), quien trabajó con aserrín de muebles viejos, al aumentar la temperatura hasta 500°C, disminuye el rendimiento sólido, lo cual es consistente con un aumento del rendimiento volátil, sin embargo, a temperaturas más altas (>500°C) ocurre la destrucción de las moléculas más pesadas disminuyendo el rendimiento del producto líquido, mientras que el rendimiento de gas y la conversión total incrementan. Esto es debido a las reacciones secundarias que llegan a ser importantes a temperaturas mayores de 500°C.

Otros trabajos relacionados con maximizar el rendimiento del producto líquido y sólido, tienen que el rango de temperatura óptimo está comprendido entre 400°C y 600°C, autores como: P. Adisak, (2011) con la planta mandioca, R. Xu, et al. (2011), con residuos de la caña de azúcar; K. Smets, et al. (2011), con pasta de semilla de colza; F. Sulaiman y N. Abdullah (2011), con vástagos de frutos de la palma de aceite; H. S. Heo, et al. (2010) con aserien de muebles viejos; R. Xu, et al (2009), con residuos de uva; S. Ucar y A. R. Ozkan (2008), con pasta de aceite de colza; B. B. Uzun, et al. (2007), con residuos de aceite olivo; W. T. Tsai, et al. (2007), con cascarilla de arroz; S. Şensöz, et al. (2006), con bagazo de olivo; B.-S. Kang, et al (2006), con mezclas de maderas; N. Özbay, et al. (2011), Con pasta de semilla de algodón; J. Piskorz, et al. (1998), con sorgo dulce y bagazo de sorgo dulce (citados en Giraldo O. 2012), así lo confirman en sus estudios.

#### ***4.4.3 Tamaño de partícula***

El tamaño de partícula tiene influencia en los rendimientos de los productos de pirólisis. Tanto las partículas grandes como las muy pequeñas afectan negativamente el rendimiento de los productos a obtener.

Para las partículas grandes el efecto se ha explicado generalmente por la velocidad de calentamiento, ya que las partículas más grandes se calientan más lentamente y la temperatura promedio de la partícula es más baja y por lo tanto el rendimiento volátil es mucho menor, lo que sugiere que restricciones de transferencia de masa y calor tienen influencia profunda para tamaños de partículas grandes.

Para estudios como los de: H. Zhang, et al. (2011) con mazorca de maíz; R. Xu, et al. (2011), con residuos de la caña de azúcar; F. Sulaiman y N. Abdullah(2011), con vástagos de frutos de la palma de aceite; S.-J. Kim, et al. (2010) con conchas de palma; S. A. Raja, et al. (2010), con

pasta de jatropha; D. López, et al (2010), con Pinos ciprés ; R. Xu, et al (2009), con residuos de uva; J. Shen, et al (2009), con aceite de eucalipto; S. Ucar and A. R. Ozkan(2008), con pasta de aceite de colza; W. T. Tsai, et al. (2007), con cascarilla de arroz; B. David A.E (2006), con pino insignie; S. Şensöz, et al. (2006), con bagazo de olivo; B.-S. Kang, et al (2006), con mezclas de maderas; D. Ayhan(2004), con residuos de té; D. S. Scott, et al (1999), con aserrín de picea (citados en Giraldo O. 2012), los rangos de tamaño de partícula que se han estudiado varían desde 0.1 mm hasta 100 mm. Para el caso de las partículas excesivamente pequeñas según H. S. Heo, et al. (2010) quien trabajó con aserrín de muebles viejos y D. Ayhan (2004) con residuos de té (citados en Giraldo O. 2012), lo que ocurre es un sobrecalentamiento seguido por la conversión de los vapores a gas. También se encontraron estudios donde no se notó influencia del tamaño de partícula, como en los de S. Şensöz, et al. (2006), con bagazo de olivo; B. B. Uzun, et al. (2006) con tortas de soja; F. Ateş, et al. (2004), con tallo de sésamo; J. M. Encinar, et al. (1996), con bagazo de olivo y uva (citados en Giraldo O. 2012).

Los cambios en los rendimientos de los productos debido al tamaño de partícula también se han relacionado a las reacciones homogéneas y heterogéneas de los alquitranes recién formados a medida que estos escapan de la partícula (Neves, et al. 2011). Lo anterior establece que existen divergencias en cuanto al manejo de valores estándar del tamaño de partícula y por tanto dependen de los resultados que se deseen obtener.

#### ***4.4.4 Flujo de gas de arrastre.***

Tiene la función principal de remover los productos calientes para minimizar las reacciones secundarias tales como craqueo, repolimerización y recondensación (W. T. Tsai, et al. 2007). Los flujos de gas de arrastre manejan rangos desde 30 cm<sup>3</sup>/min a 7000 cm<sup>3</sup>/min a condiciones estándares de presión y temperatura (101325 Pa y 298 K). Según estudios reportados como los

de P. Adisak(2011), con la planta mandioca; F. Sulaiman y N. Abdullah (2011), con vástagos de frutos de la palma de aceite; D. López, et al. (2010), con pinos ciprés; N. Abdullah, et al. (2010), con vástagos de racimos de frutas; H. S. Heo, et al. (2010), con aserrín de muebles viejos; O. Masek, et al. (2008), con café molido; S. Ucar and A. R. Ozkan(2008), con pasta de aceite de colza; N. Özbay, et al. (2001), con pasta de semilla de algodón (citados en Giraldo O. 2012), cuando se aumenta el flujo de gas de arrastre, aumenta el rendimiento del líquido, disminuye el rendimiento de gas y el rendimiento sólido muestra poca variación, sin embargo, la mayoría de estudios sobre pirólisis buscan maximizar la producción de productos líquidos y trabajan flujos de arrastre relativamente altos.

#### ***4.4.5 Tiempo de residencia.***

Este factor tiene influencia tanto en las reacciones de pirólisis primarias (desprendimiento de los primeros volátiles) como las secundarias (reacciones cruzadas de los productos), estableciéndose que tiempos largos de residencia favorecen las reacciones secundarias y tiempos cortos las reacciones primarias (Butler et al. 2011).

Por otra parte, en cuanto al desprendimiento de gases, hay que tener en cuenta que el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}$  son los gases principales que surgen de la descomposición primaria de la biomasa. Para temperaturas menores de  $450^\circ\text{C}$ , el principal producto es el  $\text{CO}_2$  (~2/3 del gas total), y el resto de gas es principalmente  $\text{CO}$ , sin embargo cuando la temperatura aumenta a valores mayores al rango  $450^\circ\text{C}$ - $550^\circ\text{C}$ , los rendimientos de  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{C}_2\text{H}_6$  llegan a ser importantes. En cuanto a los rendimientos de los productos obtenidos por la descomposición primaria y secundaria de la biomasa tenemos:

Los rangos de rendimiento de  $\text{CO}_2$  varían desde valores bajos (~3%) a temperatura de pirólisis alrededor de  $400^\circ\text{C}$ , hasta valores de ~20% a temperaturas de pirólisis entre  $700^\circ\text{C}$ -

750°C. Generalmente el rango de temperatura entre 700°C-750°C es en el cual se obtiene el mayor rendimiento de CO<sub>2</sub>. A temperaturas mayores de alrededor de 700°C el rendimiento de CO<sub>2</sub> comienza a disminuir.

Para el CO el rendimiento varía desde ~0.9%, a temperatura de pirólisis alrededor de 300°C, hasta valores de ~54% a temperaturas de pirólisis de alrededor de 900°C. El rendimiento de CO generalmente aumenta al aumentar la temperatura.

El CH<sub>4</sub> registra una variación en su rendimiento desde ~0.06% a 350°C hasta ~7.4% a temperaturas de pirólisis de alrededor de 800°C y aumenta al aumentar las temperaturas.

El rendimiento del H<sub>2</sub> puede ser tan bajo como ~0.01% a temperatura de pirólisis alrededor de 350°C y llegar hasta ~2.6% a temperaturas de pirólisis cercanas a 1000°C. Al igual que el CO y el CH<sub>4</sub>, el rendimiento de H<sub>2</sub> aumenta al aumentar la temperatura.

Por último el rendimiento para el C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> varía entre ~0.06% y ~1% cuando la temperatura pasa de 430°C a 800°C.

#### **4.5 Estado del arte**

Singh, R., et al. (2015) en su trabajo de investigación *“Aplicación multifacética de los residuos de cultivo en el biochar como una herramienta para la agricultura sostenible: Una perspectiva ecológica”* desarrollado en la India, estableció que la negligencia y la quema de residuos de cultivo a campo abierto generan fenómenos que contribuyen significativamente al aumento de las emisiones de gases y a la heterogeneidad atmosférica; la reconversión termoquímica de los residuos a biochar ha sido evaluado como un potencial mejorador de suelo y un agente secuestrador de carbono, teniendo un impacto directo sobre las propiedades básicas del suelo, junto con la liberación moderada de gases de efecto invernadero de los agroecosistemas,

proporcionando superficies de adsorción a los agroquímicos y mejorando la dinámica de los nutrientes esenciales.

En su revisión ofrecen una visión crítica sobre la investigación actual de diversos aspectos, sobre todo ecológicos, tales como: fuentes de materias primas para la producción de biochar, condiciones de pirólisis y los cambios después de la aplicación. Además realizan un breve relato de la relevancia agronómica y las principales limitaciones del biochar como enmienda, así como su uso en la ingeniería ecológica para la agricultura sostenible, concluyendo que su aplicación es más prolífica usándose como mezcla y no a través de su uso exclusivo.

Li, F. et al (2015) en su estudio *“Efecto de la temperatura de pirólisis sobre la retención de carbono y la estabilidad de biochar”* realizado en China, evaluó el efecto de la temperatura de pirólisis (200-700°C) a una velocidad de calentamiento aproximada de 20°C/min en una mufla bajo la presencia limitada de oxígeno sobre el rendimiento del biochar, su composición elemental, la distribución de grupos funcionales mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y su estabilidad química con métodos de oxidación por dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y permanganato de potasio ( $KMnO_4$ ).

Los resultados mostraron que el contenido de carbono (C) del biocarbón aumentó con el aumento de la temperatura de pirólisis de 54,0% a 200 °C hasta 83,7% a 700 °C, por el contrario, los contenidos de hidrógeno (H) y oxígeno (O) disminuyeron con el aumento de la temperatura de 6,31% a 2,22% para el contenido de H y de 45,1% a 10,6% para el contenido de O, respectivamente.

Por otra parte, encontraron que la relación H / C y O / C, por lo general usados como dos índices para estimar la aromaticidad del carbono del biochar, también disminuyeron con el aumento de la temperatura pirólisis de 1,25 a 0,32 para H / C y de 0,54 a 0,09 para O /

C, respectivamente, lo que indica que la aromaticidad del carbono del biochar se reforzó con el aumento de la temperatura de pirólisis, lo cual es beneficioso para la mejora de la estabilidad del biochar. También encontraron que el rendimiento del biochar disminuyó con el aumento de la temperatura de pirólisis de 79,1% a 200 °C hasta 19,4% a 700 °C.

El carbono retenido, se define como la proporción del carbono original secuestrado en el biochar después de la pirólisis y también disminuyó con el aumento de la temperatura de pirólisis de 69,4% a 11,0%, todo lo cual indica que la alta temperatura de pirólisis agrava la pérdida de carbono, sin embargo, altas temperaturas de pirólisis fortalecieron la estabilidad del carbono, y especialmente para el biochar derivado de los 500 °C, donde la pérdida de carbón del biochar oxidado por  $K_2Cr_2O_7$  y  $KMnO_4$  eran de 10,4% y 1,66%, respectivamente, los cuales fueron más pequeños que los otros biochars derivados de otras temperaturas. Esto significó una correlación negativa entre temperatura de pirólisis, rendimiento y la retención de carbón del biochar, mientras que hubo una correlación positiva entre temperatura de pirólisis y estabilidad del biochar.

Por su parte Gul, S. et al. (2015) en su investigación sobre “*Propiedades físico-químicas y las respuestas microbianas en suelos modificados con biochar: Mecanismos y direcciones futuras*” realizado en convenio entre los países de Canadá y Pakistán, reportaron cómo el biochar crea nuevos hábitats y cambia el ambiente del suelo para los microorganismos, los cuales pueden conducir a cambios en la abundancia microbiana, estructura de la comunidad y sus actividades. Los autores en su meta-análisis revelaron que el pirolizado lento de biochar producido a partir de diversas materias primas a temperaturas desde 300 °C a 600 °C, aumentaron consistentemente algunas propiedades físico-químicas (es decir, pH, capacidad de intercambio catiónico y de agregación) y los parámetros microbianos (es decir, abundancia y estructura de la comunidad de

microorganismos) en un gran número de suelos durante incubaciones cortas de laboratorio ( $\leq 90$  días) y estudios de campo más largos de entre 1-3 años.

Además, los autores sugieren que los biochars derivados de materias primas de estiércol o de residuos de cultivos, tienden a promover la abundancia microbiana más rápido que los derivados de la madera, puesto que el biocarbón derivado de la madera y de otras materias primas lignocelulósicas tienden a presentar efectos beneficiosos sobre la abundancia microbiana del suelo, pero en tiempos posteriores a los 60 días. Entre tanto, suelos de textura gruesa tienden a tener menos agregación, menor biomasa microbiana y actividad enzimática más baja, cuando son modificados con biochars producidos por pirólisis lenta a altas temperaturas ( $> 600$  °C), sin embargo el efecto del biochar no altera las propiedades físico-químicas y biológicas de suelos arcillosos.

Por otro lado establecen la necesidad de evaluar la magnitud de la influencia que tiene el biochar en la abundancia y actividades microbianas del suelo, teniendo en cuenta (1) el tamaño de partícula, área superficial, porosidad, contenido de nutrientes y pH, y (2) la materia orgánica del suelo (MOS) y la abundancia en el contenido microbiano en la matriz del suelo.

Srinivasan, P. et al. (2015), reportaron un estudio sobre la viabilidad de la biomasa agrícola y la biomasa de aguas residuales como fuentes precursoras de biochar y de bioenergía, realizando una identificación de los biocompuestos de la materia prima: su producción, caracterización y aplicaciones potenciales. En su estudio pirolizaron seis residuos de biomasa, como son: aserrín de pino (PSD), hierba (PG), gallinaza (BL), lodos de depuradora (SS), lodos de estanque deshidratados (DWP) y los lodos de flotación con aire disuelto (DAF), encontrando que el biochar de PSD tiene el mayor potencial de secuestro de carbono y de remediación de contaminantes debido a su gran área superficial, aromaticidad y contenido de carbono retenido.

Los bajos niveles de metales pesados (Cr, Cu, Zn, As, Cd, Hg y Pb) en todos los biochars les permitió establecer que los biochars son también aplicables al suelo de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en la regla 40 CFR parte 503.

Las técnicas de caracterización que emplearon fueron: microscopía electrónica de barrido, espectrometría de energía dispersiva de rayos X, difracción de rayos X, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectrometría de masas de plasma, espectroscopia de resonancia magnética nuclear de  $^{13}\text{C}$  en estado sólido y la espectroscopia de fotoelectrones de rayos X.

Zhang, H. et al. (2015), evaluaron el efecto del proceso de pirólisis y las condiciones de activación sobre las propiedades químicas del biochar y cómo estas propiedades alteran las transformaciones de nitrógeno (N) y carbono (C) del suelo cuando se utiliza como una enmienda. Para ello, compararon las propiedades químicas del biocarbón producido a través de pirólisis lenta a 200, 400 y 600 °C, en presencia o ausencia de vapor de agua y  $\text{CO}_2$ , con activación a 800 °C.

En la metodología aplicada, añadieron una tasa de biochar de 0,75% en peso y los suelos se incubaron durante 28 días, tiempo en el que evaluaron: el N inorgánico del suelo, las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  y al finalizar este tiempo, la adsorción de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Para determinar los efectos de las condiciones de proceso sobre las propiedades químicas del biochar, los autores utilizaron la espectroscopia de resonancia magnética nuclear cuantitativa del  $^{13}\text{C}$  en estado sólido (RMN) y el análisis elemental.

Los resultados que muestran, indican que mientras los constituyentes de la materia prima no se alteraron en la pirólisis a temperatura de 200 °C, los datos de RMN demostraron que el biochar producido a 400 y 600 °C convierten más del 82% de los componentes C lábiles

a estructuras C aromáticas, que aumentaron su recalcitrancia. Los resultados también indicaron, que temperaturas de pirólisis más altas, aumentaron en el biochar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y pH, sin embargo, cuando fueron expuestas al vapor de agua y a la activación con CO<sub>2</sub> se volvió a disminuir su capacidad de intercambio catiónico.

En comparación con el suelo sin enmienda, el suelo modificado con biochar producido a 200 °C aumentó significativamente el CO<sub>2</sub> acumulado y las emisiones de N<sub>2</sub>O en más de 3 veces, mientras que los producidos a 400 °C no tuvieron ningún efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero tuvo unos efectos similares en las emisiones de N<sub>2</sub>O. El biocarbón producido a 600 °C no tuvo efecto en las emisiones de CO<sub>2</sub> ni en las emisiones de N<sub>2</sub>O. Por otro lado, la activación de biochar disminuyó significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 18%. Las enmiendas con biochar producido a 400 y 600 °C y activadas disminuyeron significativamente el N inorgánico del suelo, lo cual se atribuyó a su mayor capacidad de adsorción para NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de 62 a 81%. Desde la perspectiva de enmienda del suelo, este estudio sugiere que la activación del biochar no benefició las transformaciones de C y N del suelo.

Jassal, R. et al. (2015) en su estudio sobre el potencial de enriquecimiento de nitrógeno del Biochar en relación con la temperatura de pirólisis y la calidad de la materia prima investigó la absorción de N y su liberación, en biochar hecho a temperaturas de pirólisis de 400, 500 y 600 °C con tres materias primas: gallinaza (PL con una relación C:N de 14), virutas de madera blanda de picea, pino y abeto (SPF con una relación C:N de 470) y una mezcla 50:50 de PL Y SPF (PL/SPF). Los biochars preparados fueron enriquecidos con nitrato de amonio (AN) y urea (UAN).

En los resultados que obtuvieron, los autores indicaron que el biochar PL tiene el menor contenido de carbono (50-56%C), pero el más alto pH (9,3-9,9), conductividad eléctrica (EC

780-960dSm<sup>-1</sup>), capacidad de intercambio catiónico (CEC, 40-46cmolk<sup>-1</sup>), y el contenido de N (3.3 a 4.5%). Por otra parte también indicaron que mientras el contenido de N y la relación atómica (C:H) disminuyó con el aumento de la temperatura de pirólisis independientemente de la materia prima utilizada, tanto el pH y la EC aumentó ligeramente con el incremento de la temperatura de pirólisis para todas las materias primas.

Los biochars de PL y SPF mostraron una relación similar H:C, también una absorción y liberación similar de nitrógeno en todas las temperaturas de pirólisis. Estos biochar absorben un 5% de nitrógeno en masa, independiente de la fuente de N, sin embargo el biochar de PL/SPF, realizó un mal desempeño en la absorción de N de cualquier fuente AN o UAN. También encontraron que la relación C:H del biochar no guarda relación con las tasa de absorción de N, lo que sugiere que la adsorción física en superficies activas es el principal mecanismo de adsorción de N en estos biochars. Encontraron diferencias menores entre N absorbido de NO<sub>3</sub>-N y NH<sub>4</sub>-N entre diferentes biochars. Muy poca cantidad de N absorbido (0.2 -0.4 mg N/g biochar) fue liberado cuando fue extraído con una solución de KCl 1M, indicando que el N retenido fue fuertemente encerrado, más aun para el NH<sub>4</sub>-N, porque la liberación de NO<sub>3</sub>-N fue de 3-4 veces más grande que el de NH<sub>4</sub>-N. La absorción de NH<sub>4</sub>-N superó la CIC efectiva del biochar, lo que sugiere que la mayor parte de la absorción puede ser debido al atrapamiento físico de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en los poros del biochar.

Los resultados de este estudio sugieren que el biochar se puede utilizar para volver a mover el exceso de N en residuos como gallinaza y estiércol y ser una buena opción de mitigación para reducir la lixiviación de N y las pérdidas gaseosas.

Crombie, K. y Mašek, O. (2015) en su estudio sobre “Sistemas de pirólisis de biochar, balance entre bioenergía y secuestro de carbón” investigaron el grado en que es posible unir los

dos conceptos aparentemente opuestos de: calor y/o producción de energía de biomasa, con secuestro de carbón en la forma de biochar. Para esto, evaluaron los efectos de la materia prima, temperatura de calentamiento (HTT), tiempo de residencia en la temperatura de calentamiento y la tasa de flujo de gas de arrastre en la distribución de co-productos y su contenido energético, así como el potencial de secuestro de carbón del biochar.

El biochar lo produjeron a partir de pellets de madera (WP) y pellets de paja (SP) a dos temperaturas (350 y 650 °C), con tres tiempos de residencia (10, 20 y 40 min) y tres velocidades de flujo de gas arrastre (0, 0,33 y 0,66 l min<sup>-1</sup>). El balance de energía del sistema lo determinaron experimentalmente mediante la cuantificación de la energía contenida dentro de los co-productos de pirólisis. En el biochar también analizaron para las propiedades fisicoquímicas y funcionales del suelo, es decir, el contenido de C- estable y el contenido de C- lábil en el medio ambiente.

En los resultados obtenidos, mostraron que el tiempo de residencia no presentó ningún efecto considerable en cualquiera de las propiedades medidas. El aumento de HTT resultó en concentraciones más altas de C fijo, C total y C- estable en el biochar, así como un mayor poder calorífico (HHV) debido al aumento de la liberación de compuestos volátiles. El aumento de caudal del gas de arrastre resultó en la disminución del rendimiento del biochar y contenidos de C-estable y C- lábil.

La pirólisis a 650 ° C mostró un aumento del rendimiento C-estable, así como una disminución de la proporción de la energía almacenada en la fracción de biocarbón, pero aumentó la energía almacenada en los co-productos líquidos y gases. El caudal de gas de arrastre también se determinó que es influyente en la determinación de la proporción de la energía acumulada en la fase gaseosa.

Al final concluyen que entendiendo la influencia de las condiciones de producción sobre la estabilidad del biocarbón a largo plazo, además del contenido de energía de los co-productos obtenidos a partir de la pirólisis, se pueden desarrollar diseños específicamente para biochar, ya sea para uso agrícola, de almacenamiento de carbono, para generación de energía o la combinaciones de las tres.

Por otro lado Kambo, H. y Dutta, A. (2015) proponen en su trabajo investigativo un examen comparativo de biochar e hidrochar en términos de producción, aplicación y propiedades fisicoquímicas, estableciendo que la carbonización hidrotérmal de la biomasa (HTC) constituye una alternativa en la que la biomasa se trata con agua caliente comprimida en vez de secarla, lo cual ha mostrado resultados prometedores ofreciendo varias ventajas sobre los pre-tratamientos térmicos secos convencionales como la pirólisis lenta, en términos de mejoras en el rendimiento del proceso y la eficiencia económica, especialmente en su capacidad para procesar la materia prima húmeda sin el requisito de pre-secado.

El Char producido de ambos procesos exhibe significativamente diferentes propiedades físico-químicas que afectan sus posibles aplicaciones, las cuales incluyen pero no se limitan al secuestro de carbono, mejoramiento del suelo, producción de bioenergía y la remediación de la contaminación de las aguas residuales.

Los autores sugieren que el hidrochar (HTC char) es un recurso valioso y es superior al biochar de ciertas maneras, ya que presenta un contenido reducido de alcalinos, alcalinotérreos y metales pesados y en cambio un aumento del poder calorífico en comparación con el biocarbón producido a la misma temperatura en el proceso operativo, sin embargo su utilización efectiva requeriría estudios e investigaciones experimentales adicionales en términos de alimentación de

biomasa; efectos y las relaciones entre las composiciones de materiales de alimentación, características del hidrochar y condiciones de proceso.

Yuan, Y. et al. (2014) orientó su trabajo de investigación a la realización de un diagnóstico sobre el diseño y fabricación de equipos de pirólisis en China, país donde la producción y el comercio de biochar es bien conocido, profundizando especialmente en los equipos horizontales de carbonización de biomasa en continuo.

La diferencia que reporta el autor de este sistema sobre los modelos tradicionales, es que usa tanto un combustible de calentamiento externo, como el calor producido por las altas temperaturas de los gases de combustión generados al carbonizar las materias primas. Los flujos de gas de combustión durante el inicio no abastecen el sistema y se deben suplir y combinar con equipos de calentamiento auxiliar con uso de diesel; el reactor pirolítico cuya estructura es de doble capa, contiene la cámara de carbonización en la capa interna, donde se encuentra instalado el tornillo transportador, mientras que la capa externa tiene un tubo de combustión de alta temperatura el cual utiliza la velocidad del motor para garantizar la alimentación continua de materia prima, una mezcla y una transferencia de calor uniforme con el fin de lograr una producción continua de carbón biológico vegetal y una temperatura de carbonización controlada.

En el exterior del reactor manejan un gas de combustión de alta temperatura para calentar la biomasa; el cilindro tiene acoplado unas aletas y deflectores que extienden el tiempo de residencia del calor producido por el gas de combustión, aumentando el coeficiente de transferencia de calor del sistema.

En este documento los autores tratan los parámetros de pirólisis, el diseño térmico y se realiza un cálculo térmico del gas de combustión. Entre los componentes claves del reactor, está (i) la cámara de carbonización, de la cual el parámetro más importante es la temperatura del gas

de combustión y (ii) el diseño estructural, donde la longitud del equipo de calentamiento es de 4,24 m, el diámetro interno del tubo interno es de 0,5 m y el diámetro interno del tubo externo que es de 0,55 m.

En el marco de las pruebas experimentales desarrolladas, encontraron que de 100 kg de tallo de maíz pueden producirse 30 m<sup>3</sup>/h de gases de combustión, consumiéndose en el proceso 15,3 m<sup>3</sup>/h y los restantes 14,7 m<sup>3</sup>/h pueden usarse para otros fines. Por último, ensayaron las cáscaras de arroz para el experimento de carbonización, usando un flujo de alimentación de 45 kg/h, una temperatura final de carbonización de 500 ° C y obteniendo una relación de rendimiento del biocarbón del 42%, además del aprovechamiento de todos los subproductos de la carbonización y la reducción de las emisiones contaminantes. Los resultados indicaron que el equipo horizontal para la carbonización continua de la biomasa tiene un modelo operativo estable y sostenible, con un diseño razonable y acorde a otros equipos de carbonización

Manyà, J.J. et al. (2014) evaluó el efecto de tres factores claves de operación (temperatura máxima, tamaño de partícula y la presión) en la estabilidad potencial del biochar producido por pirólisis lenta del sarmiento de la cepa de vid. Las variables de respuesta que analizaron fueron consideradas como indicadores claves en la estabilidad potencial del biochar en suelos, entre ellas: el rendimiento en carbono fijo, la fracción aromática del carbono y las proporciones molares de H: C y O: C. Las pruebas de pirólisis lenta las llevaron a cabo en una unidad de lecho fijo a escala de laboratorio.

Los resultados de las pruebas estadísticas que los autores reportan, establecen que el tamaño de partícula es el factor más importante en la determinación de la estabilidad potencial del biochar. El uso de partículas más grandes de biomasa y en menor medida, temperaturas de pico más altas conducen a la producción de materiales más estables. Inesperadamente, la presión

absoluta sólo juega un papel muy positivo en la disminución del contenido de alquitrán en el gas producido en la salida del reactor.

Mimmo, T. et al. (2014) estudió el efecto de la temperatura de pirólisis sobre las propiedades fisicoquímicas del biochar de *Miscanthus* (*Miscanthus × giganteus*) y su estabilidad a corto plazo. Las propiedades del biochar fueron evaluadas por espectroscopia FTIR, análisis elemental CHNO, análisis termo gravimétrico simultáneo y la estabilidad a corto plazo en un experimento de incubación a 6 meses.

Todas las técnicas analíticas reportadas indicaron un valor de umbral de temperatura de pirólisis de 360°C, por encima de la cual la resistencia térmica y la resistencia a la degradación biológica aumentaban dramáticamente. La espectroscopia FTIR les mostró bandas de absorción características de celulosa y hemicelulosa (1000-1200  $\text{cm}^{-1}$ ) en los biochars de baja temperatura que desaparecían en los biochars de alta temperatura. En estos últimos los picos de absorción asociados con estructuras aromáticas aumentaron como lo confirma el descenso en las relaciones de O/C y H/C. Estos hallazgos coinciden con los resultados de los análisis termogravimétricos simultáneos.

Los experimentos de incubación les permitieron confirmar un incremento de la resistencia a la descomposición biológica del biochar producido a temperaturas por encima de los 360°C. Los resultados del presente estudio demuestran que la estabilidad biológica y térmica del biochar se ve afectada por la temperatura de pirólisis de una manera no lineal.

En su estudio Mukherjee, A. y Lal, R. (2014) evaluaron el uso del biocarbón como una enmienda del suelo, encontrando que junto con varios cambios desfavorables en las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, se ha reportado la reducción en el rendimiento de los cultivos.

En los resultados obtenidos en relación a los controles, establecieron que el rendimiento del suelo modificado con biochar (tasa de aplicación 0,2-20% w / w) se ha reducido en un 27, 11, 36, 74, y 2% para el arroz (*Oryza sativa* L.) (Control 3.0Mg/ha), el trigo (*Triticum*spp. L.) (control 4.6 Mg/ha), el maíz (*Zea mays* L.) (Control 4.7 Mg/ha), la lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Control 5.4 Mg/ha), y el tomate (*Solanumlycopersicum* L.) (Control 265 Mg/ha), respectivamente.

Por otra parte, en comparación con los suelos no enmendados, las emisiones gaseosas de los suelos modificados con biochar (tasa de aplicación 0005-10% w / w) se han mejorado hasta en un 61, 152 y 14% para el CO<sub>2</sub> (control 9.7 Mg/ha por año) CH<sub>4</sub> (control 222 Kg/ha por año) y N<sub>2</sub>O (4. Kg/ha por año), respectivamente.

Por últimos concluyen que aunque el biochar tiene el potencial para mitigar varios problemas ambientales, los datos recogidos en esta investigación indican que se debe establecer una hoja de ruta para la clasificación sistemática del biochar y desarrollar un análisis de costo-beneficio, antes de la implementación de esta tecnología en campo a gran escala.

Biederman, L.A. y Stanley Harpole, W. (2013) en su meta análisis sobre el biochar y sus efectos sobre la productividad de la planta y el ciclo de nutrientes, encontraron que a pesar de la variabilidad predeterminada por el suelo y el clima, la adición de biochar a los suelos les dio como resultado, en promedio, un aumento de la productividad superficial que en suelos sin aplicar biochar, un mejor rendimiento de los cultivos y un incremento en la biomasa microbiana, la nodulación de rizobios, mayores concentración de K en el tejido de la planta, mayores proporciones de fósforo (P), de potasio (K), de nitrógeno total (N), y de carbono total (C) en el suelo en comparación con las condiciones de control. El pH también indicó que tendió a aumentar, convirtiéndolo en menos ácido.

Las variables que no les mostraron una respuesta significativa respecto al biochar fueron: la biomasa subterránea, la colonización de las micorrizas en las raíces y las proporciones de Nitrógeno en el tejido de la planta. Adicionalmente los análisis que reportaron no detectaron la relación entre la cantidad de biochar adicionado y el grado de afectación en la productividad superficial del suelo. Al final establecen que el biochar mantiene la promesa de ser una solución ganar-ganar-ganar con respecto a la energía, el almacenamiento de carbono y la función dentro del ecosistema.

Stewart, C. et al (2013) caracterizó un biochar producido por pirólisis rápida para la generación de bio-aceite y examinó los GEI ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ ) en el flujo de salida, determinando el secuestro de C en cuatro suelos en climas templados y cinco tasas de aplicación; 0%, 1%, 5%, 10% y 20% w / w.

En los resultados obtuvieron que del proceso de pirólisis rápida creó un biochar con una alta aromaticidad, bajo N y un alto contenido de cenizas con una relación O: C de 0,01, lo cual indicó que es altamente recalcitrante. En cuanto a los suelos, la pirólisis rápida les produjo un BC altamente recalcitrante que secuestra C y reduce las emisiones de GEI, estableciendo que la recuperación y la aplicación BC en el suelo contribuiría a un balance carbono negativo para esta forma de generación de bioenergía de un (4%).

Por su parte Singh, A. et al (2014) en su estudio sobre producción de biochar a partir de paja de mostaza para el uso agrícola y el secuestro de carbono, evaluó el BC producido a diferentes temperaturas entre 250 °C a 500 °C en un horno con control de temperatura. Los parámetros que determinaron fueron el pH, la conductividad eléctrica, la recuperación de masa, el contenido de carbono después de cada pirólisis y los efectos de la temperatura.

En los resultados que obtuvieron, reportan que los rendimientos de biochar a partir de pajas de mostaza con tamaños de partícula de entre 0,7 a 1,4 mm variaron de 66,3% a 30,5% y el contenido de carbono varió de 51,9% a 70,5% respectivamente. El valor de pH y conductividad eléctrica presentaron una variabilidad con el aumento de la temperatura de pirólisis. En cuanto a la temperatura, los resultados les permitieron aducir que el biochar producido a alta temperatura de pirólisis puede poseer un mayor potencial de secuestro de carbono cuando se aplica al suelo en comparación con el obtenido a baja temperatura.

Taghizadeh-Toosi, A. et al. (2012) evaluó la biodisponibilidad del amoníaco absorbido por el biochar a partir del aire del ambiente cuando es ubicado en el suelo, para ello usaron un isotopo de Nitrógeno y determinaron las proporciones de recuperación en las diferentes partes del sistema así: por las raíces un promedio de un 6.8%, en el tejido de las hojas debido a las diferentes propiedades del biochar entre un 26.1% a un 10.9%; las plantas con mayor recuperación del isotopo  $^{15}\text{N}$  fueron donde se usó biochars ácidos. La recuperación total del  $^{15}\text{N}$  aplicado varió de un 45% a un 29%.

Roberts, K. et al. (2010) evaluaron el ciclo de vida de los sistemas de Biochar en términos de estimación energética, potencial económico y cambio climático, estableciendo que el sistema de pirólisis con biochar aplicado a los suelos resulta en cuatro co-productos principales: secuestro de carbono estable a largo plazo, regeneración de energía renovable, biochar como una enmienda de suelo y administración de residuos de biomasa. Para su estudio utilizaron como materia prima residuos agrícolas como rastrojo de maíz, desechos de poda y los cultivos energéticos de *virgatum* o comúnmente llamados pasto varilla.

Los resultados que reportan son las reducciones en las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GHG) para restrojos y residuos de cultivo, las cuales son negativas, de -864 y -885

kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) por tonelada de biomasa seca respectivamente. Del total de esta reducción, el 62-66% son realizados por el secuestro en el biochar.

Los autores indican que la viabilidad económica del sistema-biochar es dependiente del costo de producción de materia prima, pirólisis y los valores de compensación del carbono. Las fuentes de biomasa tales como residuos de jardín tienen el mayor potencial de rentabilidad económica (+\$69/tonelada de biomasa, cuando la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>e están valoradas en \$80/ tonelada CO<sub>2</sub> e).

Al final concluyen que la distancia en el transporte de la materia crea un obstáculo significativo en la rentabilidad económica de los sistemas-biochar y que actualmente solo puede entregar beneficios de mitigación de cambio climático y ser financieramente viable como un sistema integrado usando residuos de biomasa.

Gaskin, J. et al. (2008) evaluó el efecto de las condiciones de pirólisis a baja temperatura en el biochar para uso agrícola, utilizando como materias primas la gallinaza, las cascaras de cacahuates y las astillas de pino. La pirólisis fue realizada a temperaturas de 400 y 500°C con y sin activación bajo la presencia del vapor.

En los resultados que obtuvieron, indicaron que el contenido de carbono del biochar es de alrededor de un 40% en la gallinaza, un 78% en las astillas de pino y un valor medio en las cascaras de cacahuates. Por otro lado los nutrientes de la materia prima (P, K, Ca, Mg) fueron significativamente más altos en los biochar producidos a 500 °C. Por su parte, una gran proporción de nitrógeno fue conservado en el biochar, alrededor del 27,4% en el biochar de gallinaza y un 89,6% en el biochar de pino. La capacidad de intercambio catiónico fue significativamente más alta en biochars producidos a más baja temperatura. Los resultados

indican que, dependiendo de la materia prima, algunos biochars tienen potencial para servir como fuentes de nutrientes y otros como secuestradores de C.

Lehmann J. et al (2006) en su revisión sobre el secuestro de biochar en los ecosistemas terrestres, establecieron que la conversión de carbono de biomasa a carbono de biochar conducen a un secuestro de alrededor del 50% del carbono inicial, en comparación con las bajas cantidades retenidas después de la quema (3%) y la descomposición biológica (< 10 a 20% después de 5 – 10 años), estimando que hasta un 12% (0,21 Pg C) de las emisiones antropogénicas de carbono pueden cambiar de ruta, pasando de la incineración y la aplicación directa de la biomasa en el suelo a la producción de biochar.

Rosas J. et al (2015) implementaron en el viñedo Miguel Torres SA (Barcelona), uno de los más grandes en España, un reactor móvil auto sostenible para la producción de biochar a partir de los residuos de cultivo y viñas viejas, el pirolizador cuenta con una capacidad de trabajo de hasta 60 kg/h y alcanza temperaturas de hasta 800°C, obteniendo rendimientos de entre un 25% y un 35%, consolidándose como un gran avance en la tecnología de producción de biochar in situ en Europa.

Los autores reportan que usando el reactor móvil para producir biochar y aplicándolo en la fuente de biomasa (evitando el transporte de la biomasa y el biochar) se podría conducir a una reducción de carbono de aproximadamente 18 g de CO<sub>2</sub> eq. por botella de vino producida.

Windeatt, J. et al. (2014) en su estudio sobre “Características del biochar obtenido a partir de residuos de cosecha: El potencial de secuestro de carbono y enmienda del suelo”, evaluó algunas propiedades como contenido de carbono, área superficial, pH, análisis próximo y último, contenido de nutrientes y metales y el índice recalcitrante R<sub>50</sub>, en el biochar producido mediante pirólisis lenta a 600 °C.

En los resultados obtenidos, establecieron que los rendimientos del biochar variaron del 28% al 39%. El contenido promedio de carbono fue del 51%. Los macronutrientes fueron concentrados durante la pirólisis, pero el contenido de macronutrientes del biochar no fue tan alto. La mayoría de biochars eran ligeramente alcalinos, con un pH desde 6,1 a 11,6; el cual fue correlacionado con el contenido de K del biochar. La aromaticidad se incrementó con la pirólisis, mostrando una reducción en las relaciones H/C y O/C; el índice de recalcitrancia  $R_{50}$  mostró biochars con un potencial de secuestro ya sea de clase 2 o clase 3, mostrando un potencial de secuestro de carbono del 21,3%-32,5%. El índice de recalcitrancia  $R_{50}$ , indican que fue influenciado por la presencia de metales alcalis en el biochar, los cuales pueden conducir a una subestimación de la estabilidad del mismo.

Por último los autores sugieren que los residuos evaluados en su investigación, a la actual disponibilidad global, pueden producir 373 Mt de biochar. Esta cantidad de biochar tiene el potencial para secuestrar 0.55 Pg CO<sub>2</sub> por año en suelo durante periodos de tiempo largos.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo General**

Participar en el diseño de un horno de pirólisis piloto de residuos agroindustriales con funcionamiento por etapas para producir biochar en el área de investigación y desarrollo I&D de la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S

### **5.2 Objetivos Específicos**

- Proponer procesos de pirólisis acorde con la actual generación de biomasa agroindustrial en los departamentos de Valle, Cauca y Nariño.
- Desarrollar una vigilancia tecnológica de los equipos e implementos para los procesos de pirólisis de los residuos agroindustriales.
- Apoyar al equipo encargado de ejecutar un diseño experimental de procesos de pirólisis a escala de laboratorio.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1 Objetivo número uno

Se realizó una investigación de tipo documental acudiendo a diferentes fuentes de información para la recolección de información confiable y útil para la empresa, teniendo en cuenta aspectos relevantes como: (1) los tipos de residuos agroindustriales que se están generando en mayor proporción, producto de las actividades agropecuarias en la región y que ruta de aprovechamiento se le está otorgando, (2) situación actual sobre el manejo de los residuos agroindustriales y la posibilidad de plantear una ruta de aprovechamiento a través de la pirólisis, lo cual conlleve a la generación de procesos de transformación productivos y proporcionen un valor agregado que permitan valorizar su uso a nivel industrial.

### 6.2 Objetivo número dos

Se realizó una investigación de tipo documental mediante el acceso a fuentes de información especializada en patentes de equipos y procesos de pirólisis. Las principales bases de datos revisadas fueron SCOPUS y Sciencedirect, así como documentos que hacen parte de la base de datos de los grupos de investigación vinculados como GRUBIOC y CARBON de la Universidad del Valle y del acervo patrimonial de la empresa, cuyos avances en temas relacionados con la ciencia y la tecnología del carbón, han servido de línea base para la implementación de este tipo de tecnológica en INNOVATIVA INGENIERIA S.A.S.

### 6.3 Objetivo número tres

#### 6.3.1. *Caracterización de materias primas.*

##### 6.3.1.1. *Selección de muestra representativa.*

Se extendió la materia prima y se realizó el muestreo y cuarteo de acuerdo a la Norma ASTM D2013, con el fin de obtener la muestra representativa (ver anexo C. Fig. 47). Las partes

sobrantes se juntaron y se guardaron con el objetivo de dejar una muestra testigo y conservarla para futuros análisis.

#### ***6.3.1.2. Molienda.***

Para la molienda de las materias primas se usó un molino forrajero marca Trap 300, el cual se adecuó para minimizar las pérdidas y fugas de material. Este tipo de molino es adecuado para moler esta clase de material y reducir su tamaño de partícula (ver anexo C. Fig.48).

#### ***6.3.1.3. Tamizado.***

De acuerdo a la información obtenida de la vigilancia tecnológica, los documentos revisados en los anteriores informes y por disposición de la empresa, se optó por seleccionar un tamaño de partícula entre 2 mm y 0,85 mm equivalente a malla 10 y 20 ASTM E respectivamente. El tiempo de tamizado fue de 10 minutos en un Vibrador tipo Ro-tap y posteriormente agitado manualmente (ver anexo C. Fig. 49).

### ***6.3.2. Adecuación de muestras para análisis próximo de biomasa.***

Se cuarteo y se tomó una muestra representativa del material principal, cuyo diámetro de partícula estaba entre 0.85 mm y 2 mm, esta muestra fue molida con un molino de mano y se tamizó manualmente, colectando la masa obtenida del pasante de malla 60 (ASTM E 1757).

#### ***6.3.2.1. Carbono fijo.***

Se designó como carbono fijo la fracción residual de carbón, descontadas las cenizas, después de la carbonización del material en donde se desprende en el proceso la humedad y el material volátil. Se calculó a partir de la diferencia entre el valor total de la fracción y la sumatoria del contenido de humedad, el material volátil y las cenizas.

### **6.3.2.2. Cenizas.**

Para este contenido se tomó el peso del material resultante de la calcinación completa del material a altas temperaturas. Según norma ASTM E 1755.

### **6.3.2.3. Material Volátil.**

Este parámetro permite determinar la materia gaseosa que se desprende del cuesco cuando éste es sometido a un calentamiento en condiciones determinadas. Es decir la pérdida de peso (sin contar la pérdida de humedad), durante el calentamiento del material a altas temperaturas, en ausencia de oxígeno. En general, a mayor cantidad de material volátil, mayor será el humo que producirá un tipo específico de material al quemarse. Según norma ASTM D 7582.

### **6.3.2.4. Humedad.**

Se tomó como el porcentaje de agua presente en el material a analizar, se calculó por pérdida de peso durante secado en estufa. Norma ASTM D 3302.

El análisis próximo solamente fue realizado a la cascara de coco y el cuesco de palma, los resultados se muestran en las tablas 1 y 2 respectivamente. Por disponibilidad de tiempo a las otras biomásas solamente se les determinó el contenido de ceniza ( Ver tabla 3 y Anexo H figura 57), por ser el parametro mas relevante al momento de definir la capacidad adsortiva del biochar con respecto al azul de metileno, ya que presenta un poder alcalinizante.

**Tabla 1**

#### **Análisis próximo de la cascara de coco**

Componente	%
Carbono fijo	26,36
Cenizas	3,28
Material Volátil	62,75
Humedad	7,61

Fuente. Este estudio

**Tabla 2*****Análisis próximo del cuesco de palma***

Componente	%
Carbono fijo	21,43
Cenizas	2,18
Material Volátil	62,78
Humedad	8,61

Fuente. Este estudio

**Tabla 3*****Análisis de cenizas para las materias primas adicionales***

Materia Prima	% de cenizas
Cascarilla de arroz	24%
Cuesco de palma	3%
Bagazo de Caña de Panela	5%
Palmiste	7%
Pelusa de coco	6%

Fuente. Este estudio

Adicionalmente, se apoyó al equipo técnico encargado en la realización de un análisis termogravimétrico para medir la variación de la pérdida de masa del material cuando es sometido a un intervalo de temperatura, esto con el fin de observar el comportamiento que asume la biomasa en los distintos tramos del intervalo de evaluación (ver anexo C. Fig. 50).

### **6.3.3. Descripción de equipos de pirólisis a escala de laboratorio.**

Las pruebas de carbonización se realizaron en la Universidad del Valle en el laboratorio de Ciencia y tecnología del Carbón de la escuela de Ingeniería Química, por convenio previo entre la empresa INNOVATIVA INGENIERIA S.A.S y el centro educativo mencionado. La descripción de los equipos se establece a continuación:

#### **6.3.3.1. Mufla modificada con ingreso y salida de gases activantes.**

Las pruebas experimentales en esta etapa de la investigación se realizaron en una mufla modificada con adaptaciones para el ingreso y salida de los gases activantes y los volátiles derivados de descomposición de la materia prima, manteniendo su hermeticidad; consta de una zona de calentamiento o pirólisis, una capa de material refractario, una capa de aislante térmico y un controlador digital de temperatura para registrar las rampas de calentamiento y los tiempos de operación. Cabe destacar que cada corrida experimental tarda un periodo prolongado de tiempo, ya que al trabajar con temperaturas tan altas, se requieren lapsos extensos tanto para alcanzar los picos térmicos, así como para el posterior enfriamiento del equipo, lo cual dificultó el trabajo experimental (ver Anexo E. Fig.54).

La mufla se encuentra ubicada en el laboratorio del grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbón, perteneciente a la Universidad del Valle y su operación fue aprobada por autorización previa de su director, el Ingeniero Químico Ph.D. Juan Manuel Barraza Burgos, para la investigación que esta adelantado la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S.

#### **6.3.3.2. Reactor de lecho fijo para tratamiento pirolítico de pequeñas muestras de materia prima.**

Consiste en un dispositivo fabricado en acero al carbón 1020 que soporta temperatura elevadas y tiempos de exposición prolongados, consta de cuatro compartimientos para el

asentamiento de la materia prima y un cilindro instaurado por el centro del reactor que conecta la compuerta de la mufla hasta el seccionamiento inferior de cada compartimento donde se encuentran incrustadas unas mallas fabricadas en acero inoxidable que cumplen la función de sostener las muestras para el proceso de activación y permitir el paso de los gases activantes en forma vertical (ver Anexo E. Fig. 55).

El diseño constituye una iniciativa del grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbón de la Universidad del Valle y la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S, para la producción de carbones a diferentes atmosferas de activación a escala de laboratorio.

#### ***6.3.3.3. Cilindros de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> con sus respectivos rotámetros .***

Para el desarrollo de los ensayos del diseño experimental con la cascara de coco, solamente se utilizó una atmosfera inerte con gas nitrógeno, mientras que para las pruebas adicionales sugeridas por la empresa, se emplearon los demás gases activantes a diferentes flujos de entrada. El equipo se muestra en el anexo E. Fig. 56 y la calibración de rotámetros se muestra en el Anexo F. Cuadro 4 y 5.

Como se mencionó anteriormente, se designó la ejecución de unos ensayos adicionales con otras biomásas en diferentes condiciones de procesamiento, teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico elaborado, las necesidades de la empresa y la revisión bibliográfica sobre procesos de pirólisis reportados en los primeros informes. Entre los residuos con los cuales se desarrollaron unas pruebas preliminares a escala de laboratorio están: cuesco de palma, cascarilla de arroz, bagazo de caña de panela, palmiste y pelusa de cuesco.

#### ***6.3.4. Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cáscara de coco.***

La cascara de coco es un residuo agroindustrial procedente de los cultivos cocoteros y corresponde a la capa que se encuentra debajo de la cubierta fibrosa (estopa) y que encierra la

pulpa. Su forma es esférica, de gran dureza y cuyo espesor aproximado oscila entre 3 a 5 mm. Su peso en el total del fruto esta entre un 15% y un 20% y está compuesto principalmente por lignina, celulosa y pentosano (Forero, C. et al., 2012). La producción anual de cascara de coco en Colombia está entre 20.000 y 24.000 toneladas métricas, siendo el departamento de Nariño el que tiene una producción prominente con cerca de 11.000 toneladas métricas por año (Ministerio de Agricultura y desarrollo Rural, 2009).

#### **6.3.4.1. Desarrollo experimental.**

Se realizo un proceso de activacion termoquimico usando como agente activante el KOH a diferentes concentraciones, esto con el fin de evaluar el rendimiento másico del biochar obtenido.

#### **6.3.4.2. Diseño experimental.**

Se utilizó un diseño factorial  $2^2$  rotacional compuesto con cinco puntos centrales y 4 puntos estrella, donde se evaluaron los efectos de los factores: Concentración de KOH y Temperatura de carbonización, como variables codificadas X1 y X2 respectivamente, con su dominio experimental evaluado en los niveles mínimo (-1) y máximo (+1), sobre la variable respuesta: rendimiento del biochar. La Tabla No. 4, nos indica las variables y los niveles del diseño experimental.

**Tabla 4**

#### **Variables y niveles del diseño experimental**

Variable	Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (+1)	Puntos estrella		5 Puntos centrales (0)
			Bajo (-1,41)	Alto (+1,41)	
Concentración de KOH	1	8	0	9,45	4,5
Temperatura de carbonización	400	650	348	702	525

Fuente. Este estudio

Para conocer el efecto de un factor es suficiente con hacerlo variar entre dos valores, además esta variación se debe realizar para cada posible combinación de los valores de los demás factores. Todo este conjunto de combinaciones están contempladas en la matriz de experimentos normalizada y en el plan de experimentación aleatorizado (ver Anexo 6. Cuadro No.6.).

Para el planteamiento del diseño de experimentos y el desarrollo de la metodología de superficie de respuesta se utilizó el software STATGRAPHIC CENTURION XV.I. donde se buscó encontrar una aproximación adecuada de la relación funcional entre la variable de respuesta (Rendimiento másico del biochar) y los factores experimentales (Concentración de KOH y Temperatura de Carbonización), encontrando que la función de segundo orden, era la expresión matemática que mejor modelaba el fenómeno experimental.

La aleatorización de los ensayos se realizó para garantizar la validez estadística de los resultados y la elección de la distancia de los puntos estrella al centro del diseño, se estableció con el fin de obtener una varianza consistente y estable de la respuesta en los puntos de interés ( $\alpha = 1.4142$  proporciona una precisión de estimación igual en todas las direcciones), optando de esta manera por un diseño rotatorio.

#### ***6.3.4.3. Variables de control.***

Después de la búsqueda bibliográfica y de los ensayos preliminares se seleccionaron 2 variables de control:

##### ***6.3.4.3.1. Concentración del KOH.***

Es el porcentaje de agente químico en la solución con que se impregna la cáscara de coco antes del proceso de carbonización. Se escogió un rango entre 1% y 8% p/p.

El protocolo de activación de la biomasa, fue establecido por el área técnica de la empresa, el cual consistió en mezclar la cascara de coco con el agente activante, en este caso KOH a

diferentes concentraciones, durante un tiempo de 2,5 horas en una proporción de 3:1. Este proceso se realizó en un equipo de floculación VELO JLT4 de cuatro puestos con un motor de 50 W, a 250 rpm durante 2,5 horas (ver Anexo C. Fig. 51). La masa a activar para todas las pruebas fue de 105 g, la cual fue pesada en una balanza de precisión (0,0001g) marca Pioneer modelo OHAUS (ver Anexo C. Fig. 52), que posterior al proceso de activación, fue separada de la mezcla por decantación y secada en un secador de bandejas LAB TECH Modelo LD015F (ver Anexo C. Fig. 53), durante 12 horas a 90 °C.

Para fijar la concentración se realizaron pruebas preliminares de carbonización a 700 °C utilizando cáscara de coco impregnada con una solución al 10% de agente químico. El producto obtenido utilizando KOH fue un polvillo blanco que no presento poder de adsorción. Por lo tanto se fijo el porcentaje de agente activante entre 1 y 8 %. La concentración de la solución impregnadora es un factor clave para la formación de macroporos, mesoporos y microporos en el producto final.

#### *6.3.4.3.2. Temperatura de pirólisis.*

Se define como la temperatura dentro de la mufla en el proceso de carbonización. Se escogió como mínimo una temperatura de 400 °C ya que por debajo de esta no hay carbonización del material, y como máximo 650 °C, ya que pruebas preliminares de carbonización demostraron que por encima de 700 °C de temperatura se obtenía un material sin ningún poder de adsorción.

Para el proceso de carbonización se utilizaron únicamente 85 g de material activado en todos los ensayos, asegurándose de distribuirlos en los cuatro compartimentos en iguales cantidades para evitar que las posibles diferencias de masa afecten la movilización del N<sub>2</sub> en la zona de pirólisis. El tiempo de residencia para la carbonización fue de 1,5 horas y posteriormente se dejó enfriar el material carbonizado hasta temperatura ambiente. Para retirar

las cenizas residuales, se realizó un lavado con 800 ml de solución 0,1 M de ácido clorhídrico comercial (HCl).

Posteriormente se retiró la solución acida decantando y se lavó con agua destilada hasta que la solución de lavado presentara un pH de 5 a 8; luego se secó el carbón activado durante 6 horas a 90 °C en el secador de bandejas antes mencionado.

La temperatura de pirólisis es una variable definitiva en la estructura final del carbón y de esta variable depende el consumo energético del proceso.

#### ***6.3.4.4. Otras variables de proceso.***

##### ***6.3.4.4.1. Tiempo de impregnación.***

Es el tiempo que se pone en contacto la cáscara de coco y la solución impregnadora. Para determinar el tiempo que diera la mayor impregnación del agente químico en el material, se realizaron ensayos para determinar la variación másica de la cáscara de coco en el proceso de impregnación.

Dentro de las pruebas preliminares, se realizaron 5 ensayos de impregnación a 100 gr de cascara de coco molido malla Tyler pasante 10 retenido 20, en un vaso de precipitado de 800 ml con agitación constante a 250 rpm; cada prueba se activo a tiempos de proceso diferentes 0,5; 1; 1,5; 2 ; 2,5 Y 3 horas. Cada una de estas muestras se seco durante doce horas a 90 °C, la variación másica de las últimas dos pruebas fue mínima por lo cual se fijo esta variable en 2,5 horas.

##### ***6.3.4.4.2. Relación cáscara de coco- solución impregnadora.***

Es la relación entre el peso de la solución impregnadora y la cáscara molida en el proceso de impregnación. Se fija en 3 a 1 ya que pruebas preliminares demostraron que es la mínima

relación para que se presente una agitación eficaz y es la que se sugiere en la mayoría de trabajos investigativos reportados por la bibliografía, como es el caso de Martínez, M., (2013).

Las demás variables de proceso se establecieron de la siguiente manera: Un tamaño de partícula entre 2 mm y 0,85 mm, equivalentes a mallas Tyler pasante 10 retenido 20, esto debido a que durante el proceso de carbonización existe una reducción de tamaño.

El tiempo de residencia se fijó en 1,5 horas, por ser el valor donde se obtienen los mejores resultados para la activación termoquímica según las investigaciones previas realizadas por la empresa.

Así también, se trabajó a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, esta variable dependió del funcionamiento de la mufla y se mantuvo constante durante el desarrollo de todas las pruebas experimentales.

En cuanto a la entrada gases activantes, se trabajó con N<sub>2</sub> comercial a un flujo volumétrico de 500 ml/min.

#### ***6.3.5. Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cuesco de palma.***

El cuesco de palma hace referencia al endocarpio del fruto obtenido en forma concentrada y triturada luego de la recuperación de la almendra; representa entre un 5 - 7% del peso total del fruto, es de consistencia dura y en su forma natural posee una estructura porosa (Gómez, A. et al. 2008). Este tipo de biomasa es de gran interés para la empresa, ya que su volumen de producción es bastante alto, solamente en Nariño la producción asciende a 33.331 t/año (Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, 2006) y contiene una estructura lignocelulósica favorable a la producción de CA.

#### ***6.3.5.1. Desarrollo experimental.***

Se utilizó un proceso de activación termofísico con la presencia de gases activantes a diferentes flujos y mezclas, ésto con el fin de evaluar el comportamiento del biochar obtenido respecto a su rendimiento másico y su capacidad de remoción de azul de metileno.

#### ***6.3.5.2. Diseño experimental.***

Por disposición técnica de la empresa, en esta etapa de la investigación se realizaron seis pruebas experimentales aleatorias, de las cuales, las primeras dos pruebas fueron para evaluar la carbonización en atmosferas de  $N_2$ , a una rampa de calentamiento y a temperaturas similares a las trabajadas en la primera etapa de la investigación. Las siguientes dos pruebas, permitieron evaluar la activación física en una atmosfera compuesta de una mezcla gaseosa entre  $N_2$  y  $CO_2$  a una rampa de calentamiento y en temperaturas de activación. Por último, se realizaron dos pruebas para evaluar la activación física con un flujo de  $CO_2$  como gas activante a dos rampas de calentamiento con temperaturas de carbonización y activación respectivamente.

#### ***6.3.5.3. Variables de control.***

##### ***6.3.5.3.1. Temperatura de pirólisis.***

Por disposición técnica del área de investigación y desarrollo de la empresa, se trabajaron diferentes temperaturas de pirólisis dependiendo de cada caso; para las pruebas de carbonización se manejaron temperaturas de 400 °C y 650 °C, para las pruebas de activación a una sola rampa de calentamiento se manejaron temperaturas de 800 °C y 850°C y por último, para las pruebas de activación a dos rampas de calentamiento se manejaron temperaturas de 600 °C hasta 800 °C y de 700 °C a 900 °C.

#### *6.3.5.3.2. Flujo y mezcla de gases activantes.*

Para las pruebas de carbonización se utilizó únicamente N<sub>2</sub> a un flujo volumétrico de 500 ml/min; para las pruebas de activación a una rampa de calentamiento se utilizó una mezcla de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a un flujo de 1200 y 240 ml/min respectivamente y por último, para las pruebas de activación a dos rampas de calentamiento, solamente se usó CO<sub>2</sub> a un flujo de 240 ml/min. La asignación de los valores en cada variable, fueron sugeridos por el área técnica de la empresa.

#### *6.3.5.4. Otras variables de proceso.*

Las pruebas de carbonización se realizaron con el cuesco de palma procedente del municipio de Tumaco en Nariño, donde se trabajó con 20 g de biomasa previamente acondicionada y ubicada en cada contenedor, con un diámetro de partícula entre 2 mm y 0,85 mm equivalente a malla 10 y 20 ASTM E respectivamente, una tasa de calentamiento de 10 °C/min, y un tiempo de residencia tanto en la carbonización como en la activación de 1 hora.

El orden de los tratamientos, las condiciones de operación y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7, cabe destacar que los valores asignados para cada corrida fueron determinados por el área de investigación y desarrollo y supeditados a las disposiciones de tiempo con los cuales la empresa INNOVACTIVA INGENIERIA S.A.S contaba en el laboratorio de la Universidad del valle.

#### *6.3.6. Pruebas de Pirólisis a escala de laboratorio con otras biomásas.*

Para esta etapa de la investigación se realizaron pruebas de pirólisis utilizando diferentes tipos de biomasa; la selección de estos precursores se basó, por un lado en el diagnóstico realizado anteriormente y por otro, atendiendo a las necesidades y disposiciones de la empresa. Las condiciones experimentales de operación, fueron prefinidas por el área de investigación y desarrollo, teniendo en cuenta pruebas preliminares realizadas en laboratorio.

#### ***6.3.6.1. Desarrollo experimental.***

En esta etapa de la investigación, se evaluó el comportamiento del biochar producido por diferentes tipos de biomásas a dos temperaturas de pirólisis, teniendo en cuenta su rendimiento másico y su capacidad de remoción de azul de metileno.

#### ***6.3.6.2. Diseño experimental.***

Se realizaron pruebas experimentales aleatorias con diferentes tipos de biomásas y temperaturas de pirólisis, esto con el fin de evaluar el efecto sobre el rendimiento másico y el porcentaje de remoción de azul de metileno en los biochars obtenidos.

#### ***6.3.6.3. Variables de control.***

##### ***6.3.6.3.1. Tipo de materia prima.***

Para esta etapa de la investigación se realizaron pruebas de pirólisis utilizando diferentes tipos de biomasa, tales como: pelusa de coco, cascarilla de arroz, bagazo de caña de panela y palmiste. La selección de los precursores, se realizó con base en la información recolectada en el diagnóstico sobre el estado actual de generación de biomasa en el suroccidente colombiano, mientras que las condiciones experimentales de operación fueron preestablecida con base en el diagnóstico sobre procesos de pirólisis y a pruebas preliminares de laboratorio desarrolladas previamente por el área técnica de la empresa.

##### ***6.3.6.3.2. Temperatura de pirólisis.***

En pruebas preliminares donde se trabajaron los protocolos de activación termoquímica, se logró observar que cuando la temperatura de pirólisis superaba los 600 °C, se obtenía un biochar en forma de polvillo blanco, cuyos porcentajes de remoción eran demasiado bajos. Por ende, en esta etapa de la investigación, el objetivo era evaluar el comportamiento del biochar cuando la

temperatura alcanzara los 600 °C y los 700 °C, sin que el precursor fuese sometido a ninguno proceso de activación químico previo.

#### ***6.3.6.4. Otras variables de proceso.***

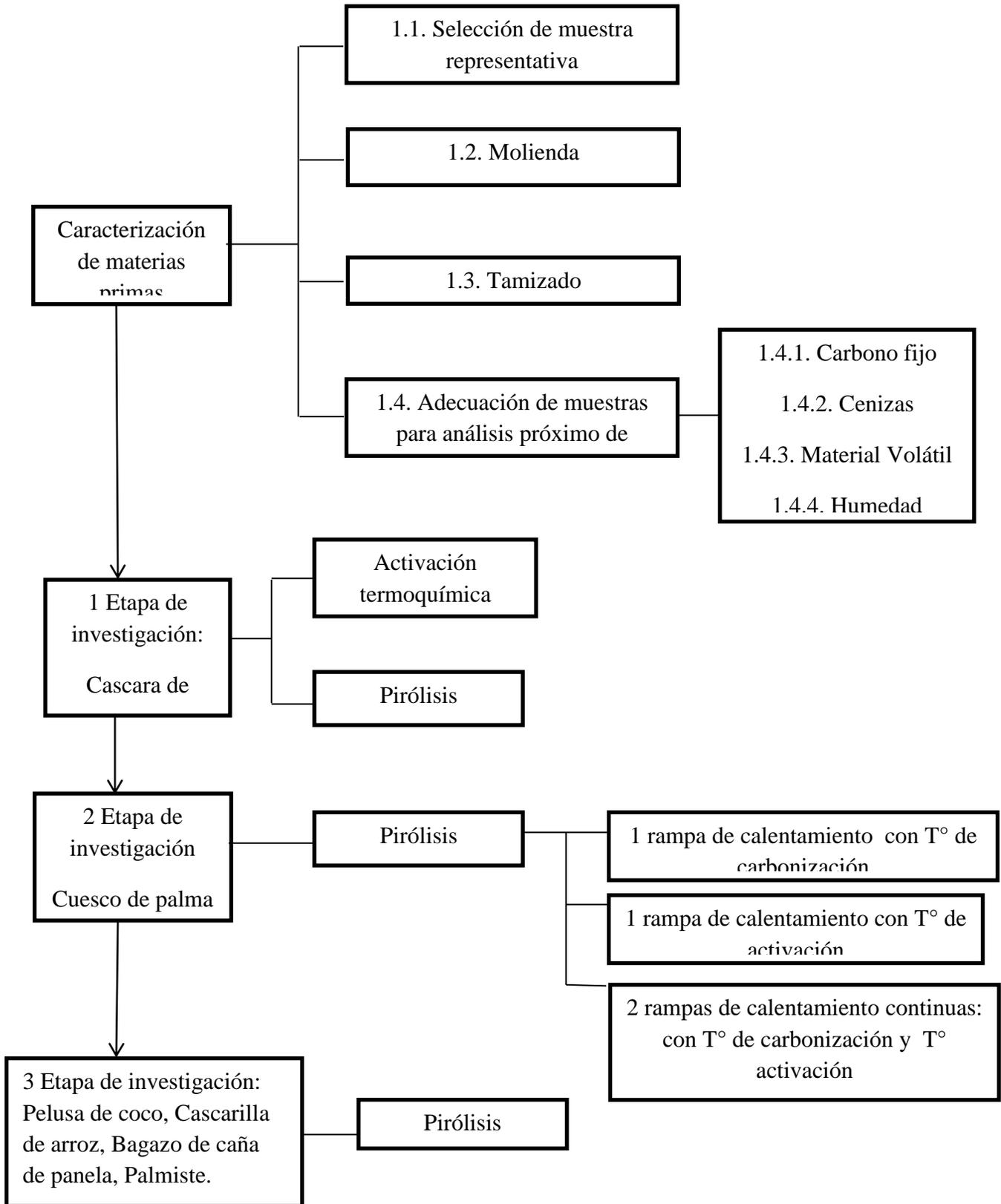
Se realizaron corridas experimentales con 3g de biomasa en cada contenedor, un diámetro de partícula entre 2 mm y 0,85 mm equivalente a malla 10 y 20 ASTM E respectivamente, una tasa de calentamiento de 10°C/min, un tiempo de residencia en la carbonización de 1 hora y presencia de un flujo de N<sub>2</sub> a 500 ml/min.

#### ***6.3.6.5. Pruebas de remoción de azul de metileno (AM).***

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello, se considera como un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se concentra en la superficie o es adsorbida se llama “adsorbato” y la fase que adsorbe se llama “adsorbente” (Cerón, A. y León, Y. 2010).

Para las pruebas de adsorción se partió de una solución patrón de azul de metileno, de la cual se tomaron alícuotas para preparar cinco soluciones de 20 ml de agua destilada y AM con concentraciones iguales a 2, 3, 5, 8 y 10 ppm en un equipo UV-VISIBLE SHIMADZU de la escuela de ingeniería química de la Universidad del Valle, trabajando a una longitud de onda de ( $\lambda=662$  nm) y realizar la curva de calibración respectiva. Posteriormente se introdujeron las muestras de biocarbón en una solución de AM a 75 ppm y al cabo de 48 horas y 30 minutos, tiempo en que se alcanza la concentración de equilibrio, se tomaron pequeños volúmenes (4ml) de las soluciones decoloradas para medir la absorbancia, determinar la concentración final de AM y así comprobar los porcentajes de remoción de cada muestra, los cuales aparecen en las tablas 7 y 8. La curva de calibración y la decoloración por la remoción de azul de metileno en las soluciones con el CA, se muestran en el Anexo I. Fig. No. 58, 59 y 60 respectivamente.

6.3.6.6. Diagrama de proceso.



## **7. RESULTADOS DE LA PASANTÍA**

El resultado final fue la presentación de 3 informes al área de Investigación y desarrollo de la empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S, donde se da cumplimiento a las actividades planteadas para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

### **7.1. Proposición de procesos de pirólisis acorde con la actual generación de biomasa agroindustrial en los departamentos de Valle, Cauca y Nariño**

#### ***7.1.1. Introducción.***

La biomasa residual, está conformada por los subproductos generados en procesos de recolección y transformación de las cosechas, conocidos como residuos agrícolas de cosecha (RAC) y residuos agroindustriales (RAI), el 75% del total de la biomasa producida en el campo corresponde a las RAC y el restante a las RAI (BiomassUsers Network Centroamérica BUN-CA,2002). Según el informe de Estadísticas Energéticas (OLADE, 2006) 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 un 10,39%, mientras que 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 de energía.

En países subdesarrollados, como es el caso de la mayoría de países latinoamericanos, la tecnología sostenible de producción de biochar se concibe como una posibilidad de luchar contra la deforestación y el uso excesivo de agroquímicos, pasando de técnicas agrarias de quemas y del uso indiscriminado de sustancias sintéticas al denominado “agruchar”, que sería la agricultura que implementa el biochar como enmienda. De esta forma se lucharía contra la pérdida de suelo

forestal tropical, mejorando su fertilidad y evitando su empobrecimiento (Lehmann et al., 2002 y Baskin, 2006).

Según un estudio realizado en el año 2003 por La Unidad de Planeación Minero Energética del Ministerio de Minas y Energía llamado “Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en el país”, Colombia produce alrededor de 29 millones de t/año de biomasa residual agrícola, la cual puede tener una capacidad energética aproximadamente de 12.000 MWh/año, sin tener en cuenta la posibilidad de su aprovechamiento en otras tecnologías.

En el primer informe, se realizó en primera instancia un diagnóstico sobre el estado de generación de biomasa en los departamentos de Nariño y Cauca, tomando los datos del más reciente estudio conjunto entre la Unidad de Planeación Minero Energético del Ministerio de Minas y Energía, el IDEAM, COLCIENCIAS y La Universidad Industrial de Santander (UIS) consignados en el “Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, 2006” donde se estableció que los cultivos con mayor generación de biomasa residual son: el arroz y el maíz como cultivos transitorios, y el banano, el café, la caña de azúcar, la caña de panela, la palma de aceite y el plátano como cultivos permanentes. Para el departamento del Valle del Cauca, la empresa INNOVATIVA INGENIERIA S.A.S, decidió orientar su diagnóstico solamente a la cascarilla de arroz como biomasa procedente de las actividades tradicionales de la ARROCERA LA ESMERALDA.

### ***7.1.2. Estado actual de generación de biomasa en los departamentos de Nariño y Cauca.***

Tanto en el departamento de Nariño como en el departamento del Cauca, la producción de biomasa se extiende por todo el territorio, presentándose una mayor cantidad municipal de residuos agrícolas en los municipios donde están sembrados los cultivos permanentes, esto debido en gran medida a que el área destinada para estos cultivos es mucho mayor, así pues, en

Nariño el municipio de Tumaco es el que presenta un volumen de producción de residuos más altos, entre 400.000 y 1.500.000 toneladas por año, mientras que en el Cauca el municipio de Santander de Quilichao, presenta una producción residual similar, siendo ésta la más alta del departamento. En el caso de los cultivos transitorios, la cantidad de residuos generados es más homogénea entre los municipios de ambos departamentos, alcanzado una producción anual de hasta 10 mil toneladas por año (ver Anexo A. Fig. No. 27,28, 29 y 30).

#### ***7.1.2.1. Cultivos de arroz.***

En el departamento de Nariño los municipios donde se produce arroz son: Barbacoas, Francisco Pizarro, Olaya herrera, La Tola, El charco, Sta. Bárbara (Iscuandé). La producción de biomasa residual por cada municipio alcanza un máximo de 10 mil toneladas/año y la cantidad residual de biomasa por departamento, es de cerca de 1.200 toneladas por año, la mayoría representada en tamo y cascarilla (ver Anexo A. Fig. No. 31 y 32).

En el departamento del Cauca los municipios productores son: Guapí, Santander de Quilichao, Timbiquí y Corinto. La cantidad de biomasa residual por municipio alcanza un máximo de 10 mil toneladas/año y la cantidad residual de biomasa por departamento, es de 13.648 toneladas por año, la mayoría también representada en tamo y cascarilla (ver Anexo A. Fig. No. 31 y 32). De lo anterior se pudo establecer que si se lograra unificar la cantidad de biomasa residual procedente del cultivo de arroz en estos 2 departamentos, la producción anual de residuos ascendería aproximadamente a las cerca de 14.846,1 toneladas/año.

#### ***7.1.2.2. Cultivos de maíz.***

En el departamento de Nariño los municipios donde se produce maíz son: Ipiales, Potosí, Córdoba, Puerres, Tangua, Pasto, Buesaco, El Tablón, Albán, San Bernardo, La Cruz, San pablo, Colon, Belén, Cartago, La Unión, San Lorenzo, Arboleda, Leiva, El Rosario, Policarpa,

Cumbitara, Los Andes, La Llanada, Linares, Samaniego, Sandoná, Providencia, Sta. Cruz, Mallama, Ricaurte, La Tola. La producción de biomasa residual por municipios no asciende a más de 10.000 toneladas/año, es decir aproximadamente la cantidad de residuos totales por departamento producto de esta actividad está alrededor de 39.988 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 33 y 34).

En el departamento del Cauca, los municipios donde prevalece este cultivo son: Sta. Rosa, San Sebastián, Bolívar, Mercaderes, Balboa, Patía, El Tambo, Timbiquí, Guapi, Morales, Cajibío, Buenos Aires, Suarez, Santander de Quilichao, Caloto, Puerto Tejada, Padilla, Miranda, Corinto, Toribio, Jambaló, Silvia, Piendamó, Caldon. En esta zona la producción de biomasa residual tampoco asciende a más de 10.000 toneladas/año, es decir aproximadamente la cantidad de residuos totales por departamento producto de esta actividad está alrededor de 19.290 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 33 y 34).

Sumando la cantidad de biomasa residual procedente del cultivo de maíz en estos 2 departamentos, la producción anual de residuos ascendería a las cerca de 59.278 toneladas/año.

#### ***7.1.2.3. Cultivos de banano.***

En el departamento de Nariño los municipios donde prevalecen los cultivos de banano son: Tumaco, Barbacoas, Olaya Herrera, La Tola, Consacá, Colón. La producción de Biomasa residual por municipio está entre 10.000 y 40.000 toneladas /año, con un total por departamento de 83.462 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 35 y 36).

En el departamento del Cauca los cultivos de banano prevalecen en los municipios de El Tambo y Timbío, con una producción de biomasa por municipio máxima de 10.000 toneladas por año, con un total por departamento de 14.576 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 35 y 36).

La cantidad de biomasa residual procedente del cultivo de banano en estos 2 departamentos, ascendería a las cerca de 98.038 toneladas/año.

#### **7.1.2.4. Cultivos de café.**

En el departamento de Nariño los municipios donde prevalecen los cultivos de café son: Albán, Ancuya, Arboleda, Belén, Buesaco, Chachaguí, Colon, Consacá, Cumbal, Cumbitara, El Peñol, El Rosario, El Tablón, El Tambo, Funes, Guaitarilla, Imués, La cruz, La Florida, La Llanada, La Unión, Leiva, Linares, Los Andes, Nariño, Mallama, Policarpa, Samaniego, San Bernardo, San Lorenzo, San Pablo, San P. de Cartago, Sandoná, Santa Cruz, Taminango, Tangua, Yacuanquer. Cabe destacar que La Unión y San Lorenzo comandan en el departamento el área cosechada de café, y su producción de Biomasa residual oscila entre 40.000 y 120.000 toneladas/año, por su parte los otros municipios mantienen una producción de biomasa residual que no asciende a más de 10.000 toneladas /año, con un total por departamento de 166.910 toneladas/año aproximadamente (ver Anexo A. Fig. No. 37 y 38).

En el departamento del Cauca los cultivos de café prevalecen en los municipios de Balboa, El Tambo, Popayán , Cajibío, Morales, Santander de Quilichao, Caldono, Piendamó e Inzá con una producción de biomasa por municipio de entre 10.000 y 40.000 toneladas/año, entre tanto Bolívar, San Sebastián , La Vega, Patía, Argelia, Totoró, Páez, Toribio, Jambaló, Corinto, Caloto y Miranda sostienen una producción de biomasa por municipio inferior a las 10.000 toneladas por año, con un total por departamento de 321.241 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 37 y 38).

Sumando la cantidad de biomasa residual procedente del cultivo de café en estos 2 departamentos, la producción anual de residuos ascendería a las cerca de 488.151 toneladas/año.

#### **7.1.2.5. Cultivo de caña de azúcar.**

En el departamento del Cauca, los municipios donde prevalece la mayor cantidad de biomasa producto de los cultivos de caña de azúcar son: Santander de Quilichao con la mayor producción, entre 400.000 y 1.000.000 de toneladas/año, Caloto, Padilla, Puerto Tejada y Miranda, con entre 120.000 y 400.000 toneladas/año y por último Suarez con la menor producción, entre 10.000 y 40.000 toneladas/año. La producción total de biomasa residual en el departamento se estima es de 2.317.443 toneladas/año aproximadamente (ver Anexo A. Fig. No. 39 y 40).

#### **7.1.2.6. Cultivo de caña panelera.**

En el departamento de Nariño, los municipios donde prevalecen los cultivos de caña panelera son: Albán, Ancuya, Arboleda, Barbacoas, Belén, Buesaco, Colon, Consacá, Cumbal, Cumbitara, El peñol, El charco, El Rosario, El Tablón, El Tambo, Guaitarilla, Fra. Pizarro, La florida, La Llanada, La tola, La Unión, Leiva, Linares, Maguí Payan, Mallama, Nariño, Olaya Herrera, Policarpa, Puerres, Ricaurte, Roberto Payan, Samaniego, San Bernardo, San Lorenzo, Sandoná, San Pablo, San Pedro de Cartago, Santa Bárbara, Santa Cruz, Tumaco, Yacuanquer. Cabe destacar que Sandoná, Ancuya, Linares y Consacá comandan en el departamento el área cosechada de Caña panelera y su producción de Biomasa residual oscila entre 120.000 y 400.000 toneladas/año por municipio, por su parte Ricaurte, Mallama, La Unión y el Tambo, mantienen una producción de biomasa residual entre las 40.000 y 120.000 toneladas /año, con un total por departamento de 795.745 toneladas/año aproximadamente (ver Anexo A. Fig. No. 41 y 42).

En el departamento del Cauca, los municipios donde prevalecen los cultivos de caña panelera son: López de Micay, Timbiquí, El Tambo, Argelia, Patía, Balboa, Bolívar, Mercaderes, San Sebastián, La Vega, La Sierra, Rosas, Timbío, Popayán, Totoró, Inzá, Páez, Caldono, Piendamó, Morales, Suarez, Buenos Aires y Santander de Quilichao. La producción de biomasa residual es

prominente en los municipios de López de Micay, El Tambo y Bolívar que oscila entre las 40.000 y 120.000 toneladas/año, entre 10.000 y 40.000 toneladas /año están los municipios de La Vega, La Sierra, Inzá, Santander de Quilichao, Buenos Aires, Suarez y Morales, y hasta las 10.000 toneladas/año en los demás municipios mencionados. La producción total de biomasa por departamento asciende alrededor de las 591.971 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 41 y 42).

De lo anterior se pudo establecer que si se lograra unificar la cantidad de biomasa residual procedente del cultivo de caña panelera en estos 2 departamentos, la producción anual de residuos estaría cerca de 1.387.716 toneladas/año.

#### ***7.1.2.7. Cultivo de palma de aceite.***

En el departamento de Nariño, el municipio donde prevalece el cultivo de palma de aceite es Tumaco, cuya producción de biomasa residual es de 292.454 toneladas/año aproximadamente. La mayoría de este residuo corresponde a la fibra, el raquis y el cuesco de palma (ver Anexo A. Fig. No. 43 y 44).

#### ***7.1.2.8. Cultivo de plátano.***

En el departamento de Nariño los municipios donde se cultiva plátano son: Albán, Ancuya, Arboleda, Barbacoas, Buesaco, Colon, Consacá, Cumbal, Cumbitara, El Charco, El peñol, El Rosario, El Tablón, El Tambo, Fco. Pizarro, La Florida, La Llanada, La Tola, La Unión, Leiva, Linares, Los Andes, Mallama, Mosquera, Olaya Herrera, Policarpa, Ricaurte, Roberto Payan, San Bernardo, Sandoná, San Lorenzo, San Pablo, San Pedro de Cartago, Santacruz, Sta. Bárbara, Taminango. Se puede observar que la producción de biomasa es superior en los cultivos de plátano costeros, Tumaco y El charco comandan la producción que va entre las 120.000 y 400.000 toneladas/año, Olaya Herrera, Taminango y San Lorenzo entre 40.000 y 120.000 toneladas/año mientras que en los demás municipios costeros y de la zona norte del

departamento está alrededor de las 10.000 a 40.000 toneladas/año. La producción total por departamento es de 878.626 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 45 y 46).

En el departamento del Cauca los municipios productores son: Guapi, Timbiquí, López de Micay, El tambo, Argelia, Patía, Balboa, Mercaderes, Bolívar, La Vega, La Sierra, Rosas, Timbío, Cajibío, Piendamó, Morales, Suarez, Buenos Aires, Caloto, Santander de Quilichao, Corinto, Padilla, Miranda, Puerto Tejada. Los municipios de Piendamó y Padilla, comandan la producción de biomasa residual entre 120.000 y 400.000 toneladas/año, mientras que los demás municipios basan su producción anual entre 10.000 y 40.000 toneladas/año. Por departamento la producción de biomasa asciende aproximadamente a las 801.031 toneladas/año (ver Anexo A. Fig. No. 19 y 20). Unificando la cantidad de biomasa residual procedente del cultivo de plátano cafetero y costero en estos 2 departamentos, se puede aducir que la producción anual de residuos estaría en cerca de 1.679.657 toneladas/año.

### ***7.1.3. Distribución de residuos por tipo: Departamentos de Nariño y Cauca.***

Los siguientes cuadros muestran la cantidad de residuos por tipo de cultivo y por tipo de residuo que se producen en el departamento de Nariño y del Cauca:

**Cuadro 1.*****Cantidad de biomasa residual producida por el sector agrícola en el departamento de Nariño***

Cultivo	Área Sembrada(ha)	Producción (t/año)	Tipo de residuo	Cantidad de residuo (t/año)	cantidad total de residuos por producto(t/año)
Palma de aceite	32.000	153.600	Cuesco	33.331	292.454
			Fibra	96.307,2	
			raquis de palma	162.816	
Caña Panelera	16334	126711	Bagazo	320.578,83	795.745,08
			hojas-cogollo	475.166,25	
Café	25926	31140	pulpa	66.359,34	166.910,4
			cisco	6.384	
			Tallos	94.167,36	
Maíz	18140	28260	Rastrojo	26.394,84	39.987,9
			tusa	7.630,2	
			Capacho	5.962,86	
Arroz	799	470	Tamo	1.104,5	1.198,5
			Cascarilla	94	
Banano	2487	13571	raquis de banano	13.571	83.461,65
			vástago de banano	67.855	
			banano de rechazo	2.035,65	
Plátano	21051	142866	raquis de plátano	142.866	878.625,9
			vástago de plátano	714.330	
Fuente: Elaboración propia a partir del Atlas de biomasa residual Colombia, 2006					
<b>TOTAL</b>	<b>116.737</b>			<b>2.258.384</b>	<b>2.258.384</b>

Fuente. Este estudio

El cuadro No. 1 permite observar que la mayor cantidad de biomasa en Nariño se produce a partir del cultivo de plátano, representada en su gran mayoría por el vástago, seguida de la caña

panelera representada por hojas, cogollo y el bagazo, mientras que la menor cantidad de biomasa es a partir del cultivo de arroz, representada en su gran mayoría en el tamo y la cascarilla.

**Cuadro 2.**

***Cantidad de biomasa residual producida por el sector agrícola en el departamento del Cauca***

Cultivo	Área Sembrada(ha)	Producción (t/año)	Tipo de residuo	Cantidad de residuo (t/año)	Cantidad total de residuos por producto(t/año)
Caña de azúcar	34.486	390.142	hojas-cogollo	1.271.863	2.317.443
			Bagazo	1.045.580,56	
Caña panelera	17426	94.263	Bagazo	238.485,39	591.971,64
			hojas-cogollo	353.486,25	
Café	53996	59.933	pulpa	127.717,223	321.240,88
			cisco	12.286	
			Tallos	181.237,392	
Maíz	7540	13.633	Rastrojo	12.733,222	19.290,695
			tusa	3.680,91	
			Capacho	2.876,563	
Arroz	1446	5.352	Tamo	12.577,2	13.647,6
			Cascarilla	1.070,4	
Banano	473	2.370	raquis de banano	2.370	14.575,5
			vástago de banano	11.850	
			banano de rechazo	355,5	
Plátano	14153	130.249	raquis de plátano	130.249	801.031,35
			vástago de plátano	651.245	
			plátano de rechazo	19.537,35	
<b>TOTAL</b>	<b>129.520</b>			<b>4.079.201</b>	<b>4.079.201</b>

Fuente: Elaboración propia a partir del Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

El cuadro No. 3. indica que en el departamento del Cauca la mayor cantidad de residuos se produce a partir del cultivo de caña de azúcar, por medio de las hojas, cogollo y bagazo, seguido de los cultivos de plátano representada en su mayoría por el vástago y de la caña panelera representada en el bagazo, hojas y cogollo, mientras que el cultivo con menor producción de residuos es el arroz, constituido en su gran mayoría por tamo y cascarilla.

#### ***7.1.4. Análisis del diagnóstico.***

En el departamento del Cauca la mayor cantidad de residuos se produce a partir del cultivo de caña de azúcar, por medio de las hojas, cogollo y bagazo, seguido de los cultivos de plátano representada en su mayoría en el vástago y de la caña panelera representada en el bagazo, hojas y cogollo, mientras que el cultivo con menor producción de residuos es el arroz, constituido en su gran mayoría por tamo y cascarilla.

De lo anterior se puede establecer que tanto en el departamento de Nariño como en el departamento del Cauca, los cultivos de plátano y caña panelera tienden a ser cultivos que producen una gran cantidad de residuos y en contraste es el cultivo de arroz el que presenta menor participación en la producción de biomasa en estos dos departamentos, sin embargo cuando se pretende diseñar una propuesta de aprovechamiento sostenible de la biomasa mediante procesos de bio-transformación, además de la disponibilidad es necesario atender otros aspectos que hacen parte de la pre-factibilidad técnico económico y ambiental del proceso, tales como: composición, recolección, transporte, manejo, costo, y disipación geográfica, ya que es usual que los volúmenes de estos residuos estén dispersos en una gran área de intervención y resulte complejo encontrar un centro de convergencia para su almacenamiento. Estas características determinan el proceso más adecuado y permiten realizar unas proyecciones de los beneficios económicos y ambientales más esperados.

Desde un punto de vista técnico y estructural los carbones activos son carbones muy desordenados e isotropos, por tanto, no serán adecuados para preparar carbones activos aquellos materiales carbonosos que pasen por un estado fluido o pseudofluido durante su carbonización; dado que durante la resolidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. Del mismo modo, tampoco resultan adecuados los materiales con altos contenidos de humedad y residuos termoplásticos, puesto que el carbón resultante debe poseer unas buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción (Menéndez, 2008).

Los residuos vegetales, debido a sus bajos niveles de humedad, se pueden utilizar en procesos de combustión directa o procesos termoquímicos, sin embargo algunos residuos como la cascara de plátano y los recubrimientos de algunas frutas, debido a su alta humedad, presentan unos rendimientos muy bajos en la conversión de biomasa a energía y requieren tratamientos previos como el secado que incrementan los costos de operación, en el caso de la producción de carbones biológicos especializados, es preferible trabajar con cascara y polvos de granos secos cuya humedad relativa sea inferior al 25% y su estructura sólida, permita obtener mejor resultados en prototipos de carbones activos. Por lo anterior es recomendable que materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% sea aprovechada mediante procesos bioquímicos como la fermentación o la digestión anaerobia (McKendry, 2002).

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 lignina y celulosa. Según Cuiping (2004) un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de

material volátil, son las ventajas que tiene la biomasa sobre los combustibles fósiles. Por lo anterior y dado su contenido de humedad, cenizas y material volátil, un alto porcentaje de la biomasa residual agrícola de Colombia es ideal para ser aprovechada energéticamente mediante procesos como la pirólisis o la gasificación

“Químicamente la biomasa es un material formado principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno; estos compuestos son los que reaccionan exotérmicamente cuando el residuo cede energía. En comparación con los combustibles fósiles, la biomasa posee un contenido energético menor, la razón es que la biomasa tiene una mayor relación de oxígeno e hidrógeno con respecto al carbono fósil y justamente la mayor cantidad de energía se almacena en las cadenas carbono-carbono” (Atlas de biomasa residual en Colombia, 2006, p. 125).

Para el caso de la fabricación del “biochar” es necesario utilizar residuos cuyos niveles de humedad sean bajos, por ende no toda la biomasa con la que se dispone en el suroccidente del país es apta para su aprovechamiento, además la biomasa residual agrícola de Colombia presenta unos valores de humedad muy variados, por lo tanto se ha podido establecer que residuos como el capacho de maíz, la cascarilla de arroz, las hojas secas de la caña panelera y el cuesco de la palma de aceite, cuyos niveles de humedad son cercanos al 7,55% son los más viables para trabajar mediante los procesos de pirólisis, entre tanto otros como los residuos de plátano a pesar de que su volumen de producción es muy alto en la región, su nivel de humedad cercana al 94% se perfila más hacia un aprovechamiento mediante procesos de biodigestión y/o fermentación.

De lo anterior se puede establecer que si se planteara un aprovechamiento por medio de la pirólisis o la gasificación a partir de materias primas cuya humedad sea demasiada alta, la eficiencia en los procesos de obtención de biochar serían relativamente bajos y no se alcanzarían unos valores de rendimientos óptimos, haciendo que el proceso sea inviable.

Otro aspecto crítico a tener en cuenta al momento de seleccionar un residuo es las condiciones para la recolección, el transporte y la transformación de la biomasa, estos son factores determinantes en la evaluación de costos de inversión y operación, ya que si se logra establecer una relación adecuada entre las variables de localización de residuos respecto a la planta de procesamiento, esto permitiría lograr un nivel de operación del proceso que esté por encima del punto de equilibrio.

Por lo tanto debido a la facilidad en las condiciones locativas de acceso y disponibilidad de materia prima, recolección, transporte, manejo, costo y disipación geográfica así como de la composición fisicoquímica propia de la biomasa, la empresa INNOVATIVA INGENIERIA S.A.S ha decidido incursionar por el momento en el aprovechamiento del cuesco de palma, la caña panelera, los residuos de coco y la cascarilla de arroz.

#### ***7.1.5. Estado actual de generación de cascarilla de arroz en la arrocera la esmerada.***

ARROCERA LA ESMERALDA está ubicada en el municipio de Jamundí y produce aproximadamente 27 Toneladas/hora de arroz, generando como subproducto aproximadamente 4 toneladas/hora de cascarilla de arroz. Un porcentaje de esta biomasa se lleva a un proceso de combustión incompleta en hornos para generar el calor utilizado en el proceso de secado, sin embargo la producción de cascarilla sobrepasa las necesidades térmicas del proceso. La compañía transporta una gran parte de cascarilla que se adiciona a los campos de cultivo, un porcentaje menor se comercializa como material de enmienda y el resto se almacena. La baja densidad aparente de la cascarilla de arroz hace que ocupe un gran volumen por lo que el gasto del transporte de la cascarilla sobrepasa 8 veces el valor de la misma y 7 el de almacenamiento. Logísticamente el manejo de la cascarilla se ha convertido para la empresa un problema que demanda inversión sin retorno.

Actualmente la combustión incompleta, como aprovechamiento térmico, es la única ruta para la cascarilla de arroz, los otros usos no son ninguna novedad ya que hace años se viene utilizando a la cascarilla como enmienda para abonos o como material de piso en las pesebreras y galpones, sin embargo este uso no involucra ningún cambio a la biomasa.

#### ***7.1.6. Implementación de la tecnología en la arrocería la esmeralda.***

La tecnología que se busca desarrollar, incluye no solo el aprovechamiento térmico, sino también la producción de carbón activado especializado utilizando como materia prima la cascarilla de arroz proveniente de la ARROCERA LA ESMERALDA, orientándose a dos mercados potenciales que en los últimos años han presentado crecimiento: Agroindustria e Industria de tratamiento de aguas residuales.

El prototipo de carbón activado “Biochar” será utilizado como enmienda en los suelos agrícolas, contribuyendo a la disminución del cambio climático por el secuestro de carbono, mientras que simultáneamente proporciona la energía y el aumento del rendimiento de los cultivos. El prototipo de carbón activado de la industria de aguas residuales será utilizado en la adsorción de iones de cromo, residuo generado por diversas industrias el cual es altamente tóxico y nocivo para la salud.

La propuesta se acopla a las necesidades de la ARROCERA LA ESMERALDA, al contribuir con el aprovechamiento térmico de la biomasa y la eficiencia en la producción de biochar; cabe resaltar que el mercado del biochar estaría asegurado ya que la compañía lo consumiría en sus campos de cultivo. La comercialización del carbón activado para aguas residuales estará respaldada con la experiencia de INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S., empresa especializada en filtros de carbón activado.

Además, la propuesta posibilita evaluar a escala piloto la obtención de energía representada en el gas y el aceite vegetal resultado de la pirólisis, la cual permitirá la optimización de procesos de secado o la generación de potencia eléctrica.

A pesar de que en la fabricación de carbón activado hay que hacer inversión en procesos e insumos, el precio de venta justifica los costos y gastos ya que oscila entre 1500 -4000 USD/tonelada, dependiendo de su especialidad; además como resultado del proceso de pirólisis se generarán gases y aceites que se pueden aprovechar como fuente de energía en el proceso de secado de arroz. La producción de carbón activado le da un valor comercial a la cascarilla de arroz 20 veces mayor que solo la valoración térmica que se le da hoy en día. Los prototipos de carbón activado que se espera producir están destinados a aumentar eficiencias y a disminuir el impacto ambiental. Con el diseño y construcción del horno de pirólisis piloto se espera establecer condiciones de escalamiento para el aprovechamiento de los demás productos del proceso de pirólisis como el bio-gas (fuente de energía) y el bio-aceite que tiene múltiples usos; además el horno de pirólisis permitirá evaluar otros materiales que son considerados residuos en otros procesos agroindustriales y que actualmente contaminan.

Por lo tanto, los impactos más importantes que se esperan obtener son: (1) optimizar las condiciones de aprovechamiento térmico de la biomasa y explorar dos de varios mercados potenciales para el uso del carbón activado producido a partir de la cascarilla de arroz, y (2) establecer una línea base de investigación y desarrollo en búsqueda del mejoramiento en el proceso de pirólisis y en la generación de nuevos prototipos de carbones activados para diferentes mercados, así como el establecimiento de estándares de calidad para la producción e implementación del biochar en sus propios cultivos.

### 7.1.7. Revisión sobre procesos de pirólisis.

#### 7.1.7.1. Estudios de caso internacionales.

A continuación, se relacionan algunos estudios internacionales sobre el aprovechamiento de biomásas mediante procesos de pirólisis a diferentes condiciones de operación:

##### 7.1.7.1.1. Estudio de caso No.1.

Título: Determinación de parámetros claves para la elaboración de biochar con alta capacidad de intercambio iónico

Autores y año: Ordorica M., López Á.F., Perret J. (2012)

Centro de Investigación: Universidad EARTH, Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica

- Metodología:

Utilizaron como materia prima el Bambú tomado de plantas de la variedad *Guadua agustifolia*, cortado y puesto a secar en trozos de 30 cm de largo y 4 cm de ancho; fibra de coco en estado de descomposición en trozos de 5 cm de largo y 4 cm de ancho y granza de arroz secada al sol para eliminar el exceso de humedad.

El equipo que utilizaron fue un horno con control de temperatura y tiempo en forma de mufla, integrado con unas capsulas fabricadas con tubos galvanizados En cada proceso usaron una capsula por materia prima y en total realizaron 9 procesos, combinando tres temperaturas 300°C, 500°C y 800°C y tres tiempos 1 h, 3h y 5h. La variable de respuesta del estudio fue determinar la capacidad de intercambio catiónico del biochar producido. El estudio lo dividieron en 3 fases.

(I) fase: evaluaron la capacidad de intercambio catiónico del biochar, sometiendo las tres materias primas a 9 procesos, mediante la combinación de tres temperaturas (300°C, 500°C y

800°C) y tres tiempos (1 h, 3h y 5h); (II) fase: evaluaron la capacidad de intercambio catiónico de acuerdo al grado de descomposición de la fibra de coco (sin descomponer, iniciando descomposición, en descomposición) y (III) en la última fase se evaluó la utilización de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 31N y KOH 22,5 N a temperaturas ambientales y a 300 °C durante una hora para activar el biochar, y a su vez, elevar la CIC

Para medir la capacidad de intercambio catiónico usaron el método de acetato de amonio, donde la CIC se determina a partir de la cantidad adsorbida de un catión índice, al hacer atravesar una solución que contenga dicho catión a través de una muestra de suelo. Los métodos más utilizados, generalmente emplean como catión índice el NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> ó Ba<sup>++</sup> y por espectrofotometría de absorción atómica se hace la determinación de los cationes extraíbles, que generalmente son K, Ca, Mg y Al, por extracción con KCl y titulación con NaOH

- Resultados:

Encontraron que el protocolo de pirólisis a 300°C por una hora utilizando la fibra de coco dio como resultado valores de capacidad de intercambio iónico más alto que con los demás tratamientos, además hallaron que para la fase II, el mayor grado de descomposición de la fibra resulta en valores de capacidad de intercambio iónico más elevado. Por otro lado encontraron que usando el tratamiento de activación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 300°C por una hora se llegó a valores de capacidad de intercambio catiónico de hasta 252 cmol (+)/kg, cuando su objetivo era superar los 100 cmol (+)/kg, presentando diferencias con los tratamientos con KOH y a los tratamientos a temperatura ambiente.

De lo anterior concluyeron que existe una relación directa entre el aumento en el grado de descomposición de la fibra de coco y la CIC del biochar producido y que el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es un agente

activador altamente efectivo a la hora de elevar la CIC del biochar si la mezcla es llevada a 300 °C por una hora.

*7.1.7.1.2. Estudio de caso No.2.*

Título: BIOCHAR: Producción y evaluación en campo

Autor y año: Bolaños D. 2012

Centro de Investigación: Universidad EARTH, Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica

- Metodología

Utilizaron como materia prima la Granza de Arroz. El equipo era una carbonera artesanal, que constaba de un estañón de metal cortado por la mitad para mantener la temperatura generada por la combustión de la leña, y dentro del estañón usaron un balde metálico de 1 galón donde colocaron la granza de arroz. Con esto generaron un ambiente anaeróbico.

Dentro de los parámetros de proceso usaron una temperatura de pirólisis de 300 hasta 400 °C; un tiempo de pirólisis de 6 horas; la activación del biochar consistió en remojar todo el material en una solución básica de KOH 22,5 N, hasta saturar los espacios intercambiables de la muestra dejando secar para posteriormente someter el carbón a una temperatura de 300 °C y 700 °C.

Realizaron una plantación de parcelas de maíz, estableciendo 6 parcelas de 3 x 5 m, sembrando dos semillas por postura a una distancia de 0,5m por surco y 0,25m por planta, con un total de 120 puntos de siembra. A dos parcelas les aplicaron tratamientos con biochar activado, otras dos con biochar sin activar y las restantes dos correspondieron a testigos a las cuales no les aplicaron nada.

- Resultados

Ellos encontraron que por cada kg de biomasa pirolizada se obtuvieron 334 g de biochar y el biochar activado con KOH mostro una capacidad de intercambio catiónico cuatro veces mayor ( $14 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ ) al que no fue activado ( $3,4 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ ). El pH que reportan del biochar activado es de 10,42, mientras que el biochar no activado de 9,29, de esto sugieren que fue debido a que los sitios de intercambio fueron incrementados producto de la reacción básica producida por el KOH.

En cuanto al mejor desarrollo radicular, obtuvieron mejores resultados con el carbón no activado, seguido del carbón del control o testigo y por ultimo con el biochar activado. Por su parte en cuanto al follaje no encontraron diferencia entre el control y el biochar activado, siendo el biochar no activado el que mantuvo superioridad sobre los tratamientos anteriores, los resultados fueron obtenidos pesando las raíces y follajes de cada planta a los 26 días de germinado el maíz.

Al cuantificar el contenido de biomasa fresca a los 26 días de haber germinado el maíz encontraron que: con el tratamiento de biochar no activado se generaron 38,9 toneladas/hectárea de biomasa fresca, con el control 24,1 t/ha, mientras que con el carbón activado solo alcanzaron 13,6 t/ha. De lo anterior pudieron establecer que para mejores resultados en contenido de biomasa en raíz y follaje en el cultivo de maíz sugieren el uso de biochar no activado.

#### 7.1.7.1.3. Estudio de caso No.3.

Título: Preparación de biocarbón a partir de la cascarilla de arroz por hidrólisis, carbonización y pirólisis.

Autores y año: Wang L., Wang X., Zou B., Ma X., Qu Y., Rong C., Li Y., Su Y., Wang Z. (2011).

Centro de Investigación: Facultad de Química de la Universidad de Jilin, República Popular China. Departamento de Ciencias de la Electrónica, Instituto de Tecnología de Ingeniería, República Popular China.

- Metodología

La materia prima que utilizaron fue la cascarilla de arroz. Entre las variables que controlaron están: concentración de ácido sulfúrico en rangos de 62 a 82 (% peso), relación entre cascara de arroz y ácido sulfúrico de 1:3 a 1:5 en g/ml, temperaturas de hidrólisis de 30 a 70 °C, tiempos de hidrólisis de 5 a 25 min, temperaturas de pirólisis de entre 400 a 800°C con tiempos de residencia y tasas de aumento de temperatura constantes de 1 hora y 20°C/min, respectivamente.

La materia prima la lavaron con agua destilada para eliminar tierra e impurezas, posteriormente la sometieron a un proceso de secado a 110 °C durante la noche. La hidrólisis la realizaron con ácido sulfúrico con concentraciones en rangos de 62% a 82% (% peso); la relación entre cascara de arroz y solución de ácido sulfúrico fue de 1:5 a 1:3 (g/ml); temperaturas de reacción de 30 a 70 °C; tiempos de reacción de 5 a 25 min. Posteriormente enfriaban a temperatura ambiente, filtraban y el filtrado lo lavaron hasta neutralidad con agua destilada, dejándolo secar durante una noche a 110 °C.

Durante la carbonización la muestra la calentaron a 95 °C durante 6 h. Los sólidos que se formaron los lavaron hasta neutralidad con agua destilada y los secaron a 120 °C durante la noche. En la Pirólisis el carbono sólido lo colocaron en un horno tubular a temperaturas de 400-800 °C durante 1 h bajo la influencia de gas nitrógeno. La tasa de aumento de la temperatura era de 20 °C/min.

- Resultados

Las mejores condiciones en el protocolo de hidrólisis establecido por ellos, indican que los valores óptimos son: concentración del ácido sulfúrico: 72%, tiempo de hidrólisis: 10 minutos, temperatura de hidrólisis: 50°C, relación de cascara de arroz/ volumen de ácido sulfúrico: 1:10-1:20 (g/ml).

Los valores más óptimos encontrados para cada variable estudiada, se lograron cuando las otras 3 variables analizadas se encontraban en sus valores más recomendables. Bajo las anteriores condiciones lograron alcanzar una relación de hidrólisis de cascara de arroz total del 52,72%.

En cuanto al proceso de pirólisis, reportaron que los contenidos de carbón fijo incrementaban al aumentar la temperatura y alcanzaban un máximo del 94% en peso a una temperatura de pirólisis de 800°C, mientras que los contenidos de hidrógeno y oxígeno decrecían a medida que se incrementaba la temperatura. El contenido de nitrógeno casi permanecía igual en todas las temperaturas.

#### *7.1.7.1.4. Estudio de caso No.4.*

Título: Pirólisis al vacío de bagazo de caña de azúcar

Autores y año: Brossard L., Penedo M., Cortéz L.A.B., Bezzon G. y Olivares E., (2003).

Centros de Investigación: Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba y UNICAMP, Campina, Sao Paulo, Brasil.

- Metodología:

La materia prima que utilizaron fue el bagazo de caña de azúcar. Manejaron un diseño experimental factorial multinivel, estableciendo como variable respuesta el rendimiento de los productos líquidos y como factores y niveles de operación:

i) Velocidad de calentamiento: 5.4, 8.9 y 12.4 (°C/min),

- ii) Tiempo a la temperatura final: 0,10 y 20 (minutos),
- iii) Temperatura final: 425, 450 y 475 (°C),
- iv) Densidad aparente del sólido 263.8, 313.1 y 362.4 (Kg/m<sup>3</sup>),

La Presión de operación fue constante a: 0,4 Kg (f)/cm<sup>2</sup>.

- Resultados

Dentro del análisis estadístico que reportan, establecen que las variables principales que inciden sobre el rendimiento de la fracción líquida son la velocidad de calentamiento y la densidad aparente del sólido, mientras que les resultan significativas las interacciones entre velocidad de calentamiento-temperatura y temperatura-densidad-aparente. Los autores hallaron también que trabajar a una velocidad de calentamiento alta y a niveles inferiores de densidad aparente y temperatura final, les resulta óptimo para obtener los mejores rendimientos en líquidos y biocarbón.

Uno de los aspectos relevantes del artículo que resultan de interés para este estudio, constituye la información que suministran sobre la caracterización de los compuestos procedentes de las fracciones líquidas pirolíticas, analizadas mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas, donde los autores indican que los componentes más abundantes del alquitrán vegetal son el levoglucosano, los fenoles totales (compuestos por 4-etil fenol, 4-metil fenol, 4-metoxi fenol y fenol) y en menor proporción el ácido acético y algunos carbonilos y esterés. En total los autores identificaron 31 sustancias a través del contraste con los patrones que ellos disponían, no obstante los compuestos que se presumen se desprenden durante la pirólisis, exceden esta cantidad. Por otro lado encontraron que la extracción rápida de los gases productos de la pirólisis no favorecen las reacciones posteriores de descomposición, a la vez que un régimen de condensación con enfriamiento brusco hace que no tengan lugar las reacciones subsiguientes

mediante las cuales pueda ocurrir la descomposición de los productos primarios, en particular del levoglucosano.

Algunos otros compuestos que resulta significativo mencionar en su identificación, son por ejemplo la 4-Metil-2(5H)-Furanona; la 1,2-ciclopentodiona, 3-metil; la 2(3H)-Furanona, dihidro. De estos el primero y el segundo se encuentran en una cantidad apreciable en el alquitrán vegetal.

Por último los autores concluyen que en las condiciones experimentales que favorecen el mayor rendimiento de líquidos de pirólisis se obtienen los mayores rendimientos de levoglucosano, fenoles y ácido acético y que los productos condensados de la pirólisis al vacío, a diferencia de los que se obtienen durante la pirólisis a presión atmosférica son una mezcla compuesta de una gran fracción acuosa y una muy pequeña cantidad de producto oleaginoso, siendo mejor para la obtención de bioaceite la pirólisis a presión atmosférica.

#### ***7.1.7.2. Estudios de caso nacionales.***

A continuación se relacionaron los estudios más importantes realizados en el país sobre el aprovechamiento de biomásas mediante procesos de pirólisis y su conversión a biochar:

##### ***7.1.7.2.1. Estudio de caso No.1.***

Título: Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (*ElaeisguineensisJacq.*)

Autores y año: Arteaga J., Arenas E., López D., Sánchez C., Zapata B., (2012).

Centros de Investigación: Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia.

- Metodología

1) Equipo: reactor de caída libre con gas N<sub>2</sub> como gas de arrastre y con calentamiento externo a través de resistencias eléctricas.

2) Preparación de la biomasa: Análisis granulométrico por tamiz de 1 mm; Secado a 110°C durante dos horas hasta un porcentaje menor al 15%.

3) Variable respuesta: rendimientos de bio aceite

4) Factor y niveles:

i) Temperatura de operación entre 500, 600 y 700°C

ii) Flujo de alimentación constante: 2 g/min

Los experimentos los realizaron por duplicado y los rendimientos de la fracción líquida y sólida los obtuvieron midiendo el peso al final de cada experimento, mientras que el rendimiento del gas lo determinaron por diferencia en el balance de materia.

Para la recolección y caracterización de los gases no condensables usaron bolsas Tedlar y su análisis se realizó con un cromatógrafo Agilent 7890 A, detectores FID y TCD, equipado con dos columnas: HP Plot Q: Longitud 15 m (software: EZChromElite) y HP Molsieve 5A: Longitud 30 m (software: EZChromElite); para elución de N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, el gas de arrastre es helio a alta pureza (99,9 %) con un flujo de 4,7 mL/min. La rampa de temperatura fue de 60°C/min hasta una temperatura final de 240°C durante 2 minutos, con una tasa de incremento de 30°C/min, con ello se asegura una correcta separación cromatográfica; la temperatura en el puerto de inyección es de 120°C asegurando un estado gaseoso en la inyección. La curva de calibración fue hecha con mezclas de gases que incluyen H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> balance en helio.

- Resultados

Ellos obtuvieron a 500 °C un rendimiento de 9.6% en peso de bio-oil y 71.4% en peso de residuo sólido o carbonizado; aunque para este caso observaron que en el residuo sólido había alta presencia de materia prima sin reaccionar. A medida que la temperatura de pirólisis se

incrementaba la producción de bio-oil también lo hacía, hasta que alcanzó el máximo rendimiento a 600 °C, donde el rendimiento de bio-oil fue del 23.3% en peso y de un casi 40% de carbonizado, luego a medida que la temperatura aumentaba el rendimiento decrecía hasta un 14.9% en peso de bio-oil, mientras que el carbonizado presentaba un incremento paulatino hasta los 700 °C, el nivel máximo de medición, donde alcanzo un rendimiento cercano al 50%.

También observaron que al aumentar la temperatura aumenta la producción de gases no condensables, este fenómeno resaltan que se debió a que las altas temperaturas llevan reacciones secundarias de craqueo de los volátiles liberados inicialmente en la pirólisis favoreciendo la presencia de hidrocarburos gaseosos de bajo peso molecular, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO. Sus mediciones las realizaron tomando cuatro muestras con intervalos de 30 minutos por experimento a cada temperatura, y reportaron la composición de los gases a cada temperatura como el promedio de los cuatro muestreos. Los gases con mayor producción son CO y CO<sub>2</sub> mientras que H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se producen en menor proporción. La composición de los gases a 600 °C, la temperatura en la cual obtuvieron el mayor rendimiento de bioaceite, fue 2.720% de CO<sub>2</sub>, 0.703 % de H<sub>2</sub>, 1.289% de CH<sub>4</sub>, 2.472 % de CO y el resto N<sub>2</sub>.

#### 7.1.7.2.2. Estudio de caso No.2.

Título: Diseño y construcción de una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa.

Autor y años: Fajardo A. (2011).

Centro de investigación: Escuela de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Colombia.

- Metodología

Como materia prima utilizaron residuos agrícolas cañeros, hojas y cogollos, con porcentajes de humedad por debajo del 10%.

Las pruebas de pirólisis las desarrollaron utilizando un micro pirolizador con funcionamiento en continuo, con fluidización mecánica por medio de un tornillo alimentador y con calentamiento indirecto usando gas propano, variando el sistema de condensación y de aislamiento térmico, de tal manera que la primera prueba no conto con estas unidades, mientras que para la segunda etapa realizaron pruebas con el acople respectivo de estos sistemas, esto con el fin de observar las variaciones de los productos obtenidos en cada corrida.

- Resultados

En la unidad de micro pirólisis sin acople de los sistemas de condensación y aislamiento, realizaron una corrida para procesar 200 g de biomasa, obteniendo un rendimiento del 15% de biochar a temperaturas entre 350 y 450 °C con un tiempo de residencia de 42 segundos, utilizando un flujo másico de 0,0813 g/s y una velocidad en el tornillo de alimentación de 2 rpm, sin tener en cuenta tamaños de partículas.

Para la segunda fase realizaron las adecuaciones técnicas del sistema de condensación para la obtención del bioaceite, lo aislaron térmicamente para reducir pérdidas por calor y acoplaron una boquilla para la combustión de los GNC. Los parámetros que usaron fueron:

A) Parámetros fijos:

- i) Tamaño de partícula: 53 $\mu$ m
- ii) Humedad de la biomasa: 7%

B) Parámetros variables:

- i) Velocidad de alimentación de la biomasa: 12, 20, 26, 29, 55 rpm.
- ii) Temperatura del reactor: 450 °C y 500 °C
- iii) Temperatura del agua para condensadores: ambiente, 20 °C, 15 °C, 11 °C.

Los resultados más óptimos los alcanzaron con: Una velocidad de alimentación de 12 rpm, una temperatura en el reactor de 500 °C y una temperatura del agua de enfriamiento de 11 °C. Los resultados obtenidos sobre los rendimientos de material recuperados fueron: Biochar 34%, bioaceite 25% y gases no condensables del 41%. Lo anterior indica la importancia de mantener aislados térmicamente principalmente el reactor y la conexión reactor-condensador, para la obtención de mejores resultados.

#### *7.1.7.2.3. Estudio de caso No.3.*

Título: Activación física de cascarilla de arroz aglomerada con engrudo de almidón de yuca para la obtención de carbón activado.

Autores y año: Cerón A. y León Y. (2010).

Centro de investigación: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas de la Universidad Industrial de Santander

- Metodología

Las materias primas utilizadas fueron la cascarilla de arroz y almidón de yuca. El desarrollo experimental se llevó a cabo en diferentes etapas.

i) Preparación del engrudo: El engrudo de almidón de yuca es un aglutinante y/o adherente que ayuda a la aglomeración de las fibras naturales, lo usaron en una proporción almidón de yuca: agua de 20:80 %p/p. Posteriormente aglutinaron la cascarilla con el engrudo de almidón de yuca y lo sometieron a una presión de 195.135 Kpa, en una prensa hidráulica carver y emplearon moldes cilíndricos en acero inoxidable para la obtención de troqueles. Establecieron diferentes pesos en gramos para obtener la mejor relación cascarilla/engrudo para la obtención de troqueles

consistentes y observaron que la relación 15% cascarilla, 85% engrudo a una presión de 195.135 Kpa presentó la mayor consistencia y menor cantidad de engrudo sobrante.

ii) Proceso de secado: los colocaron en la mufla a 90°C hasta peso constante.

iii) Proceso de carbonizado: usaron un reactor tubular de acero de 20 cm de longitud y 4 cm de diámetro, con calentamiento externo (mufla), a una velocidad de aprox. 3 °C/min, hasta alcanzar una temperatura de 400 °C, para eliminar la humedad aun retenida y los compuestos volátiles.

iv) Cuando alcanzaron los 400°C hicieron circular los gases activantes: vapor de agua sobrecalentada a 200 °C y CO<sub>2</sub>, variando los flujos de vapor de agua y CO<sub>2</sub> de la siguiente manera: Vapor de agua desde 0 hasta 20 minutos, usando intervalos de 5 minutos, Flujo de CO<sub>2</sub> desde 0 hasta 60 minutos, usando intervalos de 5 y 10 minutos.

Ellos advirtieron que con la omisión de alguno o ambos gases activantes, la capacidad adsorptiva es menor en comparación al uso de los gases combinados y sugieren que esto es debido a que en la etapa de carbonización se elimina agua, compuestos volátiles y materiales no carbonosos y entre tanto el carbono restante cristaliza con formaciones irregulares cuyos intersticios dan como resultado un carbón con baja capacidad de adsorción, mientras que con el uso de los gases activantes se tiene que: con el paso del vapor de agua se aumenta la estructura macro y meso porosa del carbonizado y se extrae gran cantidad de materia volátil, además de otros compuestos que por su naturaleza polar son removidos y la molécula de CO<sub>2</sub> posee un menor tamaño, la cual puede pasar por cavidades donde la molécula de agua no cabe, creando poros más pequeños y aumentando así su capacidad adsorptiva general.

- Resultados

1) Emplearon la prueba del índice de azul de metileno para los distintos carbones formados por las diferentes combinaciones de flujos de agentes activantes, obtuvieron que la mayor capacidad adsorbente se obtuvo con: Tiempo de activación con vapor de agua: 20 min y Tiempo de activación con CO<sub>2</sub>: 60 min

2) Hallaron mediante la isoterma de adsorción experimental la existencia de meso y macro poros, debido al gran tamaño de la molécula de AM, la cual no penetra a través de carbones de diámetro medio inferior a 1.5 nm.

3) Midieron el pH del carbón y encontraron que es de carácter básico, a causa de las cenizas dentro de la estructura del carbón, mostrando que existe cierta afinidad electrónica por el AM de metileno, ya que se comporta este último como ácido.

4) Le realizaron una prueba de compresión al carbón, mostrando un desplazamiento de 8.8 mm con una fuerza de 40 N, ratificando que es apto para la aplicación en columnas permitiendo el apilamiento de grandes cantidades de troqueles sin temor a fracturarse.

#### *7.1.7.2.4. Estudio de caso No.4.*

Título: Pirólisis de Biomasa, cuesco de palma de aceite

Autores y año: Gómez A., Klose W., Rincón S. (2008).

Centro de investigación: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería,

Departamento de Mecánica y Mecatrónica, Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización

Térmica de procesos BIOT (Colombia). Universidad de Kassel, Facultad de Ingeniería

Mecánica, Instituto de Ingeniería Térmica (Alemania).

- Metodología

La materia prima utilizada fue el cuesco de palma. Los parámetros de operación del proceso fueron los siguientes: i) Tamaños de grano: entre 0,05 mm y 5 mm; ii) Flujo de gas de barrido:

1,5 l/min; iii) Tipo de mezcla: N<sub>2</sub>-Vapor de agua en proporciones 70-30%, con el mismo flujo volumétrico; iv) 3 velocidades de calentamiento 1, 3, 10 °C/min; v) 2 alturas de cama de 25 y 3 mm; vi) 3 variaciones sobre el tamaño de grano 5, 2-3, menor a 0,05 mm; vii) 6 variaciones de temperatura de reacción para un tamaño de partícula menor a 0,05 mm con valores de 190, 246, 285, 332, 500 y 974 °C y 4 variaciones de temperatura de reacción para tamaños de partícula 2-3 mm con valores de 268, 345, 500 y 960 °C; viii) Pirólisis en una atmósfera de agua; ix) Pirólisis del cuesco de palma de frutos secos con variaciones en el contenido de ceniza de 1,4 y 0,8%

Los protocolos para la adecuación de la materia prima y su evaluación en los procesos de pirólisis se indican a continuación:

a) Contenido de ceniza: lavaron el cuesco de palma con agua a 80 °C por 4 horas para disminuir el contenido de ceniza.

b) Análisis granulométrico: Tamizado en seco. Usaron la norma DIN 4188, con series de tamices con diámetro externo de 300 mm, usando 300 g de muestra en un aparato de múltiples tamices marca retsch tipo vibro, equipado con vibración perpendicular, durante 20 min según la norma DIN22019 que sugiere este tiempo para el análisis por tamizado.

c) Secado: Secaron las muestras a 106 °C con una duración aproximada de entre 45 a 60 min, culminando cuando no existía variación de peso.

d) Calentamiento: Con velocidad de calentamiento constante hasta temperatura final escogida. Esta temperatura la sostenían durante 15 min para garantizar que toda la muestra tuviera una temperatura homogénea. Al final suspendieron el suministro de potencia eléctrica y dejaron la muestra en el reactor bajo un flujo de 1 l/min de nitrógeno, hasta alcanzar la temperatura ambiente; finalmente sacaron la muestra y la pesaron.

➤ Resultados

1) Encontraron que al aumentar la tasa de calentamiento durante la pirólisis existe una producción menor de la fracción carbonizada, mientras que tasas de calentamiento bajas y moderadas sin evacuación rápida de la fase volátil, favorece la producción de carbonizado, esto debido a las reacciones heterogéneas, al permitir mayor tiempo de contacto entre la fase sólida y volátil. Precisamente el aspecto menos conocido de la pirólisis son las reacciones que ocurren entre la fase volátil y la fase sólida, que conllevan a reacciones secundarias exotérmicas, tasas de calentamiento del orden de 50 a 150 °C/s ayudan a evitar este tipo de reacciones. En la medida en que se tengan tiempos de permanencia altos de la fase volátil en el reactor, se potencializa su degradación. Los productos generados en estas reacciones secundarias provienen de reacciones entre el levoglucosano y la matriz de material sólido, así como de la degradación térmica de los hidrocarburos pesados en fase volátil (este tipo de degradación térmica de los hidrocarburos se denomina craqueo).

2) Las reacciones para la generación de CO<sub>2</sub> Y CO ocurren de manera acoplada hasta los 400 °C, a temperaturas superiores la formación de estos gases ocurren de manera independiente siendo mayor la formación de CO que la de CO<sub>2</sub>. La formación de CH<sub>4</sub> comienza a 250°C y presenta picos de reacción a 407 y 507 °C, la formación de H<sub>2</sub> a 400°C e identificaron un punto máximo único a 700 °C. Del anterior análisis elemental de la composición de los gases generados, lograron establecer que hasta temperaturas de 400 °C se presenta en mayor proporción la generación de gases CO, CO<sub>2</sub> y condensables. Desde los 400 °C hasta los carbonizados obtenidos a 960 °C se generan en mayor proporción los gases de H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e hidrocarburos pesados.

3) Las tasas de calentamiento elevadas favorecen la presencia de los gradientes térmicos durante el calentamiento de la cama de material y en la parte interna de las partículas de biomasa, promoviendo la presencia de reacciones secundarias.

4) Los tipos de biomasa que presentan mayor contenido de lignina, como cascara de coco o nueces permiten mayores rendimientos de fracción carbonizado durante la pirólisis.

5) La remoción de material inorgánico de las muestras, se hace generalmente con lavados ácidos, que alteran la cristalinidad y el grado de polimerización de la biomasa y pueden dejar trazas de ácido en la biomasa.

6) El efecto del tamaño de grano es más influyente en la fracción másica final de carbonizado que el efecto causado por la altura de cama de la materia prima en el reactor, encontrando que para tamaños de partícula mayores se obtiene una menor fracción de condensado y que alturas de cama alta, promueven reacciones de repolimerización de la fase volátil con la superficie de la cama.

7) Entre mayor sea el tamaño de grano, mayor es el tiempo necesario para que los productos primarios de la pirólisis abandonen la partícula, este factor promueve si no se controla el desarrollo de reacciones secundarias entre la fase sólida y la fase volátil y por ende la formación de carbonizado.

8) La presencia de la ceniza tiene un efecto catalítico que favorece la fracción másica del carbonizado, ya que permite que se den reacciones para su formación a menor temperatura.

9) Cuando trabajaron en atmosferas de vapor de agua en vez del nitrógeno como gas de arrastre encontraron que hasta temperaturas del orden de 550 °C no se presentaba influencia en la fracción sólida ni en la fracción gaseosa, sin embargo a partir de esta temperatura notaron el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub> y adujeron que estos efectos pueden ser

ocasionados por las reacciones heterogéneas del material volátil condensado con el carbonizado, además de la reactividad con el vapor de agua a medida que se incrementaba la temperatura de reacción. También establecieron que la realización del proceso bajo atmosferas de vacío, inhibe el desarrollo de reacciones secundarias.

10) El aumento de la presión en el proceso de pirólisis favorece la ocurrencia de reacciones secundarias y conduce a la formación de mayores fracciones de carbonizado.

11) También realizaron un análisis de la contracción volumétrica de cubos uniformes de cuesco de 4x4x4 mm encontrando que se presenta un incremento en la contracción volumétrica con un aumento de temperatura hasta los 500 °C, para después estabilizarse.

12) En cuanto a la microporosidad encontraron que para el carbonizado sin activar se tiene un volumen total de adsorción de 30 mm<sup>3</sup>/g, y activado de 250 mm<sup>3</sup>/g.

13) También determinaron que hasta la temperatura de 500 °C ocurren las reacciones primarias de pirólisis con rendimientos máximos de carbonizado y alquitranes. Lo anterior les permitió plantear que la biomasa se transforma inicial y completamente en una fase volátil condensable bajo condiciones experimentales muy controladas que minimicen las reacciones secundarias, estos alquitranes tienen una humedad que depende de la humedad de la biomasa y del agua generada durante el proceso, no obstante en la mayoría de los casos la humedad del alquitrán está alrededor de un 15-30% en peso.

14) Según este estudio, la formación de la fase volátil se define como la única reacción primaria de la pirólisis del cuesco y plantean la hipótesis que la formación de carbonizado es directamente proporcional a la masa que aún no ha reaccionado en cada instante del proceso, además presentan la descomposición de la biomasa con un esquema de tres reacciones paralelas e independientes (reacciones con la hemicelulosa, celulosa y lignina). Mediante la reacción

primaria se forma la fracción volátil, que a su vez se descompone mediante dos reacciones secundarias altamente competitivas. Por medio de la reacción de despolimerización, la fase volátil reacciona hasta formar finalmente gases permanentes y a través de la repolimerización, la fase volátil vuelve a reaccionar con el lecho para formar carbonizado.

Existe una cuarta reacción y es la reacción del carbonizado ya formado, la cual inicia a partir de los 500°C y lo que ocurre es que el carbonizado vuelve a despolimerizarse, presentándose la formación de una fase volátil no condensable y que también la conforman  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  y otros hidrocarburos pesados.

En la cinética química de la formación de gases producto de la despolimerización de la fase volátil, esta se vuelve dominante a altas temperaturas, en cuanto a la despolimerización de la fase carbonizada ya formada, se requiere adelantar trabajos experimentales, puesto que esta reacción no fue controlada en sus experimentaciones.

Otro aspecto a tener en cuenta es que a mayores tasas de calentamiento, mayores son las diferencias entre el reactor y la matriz de materia sólida, este efecto se conoce como atraso térmico y se debe al flujo de calor del reactor al material que procesa y produce un error sistemático en las mediciones, que se hace mayor a tasas de calentamiento elevadas, especialmente cuando los termopares no están bien ubicados.

15) La formación de metano, hidrógeno y de los compuestos de hidrocarburos pesados son ocasionados por reacciones del material carbonizado que fue formado a temperaturas menores, estos generalmente se producen en mayor proporción a temperaturas superiores a los 500°C, mientras que la formación de  $CO_2$ ,  $CO$  y condensables se forman por las reacciones de la fase volátil y ocurren desde temperaturas de 250°C.

16) La tasa de calentamiento tiene una influencia directa sobre el desarrollo de las reacciones secundarias que pueden ocurrir en el interior de las partículas, en la cama del material sólido, y/o en la atmosfera a alta temperatura del reactor (cuando la fase volátil no se evacua rápidamente).

17) La realización del proceso de pirólisis en atmosferas reactivas como  $H_2O$ ,  $CO_2$  y Aire, promueven las reacciones de oxidación de las fases volátil y sólida, especialmente a temperaturas mayores a  $600^\circ C$ .

18) El volumen acumulado de macro y meso porosidad sufre variaciones, lo cual sugieren que puede ser un indicativo de reacciones secundarias en la matriz sólida. Además la contracción volumétrica de bloques formados de cuesco puede ser del 45% en relación al volumen inicial de la biomasa seca después de ser sometido a temperaturas de pirólisis.

19) Entre las condiciones que permiten minimizar los efectos causados por las reacciones secundarias están: Uso de muestras con tamaño de grano pequeño y bien distribuidos en el reactor; remoción de material inorgánico de la biomasa; uso de muestras libres de humedad; ejecución del proceso en atmosferas inertes o en vacío; uso de velocidades de calentamiento bajas que disminuyan los gradientes térmicos dentro de las partículas y promuevan el calentamiento homogéneo; evacuación y enfriamiento rápido de la fase volátil que se forma durante la pirólisis, a través del uso de flujo de gas arrastre adecuados. Sin embargo la presencia de reacciones secundarias es muy difícil de controlar, incluso en equipos sofisticados como el de termogravimetría, se hace muy complejo lograr mediciones absolutas en los intervalos dominados químicamente.

20) La deshidratación determina el 36% en peso del carbonizado y la carbonización es el principal responsable de la formación de carbonizado, este es un proceso endotérmico y a esta reacción se asocia la producción de  $CO$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ . La despolimerización por su parte se

caracteriza por ser un proceso exotérmico que interviene en la formación de material volátil condensable, especialmente levoglucosano (brea volátil), debido a la ruptura de los enlaces de glucosa; adicionalmente se consideran dos reacciones posteriores de la brea, que forman gas y más carbonizado. Entre tanto el craqueo ocurre cuando el material volátil no es evacuado rápidamente y ocurre la degradación térmica de los hidrocarburos pesados, hasta la formación de hidrocarburos más livianos.

#### ***7.1.8. Análisis del proceso de pirólisis.***

Según Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2008), la biomasa va asumiendo una serie de comportamientos a medida que es sometido a un tren de temperaturas, estableciendo una compleja red de reacciones que modelan la cinética química de descomposición de la biomasa, atendiendo a sus propiedades fisicoquímicas y a los parámetros operacionales del proceso de pirólisis al que está siendo sometida, estableciéndose tres momentos fundamentales que describen su proceso de transformación:

##### ***7.1.8.1. Temperaturas menores de 250°C.***

Inicio de la formación de CO<sub>2</sub>, CO, Vapor de H<sub>2</sub>O y carbonizado. Los efectos estructurales son causados por la degradación térmica: Para Broido (citado en Gómez et al., 2008) los procesos de escisión de enlaces ocasionan una disminución en el grado de polimerización, esto ocurre en los puntos de mayor esfuerzo, es decir en la frontera donde se encuentran la región cristalina y amorfa, estos procesos ocurren al azar. El grado de orientación de los enlaces de celulosa, tiene efectos en la manera en que se presentan los enlaces cruzados:

a) Cuando la orientación es alta, la distancia entre cadenas es corta, promoviendo la formación de enlaces cruzados o intermoleculares, produciendo mayor carbonizado.

b) Cuando la distancia entre cadenas es larga, disminuye la posibilidad de la formación de enlaces cruzados por efectos térmicos, disminuyendo la formación de carbonizado.

Para Broido (citado en Gómez et al., 2008) la celulosa amorfa forma menos carbonizado y más volátil.

#### ***7.1.8.2. Temperaturas entre 250°C y 500°C.***

Continúan generándose carbonizado, CO<sub>2</sub>, CO, condensables y se inicia la formación de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>. Debido a la rápida degradación térmica que ocurre en este intervalo, no existen estudios de los efectos estructurales, especialmente los debidos a cristalinidad y orientación de las cadenas. Según Golova (citado en Gómez et al., 2008) la degradación térmica en esta etapa produce reacciones de despolimerización, fundamentadas en 2 hipótesis:

1. Que los enlaces de glucosa se rompen de tal manera que cada uno de los fragmentos queda con uno de los electrones del enlace, en este caso de despolimerización toma lugar un mecanismo de radicales libres. Este tipo de rompimiento de enlaces se denomina homólisis.
2. Que el mecanismo de rompimiento de enlaces de glucosa ocurre a través del rompimiento de un enlace covalente, de tal manera que el par de electrones permanece con uno de los dos fragmentos entre los cuales se produce la ruptura. En este caso la despolimerización procede de un carbocatión intermedio. Este tipo de rompimiento de enlace se denomina heterólisis.

Ninguna de las dos hipótesis ha podido ser desmentida, para Essing et al. (Citado en Gómez et al., 2008), un experto en el tema, la formación de levoglucosano ocurre por una escisión heterolítica en la parte media de la cadena.

### ***7.1.8.3. Temperaturas mayores de 500°C.***

Se continúa la producción de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y se producen C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> y otros hidrocarburos pesados. No se tiene certeza si inicia a estas temperaturas o a temperaturas menores. Tampoco se ha tenido certeza de que la ruta química de pirólisis de biomasa sea la misma a estas temperaturas.

En temperaturas bajas y moderadas se forma bastante CO<sub>2</sub> en comparación al CO, a temperaturas altas y a velocidades de calentamiento altas, la formación de CO es mucho mayor. También reportan que a temperaturas altas se generan hidrocarburos pesados, basándose a que existe una ruta de pirólisis a altas temperaturas que implica la fragmentación del anillo de glucosa en CO y H<sub>2</sub>.

Evans y Milne (citados en Gómez et al., 2008) establecen que la degradación térmica de los hidrocarburos formados durante las reacciones primarias de pirólisis, resultan en la formación de hidrocarburos y sustancias oxigenadas de menor peso molecular, hasta la formación de alquitranes aromáticos, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

## **7.2. Desarrollar una vigilancia tecnológica de los equipos e implementos para los procesos de pirólisis de los residuos agroindustriales**

### ***7.2.1. Equipos de pirólisis y patentes.***

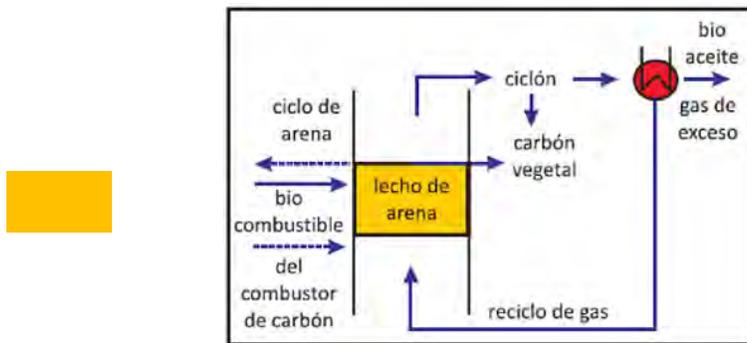
A nivel comercial existe una múltiple cantidad de equipos diseñados para la transformación termoquímica de la biomasa dependiendo de las necesidades volumétricas de material a transformar por unidad de tiempo y de los efectos de la transferencia de calor y masa; la mayoría son de lecho fijo, móvil y fluidizado, dependiendo sin son a escala de laboratorio y/o piloto, industrial y/o semi-industrial y del tipo de alimentación: tipo batch, continua y/o semicontinua;

sin embargo la discusión se centra principalmente, pero no se limita, al reactor, por ser la pieza clave en el proceso de bioconversión. Entre los más reactores más comunes están:

### 7.2.1.1. Reactores de lecho fijo.

Los reactores de lecho fijo son los más antiguos y su operación en su mayoría es tipo batch. En este tipo de reactores, el calor necesario para la pirólisis es suministrado por una fuente externa o permitiendo una combustión parcial de la biomasa. En algunos casos, se usa un gas de arrastre que permita despojar la fracción volátil mientras el carbonizado permanece en el reactor.

Este es el diseño que más se ha enfocado y favorece la producción de char, al tener bajas velocidades de calentamiento y altos tiempos de residencia (Basu, 2010, citado en Montoya J. et al., 2013). En el mundo la planta de Bio-alternative ubicada en suiza y la planta de madera de la Universidad de Cardiff, UK son claros ejemplos del uso de esta tecnología a escala industrial, con capacidades de producción de alrededor de 50 kg/h.



**Figura 1. Reactor de lecho fijo.**

*Fuente: Castillo M., 2008 citado en Montoya J. et al., 2013*

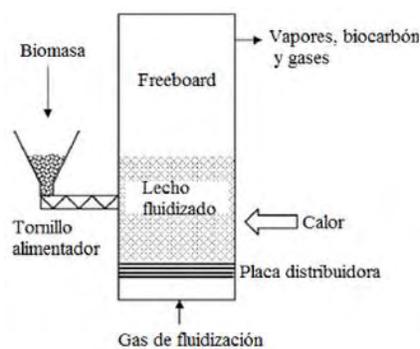
### 7.2.1.2 Reactores de lecho fluidizado.

Se caracterizan por ser ampliamente usados en la industria tanto en procesos químicos como para la obtención de petróleo desde hace más de 50 años. Las variables de proceso más relevantes en este tipo de reactores son el tiempo de residencia, el flujo de gas de arrastre, la

velocidad de calentamiento y el tamaño de partícula. Las investigaciones han demostrado que tienen un alto rendimiento de conversión de biomasa.

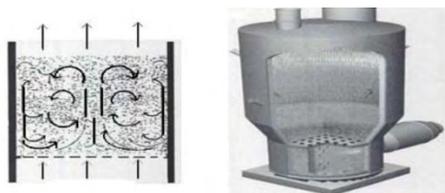
En este reactor las partículas de biomasa se calientan rápidamente al mezclarlas con partículas de arena en movimiento en un lecho fluido a alta temperatura. El calor requerido es generado a partir de un combustor independiente del pirolizador mediante la combustión de los gases y/o sólido carbonoso de la pirólisis y generalmente se transfiere al lecho por medio de serpentines de calentamiento. El tamaño de partícula adecuado de la materia prima para conseguir altas velocidades de transferencia de calor es de 2-3 mm, y el tiempo de residencia es de 0,5-2 segundos, los cuales se controlan por la velocidad del gas de fluidización (gases no condensables).

En este caso se requieren ciclones para separar los volátiles y los sólidos (sólidos carbonosos y arena del lecho). Los gases de pirólisis son recirculados al proceso para adicionar calor, los cuales se recalientan, comprimen y previamente se limpian para evitar obstrucciones en los equipos. Los mecanismos de transferencia de calor son principalmente por conducción con un 94% y convección con un 6% (Giraldo O. 2012 y Montoya J. et al., 2013).



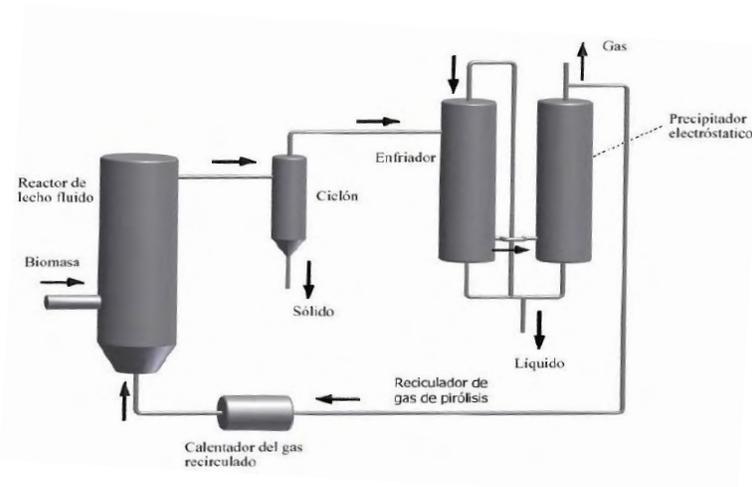
**Figura 2 Reactor de lecho fluidizado.**

**Fuente: PrabirBasu, 2010, citado en Montoya J. et al., 2013**



**Figura 3 Reactor de lecho fluidizado.**

*Fuente: Castells X., 2005.*



**Figura 4 Reactor de lecho fluidizado con recirculación de gases.**

*Fuente: Giraldo O. 2012*

Esta tecnología se ha desarrollado casi hasta nivel comercial, teniendo plantas piloto demostrativas y equipos de laboratorio para investigación con capacidades entre 3 y 300 kg/h, entre las principales se encuentran: Best Energy en Australia que procesa 300 kg/h de biomasa, Unión Fenosa en España con 200 kg/h y la Universidad Waterloo con un flujo de alimentación de 3 kg/h. A nivel industrial, la empresa Dynamotive de Canadá, patentó el proceso de pirólisis rápida de biomasa, en el cual usan como materia prima aserrín con una humedad inferior al 10%, a temperaturas de 450-500°C y tamaños de partícula entre 1 y 2 mm.

En este proceso usan un ciclón para separar el biocarbón de los volátiles, los cuales son condensados para almacenar el bioaceite y utilizar el syngas, el cual junto con el biochar y otras biomásas suministran la energía para hacer funcionar el pirolizador, aunque el syngas también lo usan como gas de fluidización. En este diseño la empresa enfoca su interés a los bioaceites cuyo rendimiento alcanza entre el 60 y 75%, biocarbón entre el 15-20%, y los gases no condensables entre el 10-20% (Bridwater y Peacocke, 2000, citado en Montoya J. et al., 2013).

### ***7.2.1.3. Reactor de lecho fluidizado circulante.***

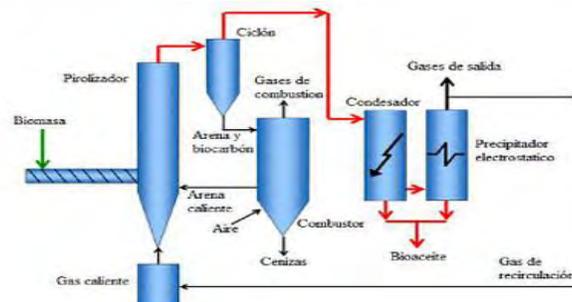
Estos son reactores de lecho fluidizado cuya característica principal es la recirculación de las partículas de carbón y biomasa no convertida después del proceso de pirólisis, las cuales después del procesamiento, son separadas de los volátiles mediante un ciclón y llevados a un combustor para el aprovechamiento de su densidad energética para recalentar el portador de calor.

En este sistema la biomasa se alimenta en un reactor de fluidización rápida generalmente por un sistema de tornillo sinfín, donde se da un contacto intenso entre las partículas de biomasa y las partículas de arena, las cuales se alimentan juntas en la sección inferior del reactor. El uso de la arena como un portador de calor ofrece la ventaja de una construcción compacta debida a la alta tasa de transferencia de calor a las partículas de biomasa, sin embargo no se encontró reportes en la literatura sobre las velocidades de flujo de gas de arrastre, gases de precalentamiento y cantidad de arena para este proceso.

Este reactor es muy similar al reactor de lecho fluidizado mencionado anteriormente porque requiere tamaños de partícula pequeños de entre 1-2 mm, aunque el tiempo de residencia del sólido en el reactor es casi el mismo que el de los volátiles, aproximadamente 1 segundo. La ventaja principal del reactor del lecho fluido circulante comparado al reactor de lecho fluido y ablativo es la transferencia de calor directa a la biomasa por la recirculación de arena recalentada

por la combustión del sólido de pirólisis, lo que disminuye pérdidas de energía, otra ventaja es el corto tiempo de residencia del gas, lo que suprime reacciones de craqueo del alquitrán, pero tiene como desventaja una hidrodinámica más compleja y al momento de escalarse se debe prestar especial atención en el pegado de la mezcla de las partículas de biomasa con la arena.

Este modelo es usado en mayor medida, para la obtención de los bioaceites producto de la pirólisis y es el menos recomendable para la producción de biochar. Los mecanismos de transferencia de calor en estos reactores son un 80% por conducción y el restante 20% por convección (Demirbas et al., 2010, citado en Montoya J. et al., 2013.). Este tipo de tecnología ha sido ampliamente desarrollada por la empresa Ensyn en Ottawa-Canadá, donde la operación típica de este reactor es a temperaturas de 600°C y flujos de biomasa de 100 kg/h, con madera de álamo como material de alimentación, y tamaños de partícula de 6 mm, manteniendo porcentajes de humedad inferiores al 10%; este equipo cuenta con un control preciso de tiempos de residencia de los vapores calientes, de hasta cien milisegundos, estos tiempos de residencia muy cortos se utilizan para la producción de productos químicos, mientras que tiempos de residencia más largos son usados para la producción de biocombustibles, con el fin de romper completamente la lignina; los rendimientos de bioaceite son de un 65 a 80% , 12-16% de biocarbón, y gas dependiendo de la materia prima procesada ( Montoya J. et al., 2013).



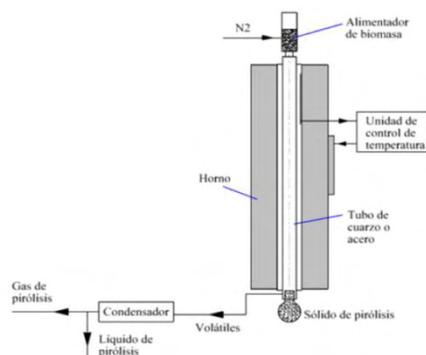
**Figura 5 Reactor de lecho circulante para pirólisis.**

Fuente: Montoya J. et al., 2013

#### 7.2.1.4. Reactores de caída libre.

Este sistema es usado normalmente a escala de laboratorio para el estudio integral de la pirólisis de biomasa. Durante el proceso de pirólisis es desmontado el alimentador y cargado con la biomasa, posteriormente es remontado y purgado el sistema con flujo de nitrógeno para despojar el oxígeno, después el reactor es llevado a la temperatura objetivo. Luego se inicia la alimentación de biomasa que se piroliza al caer a través del reactor. El sólido carbonoso queda en el fondo del reactor donde es recolectado, los volátiles continúan fluyendo por la línea del proceso pasando por un condensador donde se recogen los líquidos condensables, mientras que el syngas sigue su curso y es recogido al final del reactor.

En este tipo de equipos deben manejar velocidades de calentamiento altas de entre 500-1000 °C/s y tiempos de residencia menores a 2 segundos. Este reactor no es de los más usados y para este tipo de diseño, el incremento del tamaño de partícula, genera un incremento en la resistencia a la transferencia de calor por conducción, lo cual resulta en gradientes de temperatura más grandes y limita la pirólisis completa de la biomasa, debido al corto tiempo de residencia que las partículas permanecen en la zona de reacción, los tamaños de partícula deben ser inferiores a 1 mm (Montoya J. et al., 2013).



**Figura 6 Reactor de caída libre**

Fuente: Giraldo O. 2012

#### ***7.2.1.5. Reactores de abrasión para pirólisis.***

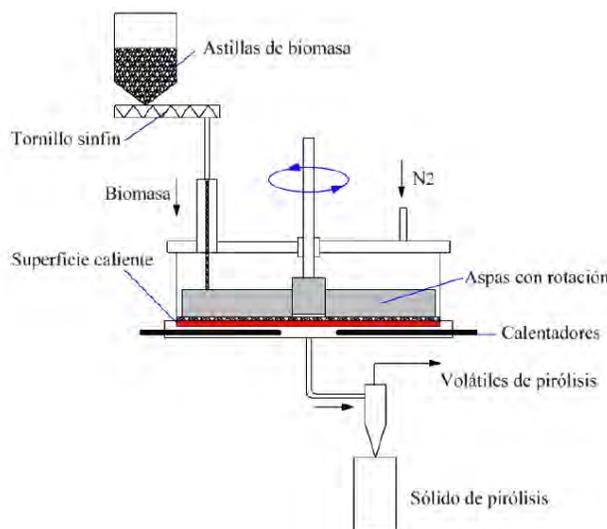
La pirólisis ablativa depende de la transferencia de calor que ocurre cuando las partículas de biomasa se presionan y se deslizan sobre una superficie caliente (alrededor de 550-600 °C) en rotación. En la pirólisis ablativa la transferencia de calor se da desde la superficie caliente del reactor a las partículas de biomasa que están en contacto con esta bajo presión, la presión entre la biomasa y las paredes del reactor es creada por medios mecánicos, fuerzas de fricción y debido a la fuerza centrífuga, proporcionando altas velocidades de transferencia de calor.

El frente de pirólisis se mueve unidireccionalmente. Este sistema puede usar tamaños de partícula relativamente grandes de aproximadamente 6 mm, no es necesario la presencia de gas de arrastre y es más importante la transferencia de calor al reactor, que la transferencia directamente a la biomasa. Las altas temperatura en la superficie caliente se puede conseguir por medio del gas de chimenea producido por la combustión de gases de pirólisis y/o solido de pirólisis, en un proceso de recirculación de gases o a través de resistencias eléctricas. Para escalamientos es necesario tener en cuenta que el parámetro principal a controlar es el área superficial de contacto entre la biomasa, las superficies de calentamiento y las aspas de rotación.

Otros parámetros fundamentales que determinan la eficiencia en los subproductos del proceso de pirólisis de biomasa incluyen la velocidad relativa de las partículas sobre la superficie de intercambio de calor, la presión y la temperatura superficial del reactor (Montoya J. et al., 2013 y Giraldo O., 2012).

En la universidad de ASTON UK, el proceso se ha desarrollado con éxito usando flujos de alimentación de 3 kg/h, el proceso de escalamiento aún se está estudiando y se ha descubierto que este es un equipo óptimo para análisis de descomposición térmica de biomasa a pequeña escala. El principio básico consiste en aplicar presión a las partículas de biomasa, en una

superficie metálica caliente, utilizando unas palas o aspas inclinadas que además imparten un movimiento horizontal y unidireccional de las partículas a través de las superficies calientes. Los rendimientos de bioaceites están alrededor de un 70-80%, sólido char 15%, gases 10%, dependiendo de la biomasa de alimentación (Montoya J. et al., 2013 y Giraldo O., 2012).



**Figura 7 Reactor ablativo**

Fuente: Giraldo O. 2012

#### **7.2.1.6. Reactores de vacío.**

Este sistema incluye una combinación de condiciones de pirólisis lenta y rápida. Las partículas de biomasa se calientan a velocidades relativamente lentas pero el gas producido se remueve rápidamente de la zona de alta temperatura, con esto se evitan reacciones de repolimerización y craqueo. En este reactor se requieren tamaños de partícula más grandes que en otro tipo de reactores para evitar que sean arrastrados por el vacío, de entre 2-5 cm. El vacío requerido obliga a emplear equipos de gran capacidad, lo cual es muy costoso debido a los

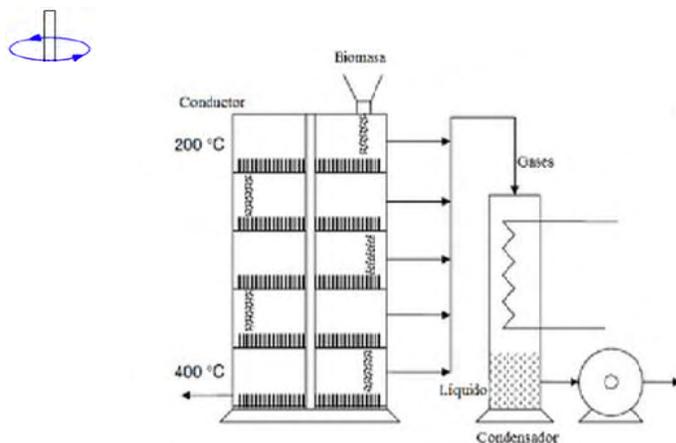
problemas de sensibilidad al ensuciamiento, consumo de energía y capacidad de succión, que resultan inviables para escalamientos semi-industriales e industriales.

Este equipo no requiere el acople de gases de arrastre, lo que resulta en una mayor facilidad para la recolección de los líquidos condensables. Los parámetros de operación más usados en estos equipos son de temperaturas que rondan los 450 °C para la temperatura final de pirólisis, así como velocidades de calentamiento bajas y tiempos de residencia cortos. Una disposición muy general en este tipo de reactores, requiere de una serie de placas calientes, la placa superior está a temperaturas de 200 °C, mientras que la inferior esta alrededor de unos 400 °C; la biomasa alimentada a la placa superior cae a las placas inferiores sometiéndose a secado y pirólisis mientras se mueven sobre las otras placas (Montoya J. et al., 2013 y Giraldo O., 2012).

La pirólisis al vacío de madera de álamo, en un reactor de múltiples bandejas ha sido estudiado por Roy et al. (1992), citado en el documento de Montoya et al. (2013), quien ha desarrollado su investigación en la Universidad Laval de Quebec en Canadá. Seis bandejas circulares u hogares con superficies de calentamiento y 0,7 m de diámetro, se ubican en una altura de reactor de 2 metros. La madera la ubican en el compartimiento superior del reactor, la cual es transportada hacia abajo por gravedad, por la acción de raspadores que están en cada unidad y/o por el movimiento circular del tubo que soporta los hogares. La temperatura de la solera superior es de 200 °C y aumenta hacia la parte inferior del reactor donde sostiene una temperatura de 400 °C para alcanzar un máximo de rendimientos en bioaceite. También, usan una bomba de vacío, para manejar presiones de 1 kPa.

La empresa Pyrovac también construyo una planta demostrativa en Janquiere, Quebec con una capacidad de 84 toneladas por día, utilizando temperaturas de 450 °C y presiones de 15 kpa,

estas condiciones les permitirían recuperar grandes cantidades de biosólidos y aceites (Montoya J. et al., 2013).



**Figura 8 Reactor para pirólisis al vacío**

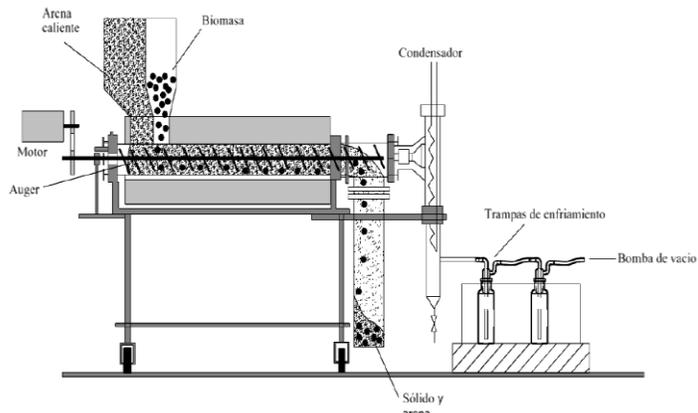
*Fuente: Montoya J. et al., 2013*

#### **7.2.1.7. Reactores Auger.**

Estos reactores pueden actuar con o sin arena como medio de calentamiento. Las partículas de biomasa se mezclan con un portador de calor que pueden ser: arena caliente, esferas de acero o cerámicas calientes, con un doble tornillo sinfín y se descomponen para generar volátiles y sólidos carbonosos. El portador de calor se puede recircular al proceso continuamente.

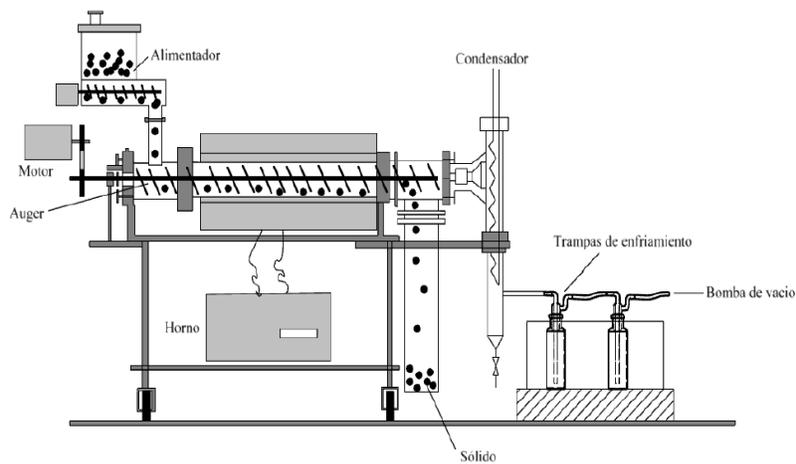
La transferencia de calor a las partículas de biomasa ocurre por el contacto directo con un portador de calor, eliminando la necesidad de un gas de transporte inerte. Algunos diseños evitan el uso de arena y en vez de este usan una fuente de calor externa (hornos y/o resistencias acopladas en las paredes) para adicionar calor a través de la pared del reactor. En algunos casos suelen usar gas inerte de arrastre para disminuir el tiempo de residencia de los volátiles en el reactor, esto cuando se requieren mayores rendimientos en bioaceites. El tiempo de residencia de

los volátiles puede variar de entre 5 y 30 segundos. El reactor utiliza temperaturas aproximadamente de 600°C con flujos de gas de arrastre de 3,5 l/min (Giraldo O., 2012).



**Figura 9** Reactor auger con arena como portador de calor

Fuente: Giraldo O. 2012



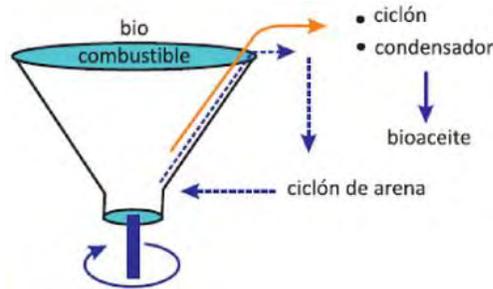
**Figura 10** Reactor auger con calentamiento externo por un horno

Fuente: Giraldo O. 2012

#### **7.2.1.8. Reactor de cono rotatorio.**

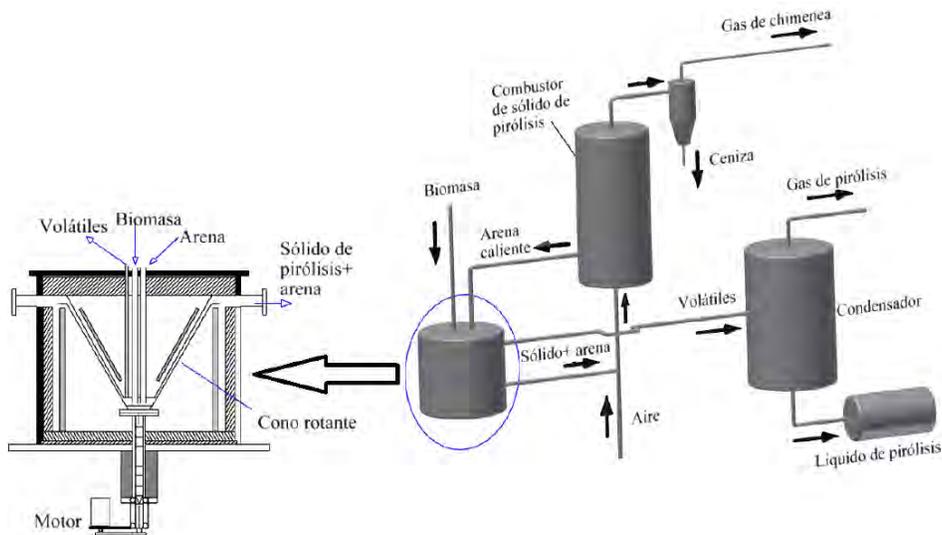
En este equipo las partículas se alimentan cerca del fondo del cono rotatorio junto con un exceso de material transportador de calor como arena y después se transporta hacia arriba a lo largo de la pared del cono en una trayectoria en espiral por las fuerzas centrífugas de alrededor de 600 rpm. Los volátiles pasan a través de un ciclón antes de pasar al condensador. Después de que el sólido carbonoso y la arena salen del reactor se envían a un combustor de lecho fluidizado donde el sólido se quema para calentar la arena, la cual es de nuevo recirculada al reactor. Las ventajas de este equipo radican en que no requieren fluido de arrastre en el cono rotatorio, además se aprovecha el movimiento de las partículas para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, sin embargo se pueden presentar problemas en procesos de escalado y operación (Montoya J. et al., 2013 y Giraldo O., 2012).

El grupo de investigación BTG de la Universidad de Aston, UK, ha desarrollado esta tecnología a escala de laboratorio, a nivel de planta piloto con un flujo de alimentación de 200 kg/h y están construyendo una planta con capacidad de procesamiento de 2 t/h de biomasa; la materia prima que usan es el raquis de palma con un 70% de humedad, la cual es secada y triturada para alcanzar tamaños de partícula de 10 mm. Este equipo consta básicamente de un reactor de cono rotatorio en el que la fuerza centrífuga mueve la arena caliente junto con el material a procesar. (Jahirul, Rasul, Chowdhury&Ashwath, 2012, citado en Montoya J. et al., 2013).



**Figura 11 Reactor de cono rotatorio**

Fuente: Castillo M., 2008 citado en Montoya J. et al., 2013



**Figura 12 Reactor de cono rotatorio con recirculación del material transportador de calor**

Fuente: Giraldo, O. 2012

Por otra parte, dentro de los estudios más especializados para determinar los parámetros cinéticos de reacción en el marco del comportamiento de la descomposición térmica de la biomasa, realizado tanto en atmosferas inertes de nitrógeno, argón, helio, así como en atmosferas reactivas de  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  y/o aire (Gómez A. et al, 2008, p.13) pueden utilizarse diferentes técnicas y equipos, entre los más comunes y sofisticados están:

- Análisis de termogravimetría (TGA): permite medir la variación en continuo de la masa de una muestra en función de la temperatura, la cual puede incrementarse de manera

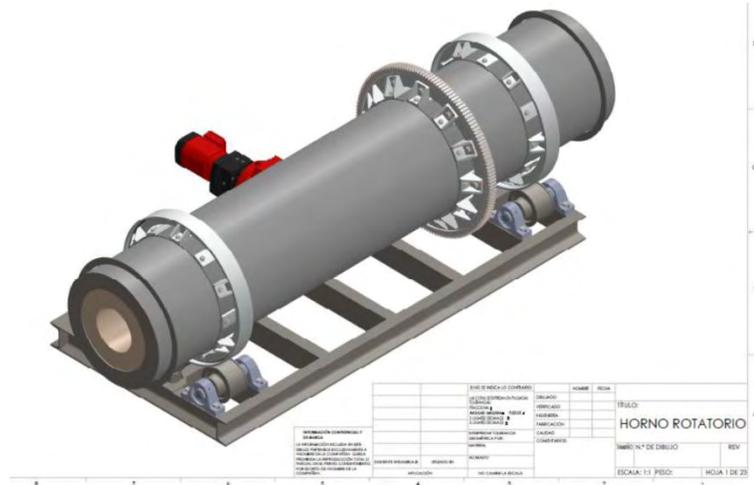
continua o incluir escalones de tratamientos isotérmicos. Estos análisis son generalmente usados a escala de laboratorio desde pocos miligramos hasta varios gramos de materia prima.

- Calorimetría diferencial de barrido (DSC): con esta técnica la muestra se somete a un programa controlado de temperatura, de tal manera que las diferencias de temperatura entre la muestra y un material de referencia permiten determinar información relevante sobre: entalpías de reacción, temperaturas de transición entre fases y estados de reacción.
- Análisis térmico simultáneo (TSA): esta técnica combina simultáneamente el análisis de termogravimetría (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Es decir se mide simultáneamente la variación de masa y la diferencia de temperatura entre la masa del material que se procesa y un material de referencia.
- Análisis continuo de gas generado EGA: Para el análisis del gas generado durante el procesamiento térmico se acoplan sistemas de análisis que permiten la medición e identificación de diferentes componentes de la mezcla del gas, principalmente CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>. El uso de otras técnicas de medición en continuo incluyen: los detectores de ionización por llama (FID), los cuales permiten la medición de compuestos de hidrocarburos de mayor peso molecular en la fase volátil.

Las técnicas de Cromatografía de gases (GC) y de líquidos (HPLC) son usadas generalmente para el análisis del gas y de la fase volátil condensable, mientras que la Espectrometría de masas (MS) se usa generalmente para la identificación de componentes, especialmente en los estudios de micro cinética.

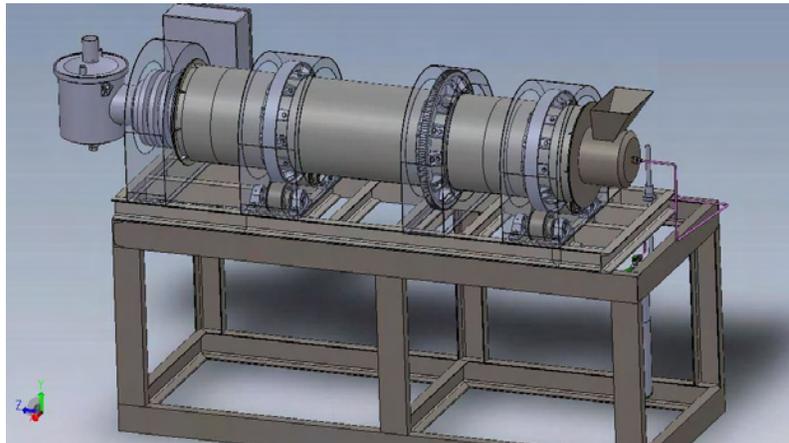
Con el fin de acondicionar las materias primas y realizar su respectiva caracterización antes y después de cada tratamiento, se pueden utilizar una serie de normas estándares como las ASTM, las cuales se muestran en el Anexo B. Cuadro No.3.

**7.2.2. Reactor de la empresa INNOVACTIVA INGENIERÍA S.A.S.**



**Figura 13** Cuerpo metálico del horno rotatorio

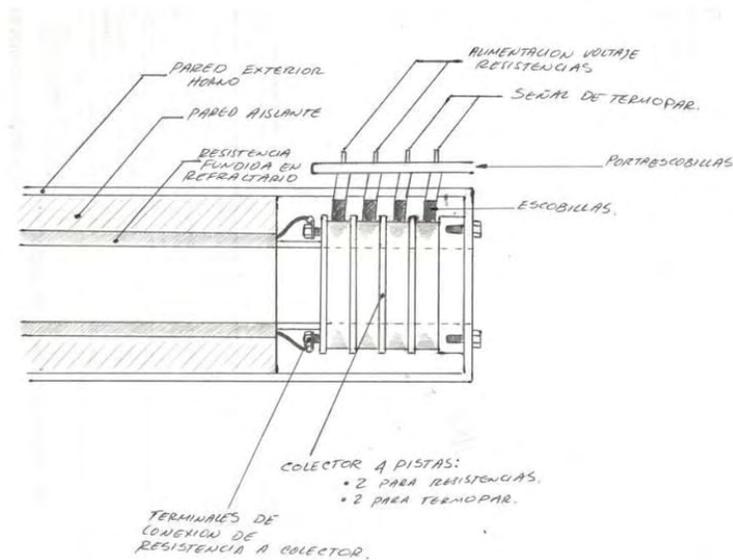
Fuente. Este estudio



**Figura 14** Horno rotatorio completo

Fuente. Este estudio





**Figura 17. Sistema eléctrico para el calentamiento del horno rotatorio.**

Fuente. Este estudio

El equipo que está diseñando la empresa consiste en un horno de tipo rotatorio, con una alimentación semicontinua y una configuración estructural basada en un cuerpo metálico fabricado en acero al carbón 1020 espesor 1/8", un aislante térmico y un cemento refractario tipo "concrash". El sistema de calentamiento es externo y consta de un sistema eléctrico con un conjunto de escobillas, termopares y unas resistencias que estarán fundidas dentro del material refractario, para alcanzar temperaturas de hasta 900°C, así como un sistema de control de temperatura digital, donde se podrá manipular los set points de temperatura y los tiempos de residencia de la cama en el reactor.

Las rotaciones serán de 1 y 3 rpm (es decir rotará lentamente) controladas por un motoreductor conectado a una eje dentado principal asegurado por medio de dos chumaceras, el cual a su vez estará en contacto directo con la rueda dentada central empotrada en la superficie externa del cilindro metálico; en cada extremo del cilindro también estarán dispuestas unas ruedas que rotarán por medio de dos pistas de rodadura, con dos ejes en cada lado acopladas al

chasis del horno por medio de ocho chumaceras. En la parte inicial del equipo, se tendrá una especie de gato hidráulico que permitirá manipular la inclinación del horno para los eventos de descarga de material.

La capacidad de procesamiento del reactor es de 500 g de materia prima por hora, es decir el 30% de la capacidad total de llenado, para garantizar el calentamiento uniformemente en toda la biomasa, la cual debe ingresar con una humedad inferior al 8%, para evitar choques térmicos que puedan afectar al material refractario. Para el sistema de alimentación de residuos se usará una tolva al inicio del cuerpo y para la recolección del carbón un colector al final del cilindro.

También existirán unas entradas a la zona de pirólisis, donde estarán acoplados unos ductos para el ingreso de los diferentes gases activantes con sus respectivos rotámetros para las mediciones de flujo respectivos.

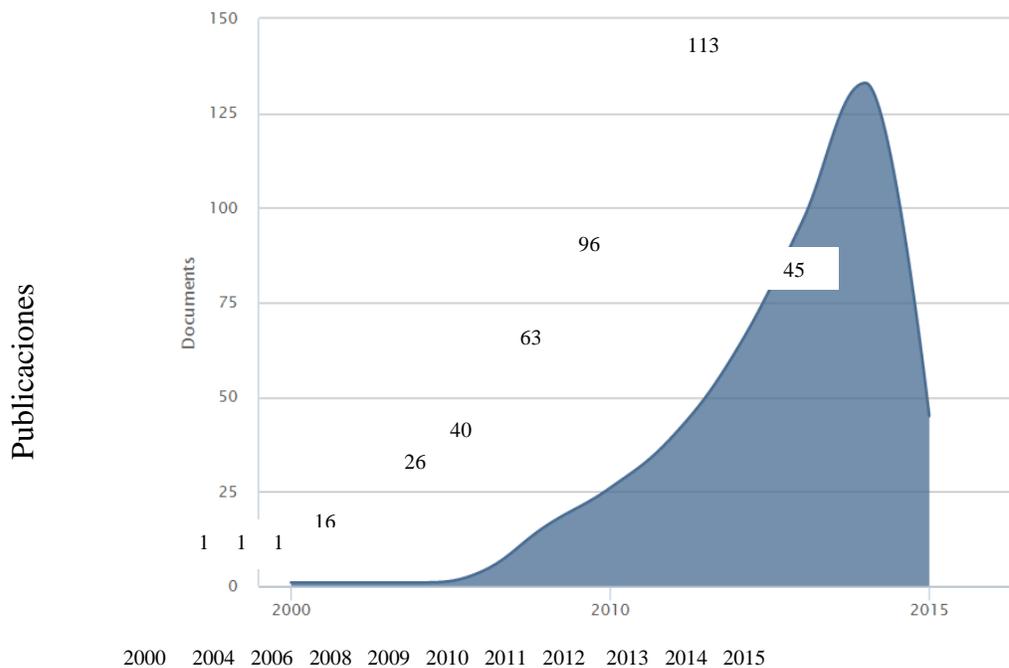
Este modelo de reactor fue seleccionado por la empresa, debido a que su configuración estructural es más económica respecto a los otros equipos, es versátil en el tratamiento de diferentes biomásas a distintas condiciones de proceso, permite trabajar un flujo de alimentación semicontinua y un calentamiento homogéneo aprovechando el movimiento rotacional del cuerpo cilíndrico y en términos generales corresponde al perfil determinado por el estudio técnico realizado por el área de investigación y desarrollo.

En un contexto global, la ingeniería de detalle del equipo, aún está en proceso de desarrollo y con el equipo técnico de la empresa, se han ido evaluado una serie de ajustes que se han instaurado paulatinamente en el transcurso del trabajo de construcción; en un balance general, el equipo encargado ha cumplido con las tareas de fabricación del reactor según las disposiciones generales de la empresa y los retrasos se han presentado debido a situaciones externas

especialmente por parte de los proveedores de las piezas eléctricas, quienes ha retrasado en cierta medida el ensamblaje y la conformación final del horno.

### 7.2.3. Análisis de la vigilancia tecnológica.

Con base en la revisión de los 30 artículos científicos de la base de datos SCOPUS Y ScienceDirect para la elaboración de la vigilancia tecnológica, se lograron establecer los siguientes aspectos:

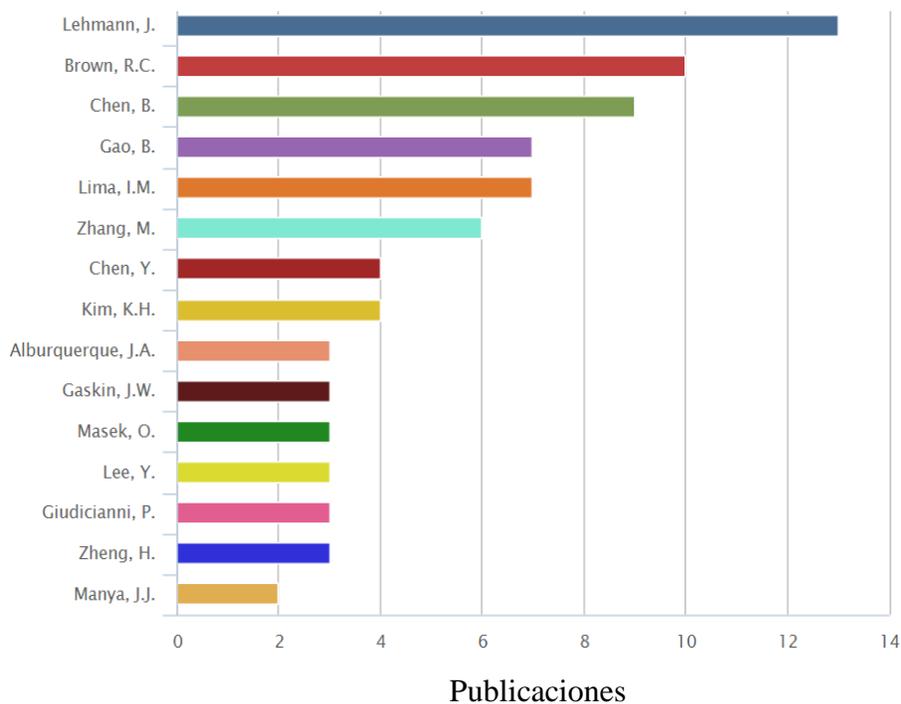


**Figura 18. Número de publicaciones por año**

Fuente: Base de datos SCOPUS [En línea]

En la figura N0. 18 se puede observar que en el transcurrir de los últimos 15 años, las investigaciones relacionadas con la producción de biochar se han incrementado paulatinamente, presentando un pico de publicaciones en el año 2014, con 113 documentos, mientras que al comenzar la primera década del presente siglo el número de publicaciones no superaban un documento. Hay que tener en cuenta que las investigaciones reportadas sobre el

aprovechamiento de biomasa para la producción de aceites, data desde la década de los cincuenta, sin embargo el enfoque para el aprovechamiento del biocarbón como enmienda de suelo aún está en proceso de investigación y por ende es considerada como una tecnología relativamente nueva.

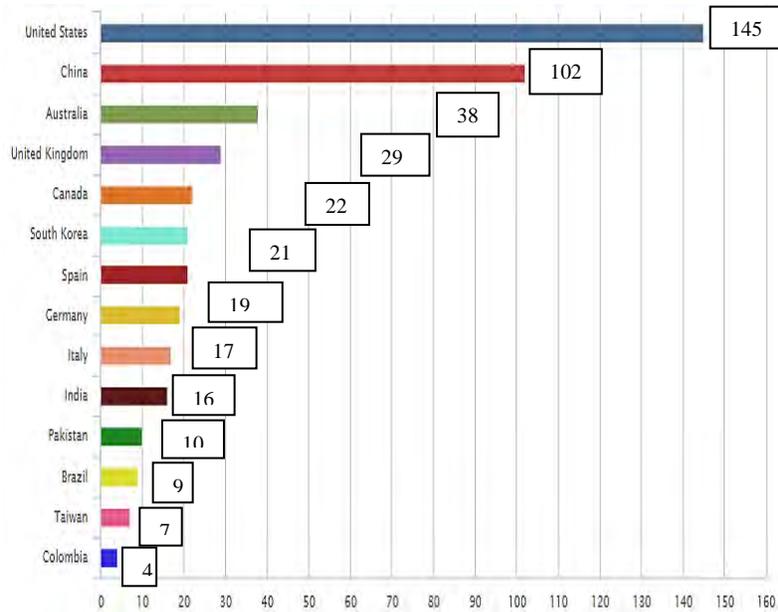


**Figura 19 Número de publicaciones por Autor**

Fuente: Base de datos SCOPUS [En línea]

En la figura No. 19 se muestran los autores que más han publicado en temas sobre pirólisis de biomasa para la producción de biochar como una tecnología carbono negativa, entre ellos y quizá el más influyente es Johannes Lehmann, docente de la escuela de agricultura y ciencias de la vida de la Universidad de Cornell , Ithaca, Estados Unidos y presidente de la junta de la Iniciativa Internacional del Biochar (IBI), la cual es una entidad sin ánimo de lucro formada en julio de 2006 y dedicada a la promoción de la investigación y comercialización del biochar.

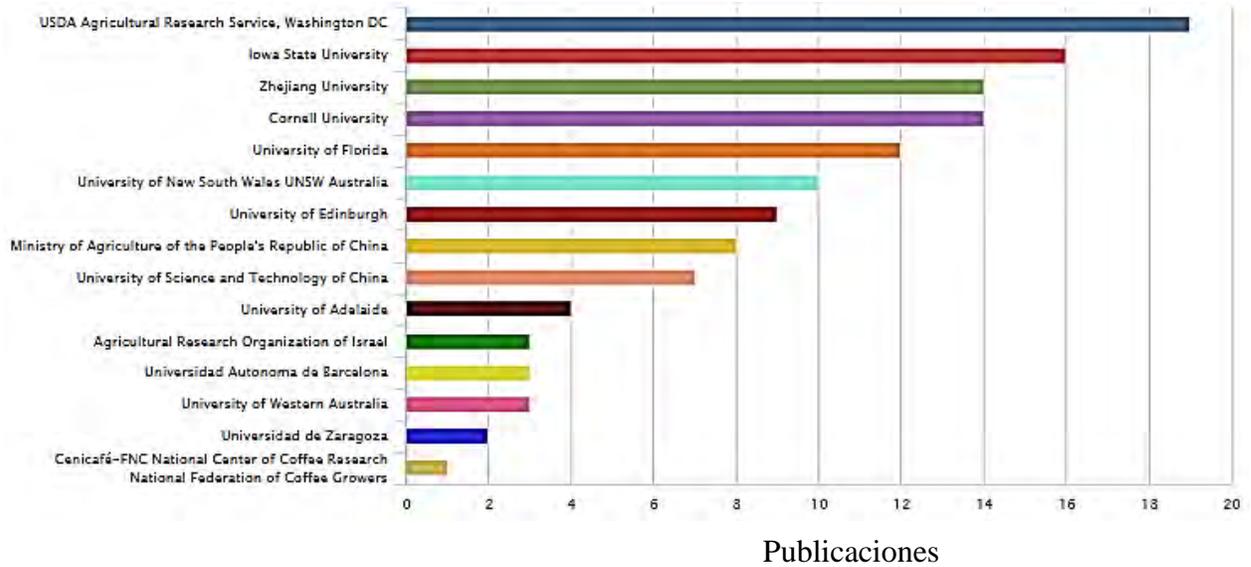
Lehman es un pionero y gran convencido de que la aplicación de esta tecnología en suelos pobres, mejoraría transablemente su fertilidad.



**Figura 20 Número de publicaciones por País**

Fuente: Base de datos SCOPUS [En línea]

En la figura No. 20 se pueden observar que países como Estados Unidos, China, Australia y Reino Unido comandan la apuesta internacional del biochar disponiendo una gran maquinaria tecnológica para convertir un subproducto de la explotación energética de la biomasa, en una potencial herramienta de secuestro de carbono, cuyo interés tiende a extenderse en todos los países del globo como un nuevo enfoque de investigación orientado al fortalecimiento de los agroecosistemas.

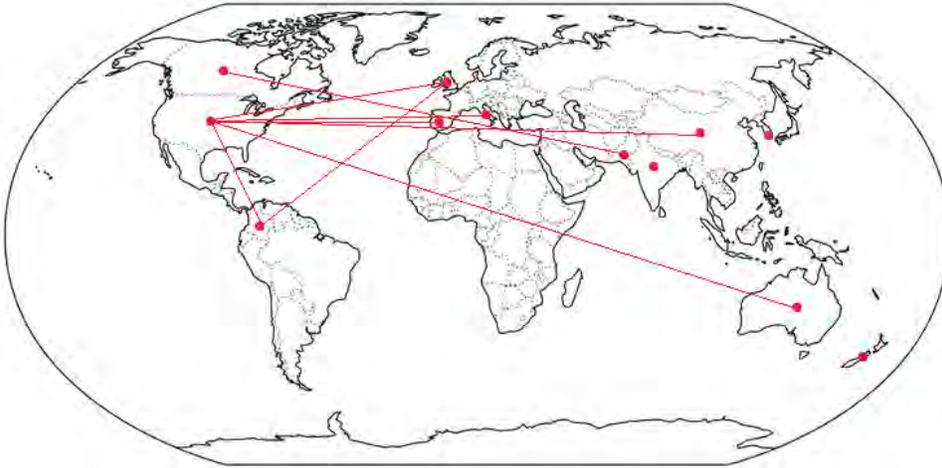


**Figura 21** Número de publicaciones por centro de investigación

Fuente: Base de datos SCOPUS [En línea]

publicado en torno a la tecnología de producción de biochar, incluyéndolo en temas de gran interés como el aprovechamiento integral de biomásas para bioconversión energética, producción agrícola sostenible a escalas superiores, cambio climático, seguridad alimentaria y seguridad de suelos.

Estas entidades se han convertido en epicentros de conocimiento, estableciendo las bases en torno a equipos, protocolos y procedimientos científicos para la implementación de esta nueva tecnología que se considera es de impacto mundial, pero que se puede aplicar a diferentes escalas y en distintos escenarios de producción.



***Figura 22 Red internacional de conocimiento sobre biochar según los artículos de la vigilancia tecnológica de la empresa***

Fuente. Este estudio

Esta figura nos permite identificar la red de conocimiento que se ha ido gestando alrededor del mundo en torno al tema de la producción del biochar; este esquema se pudo elaborar después de revisar los 30 artículos que hacen parte de la vigilancia tecnológica de la empresa y observar el trabajo sinérgico que están desarrollando países como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, China, Australia, Nueva Zelanda, India, Pakistán, Italia, España entre otros para profundizar en el tema del biocarbón. En Colombia este tema es aún incipiente, sin embargo instituciones como la Universidad Nacional, la Universidad del Valle, la Universidad de Antioquia, la Universidad Industrial de Santander, Cenicafé, el CIAT y la ICESI entre otras, han adelantado trabajos investigativos a escala de laboratorio que involucran simultáneamente el aprovechamiento integral de la biomasa con fines energéticos y la producción de biochar.

A nivel internacional el Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo, la Oficina de Asuntos exteriores y de la Commonwealth en México (FCO), así como las diferentes dependencias, departamentos y agencias de cada país pionero, han logrado canalizar una gran

cantidad de recursos orientados a promover la investigación y el desarrollo del biochar, como una tecnología de tendencia internacional, cuyos impactos son de escala global y pueden transformar la visión sobre la productividad agrícola y el aprovechamiento energético sostenible.



**Figura 23. Centros regionales de la IBI (Iniciativa de Investigación de Biochar).**

*Fuente: Iniciativas de Biochar en el Mundo (IBI, 2013)*

Esta figura muestra la distribución de los grupos regionales que fomentan y dan soporte a la investigación y creación de proyectos a nivel local, generando publicaciones y ayudando a la promoción del uso del biochar. Suramérica aún no posee un desarrollo investigativo ponderable a un contexto internacional, excepto Brasil que ya ha tenido avances científicos por ser es el epicentro del hallazgo de la *Terra Preta do Indio*, de la cual surge la iniciativa, sin embargo esta tecnología está ingresando paulatinamente al espectro de investigación de la mayoría de las instituciones y entidades, por ser un tema de discusión que involucra a todos los países productores de gases de efecto invernadero sin importar su escala.

#### **7.2.4. El Biochar y las perspectivas económicas.**

Actualmente, la industria destinada a la producción de gas sintético (*syngas*) y biocombustibles, que utilizan como materia prima biomasa natural, son las principales productoras de biochar, sin embargo, la explotación comercial y la existencia de una industria estable con unos objetivos concretos de producción de biochar no existe. Ello se debe principalmente a dos motivos, por un lado la necesidad de una mayor investigación en el uso de este material pirogénico como enmienda de suelos, que permita disponer de una base científica que justifique técnicas concretas de pirólisis a partir de distintos materiales iniciales de cara a la obtención de productos específicos que aseguren una aplicación estudiada y justificada. Por otro lado la falta de políticas favorables que permitan el establecimiento de un mercado que dé salida a este producto, como pudiera ser el establecimiento de cuotas más altas en el comercio de créditos de CO<sub>2</sub>, así como lo son otras técnicas de geoingeniería carbono-negativas reconocidas científicamente como herramientas capaces de contribuir a equilibrar e intervenir en cuestiones relacionadas con el cambio climático.

En este sentido países como EEUU o Australia trabajan actualmente en la creación de legislaciones favorables, y organismos como el IBI han centrado sus esfuerzos en una futura Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), en la que se pueda reconocer al biochar como una herramienta útil y necesaria en la lucha contra el cambio climático (Abenza D., 2012). En un análisis generalizado, se ha estimado que la pirólisis de biomasa podría ser rentable para el secuestro de carbono y la producción de energía si el coste de una tonelada de CO<sub>2</sub> alcanzase los 37\$ en el actual comercio de créditos de carbono (Lehmann, 2007).

Por otra parte, grupos ecologistas y otras asociaciones de varios países han firmado un acuerdo de rechazo a la promoción y comercialización del biochar bajo el título: *Biochar: una nueva amenaza para los pueblos, la tierra y los ecosistemas*, basándose en la variabilidad de los resultados científicos obtenidos acerca de los beneficios ambientales del uso del biochar, poniendo en duda su defensa como herramienta útil frente al cambio climático. También critican la posibilidad de desarrollo de una industria que desvirtúe el objetivo inicial del biochar debido a sus actividades lucrativas comerciales que fomenten la deforestación y la exclusión social en zonas de países en desarrollo, como ocurrió en la década pasada con el fomento de plantaciones para el desarrollo de biocombustibles. Este último aspecto podría ser cierto en el contexto de que la producción de biochar alcanzase una importancia relevante en el comercio de créditos de carbono dentro del mercado de emisiones de CO<sub>2</sub> (Abenza D., 2012), pues la ambición humana ha demostrado a lo largo de la historia lo destructivo que puede llegar a ser el hombre, cuando existen intereses económicos particulares.

De lo anterior se puede aducir que la defensa del uso del biochar en suelos carecería de sentido si no se realiza de una manera sostenible, como por ejemplo si no se certifica el origen sostenible de la biomasa obtenida sin producirse cambios de uso del suelo que impliquen deforestación y plantaciones masivas para el cultivo de biomasa destinada a pirolizar, que a su vez generarían problemas de alimentación en poblaciones, de erosión y de pérdida de funcionalidad de suelos. También se destaca la importancia de la producción de biochar con tecnología adecuada y moderna que asegure la no liberación de gases de efecto invernadero u otras sustancias como hollín que pueden ser nocivas para la salud (Woolf et al., 2010).

Un estudio llevado a cabo en el contexto del Reino Unido (Shackley et al. 2011) concluye que el punto de equilibrio para la comercialización de biocarbón estaría situado entre £148 a £389

(US\$222 a US\$584) por tonelada, para el biocarbón producido, entregado y depositado en los campos. Bajo las condiciones definidas, la fuente más rentable de biocarbón son los residuos de madera, de alimentos, lodos de depuración de aguas residuales y residuos verdes, pero estos materiales enfrentan una compleja regulación, como normas ambientales y de estandarización, además de certificaciones periódicas. Otra fuente (BBF, 2012) indica que cuando se utilizan hornos tradicionales, el costo de producción puede variar de £20 a £300 por tonelada de biocarbón. Los enormes rangos estimados sugieren que los costos se reducen a medida que aumenta la producción de biocarbón y mejoran las tecnologías. Esto también podría ocurrir si se obtienen recursos por la comercialización de los subproductos del proceso de generación. De lo anterior, haciendo un balance general entre costos de producción y valor comercial del producto, se puede establecer que la rentabilidad del proceso oscila entre £89 y £120 por tonelada.

Hacia el año 2003, Japón tenía el mercado más desarrollado en los subproductos de la pirólisis, pues aproximadamente 15000 t/año de biochar eran comercializadas para usos en el suelo (Okimori, 2003). En España, existen algunas industrias ligadas a su producción y venta en el campo de la bioenergía como por ejemplo IKERLAN o Grupo Guascor en el País Vasco o la empresa catalana Terra Fosca Biochar (Abenza D., 2012). En Colombia la demanda de biochar no tiene datos estadísticos registrados oficialmente, pues es muy baja y la mayoría de biomasa es usada sin procesar, sin embargo la demanda de carbón activado es del orden de 900 – 1300 ton/año, la cual es prácticamente abastecida en su totalidad mediante importaciones, manejándose precios en los últimos años de entre \$6.500 y \$7.500 por kilogramo el importado y de entre \$4.000 y \$5.000 el nacional (Cerón A. y León Y., 2010).

Este constituye un tema que debe ser ampliamente estudiando, puesto que en el país existe la posibilidad de producir carbón activado a gran escala sin tener que recurrir a las importaciones, lo cual abriría campo a una industria emergente dentro de la economía nacional.

### **7.3 Apoyar al equipo encargado de ejecutar un diseño experimental de un proceso de pirólisis a escala de laboratorio**

En este capítulo se presentan los resultados de los diferentes procedimientos experimentales realizados para evaluar el rendimiento de la producción del biochar en las condiciones de proceso seleccionadas.

#### ***7.3.1. Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cascara de coco.***

Los resultados experimentales a escala de laboratorio se muestran en la Tabla No.5, obteniendo un rendimiento promedio de biochar de 23.3%, el restante 76.7% se determinó que pudo estar representando en su gran mayoría en los condensados y en el gas de síntesis, los cuales para efectos de este estudio no fueron recolectados ni evaluados.

**Tabla 5.****Resultados de la experimentación: 1 etapa de la investigación.**

Prueba	Masa a activar	Concentración de KOH	Temperatura	Masa a carbonizar	Masa final de carbón
1	105 g	4,5	525°C	85 g	21,8 g
2	105 g	4,5	525°C	85 g	24,2 g
3	105 g	4,5	525°C	85 g	23,7 g
4	105 g	4,5	702°C	85 g	14,2 g
5	105 g	8	650°C	85 g	18,3 g
6	105 g	1	400°C	85 g	9,7 g
7	105 g	4,5	525°C	85 g	22,2 g
8	105 g	4,5	348°C	85 g	27,9 g
9	105 g	9,45	525°C	85 g	25,3 g
10	105 g	4,5	525°C	85 g	21,6 g
11	105 g	0	525°C	85 g	11,7 g
12	105 g	1	650°C	85 g	10,3 g
13	105 g	8	400°C	85 g	26,4 g

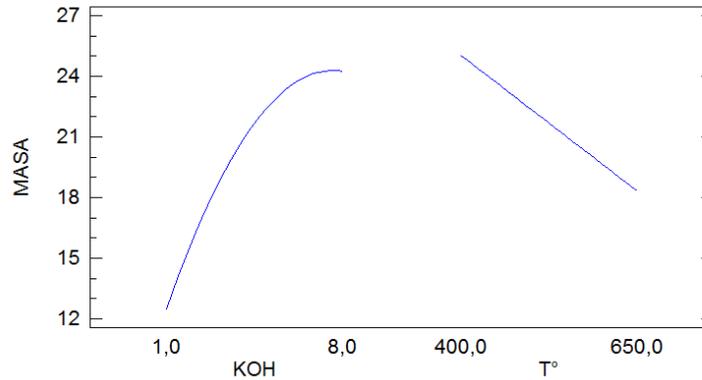
Fuente. Este estudio

**7.3.1.1. Análisis de sensibilidad: Metodología de superficie de respuesta.**

Los resultados obtenidos del análisis ANOVA del diseño factorial  $2^2$  indicaron que la variable más significativa es la concentración de KOH (estadístico de prueba  $p < 0,0003$ ), seguida de la temperatura (estadístico de prueba  $p < 0,0066$ ), mostrando claramente que ambos factores influyen de manera independiente en la variable respuesta, mientras que la interacción de las dos, no presenta un aporte significativo (estadístico de prueba  $p < 0,1244$ ). Como se mencionó con anterioridad, la expresión matemática que más se ajusta al fenómeno experimental objeto de estudio es una función de tipo cuadrático, con un valor  $R^2$  de 0,9091 y un  $R^2$  ajustado de 0,8442. La ecuación del modelo ajustado con sus valores físicos reales correspondientes a las variables (X1 y X2) es:

$$\text{Rendimiento másico} = -16,5992 + 6,84492 * X_1 + 0,103808 * X_2 - 0,284058 * X_1^2 - 0,00497143 * X_1 * X_2 - 0,000103145 * X_2^2$$

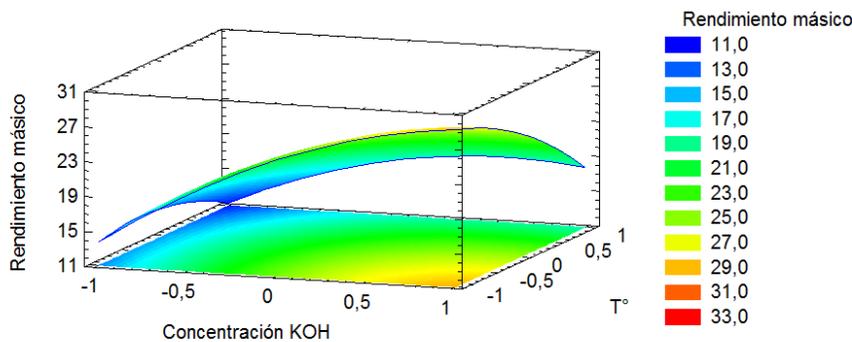
Ecuación número (1)



**Figura 24. Diagrama de efectos principales para el rendimiento másico**

Fuente. Este estudio

En la figura No. 24 se puede observar la interacción de la relación: concentración de KOH y Temperatura de carbonización sobre el rendimiento másico del biochar, determinando que las condiciones más favorables del sistema, se dan a una concentración alta de KOH y a una temperatura baja de carbonización. Estas son las condiciones de operación que se deben establecer para favorecer la variable respuesta. Es preciso aclarar que estos efectos son representativos para los intervalos establecidos para cada una de las variables, en la configuración de contacto con la cual se trabajó.



**Figura 25. Superficie de respuesta estimada**

Fuente. Este estudio

Esta figura No. 25 se corrobora el comportamiento de las variables seleccionadas en el proceso y su incidencia en la variable respuesta, indicando que el mayor rendimiento masico del biochar se alcanza en la zona anaranjada donde la temperatura de carbonizacion asume el nivel mas bajo y la concentracion de KOH el nivel mas alto.

Con base en los resultados obtenidos, se establecio la necesidad de optimizar el proceso y fijar unos parametros de operación para maximizar el rendimiento masico del biochar. Los resultados se muestran en la tabla No.6.

**Tabla 6.**

**Optimización de variables**

Factor	bajo	Alto	Óptimo
KOH	-1,41421	1,41421	1,41421
T°Carb	-1,41421	-1,41421	-1,41421

Fuente. Este estudio

La tabla No. 6 permite identificar la combinación de niveles de los factores experimentales para optimizar la variable respuesta sobre la región indicada, estableciendo que se puede alcanzar

un porcentaje del 30,1172% en el rendimiento másico del biochar, si se trabaja a una concentración de KOH en el nivel más alto, es decir 9,45% y a una temperatura de carbonización en el nivel más bajo, es decir a 348°C.

### **7.3.1.2. *Discusión.***

Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos a escala laboratorio, en conjunto con el área de investigación y desarrollo, se pudo establecer que temperaturas altas de pirólisis favorecen los fenómenos de descomposición de la muestra mediante procesos de deshidratación y volatilización, lo cual tiene una influencia directa sobre la cantidad de biochar que queda retenido en la cama de material después del proceso térmico y por ende en el rendimiento másico final.

Es preciso aclarar que a temperaturas bajas de carbonización, cierta cantidad de la biomasa de la cama del reactor no reacciona y por tanto el rendimiento másico del biochar es mucho más alto, sin embargo la estructura porosa y la superficie activa si resultan afectadas, efecto que trato de contrarrestarse con la presencia del KOH como agente químico activador antes del proceso de pirólisis, cuya función básicamente era incrementar la cantidad de espacios intercambiables del carbón y que según el análisis ANOVA, también tuvo una influencia directa sobre el rendimiento másico,

Lo anterior se atribuyó a dos situación, por un lado a que existe una mayor impregnación del KOH en la cama de material a concentraciones superiores, incrementando por ende el valor másico en la muestra y por otro lado, el efecto está relacionado a que el KOH forma una especie de capa protectora alrededor del lecho de biomasa, interfiriendo en la cinética de su descomposición y la volatilización, lo cual en un intervalo relativamente corto de tiempo que dura el proceso térmico, tiene un efecto significativo en el rendimiento másico del biochar.

Según Carvalho (2013), el hidróxido de potasio, es un agente activante que suele llevar a la obtención de carbones activados con mayor desarrollo de la porosidad, con hasta un área superficial de  $3000 \text{ m}^2/\text{g}$  y con mayor rendimiento cuando se utilizan precursores de estructura carbonosa. Esto se debe a que el agente químico activante altera el curso de la pirólisis, puesto que durante el tratamiento térmico se produce una entrada de la sustancia en la matriz, actuando como molde o plantilla para la creación de microporosidad y produciendo varias reacciones químicas en la superficie del carbón, iniciando el procesos de descomposición en el KOH hacia la formación de carbonato de potasio, óxido de potasio y potasio metálico, evitando así la descomposición directa de la cama de material, pero si permitiendo una contracción por el efecto térmico y la generación de agentes gasificantes como vapor de agua y  $\text{CO}_2$  que reaccionan con la matriz para el ensanchamiento de los poros. Además, al no actuar como agente deshidratante del material precursor, no sugiere pérdidas de masa en el carbón final (Martínez, M., 2013).

### ***7.3.2. Pruebas de pirólisis a escala de laboratorio con cuesco de palma.***

Los resultados experimentales a escala de laboratorio se muestran en la Tabla No.7, obteniendo un rendimiento promedio de biochar de un 25%, el restante se pudo establecer que se desprendió en forma de volátiles.

***Tabla 7.***

#### ***Resultados de la experimentación: 2 Etapa de la investigación***

Variables	Tratamientos						CA <sub>(ref.)</sub> (INGEOMINAS)
	1	2	3	4	5	6	
Rampas de calentamiento	1	1	1	1	2	2	-
T° de carbonización (°C)	400	650	-	-	600	700	-
t de	1	1	-	-	1	1	-

carbonización (horas)							
T° de activación (°C)	-	-	800	850	800	900	-
t de activación (horas)	-	-	1	1	1	1	-
Mezcla y flujo de gases (ml/min)	N <sub>2</sub> (500)	N <sub>2</sub> (500)	N <sub>2</sub> (1200); CO <sub>2</sub> (240)	N <sub>2</sub> (1200); CO <sub>2</sub> (240)	CO <sub>2</sub> (240)	CO <sub>2</sub> (240)	-
% Rendimiento másico	32,5	25	24	24	24,12	23	-
% de remoción	63,9	86,6	82,2	94,5	87,9	96,9	89

Fuente. Este estudio

Las corridas experimentales permiten determinar que dentro de las pruebas que solamente usan una rampa de calentamiento y temperaturas de carbonización, es decir las pruebas 1 y 2, el porcentaje de rendimiento másico es mayor en el tratamiento 1 con un 32,5%, sin embargo su capacidad adsorptiva es muy baja y se aleja del carbón de referencia cuyo porcentaje de remoción es del 89%, mientras que la corrida 2 disminuye su rendimiento másico, pero mantiene una proximidad al porcentaje de remoción ofrecido por el carbón de referencia.

En cuanto a las corridas con una rampa de calentamiento y temperaturas de activación, es decir las pruebas 3 y 4, es la corrida 4 la que tiene mejor porcentaje de remoción, mientras que el porcentaje de rendimiento másico para ambas pruebas está en torno al 24%, lo cual indica que está por encima del tratamiento 3. Por su parte, las corridas que se trabajaron a dos rampas de calentamiento con temperaturas de carbonización y activación, es decir pruebas 5 y 6, es la corrida 6 la que tiene un porcentaje muy alto de remoción, superior incluso al carbón de referencia, y un rendimiento másico que si bien es el menor de todos, en comparación con la corrida 5, es tan solo de un 1,12%.

### **7.3.2.1. Resultados y discusión.**

Los resultados obtenidos permiten establecer que temperaturas altas durante el proceso de pirólisis, permiten generar una mayor estructura porosa dentro del material precursor, favoreciendo la formación de superficies activas que permiten alcanzar mejores porcentajes de remoción, sin embargo el rendimiento es afectado en cierta medida, por la presencia de reacciones de despolimerización, condensación y craqueo a medida que se incrementa la temperatura, las cuales van tomando aún más importancia en la descomposición del lecho y disminuyendo la masa final que queda retenida en la cama del material.

Estableciendo un análisis general, es decir incluyendo todas las corridas en un sondeo transversal, se pudieron establecer las siguientes conclusiones:

- a) El biocarbón con mayor capacidad adsortiva es el que presenta un menor porcentaje de rendimiento, para este caso se hace referencia a la corrida experimental 6, mientras que el biocarbón con mayor rendimiento másico, es precisamente el que presenta la menor capacidad adsortiva, para este caso la corrida experimental 1, es decir que las dos variables de respuesta que se analizaron, manejan una tendencia inversa, lo cual permite inferir la necesidad de establecer un punto de equilibrio para mantener en el producto final, una característica de calidad y cantidad que reconozca manejar valores óptimos tanto de rendimiento, como de porcentajes de remoción y que estén por lo menos cercanos a los valores reportados por el carbón de referencia.
- b) En un marco general, el proceso de obtención de carbón activado está influenciado por una gran cantidad de variables, en este caso, la temperatura de pirólisis ejerció una influencia significativamente superior a la influencia que tuvieron los gases activantes, respecto a los porcentajes de remoción de azul de metileno, puesto que se

obtuvo a mayores temperaturas de pirólisis, un producto con mayor poder adsorptivo, independientemente de las variaciones realizadas en la mezcla y el flujo de los gases activantes.

### 7.3.3. Pruebas de Pirólisis a escala de laboratorio con otras biomásas.

Los resultados obtenidos a partir de la experimentación con diferentes tipos de biomasa como posibles precursores de biochar, se muestran en la tabla No.8. Los rendimientos promedios de los biochars obtenidos, variaron de acuerdo al tipo de biomasa pirolizada.

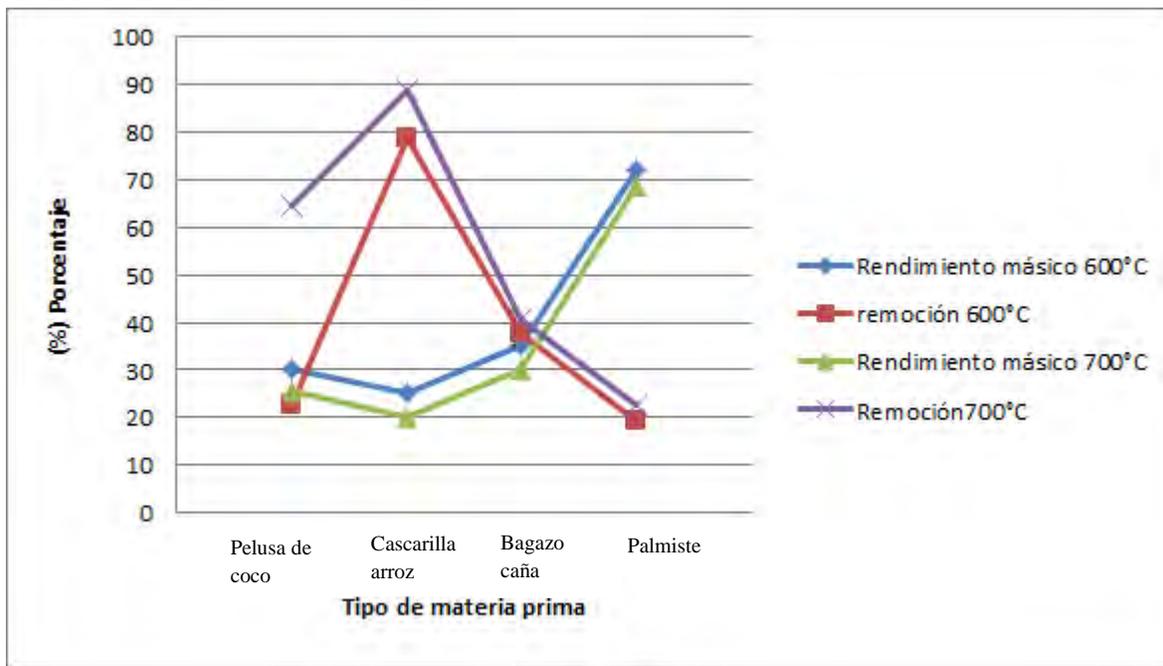
**Tabla 8.**

#### **Resultados de la experimentación: 3 Etapa de la investigación**

Biomásas	Tratamientos					
	1- corrida experimental			2- corrida experimental		
	T° de pirólisis °C	Rendimiento másico	Porcentaje de remoción	T° de pirólisis °C	Rendimiento másico	Porcentaje de remoción
Pelusa de coco	600	30%	22,8%	700	25,6%	64,6%
Cascarilla de Arroz	600	25%	78,7%	700	20%	88,8%
Bagazo de caña de panela	600	35%	37,8%	700	30%	40,7%
Palmiste	600	72%	19,2%	700	68,8%	22,5%

Fuente. Este estudio

En esta etapa de la investigación se pudo establecer que la cascarilla de arroz, es un precursor de carbón activado con altos porcentajes de remoción y un rendimiento másico que oscila los 20 – 25%, mientras que la pelusa de coco y el bagazo de caña de panela presentan valores de remoción relativamente bajos en comparación con la cascarilla, pero su rendimiento está por encima y rondan los 25 – 35%. Por su parte el palmiste conserva un alto porcentaje de rendimiento, pero su capacidad adsortiva es la más baja entre las materias primas analizadas. Estos resultados se pueden observar en la figura No.26.



**Figura 26. Rendimientos másicos y porcentajes de remoción en diferentes tipos de materias primas: 3 etapa de investigación.**

Fuente. Este estudio

Un aspecto relevante que se pudo observar durante todas las corridas experimentales y que se muestran en la anterior figura, es que a medida que se incrementa la temperatura de pirólisis, disminuye el rendimiento másico de los productos, pero se incrementa su capacidad adsorptiva.

#### **7.3.3.1. Resultados y discusión.**

Los resultados obtenidos entre los biochars obtenidos a partir del residuo que presentó mejor porcentaje de remoción, pero menor rendimiento (Cascarilla de arroz) y el que presentó los resultados totalmente opuestos (palmiste), se entiende en primera instancia, a la cantidad de carbono fijo que contienen ambos residuos, siendo la cascarilla de arroz un gran portador con un 39,9% de C en su estructura química (Cerón, A. y Leon, Y. 2010), mientras que el palmiste alcanza entre un 15,2 y un 15,7% (Jerez, C., 2014), lo cual determina en gran medida la capacidad de cada residuo de poder ser activado y formar una estructura porosa, además, según Cerón, A. y Leon, Y. (2010) el CA proveniente de la cascarilla de arroz es de carácter básico, a causa del alto porcentaje de cenizas y es precisamente por esta razón que se presenta cierta afinidad y atracción entre el CA y el azul de metileno, siendo este último de comportamiento ácido; por otro lado, el palmiste es un gran portador de material graso, con un 44% de grasa cruda (Zumbado et al., 1991), la cual forma una capa alrededor del precursor e impide el proceso de adsorción del azul de metileno, determinando bajos porcentajes de remoción.

La cascarilla, es sensible a la descomposición térmica y los procesos de despolimerización y condensación, por ende su bajo rendimiento y alta superficie activa, mientras que el palmiste presenta una gran resistencia al calor, debido a su estructura oleaginosa, lo cual se traduce en un mayor rendimiento, pero una menor adsorción.

Por otro lado, con base en los resultados obtenidos a escala de laboratorio, en conjunto con el área técnica de la empresa se pudo establecer que la pelusa de coco, al ser una materia prima

muy poco densa y con una estructura de naturaleza fibrilar, el establecimiento de un esqueleto poroso es muy poco probable, lo cual se tradujo en una menor capacidad de adsorción, debido al desarrollo de una menor área superficial. Caso similar ocurrió con el bagazo de caña de panela, el cual si bien fue un poco más denso, también mantuvo una estructura fibrilar muy poco porosa, lo cual afectó el desarrollo de espacios intercambiables en la matriz del biochar obtenido.

## 8. CONCLUSIONES

❖ Los volúmenes de producción de biomasa en los departamentos de Nariño y Cauca, constituyen una fuente promisorio de precursores de biochar, puesto que se generan en gran cantidad y dependiendo de su estructura fisicoquímica, su disposición final no va más allá del relleno sanitario, como material de galpones y en algunos casos como material para compostaje. Si bien es cierto que no toda la biomasa es adecuada para su uso en la tecnología del biochar, una gran parte contiene una estructura lignocelulósica apta para su bioconversión a enmiendas orgánicas mediante tratamientos termoquímicos, lo cual contribuiría a mejorar ostensiblemente la dinámica de asimilación de nutrientes y la reducción en el uso de agroquímicos fuertemente criticados por su impacto en el medio ambiente.

❖ En el caso puntual de la cascarilla de arroz, el volumen de producción que maneja LA ARROCERA LA ESMERALDA sobrepasa sus niveles tolerables de manejo, ya que rebasa la demanda energética necesaria para sus procesos de secado y generación de potencia eléctrica, así como para su uso a nivel agrícola, generándose problemas de acumulación, contaminación y gastos adicionales en almacenamiento y transporte, es por eso que la tecnología de producción de biochar pretende cambiar su ruta de transformación, orientando su explotación a la fabricación de un producto con un valor agregado y de alto impacto en el sector agroindustrial.

❖ En el mercado existe una gran cantidad de hornos para el tratamiento de biomasa mediante procesos de pirólisis, sin embargo su uso está condicionado a las necesidades del proceso, puesto que dependiendo de las necesidades volumétricas de material a transformar por unidad de tiempo (tipo batch, continua y/o semicontinua) y de la capacidad económica y disponibilidad de espacio, se puede implementar un diseño a escala de laboratorio, industrial y/o semi-industrial. La empresa INNOVATIVA INGENIERÍA S.A.S. optó por la incorporación de

un horno rotatorio con ingreso de gases activantes y una alimentación semicontinua, esto atendiendo a algunos aspectos económicos como su módico precio en comparación con otro tipo de equipos, cuyo valor en el mercado es demasiado alto como es el caso del reactor de vacío y/o el de lecho fluidizado y aspectos técnicos como el aprovechamiento del movimiento rotatorio del cuerpo cilíndrico para garantizar el calentamiento uniforme de la biomasa.

❖ La activación termoquímica constituye una alternativa de producir biochar con una alta superficie activa, para el caso particular de la cascara de coco, se obtuvo un producto con un buen rendimiento másico y buenas propiedades de manejo. Por otro lado, la activación termofísica, donde se incluyeron rampas de calentamiento con temperaturas de carbonización y activación, así como la presencia de atmosferas inertes y reactivas, permitieron obtener un material con una capacidad adsortiva comparable al del CA de referencia, buenas propiedades de manejo y rendimientos que dependen del grado de carbonización y el tipo de biomasa. Con base en esto, se pudo establecer que entre las biomosas seleccionadas para la segunda y tercera etapa de la investigación, fueron el cuesco de palma y la cascarilla de arroz, los residuos con mejores características finales para su posterior aplicación como enmiendas, teniendo en cuenta que las variaciones estructurales en las partículas de la cama del material, dependieron de las operaciones y los parámetros de proceso.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Establecer una relación mediante pruebas experimentales entre el área superficial, el rendimiento del biochar y la capacidad de adsorción con respecto a la bioretención de los agroquímicos y el agua.
- ❖ Para la implementación de un protocolo de activación ya sea termoquímico o termofísico, es necesario evaluar sus condiciones particulares de proceso, por un lado, la activación termoquímica sugiere el desarrollo del proceso experimental en dos etapas y la adquisición de insumos adicionales que incrementan los costos de producción, mientras que en la activación termofísica se tiene en cuenta el gasto energético del reactor y la inclusión de gases para crear atmosferas de reacción específicas. Por lo tanto, se sugiere realizar un estudio detallado de los costos parciales de producción de ambos procesos, con el fin de identificar qué tipo de tecnología resulta más adecuada a una escala superior, evitando afectar la viabilidad técnico-económica del proceso.
- ❖ Por otro lado, es necesario tener en cuenta que antes de iniciar el funcionamiento del equipo, se deben establecer unos criterios y enfoques para orientar el proceso hacia los beneficios que se desean obtener, ya que el reactor de la empresa se ha diseñado para que tenga una versatilidad en la obtención de los productos finales. Parámetros de proceso como temperatura de pirólisis, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, flujo de gas de arrastre, velocidad de alimentación, entre otros, son los que determinan el tipo de pirólisis. Lo anterior debe ir concatenado a un balance de recursos, siendo conscientes de manejar una relación costo/beneficio en los protocolos que favorezcan los intereses de la empresa.
- ❖ La pirólisis es el proceso determinante donde se da lugar a todas las reacciones claves al momento de producir ya sea biochar, bioaceite o biogás, mantener controladas las condiciones de

operación no solamente es básico para efectos de estudio y experimentación, sino también para efectos de seguridad industrial, puesto que al manejar temperaturas de reacción tan altas y acumulación de sustancias con capacidad de ignición, una inadecuada manipulación puede generar incluso explosiones, por ende tener las condiciones de seguridad necesarias es el principal requisito para evitar posibles accidentes.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Abenza, D. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias Ambientales). España., Universidad Autónoma de Barcelona, Facultad de Ciencias Ambientales.
- Arteaga, J.; Arenas, E.; López, D.; Sánchez, C.; Zapata, Z. (2012). Obtención de Biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de Palma Africana (*Elaeisguineensis*Jacq.). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
- Baskin, Y. (2006). "Slash-and-char improvesAmazoniansoil". *BioScience*56, 368.
- BBF. (2012). British Biochar Foundation. Disponible en: <http://www.britishbiocharfoundation.org>.
- Biederman, L. A., & Stanley Harpole, W. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202-214. doi:10.1111/gcbb.12037
- 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.
- Bolaños D. (s/f). BIOCHAR: Producción y evaluación en campo. Universidad EARTH, Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica. Disponible en [http://www.academia.edu/6974893/Biochar\\_production\\_and\\_evaluation](http://www.academia.edu/6974893/Biochar_production_and_evaluation).

- Boullosa, N. (2010). Biochar: capturar carbono y enriquecer el suelo es viable [blog internet]. España. Citado en agosto de 2010. Disponible en <http://faircompanies.com/blogs/view/biochar-capturar-carbono-y-enriquecer-el-suelo-es-viable/>
- Brossard, L.;Penedo, M.; Cortez, L.A.B.;Bezzon, G.; Olivares, E. (2003). Pirólisis al vacío de bagazo de caña de azúcar. Encontro de Energia no Meio Rural, 2003, Campinas (SP, Brazil). [cited 30 April 2015]. [Online] Available from:<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022000000200025&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200025&lng=en&nrm=iso)>
- Butler, E.; Devlin, G.; Mieir, D.; McDonell, K. (2011). "A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 4171-4186, 2011.
- Carvalho Monteiro de Castro, M. (2013). Preparación de Carbones activados con KOH a partir de residuos de petróleo. Adsorción de Hidrógeno. Universidad de Alicante, España
- Castells, X. (2005). Tratamiento y valorización técnica de residuos. Madrid: Ediciones Días de Santos. p 172.
- Cerón, A.; León, Y. (2010). Activación física de cascarilla de arroz aglomerada con engrudo de almidón de yuca para la obtención de carbón activado. Tesis (Obtención de título en

Ingeniería Química). Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas de la Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Crombie, K., & Mašek, O. (2015). Pyrolysis biochar systems, balance between bioenergy and carbon sequestration. *GCB Bioenergy*, 7(2), 349-361. doi:10.1111/gcbb.12137

Cheng, C.; Lehmann, J.; Thies, J. E. & Burton, S. D. (2008) “Stability of black carbon in soils across a climatic gradient”. *Geophys. Res.* 113 doi: 10.1029/2007JG000642.

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

Demirbas, A. (2009). Biorefineries: Current activities and future developments.. *Energy conversion and management*, 50(11), 2782-2801.

Dominic, W.; James, E.; Amonette, F.; Alayne Street-Perrott; Lehmann, J. & Stephen, J. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. Article number 56. Published 10 August 2010 in NATURE COMMUNICATIONS.

Dufour J. (2011). Weblog de Energía y Sostenibilidad de Madrid. [Blog de internet]. “La pirólisis de biomasa: un clásico revitalizado” España 2011 Jun. [Citado 9-05.2014]. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2011/06/10/131236>

Fajardo, A. (2011). Diseño y construcción de una unidad de investigación en pirólisis continúa de biomasa. Tesis de pregrado para optar el título de Ingeniero Mecánico no publicada.

Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería mecánica. Cali, Valle del Cauca, Colombia.

FAO. (2002a). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Recuperado el 14 de marzo de 2014, de <http://www.fao.org/docrep/x5328s/x5328s05.htm>

FAO. (2002b). Dendroenergía. Recuperado el 15 de marzo de 2014, de Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal: <http://www.fao.org/docrep/005/y4450s/Y4450S11.htm>

Forero, C.; Cediel, A.; Rivera, J.; Suaza, A.; Sierra, F. “Estudio preliminar del potencial energético de cuesco de palma y cáscara de coco en Colombia”. *Revista Ingeniería Solidaria*, Vol. 8, No. 14, 2012, pp 19-25.

Fowles, M. (2007). “Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy”. *Biomass and Bioenergy* 31, 426-432.

Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., & Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2061-2069. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

Giraldo, O. (2012). “Conversión de biomasa recalcitrante originada en la producción de etanol a partir de la planta de banano y su fruto en combustibles mediante procesos de pirólisis.” Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Facultad de Minas-Escuela de procesos y Energía.

Glaser, B.; Lehmann, J.; Zech, W. (2002). “Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal- a review”. *Biology and Fertility of Soils* 35, 219-230

Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. (2001). “The Terra Preta phenomenon – A model for sustainable agriculture in the humid tropics”. *Naturwissenschaften* 88, 37–41.

Glaser, B.; Balashov, E.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. (2000). “Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region”. *Organic Geochemistry* 31:669-678.

Gómez, A.; Klose, W.; Rincón, S. (2008). *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*. Instituto de Ingeniería Térmica, Universidad de Kassel, Kassel-Alemania. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Gómez, A.; Klose, W.; Rincón, S.; Wiest, W. (2004). *Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: Tecnologías y perspectivas*.

Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46–59. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>

Heo, H. S. (2010). "Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed". *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. S91-S96.

IBI (International Biochar Initiative) (2013). IBI Technical Bulletin #101. Disponible en: <http://www.biochar-international.org>.

IBI (International Biochar Initiative) (2013). IBI Technical Bulletin #104. Disponible en: <http://www.biochar-international.org>.

Jassal, R. S., Johnson, M. S., Molodovskaya, M., Black, T. A., Jollymore, A., & Sveinson, K. (2015). Nitrogen enrichment potential of biochar in relation to pyrolysis temperature and feedstock quality. *Journal of Environmental Management*, 152, 140-144. doi:10.1016/j.jenvman.2015.01.021

Jerez, C. (2014). Diseño de una planta para la obtención de carbón activado a partir de cuesco de palmiste (*ElaeisGuineensis*) mediante activación química con cloruro de zinc. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

Jha, P.; Biswas, A.; Lakaria, B.; Subbarao, A. (2010). Biochar in agriculture - prospects and related. *Current Science* (00113891). [Serial online]. November 10, 2010; 99(9):1218-1225. Available from: Green FILE, Ipswich, MA. Accessed February 21, 2010.

Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). Comparative evaluation of torrefaction and hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for the production of solid biofuel. *Energy Conversion and Management*, 105, 746-755. doi:10.1016/j.enconman.2015.08.031

Kassel-Alemania, Universidad de Kassel, Instituto de Ingeniería Térmica. Revista PALMAS- Vol. 25 No. Especial, Tomo II, 2004.

Lehmann, J. (2009). “Terra Preta de Indio”, *Encyclopedia of Soil Science* 1:1, 1-4.

Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 381-387.

Lehmann, J.; Gaunt, J. & Rondón, M. (2006). “Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review”. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403–427

Lehmann, J.; Da Silva, JR. J.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. (2003a). “Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments”. *Plant and Soil*, vol 249, pp 343-357

Lehmann, J.; Kern, D. C.; Glaser, B.; Woods, W. I. (2003b). “Amazonian Dark Earths Origin, Properties, Management”. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 523p.

Lehmann, J.; Da Silva J.P.J.; Rondón, M.; Da Silva, C.M.; Greenwood, J.; Nehls, T.; Steiner, C. y Glaser, B. (2002). "Slash- and- char: a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon" 17th WCSS, 14-21 Agosto 2002, Tailandia. Symposium n°13, p449.

Li, F., Wang, J., Xie, Y., Li, H., Li, X., & Li, F. (2015). Effects of pyrolysis temperature on carbon retention and stability of biochar. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(4), 266–271. <http://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2015.04.037>

Macías, R.; Chejne, F.; Montoya, J.; Blanco, A. (2014). Gasificación de bagazo de Caña y Carbón en planta piloto. *Revista Digital de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la UJTL* Vol. 4 N°. 1 pp. 24-32. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Major, J. (2010). "Biochar for soil quality improvement, climate change mitigations and more", a literature review.

Major, J. (2006). "El biocarbón: Una herramienta para el manejo sostenible de suelos y la producción de energía" *tecnicana*. Recuperado el 3 de febrero de 2014, de <http://www.tecnicana.org>

Manyà, J. J., Ortigosa, M. A., Laguarda, S., & Manso, J. A. (2014). Experimental study on the effect of pyrolysis pressure, peak temperature, and particle size on the potential stability of vine shoots-derived biochar. *Fuel*, 133, 163-172. doi:10.1016/j.fuel.2014.05.019

- Martínez, M. C. (2012). Preparación y caracterización de carbón activo a partir de lignina para su aplicación en procesos de descomposición de aguas. Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Mckendry, P. (2002). Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology* 83, pp. 37-46.
- Menéndez, J.A. (2008). Curso de Extensión universitaria: El Mundo del residuo: Caracterización, tratamiento, gestión. Tema: Residuos de Biomasa para la producción de carbones activos y otros materiales de interés tecnológico. Universidad de Oviedo de España. Facultad de Geología. Curso realizado del 7-18 de abril de 2008. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/4698/1/CursoResiduos.pdf>.
- Mimmo, T., Panzacchi, P., Baratieri, M., Davies, C. A., & Tonon, G. (2014). Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*miscanthus* × *giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties. *Biomass and Bioenergy*, 62, 149-157. doi:10.1016/j.biombioe.2014.01.004
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. “Anuario Estadístico del sector agropecuario y pesquero 2009”, Bogotá, D.C., 2009
- Montoya, J.; Chejne, F.; Castillo, E.; Acero, J.; Gómez, C.; Sarmiento, J.; Valdez C.; Garzón L.; Osorio, J.; Tirado, D.; Blanco, L.; Moreno, N.; Marrugo, J.; Ospina, E. (2013). Pirólisis rápida de biomasa. Primera Edición, Diciembre del 2013. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín-Facultad de Minas. ISBN 978-958-761-774-0.

Mukherjee, A., Lal, R., & Zimmerman, A. R. (2014). Impacts of 1.5-year field aging on biochar, humic acid, and water treatment residual amended soil. *Soil Science*, 179(7), 333-339. doi:10.1097/SS.0000000000000076

Neves, D.; Thunman, H.; Matos, A.; Tarelho, L.; Gómez-Barea, A. (2011). "Characterization and prediction of biomass pyrolysis products," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, pp. 611-630, 2011.

Okimori, Y.; Ogawa, M.; Takahashi, F. (2003). "Potential of CO<sub>2</sub> emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra, Indonesia". *Mitigation and adaptation strategies for global change* 8, 261-280.

Ordorica, M.; López, Á.F.; Perret, J. (2012). Determinación de parámetros claves para la elaboración de biochar con alta capacidad de intercambio iónico. Universidad EARTH, Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica.

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

Pérez, S. U. (2013). Agroquímicos envenenan suelos en Colombia. *UN Periódico*. Recuperado el 2 de febrero de 2014. Elaborado el 9 de Noviembre de 2013.

- Petersen, J. B.; Neves, E.; Heckenberger, M. J. (2001). "Gift from the past: Terra Preta and prehistoric Amerindian occupation in Amazonia". En McEwan, C.; Barreto, C. y Neves, E. (eds) Unknown Amazonia, British Museum Press, London, UK, pp86-105.
- Quiceno, D. & Mosquera, M. (2010). Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology*, 44(2), 827-833. doi:10.1021/es902266r
- Rondón, M.; Molina, D.; Ramírez, J.; Amezquita, E.; Major, J. y Lehmann, J. (2006). Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through biochar amendments to unfertile tropical soils. Poster World Congress of Soil Science, Philadelphia, PA, July 10-14.2006.
- Rosas, J. G., Gómez, N., Cara, J., Ubalde, J., Sort, X., & Sánchez, M. E. (2015). Assessment of sustainable biochar production for carbon abatement from vineyard residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 239-247. doi:10.1016/j.jaap.2015.01.011
- Sandoval, J. O. (2013). Acondicionadores y mejoradores de suelo. Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Programa Nacional de transferencia de tecnología agropecuaria PRONATTA.

- Sciencemag. (2012). Carbon storage with benefits. Consultada en febrero de 2014, Publicada noviembre de 2012.  
<http://www.sciencemag.org.bd.univalle.edu.co/content/338/6110/1034.full.pdf?sid=5f389d5a-02ed-4a1c-b37c-1736fb37479c>.
- Shackley, S.; Hammond, J.; Gaunt, J.; Ibarrola, R. (2011). The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. *Carbon Management*, 2(3): 335– 356.
- Singh, R., Babu, J. N., Kumar, R., Srivastava, P., Singh, P., & Raghubanshi, A. S. (2015). Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective. *Ecological Engineering*, 77, 324–347.  
<http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.011>
- Singh, A., Singhai, R., Biswas, A. K., & Dubey, A. K. (2013). Production of biochar from mustard for agriculture use and carbon sequestration. *International Journal of ChemTech Research*, 5(2), 844-848. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- Sohi, S.; Loez-Capel, E.; Krull, E.; Bol, R. (2009). “Biochar’s roles in soil and climate change: A review of research needs”. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64 pp.
- Srinivasan, P., Sarmah, A. K., Smernik, R., Das, O., Farid, M., & Gao, W. (2015). A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: Production, characterization and potential applications. *The Science of the Total Environment*, 512-513C, 495–505. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.068>

Steiner, C.; Keshav, C.D., Garcia, M.; Forster, B. y Zech, W. (2008). “Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol”. *Pedobiologia* 51, 359-356.

Stewart, C. E., Zheng, J., Botte, J., & Cotrufo, M. F. (2013). Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *GCB Bioenergy*, 5(2), 153-164. doi:10.1111/gcbb.12001

Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Sherlock, R. R., & Condon, L. M. (2012). Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and Soil*, 350(1-2), 57-69. doi:10.1007/s11104-011-0870-3

Tenenbaum, D. Biochar: Carbon Mitigation from the Ground Up. *Environmental Health Perspectives* [serial online]. February 2009; 117(2):A70-A73. Available from: Green FILE, Ipswich, MA. Accessed February 21, 2014.

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>

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Instituto De Hidrología, Meteorología y estudios ambientales IDEAM, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS, Universidad Industrial de Santander UIS (2006), Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia. <http://www.upme.gov.co>

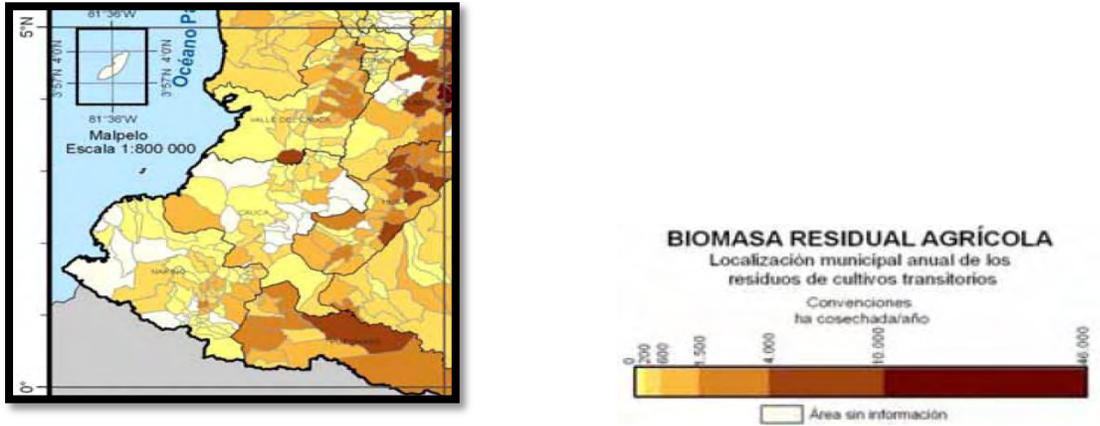
- Wang, L.; Wang, X.; Zou, B.; Ma, X.; Qu, Y.; Rong, C.; Li, Y.; Su, Y.; Wang, Z. (2011). Preparation of carbon black from rice husk by hydrolysis, carbonization and pyrolysis. *Bioresource Technology*, 102(17), 8220–4. doi:10.1016/j.biortech.2011.05.079
- Warnock, D.; Lehmann, J.; Kuyper, T.; Rillig, M. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant & Soil* [serial online]. November 2007; 300 (1/2):9-20. Available from: GreenFILE, Ipswich, MA. Accessed February 21, 2014.
- W. T. Tsai, et al., (2007). "Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions," *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 22-28, 2007.
- Windeatt, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A., & Singh, S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*, 146, 189-197. doi:10.1016/j.jenvman.2014.08.003
- Woolf, D.; James, E.; Amonette, F.; Alayne; Street-Perrott; Lehmann, J.; Joseph, S. (2010). "Sustainable biochar to mitigate global climate change". *Natural communications* 1, art.56.
- Yuan, Y., Tian, Y., Zhao, L., & Yao, Z. (2014). Design and manufacture of horizontal continuous biomass carbonization equipment. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(13), 203-210. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.13.025

Zhang, H., Voroney, R. P., & Price, G. W. (2015). Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. *Soil Biology and Biochemistry*, 83, 19–28. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.006>

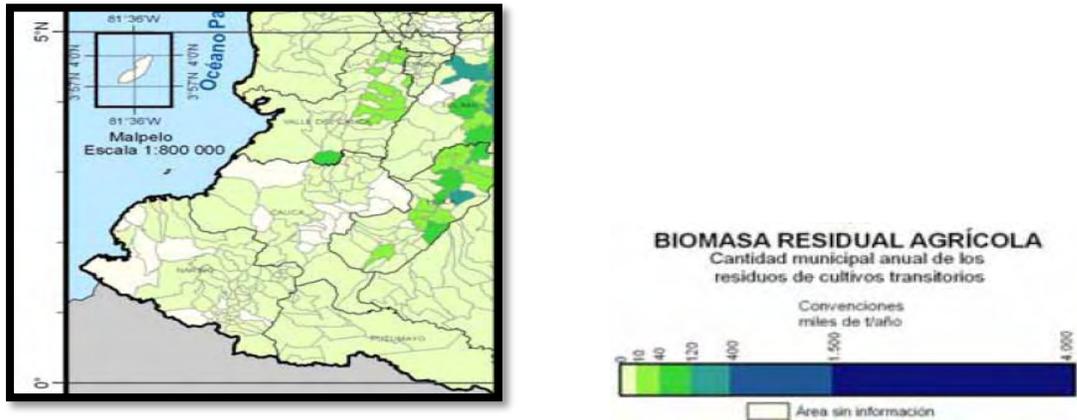
Zumbado, M.; Madrigal, S.; Marín, M. (1991). Composición y valor nutricional del palmiste o coquito integral de Palma Africana (*ElaeisGuineensis*) en pollos de engorde. Centro de Investigación en Nutrición Animal. Escuela de Zootecnia, Universidad de Costa Rica.

## **ANEXOS**

*Anexo A. Producción municipal anual de biomasa en los departamentos de Cauca y Nariño*



*Figura 27. Cultivos Transitorios: Área cosechada*



*Figura 28. Cultivos Transitorios: Producción municipal anual de biomasa*

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

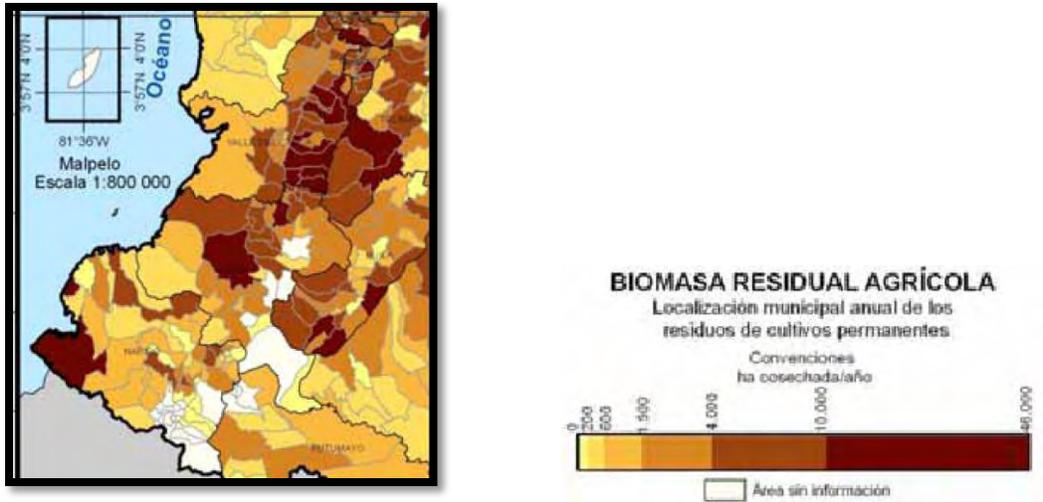


Figura 29. Cultivos permanentes: Área cosechada

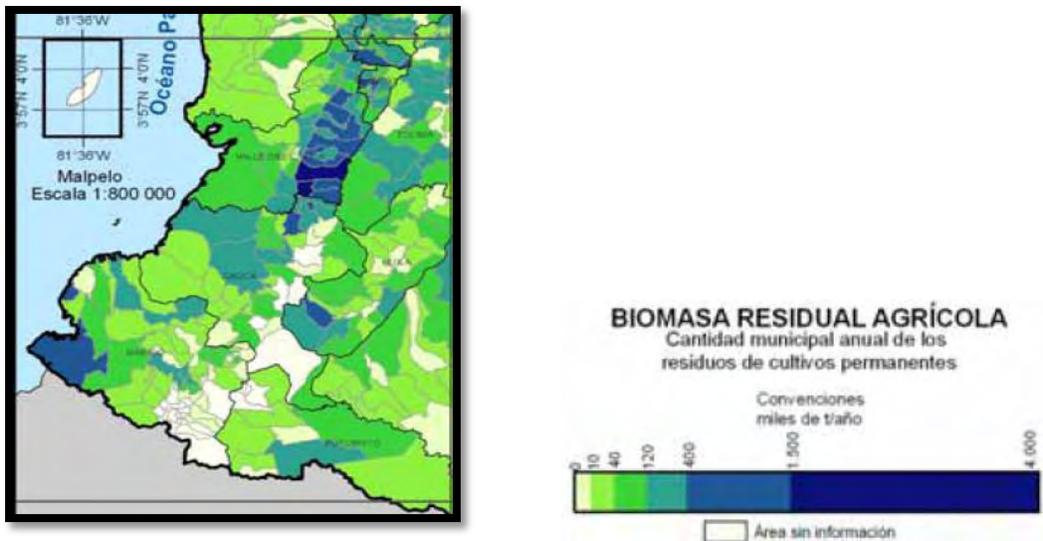


Figura 30. Cultivos permanentes: Producción municipal anual de biomasa

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

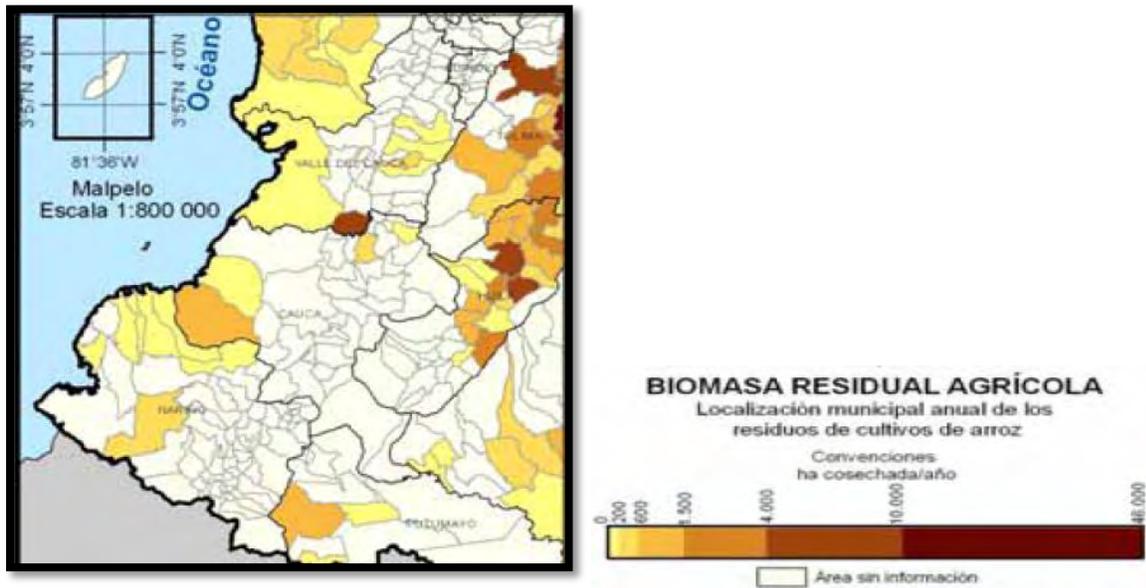


Figura 31. Cultivos de arroz: Área cosechada

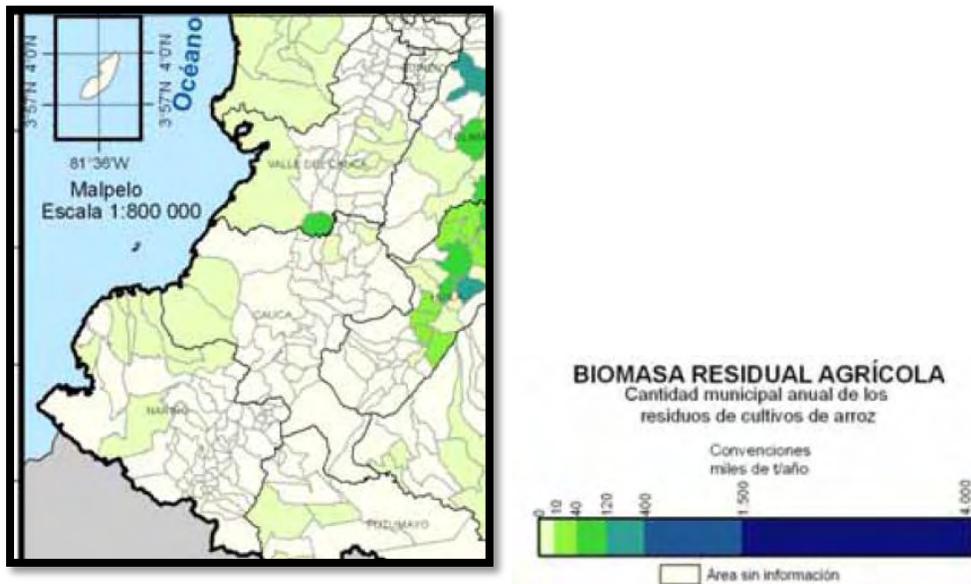


Figura 32. Cultivos de arroz: Producción municipal anual de biomasa

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

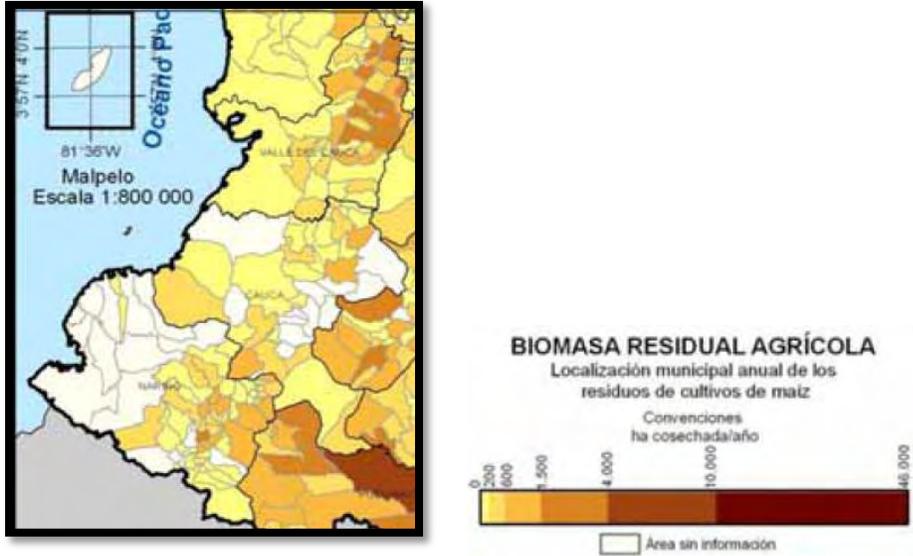


Figura 33. Cultivo de Maíz: Área cosechada

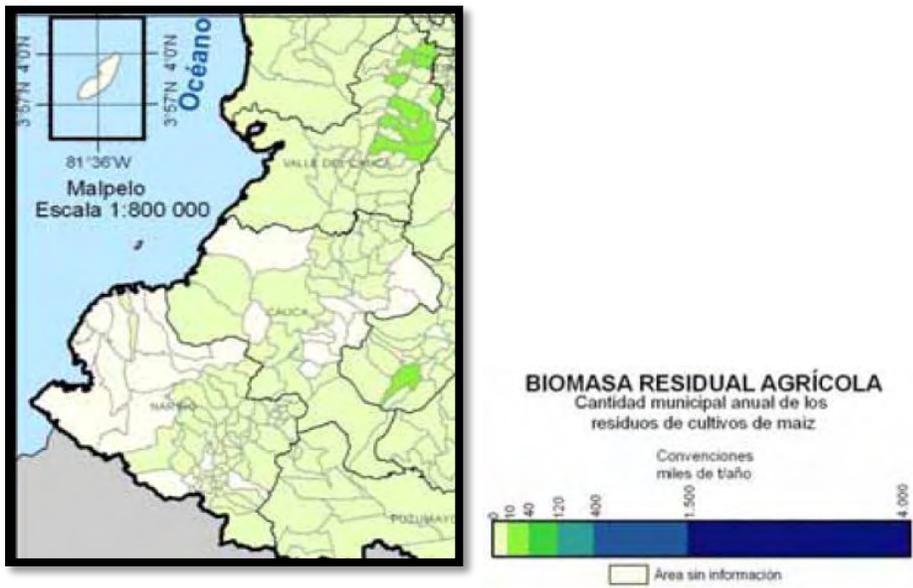


Figura 34. Cultivo de Maíz: Producción municipal anual de biomasa

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

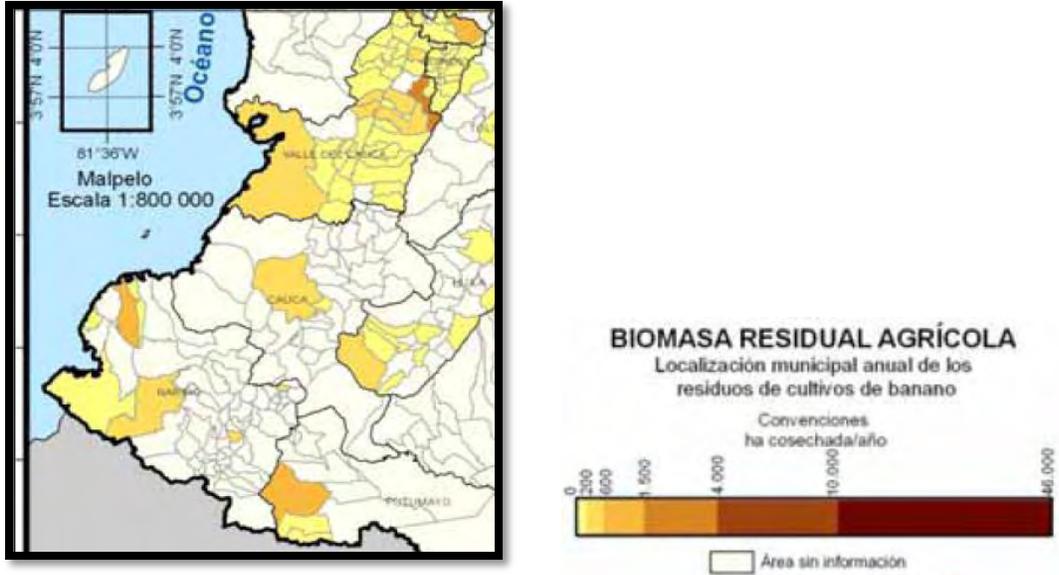


Figura 35. Cultivos de Banano: Área cosechada

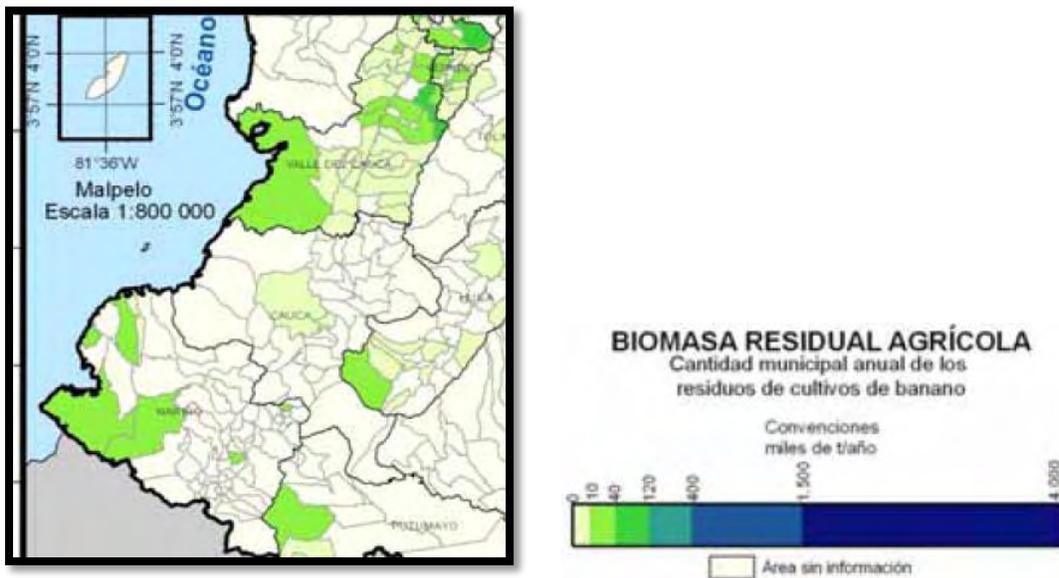


Figura 36. . Cultivos de Banano: Producción municipal anual de biomasa

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

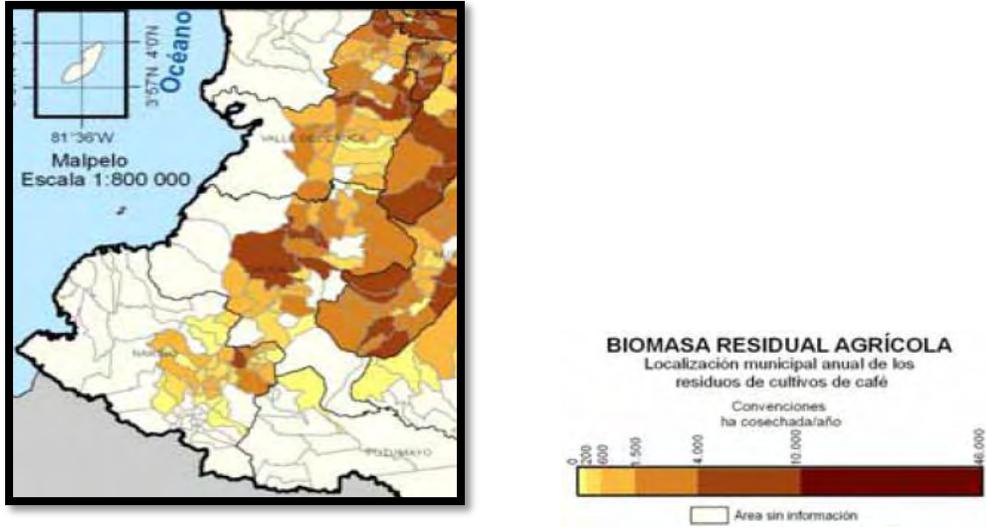


Figura 37. Cultivos de Café: Área cosechada

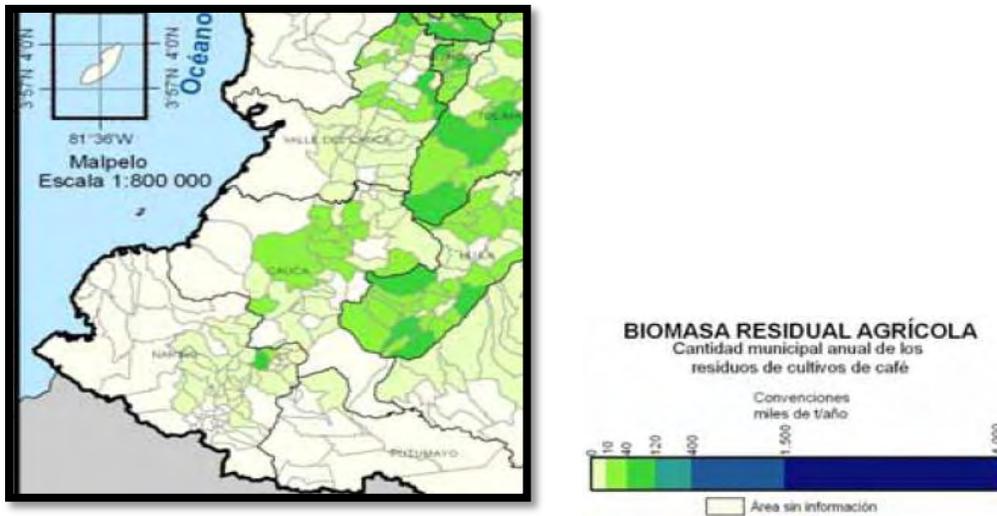


Figura 38. Cultivos de Café: Producción municipal anual de biomasa

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

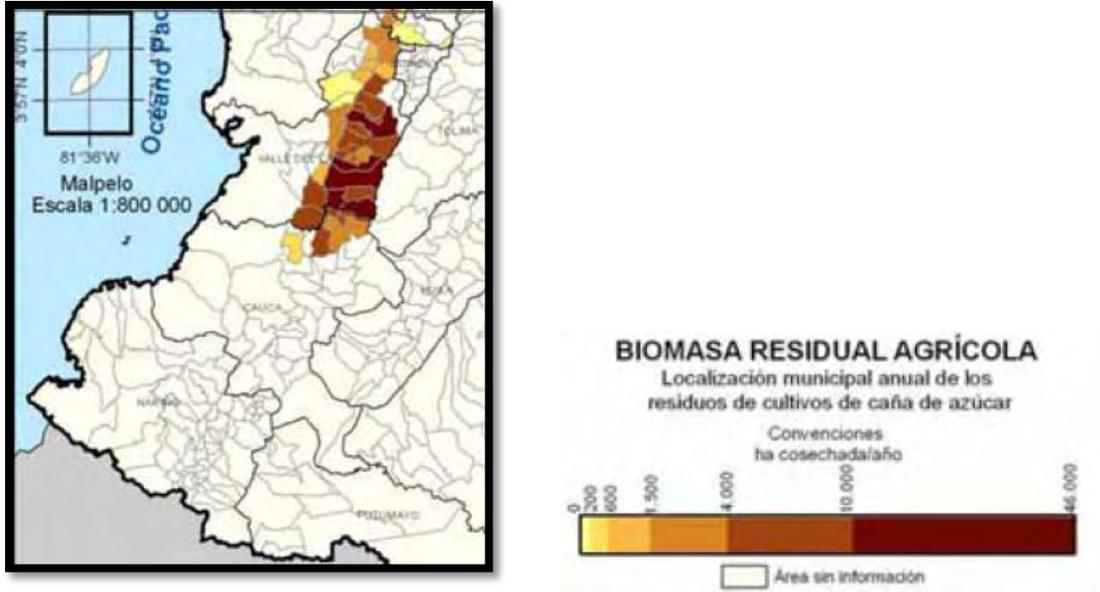


Figura 39. Cultivo de caña de azúcar: Área cosechada

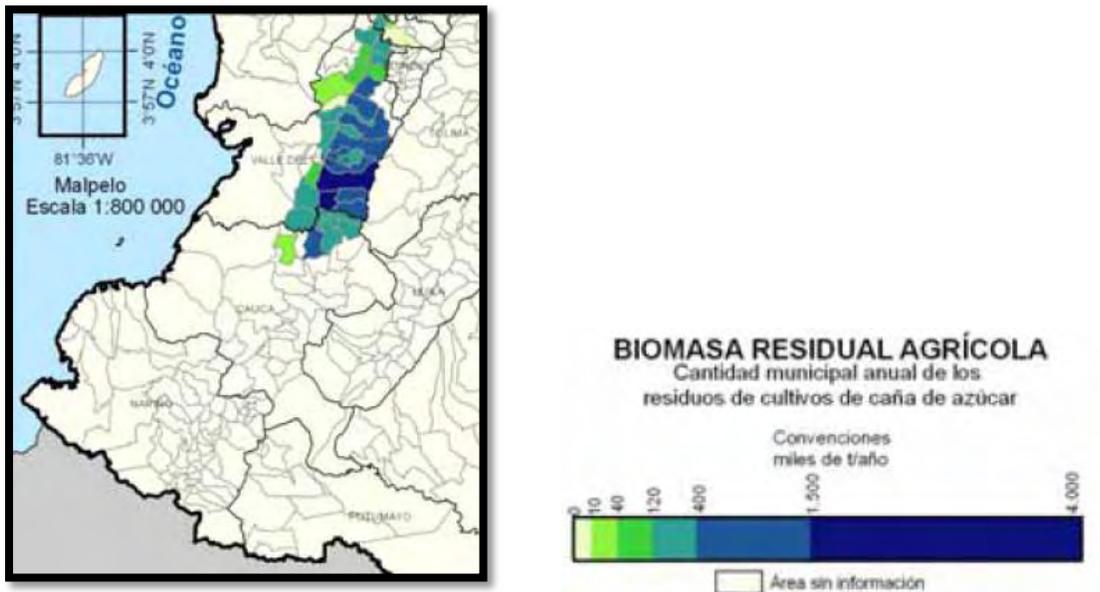


Figura 40. Cultivo de caña de azúcar: Producción municipal anual de biomasa

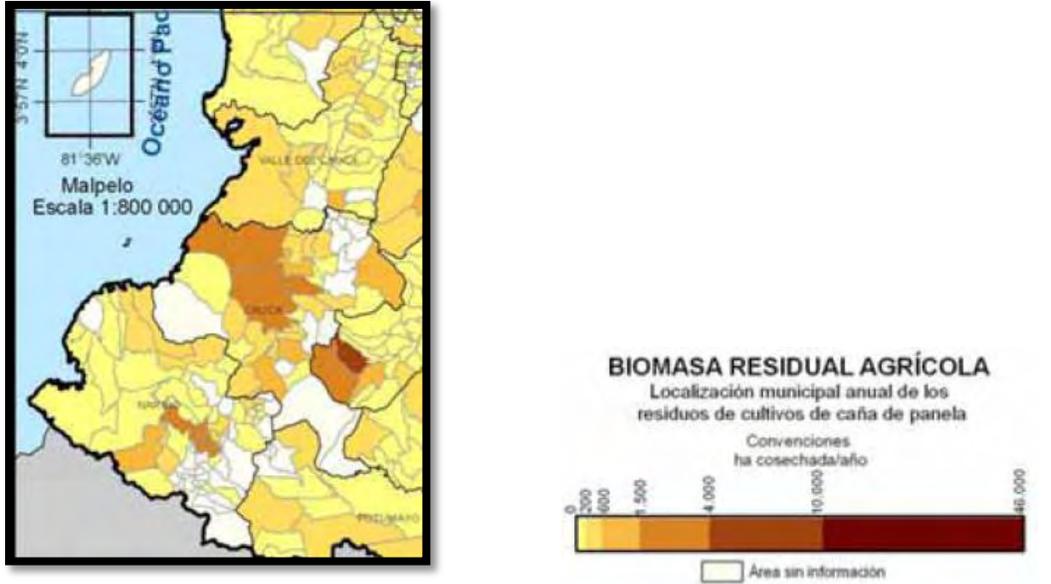


Figura 41. Cultivo de caña panelera: Área cosechada

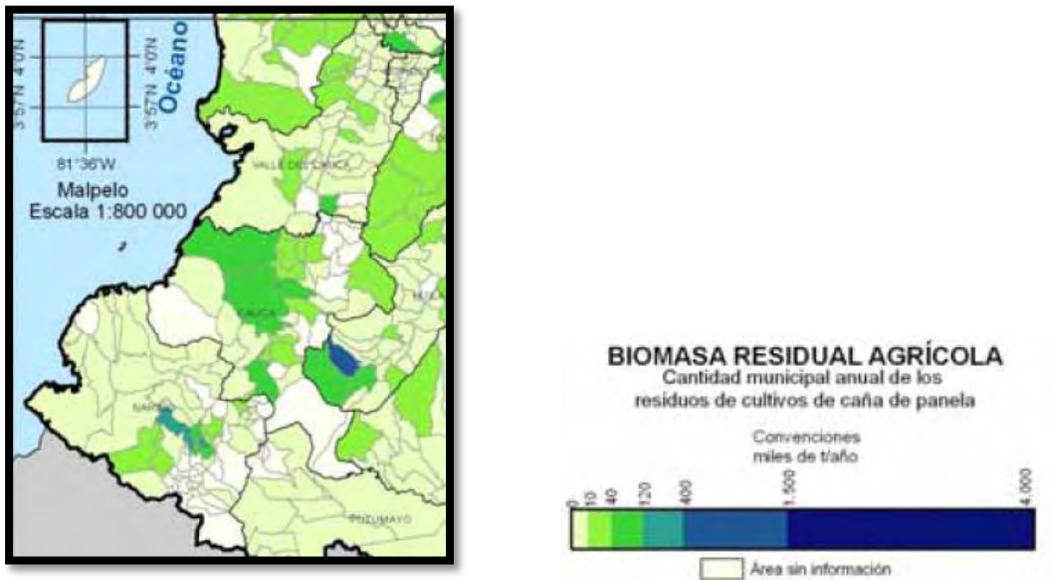
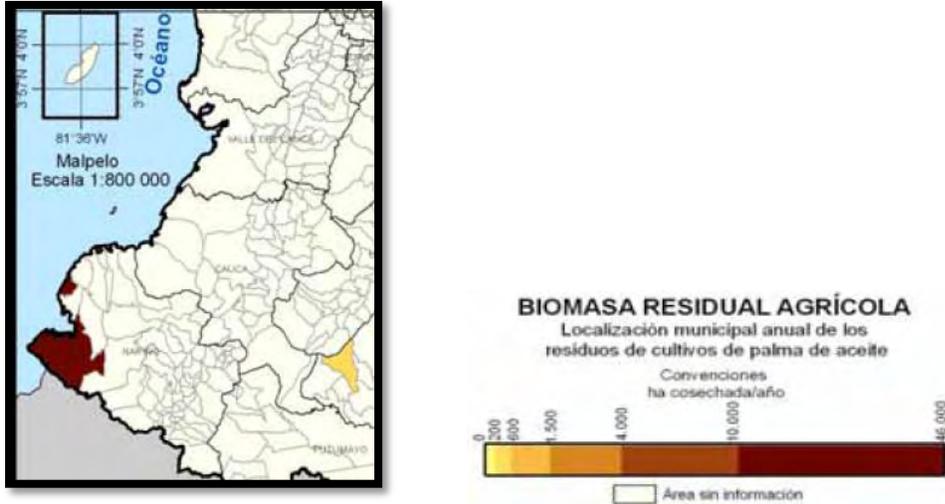
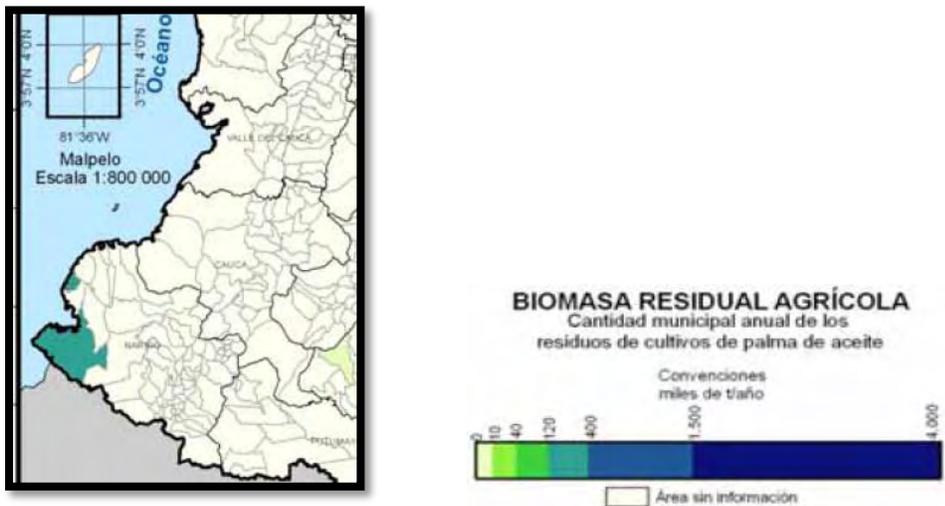


Figura 42. Cultivo de caña panelera: Producción municipal anual de biomasa



*Figura 43. Cultivo de Palma de aceite: Área cosechada*



*Figura 44. Cultivo de Palma de aceite: Producción municipal anual de biomasa*

Fuente: Atlas de biomasa residual Colombia, 2006

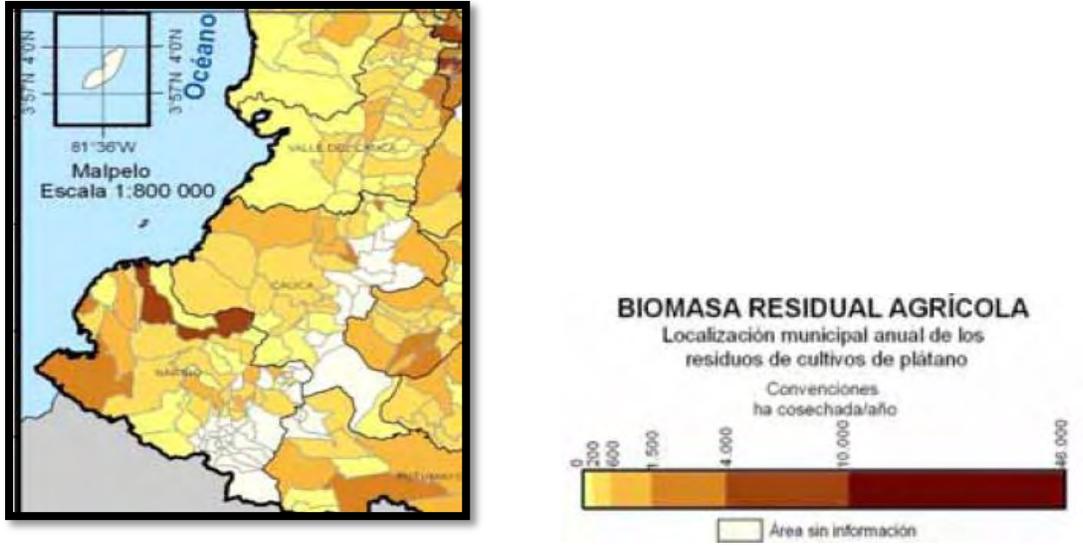


Figura 45. Cultivos de plátano: Área cosechada

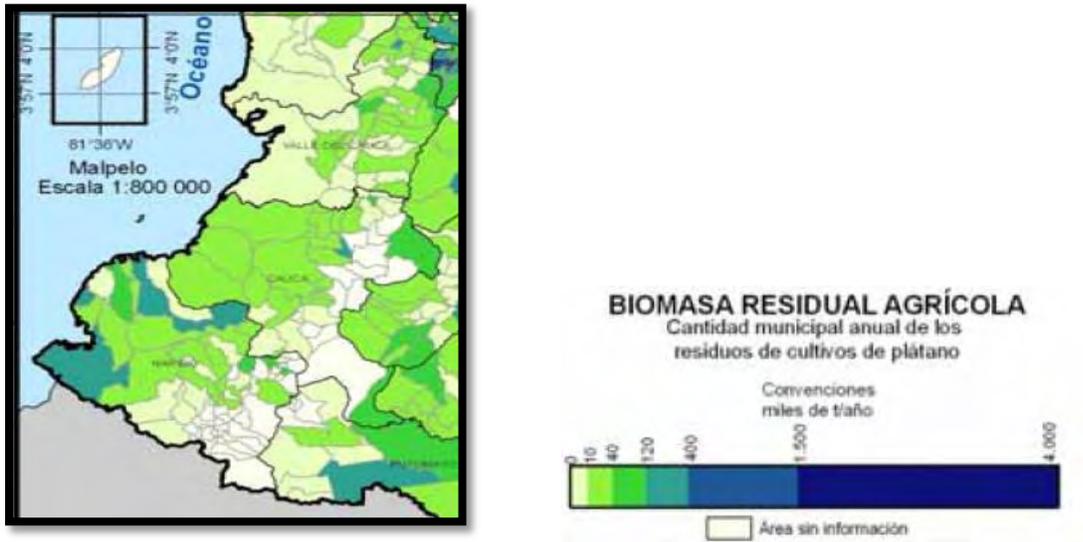


Figura 46. Cultivos de plátano: Producción municipal anual de biomasa

**Anexo B. Normas ASTM E para caracterización de materias primas y carbón activado****Cuadro 3. Listado de Normas ASTM más usadas en el procesamiento de carbón activado**

Para biomasa	Norma
Muestreo y cuarteo de la materia prima para la obtención de la muestra representativa	ASTM D2013
Adecuación de las muestras	ASTM E-1757
Análisis de cenizas	ASTM E-1755
Análisis de Sólidos totales	ASTM E-1756
Para carbón	Norma
Análisis Próximo	
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302
Material Volátil (% en peso)	ASTM D 7582
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582
Carbón Fijo (% en peso)	ASTM D 3172
Poder Calorífico Superior (kCal/kg)	ASTM D 5865
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	ASTM D 5865
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239
Análisis elemental	
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582
Carbono (% en peso)	ASTM D 5373

Hidrogeno (% en peso)	ASTM D 5373
Nitrógeno (% en peso)	ASTM D 5373
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239
Oxigeno (% en peso)	ASTM D 5373

Continuación Cuadro No. 3

Poder Calorífico Inferior (BTU/Lb)	ASTM D 5865
Análisis en carbón activado	
Humedad	ASTM D2867-09
Contenido total de ceniza	ASTM D2866-11

*Anexo C. . Caracterización de la biomasa y equipos del proceso*



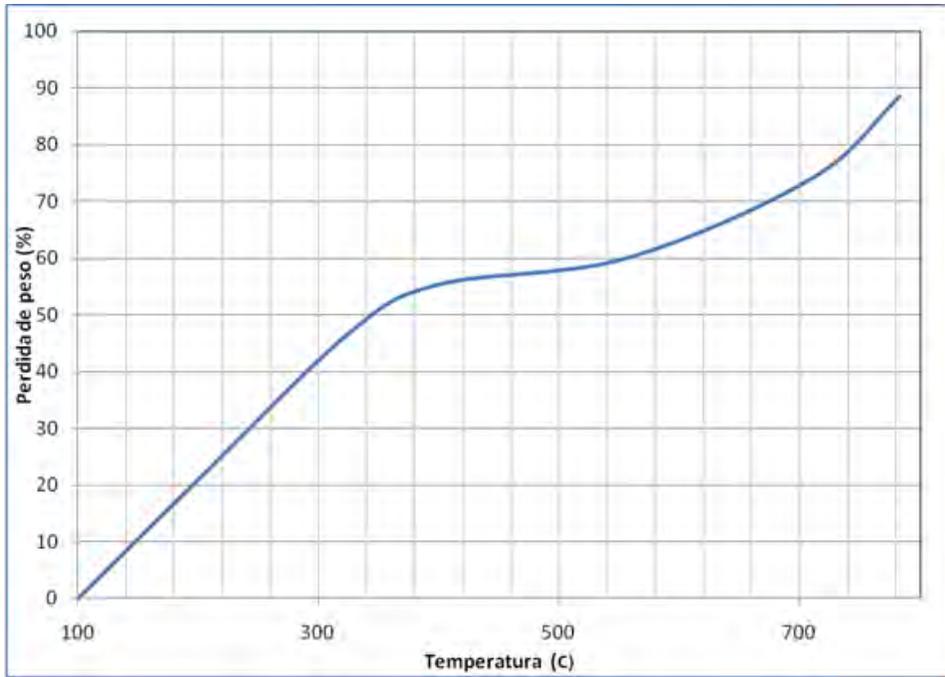
*Figura 47. Cuarteo y Selección de muestra representativa*



*Figura 48. Molienda*



*Figura 49. Tamizaje*



*Figura 50. Curva termogravimétrica: Descomposición de la biomasa en el tiempo*



*Figura 51. Equipo de floculación VELO JLT4 de cuatro puestos*

Fuente: Laboratorio de procesos, Escuela de ingeniería química Universidad del Valle



***Figura 52. Balanza de precisión marca Pioneer modelo OHAUS***

Fuente: Laboratorio de procesos, Escuela de ingeniería química Universidad del Valle



***Figura 53. Secador de bandejas LAB TECH Modelo LD015F***

Fuente: Laboratorio de procesos, Escuela de ingeniería química Universidad del Valle

.

*Anexo D. Descripción de los equipos para pirólisis*



*Figura 54. Mufla modificada con ingreso y salida de gases activantes*

*Fuente: Laboratorio de procesos del grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbón, Escuela de ingeniería química Universidad del Valle.*



*Figura 55. Reactor de lecho fijo para tratamiento pirolítico de pequeñas muestras de materia prima.*

Laboratorio de procesos del grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbón, Escuela de ingeniería química Universidad del Valle.



*Figura 56. Cilindros de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> con sus respectivos rotámetros*

*Laboratorio de procesos del grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbón,  
Escuela de ingeniería química Universidad del Valle.*

*Anexo E. Calibración de rotámetros**Cuadro 4. Calibración de rotámetros para CO<sub>2</sub>*

Nivel	Volumen	t1	t2	t3	tprom.	flujo mL/s	Flujo mL/min
0,5	10	3,64	3,52	3,56	3,57	2,80	167,910
1,5	10	2,51	2,54	2,62	2,56	3,91	234,681
2	10	1,78	1,8	1,72	1,77	5,66	339,623
3	10	1	1,03	1,07	1,03	9,68	580,645
4	10	0,78	0,75	0,78	0,77	12,99	779,221
5	20	1,09	1,13	1,13	1,12	17,91	1074,627
6	20	0,91	0,94	1,05	0,97	20,69	1241,379
7	30	1,17	1,25	1,21	1,21	24,79	1487,603
8	50	1,7	1,84	1,66	1,73	28,85	1730,769
10	20	2,62	2,72	2,75	2,70	7,416564	444,99
15	20	1,53	2,56	1,63	1,91	10,48951	629,37
20	30	1,75	1,84	1,81	1,80	16,66667	1000,00
25	30	1,37	1,32	1,37	1,35	22,16749	1330,05

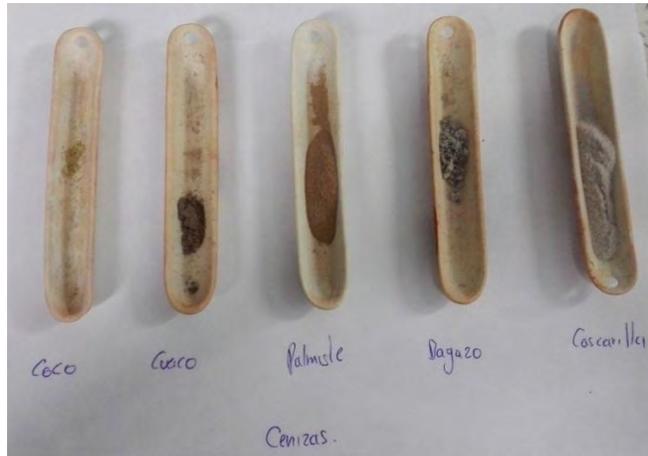
**Cuadro 5. Calibración de rotámetros para N<sub>2</sub>**

Nivel	Volumen	t1	t2	t3	tprom.	flujo mL/s	flujo mL/min
5	10	2,26	2,32	2,45	2,34	4,27	256,05
10	10	1,31	1,43	1,34	1,36	7,35	441,18
15	10	0,78	0,82	0,83	0,81	12,35	740,74
20	20	1,03	1,05	1,06	1,05	19,11	1146,50
25	20	0,72	0,84	0,83	0,80	25,10	1506,28
30	30	1,06	1,08	1,03	1,06	28,39	1703,47
40	50	1,31	1,32	1,22	1,28	38,96	2337,66

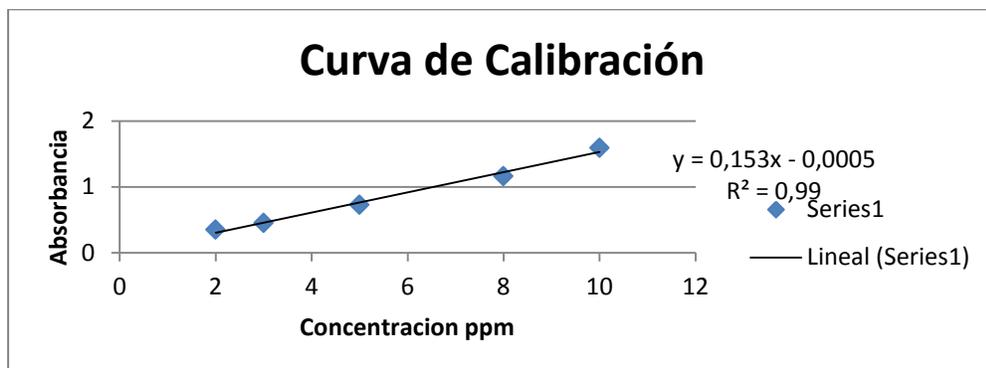
*Anexo F. Diseño experimental***Cuadro 6. Matriz de experimentos normalizada y plan de experimentación real**

Ensayos	Matriz de experimentos		Plan de experimentación	
	X1	X2	Concentración de KOH	Temperatura de carbonización
1	0	0	4,5	525°C
2	0	0	4,5	525°C
3	0	0	4,5	525°C
4	0	1,4142	4,5	702°C
5	1	1	8	650°C
6	-1	-1	1	400°C
7	0	0	4,5	525°C
8	0	-1,4142	4,5	348°C
9	1,4142	0	9,45	525°C
10	0	0	4,5	525°C
11	-1,4142	0	0	525°C
12	-1	1	1	650°C
13	1	-1	8	400°C

*Anexo G. Muestras para análisis de cenizas*



**Figura 57. Muestras de las materias primas adicionales**

**Anexo H. Pruebas de adsorción de azul de metileno****Figura 58. Curva de calibración****Figura 59. Pruebas de adsorción de azul de metileno en la tercera etapa de la investigación****Figura 60. Diferencias de la capacidad adsorptiva entre la cascarilla de arroz y el palmiste**