

**ANALISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA SÓLIDA EN
CARTAGENA Y PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA
SU UTILIZACIÓN BAJO UN ESQUEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

HANDRY ALEXANDER MUÑOZ BRU

JOHN JAIRO DEL TORO MARTINEZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
CARTAGENA DE INDIAS
OCTUBRE DE 2006**

**ANALISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA SÓLIDA EN
CARTAGENA Y PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA
SU UTILIZACIÓN BAJO UN ESQUEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

HANDRY ALEXANDER MUÑOZ BRU

JOHN JAIRO DEL TORO MARTINEZ

**Monografía de grado para otorgar el título de
Ingeniero Mecánico**

Asesor

BIENVENIDO SARRIA LOPEZ

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
CARTAGENA DE INDIAS
OCTUBRE DE 2006**

ARTICULO 107

La institución se reserva el derecho de la propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados, los cuales no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

CARTAGENA DE INDIAS, 20 DE OCTUBRE DE 2006

Cartagena de Indias D.T. y C., Diciembre 4 de 2006

Señores:

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Comité de Evaluación de Proyectos

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente nos dirigimos a ustedes, con el objeto de presentarles a su consideración, estudio y aprobación de la monografía **ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA SÓLIDA EN CARTAGENA Y PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA SU UTILIZACIÓN BAJO UN ESQUEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA** por requisito para optar por el título de ingeniero mecánico.

Atentamente

Handry Alexander Muñoz Bru
C.C. 73.211.886 de Cartagena

John Jairo Del Toro Martínez
C.C. 73.007.214 de Cartagena

Cartagena de Indias D. T. y C. Diciembre 4 de 2006

Señores:

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Comité de Evaluación de Proyectos

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Ciudad

Respetados Señores:

Tengo el agrado de presentar a su consideración, estudio y aprobación, la monografía titulada **“ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA SÓLIDA EN CARTAGENA Y PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA SU UTILIZACIÓN BAJO UN ESQUEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA”**, desarrollada por los estudiantes **Handry Alexander Muñoz Bru y John Jairo Del Toro Martínez**.

Al respecto me permito comunicar que he dirigido el citado trabajo, el cual considero de gran importancia y utilidad.

Atentamente

Bienvenido Sarria López

ASESOR DE MONOGRAFÍA

AUTORIZACIÓN

Cartagena de Indias, D. T. y C.

Nosotros, HANDRY ALEXANDER MUÑOZ BRU, identificado con cédula de ciudadanía número 73.211.886 de Cartagena y JOHN JAIRO DEL TORO MARTINEZ, identificado con cédula de ciudadanía número 73.007.214 de Cartagena, autorizamos a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de nuestro trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la Biblioteca.

**HANDRY ALEXANDER MUÑOZ BRU
MARTINEZ**

C.C. # 73.211.886 de Cartagena

JOHN JAIRO DEL TORO

C.C. # 73.007.214 de Cartagena

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por darme la oportunidad, la constancia, la fortaleza y la voluntad férrea para llevar a cabo este ciclo, de la misma manera a mis padres por tener en mi esa confianza y por haberme dado el intelecto para asimilar tantas enseñanzas que exigen nuestro sacrificio y dedicación, a mis familiares y amigos por su apoyo, a las hermanas Yaneth y ketty por las oraciones que realizaron día tras día, lo mismo que por su incondicional compañía y su imperativa voz de aliento, pues sin todo este equipo de personas no hubiese sido posible haber logrado este paso tan importante en mi vida.

HANDRY ALEXANDER.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado la confianza y la fuerza de voluntad para llevar a cabo este gran logro; a mi familia que sin ellos no hubiese sido posible haber dado este paso gracias a su apoyo incondicional el cual es un factor muy importante en mi vida, a mis amigos por haber estado dispuestos a ayudarme en los momentos que mas los necesitaba.

JOHN JAIRO.

RESUMEN

TITULO: ANALISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA SÓLIDA EN CARTAGENA Y PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA SU UTILIZACIÓN BAJO UN ESQUEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

AUTORES: HANDRY ALEXANDER MUÑOZ BRU

JOHN JAIRO DEL TORO MARTINEZ

OBJETIVO: Generar una solución para la utilización de residuos sólidos bajo un esquema de digestión anaerobia.

METODOLOGIA: Se realizó una investigación minuciosa y se evaluó el estado de los recursos biomásicos a nivel internacional, nacional y local basándose en la información recopilada de distintas fuentes bibliográficas, tales como páginas de Internet, libros y revistas, para determinar cual de los recursos disponibles actualmente en Cartagena son los más adecuados según su disponibilidad, su potencial de distribución y de recolección; luego se analizaron las tecnologías disponibles actualmente a nivel mundial con el fin de determinar cual es la más apropiada para procesar los recursos a utilizar y por último se realizó un modelamiento simulado el cual arrojó resultados con los que se determina la cantidad de energía aprovechable.

RESULTADOS: Se genera un documento el cual contiene el estimado disponible de biomasa existente en Cartagena, además de un estimado del potencial energético. Por se describen los principales tipos de tecnologías adecuadas para aprovechar la biomasa, otro resultado que se obtiene es el modelo de un biodigestor de aguas negras por parte de un software conocido con el nombre de MATLAB 5.3.

ASESOR: Bienvenido Sarria López

INGENIERO MECÁNICO

OBJETIVO GENERAL

Generar una solución para la utilización de residuos sólidos bajo un esquema de digestión anaerobia.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Evaluar el estado del arte de la investigación actual en Colombia y el mundo en cuanto al uso de biomasa sólida, tipos, características, aplicaciones y tecnología actual para su aprovechamiento.
2. Valorar el recurso biomásico disponible en Cartagena determinando los tipos de biomasa presentes, su potencial de recolección, distribución y procesamiento final.
3. Determinar el potencial de utilización de la biomasa en Cartagena, evaluando cual de los diferentes residuos son potencialmente aptos para su utilización como recurso energético.
4. Determinar el impacto ambiental y social del uso de biomasa sólida como fuente energética en empresas de la ciudad de Cartagena.
5. Evaluar y proponer una tecnología adecuada para el uso de la biomasa sólida mas apropiada como fuente de energía en empresas de Cartagena.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 25 |
| 1 ESTADO DEL ARTE DE LA BIOMASA | 30 |
| 1.1 La Biomasa | 30 |
| 1.2 Ventajas Y Desventajas | 53 |
| 1.2.1 Ventajas de la Biomasa | 53 |
| 1.2.2 Desventajas de la Biomasa | 56 |
| 1.3 Tecnología de Procesamiento de Biomasa | 58 |
| 1.3.1 Métodos termoquímicos | 58 |
| 1.3.2 Métodos Biológicos..... | 65 |
| 1.4 Estado Del Arte De La Biomasa En El Mundo | 66 |
| 1.4.1 La biomasa en el contexto de la Unión Europea..... | 68 |
| 1.4.2 La biomasa en el contexto de América | 71 |
| 1.5 Situación del maíz en Cartagena..... | 86 |
| 1.5.1 Composición de la planta | 86 |
| 1.5.2 Producción de maíz..... | 88 |
| 1.5.3 Descripción de los residuos..... | 89 |
| 1.6 Situación del arroz en Cartagena | 90 |
| 1.6.1 Composición de la planta | 90 |
| 1.6.2 Producción de arroz..... | 91 |
| 1.6.3 Descripción de los residuos..... | 93 |
| 1.7 Situación del algodón en Cartagena..... | 94 |
| 1.7.1 Composición de la planta | 94 |
| 1.7.2 Producción del algodón | 95 |
| 1.7.3 Descripción de los residuos..... | 97 |
| 1.8 Situación del sorgo en Cartagena..... | 98 |
| 1.8.1 Composición de la planta | 98 |
| 1.8.2 Producción del sorgo | 99 |
| 1.8.3 Descripción de los residuos..... | 100 |
| 1.9 Situación de la yuca en Cartagena..... | 101 |
| 1.9.1 Composición de la planta | 101 |
| 1.9.2 Producción de la yuca | 102 |
| 1.9.3 Descripción de los residuos..... | 103 |
| 1.10 Situación de la ñame en Cartagena | 104 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 1.10.1 | Composición de la planta | 104 |
| 1.10.2 | Producción del ñame..... | 105 |
| 1.10.3 | Descripción de los residuos | 106 |
| 1.11 | Situación del plátano en Cartagena | 107 |
| 1.11.1 | Composición de la planta | 107 |
| 1.11.2 | Producción del plátano..... | 109 |
| 1.11.3 | Descripción de los residuos | 110 |
| 2 | POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS | 111 |
| 2.1 | Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos | 111 |
| 2.1.1 | Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos Domésticos..... | 111 |
| 2.1.2 | Potencial Energético de las Aguas Negras | 117 |
| 2.2 | Potencial Energético de los Residuos Sólidos Industriales | 119 |
| 2.2.1 | Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos Industriales..... | 119 |
| 2.2.2 | Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos Comerciales | 120 |
| 2.3 | Potencial Energético de los Residuos Agrarios | 121 |
| 2.3.1 | Arroz | 121 |
| 2.3.2 | Algodón..... | 124 |
| 2.3.3 | Sorgo | 128 |
| 2.3.4 | Yuca..... | 130 |
| 2.3.5 | Ñame | 133 |
| 2.3.6 | Plátano..... | 135 |
| 2.4 | Conclusión..... | 138 |
| 3 | PROPUESTA TECNOLÓGICA..... | 141 |
| 3.1 | SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE RSU..... | 141 |
| 3.1.1 | TIPOS DE BIODIGESTORES | 142 |
| 3.2 | Modelo de un biodigestor | 145 |
| 3.3 | Análisis de resultados..... | 148 |
| 4. | CONCLUSIONES | 153 |
| 5 | RECOMENDACIONES..... | 155 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA..... | 156 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1. Rangos de temperatura para los cuales se realizan los distintos procesos de transformación..... | 45 |
| Tabla 2. Principales residuos agroindustriales en Brasil..... | 57 |
| Tabla 3. Volumen de consumo de empresas para la producción de energía..... | 58 |
| Tabla 4. Producción, rendimiento, área de la caña de azúcar, y producción de alcohol..... | 60 |
| Tabla 5. Potencial de generación de energía de la cáscara de arroz..... | 64 |
| Tabla 6. Producción de maíz tecnificado y tradicional..... | 67 |
| Tabla 7. Producción de arroz en los sistemas de riego, secano manual y secano mecánico..... | 71 |
| Tabla 8. Producción de Algodón 2003 y 2004..... | 75 |
| Tabla 9. Producción de Sorgo 2003 y 2004..... | 78 |

| | |
|--|------------|
| Tabla 10. Producción de Yuca 2003 y 2004..... | 81 |
| Tabla 11. Producción de Ñame 2003 y 2004..... | 85 |
| Tabla 12. Producción de Plátano 2003 y 2004..... | 88 |
| Tabla 13. Consolidado promedio de la composición de los residuos sólidos domésticos en los estratos 4, 5 y 6 de Cartagena de Indias..... | 92 |
| Tabla 14. Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas..... | 94 |
| Tabla 15. Cantidades estimadas de residuos de arroz, secado manual y secado mecánico 2003 y 2004..... | 101 |
| Tabla 16. Humedad, poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción de arroz..... | 101 |
| Tabla 17. Cantidades estimadas de residuos del cultivo en 2003 y 2004 de algodón..... | 104 |

| | |
|---|------------|
| Tabla 18. Humedad, poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso del algodón..... | 105 |
| Tabla 19. Cantidades estimadas de residuos del cultivo del sorgo en 2003 y 2004..... | 108 |
| Tabla 20. Poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción de sorgo..... | 109 |
| Tabla 21. Cantidades estimadas de residuos del cultivo de yuca en 2003 y 2004..... | 110 |
| Tabla 22. Humedad de los residuos del proceso de producción de la yuca..... | 111 |
| Tabla 23. Cantidades estimadas de residuos del cultivo de plátano en 2003 y 2004..... | 115 |
| Tabla 24. Poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción del plátano..... | 116 |

Tabla 25. Resumen de potenciales energéticos de los residuos sólidos (La columna elegibilidad toma el valor de uno (1) si el residuos no posee ningún uso que rivalice con su aprovechamiento).....118

Tabla 26. Parámetros del modelo (Bernard et al. 2001; Dochain et al. 1991; kus y Weissmann1995).....129

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1. Reservas probadas de petróleo y producción mundiales 2003...5 | 5 |
| Figura 2. Precios del petróleo 1947-2004 en dólares del 2004 por barril.....6 | 6 |
| Figura 3. Historia de la producción total de crudo en barriles Enero de 1999 a junio de 2005.....8 | 8 |
| Figura 4. Esquema de un sistema de gasificación con filtrado y lavado del sinter gas que alimenta un motor de combustión interna.....39 | 39 |
| Figura 5. Gasificador Downdraft o de flujo descendente.....42 | 42 |
| Figura 6. Distribución de suministro mundial de energía primaria.....48 | 48 |
| Figura 7. Distribución del consumo de biomasa en los países de la UE...49 | 49 |
| Figura 8. Consumo de energía por combustible en los Estados Unidos, 1970-2025 (quadrillones de BTU).....51 | 51 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 9. Generación de electricidad por combustible en los Estados Unidos, 1970-2025 (billones de kWh)..... | 52 |
| Figura 10. Producción de energía por combustible en los Estados Unidos, 1970-2025 (quadrillones de BTU)..... | 53 |
| Figura 11. Emisiones proyectadas de dióxido de carbono por sector y combustible, 1990-2025(millones de toneladas métricas)..... | 55 |
| Figura 12. Distribución energética del Brasil..... | 56 |
| Figura 13. Panorama del uso de leña en Brasil en el año 2002..... | 58 |
| Figura 14. Proceso de recolección de los residuos de madera..... | 59 |
| Figura 15. Proceso de recolección de la caña de azúcar..... | 61 |
| Figura 16. Panorama del crecimiento del área plantada en Brasil de caña de azúcar..... | 62 |
| Figura 17. Producción de biocombustibles por año en millones de toneladas..... | 63 |

| | |
|---|------------|
| Figura 18. El peso promedio en gramos de cada parte de la planta de maíz al final de cada semana durante las temporadas de crecimiento de 4 años consecutivos..... | 66 |
| Figura 19. Planta de arroz en un campo inundado..... | 69 |
| Figura 20. Planta de algodón madura..... | 74 |
| Figura 21. Grano de sorgo..... | 77 |
| Figura 22. Ñame..... | 84 |
| Figura 23. Plátano..... | 87 |
| Figura 24. Pareto de potencial energético en Cartagena..... | 118 |
| Figura 25. Taza de dilución d^{-1} vs T..... | 130 |
| Figura 26. Caudal de metano producido al final del proceso de digestión anaerobia..... | 131 |

INTRODUCCIÓN

Por mucho tiempo el manejo de aguas residuales a fomentado una problemática ambiental alrededor de la ciudad y principalmente en los dos cuerpos de agua mas importantes, es decir la Bahía de Cartagena y la Ciénaga de la Virgen.

Por este motivo se ha generado diversas iniciativas ambientales por distintos gremios de la sociedad cartagenera, sin embargo, los esfuerzos actuales no son suficientes para generar una solución adecuada para poder controlar este fenómeno.

Por otra parte encontramos el problema de la escasez energética propiciado por la alta dependencia de la sociedad de consumo en los combustibles fósiles. Una alternativa a esta problemática es la generación de energía a través de materiales y actividades poco usuales en el pasado. Dentro de estas actividades encontramos todas las fuentes de energía llamadas alternativas (eólica, mareomotriz, solar, geotérmica, etc.).

Además de estas fuentes de energía, la utilización de materiales que se encuentra al final de la cadena productiva para su aprovechamiento en la creación de algún tipo de energía ha fomentado grandes expectativas.

Dentro de este último se sitúa la utilización de las aguas negras como biomasa residual para su reintroducción en el proceso productivo mediante variados esquemas, con el valor agregado de la disminución de la contaminación de cuerpos de agua utilizados como vertederos.

En este mismo orden de ideas, el objeto de este ejercicio teórico es generar una solución para la utilización de residuos sólidos que se crean por las distintas actividades del hombre alrededor de la ciudad de Cartagena.

Con este propósito en mente, se realizó una investigación minuciosa y se evaluó el estado de los recursos biomásicos a nivel internacional, nacional y local basándose en la información recopilada de distintas fuentes bibliográficas, tales como páginas de Internet, libros, revistas especializadas, y corporaciones regionales autónomas, como es el caso de CARDIQUE, para determinar cuál de los recursos disponibles actualmente en Cartagena es el más adecuado según su disponibilidad, su potencial de distribución y de recolección; posteriormente se analizaron las tecnologías disponibles actualmente a nivel mundial para el aprovechamiento de biomasa residual sólida con el fin de determinar cuál es la más adecuada para procesar los recursos a utilizar y por último se realizó un modelamiento simulado los cuales arrojan resultados con los que se determina la cantidad de energía aprovechable.

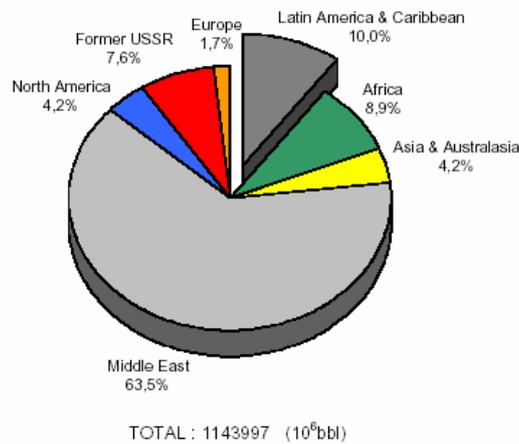
El resultado final es la generación de un documento el cual contiene el estimado disponible de biomasa existente en Cartagena, además de conocimiento de un estimado de potencial energético. Por otra parte se describen los tipos de tecnologías adecuadas para aprovechar la biomasa residual sólida y de esta manera se generan inquietudes para el desarrollo de la misma.

Planteamiento del problema

En los años 80 casi la totalidad de la energía consumida en el mundo provenía de la quema de combustibles fósiles, considerando el mismo consumo per capita de esos años y que la población mundial llegara a 8200 millones de personas, en el 2025 se quemaran 14.000 millones de toneladas de carbón. Es decir, habrá un incremento del 40%. Ello producirá una aceleración del calentamiento global del planeta y una elevación del nivel de los océanos. Así los combustibles fósiles se agotan y amenazan con provocar una catástrofe ecológica. Otra opción es la tecnología nuclear pero esta resulta ser muy costosa y peligrosa. Esta situación y la crisis energética que impacto al mundo en 1.973 y que dejó casi sin combustible a los principales países del mundo, obligó a los especialistas a formular un serio replanteo sobre los mecanismos de generación de energía.

La situación de los hidrocarburos a nivel mundial ha creado incertidumbre acerca del futuro y una nueva conciencia ambiental global que ha generado iniciativas tales como el protocolo de Montreal y el Protocolo de Kyoto.

WORLD RESERVES



WORLD PRODUCTION

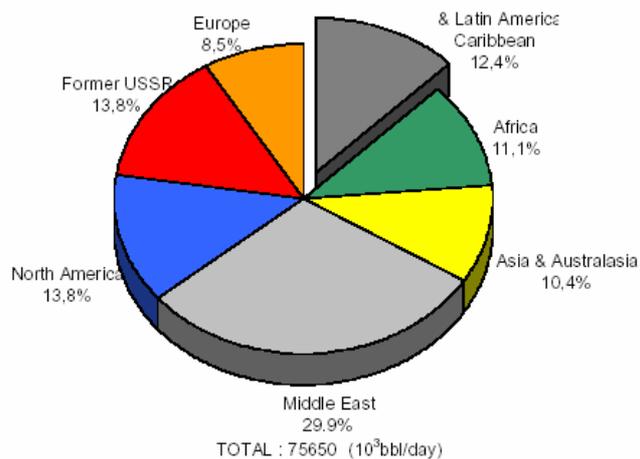


Figura 1. Reservas probadas de petróleo y producción mundiales 2003.¹

Del mismo modo es preocupante el volumen de reservas en el mundo. En la figura 1 podemos observar un grafico que ilustra la distribución y cantidad de petróleo alrededor el globo. La razón de reservas a producción total nos da un estimado de 41 años de petróleo en el mundo en el 2003. Debido a este

¹ “Sistema de Información Económica-Energética”. OLADE. 16. Quito. 2004.

panorama se hace imperativo reemplazar a los combustibles fósiles como fuente primaria de energía.

En cuanto a los precios de los combustibles fósiles, en la figura 2 podemos localizar una tendencia fuerte hacia el alza. Esta tendencia puede ser explicada por varios factores, sin embargo, el principal es el inminente agotamiento de esta fuente de energía a nivel mundial, tema que ya hemos abordado.

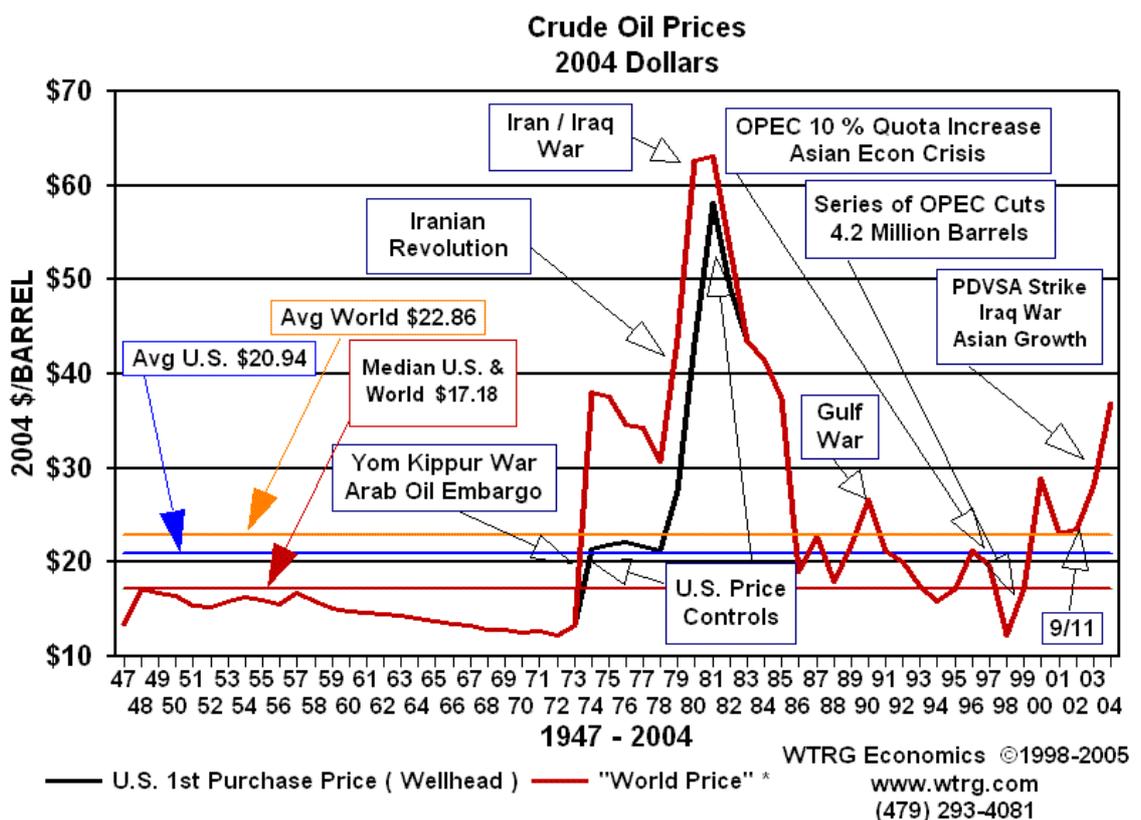


Figura 2. Precios del petróleo 1947-2004 en dólares del 2004 por barril.²

² <http://www.wtrg.com/prices.htm>

El horizonte energético mundial esta en una fase de transición hacia un cambio profundo en cuanto a la generación. Colombia y en especial Cartagena se ven rezagadas. En la actualidad la industria cartagenera no hace uso de ninguna clase de combustible renovable en la producción de la energía necesaria para su funcionamiento. La utilización extensiva de combustibles fósiles genera altos costos de producción de energía.

La situación energética actual de las empresas de Cartagena, e incluso de toda Colombia, se agrava con la noticia de que la reservas probadas de crudo en Colombia abastecerán el mercado bajo una base auto sostenible solo hasta el 2007 y el país deberá importar todo el crudo de utilización domestica en el 2009³. Para tratar de sobrellevar esta situación el gobierno nacional planea la inversión de 80 millones de dólares por año en exploración petrolera por los próximos 15 años⁴. En la figura 3 se observa la tendencia marcadamente decreciente de la producción de crudo en Colombia. Toda esta inversión, la inestabilidad de la situación del crudo en el futuro y la política de anulación de subvenciones a los derivados del crudo por parte del gobierno aumentan los precios de los combustibles fósiles en el país. Haciendo que los costos de producción de energía por medio de la inflamación de combustibles fósiles aumenten fuera de los límites operativos de las empresas de la ciudad de Cartagena.

³ “Biocombustible para los motores diesel en Colombia. **Una alternativa muy aceitosa**”. <http://www.colciencias.gov.co/agenda/pn113.html>

⁴ “COLOMBIA INVERTIRÁ US\$80 MILLONES POR AÑO EN EXPLORACIÓN PETROLERA”. Presidencia de la Republica 23 de mayo 2005. <http://www.presidencia.gov.co/sne/2005/mayo/23/03232005.htm>

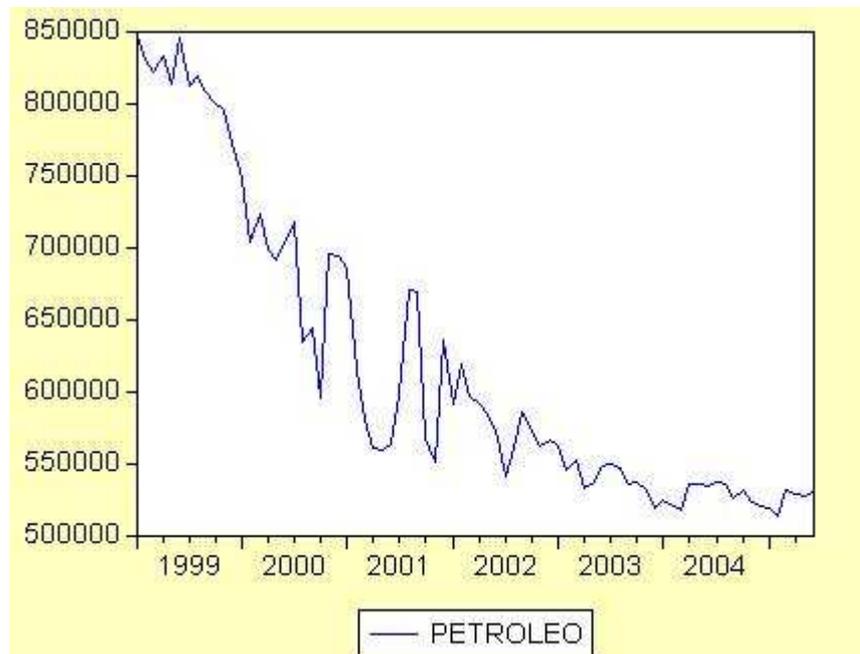


Figura 3. Historia de la producción total de crudo en barriles Enero de 1999 a Junio de 2005.⁵

Además de esta situación de alza de costos debido al agotamiento del crudo, la inflamación de combustibles fósiles produce emisiones peligrosas para la salud humana, la calidad del aire y que contribuyen enormemente a la peligrosa situación del calentamiento global, uno de los temas prioritarios en estos últimos años con iniciativas ya mundiales como el protocolo de Kyoto.

En conclusión, la situación mundial, en especial la situación nacional y local hace necesaria la utilización de combustibles provenientes de recursos renovables. En primer lugar por la probable crisis que el mundo enfrentará al

⁵ “Estadísticas Volumétricas de la Industria Petrolera. Periodicidad Mensual.”. Dirección General de Planeación y Riesgos. ECOPETROL. 2005.

acabar sus reservas. En segundo lugar por las emisiones que la quema de combustibles fósiles que agravan el calentamiento global y desmejoran la calidad del aire. Por ultimo, el costo de los combustibles fósiles se ha convertido en un factor determinante en la generación de energía en las empresas.

1 Estado del arte de la Biomasa

1.1 La Biomasa

La biomasa, sustancia orgánica renovable de origen animal o vegetal, era la fuente energética más importante para la humanidad y en ella se basaba la actividad manufacturera hasta el inicio de la revolución industrial. Con el uso masivo de combustibles fósiles el aprovechamiento energético de la biomasa fue disminuyendo progresivamente y en la actualidad presenta en el mundo un reparto muy desigual como fuente de energía primaria.

Mientras que en los países desarrollados, la energía renovable es más extendida y representa el sector que más se está potenciando, en multitud de países en vías de desarrollo es la principal fuente de energía primaria lo que provoca, en muchos casos, problemas medioambientales como la deforestación, desertización, reducción de la biodiversidad, etc.

No obstante, en los últimos años el panorama energético mundial ha variado notablemente. El elevado coste de los combustibles fósiles y los avances técnicos que han posibilitado la aparición de sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa cada vez más eficientes, fiables y limpios, han causado que esta fuente de energía renovable se empiece a considerar por las industrias como una alternativa, total o parcial, a los combustibles fósiles.

La energía de la biomasa proviene en última instancia del sol. Mediante la fotosíntesis el reino vegetal absorbe y almacena una parte de la energía solar que llega a la tierra; las células vegetales utilizan la radiación solar para formar sustancias orgánicas a partir de sustancias simples y del CO₂ presente en el aire. El reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía. En este proceso de transformación de la materia orgánica se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos.

En conclusión el término biomasa es utilizado para referirse al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa se procede de la madera, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros) residuos agrícolas y estiércol.

La energía biomasa puede dividirse en tres clases básicas, a saber: La biomasa natural, la biomasa residual y la biomasa producida.

- La biomasa natural

Se puede definir esta clase de biomasa como aquella que se produce de manera libre en la naturaleza sin intervención alguna del hombre. Estas son aprovechadas en su estado natural en cuanto a sus características y localización incluyéndose: árboles y arbustos, pastos, cultivos y plantas acuáticas. El aprovechamiento de este tipo de biomas posee limitaciones.

1. El 40% de la biomasa acuática conformada por algas y plantas es de muy difícil recuperación.
2. La biomasa terrestre esta muy dispersa, de difícil recolección, transporte y transformación en alguna forma energética útil.
3. Cuando sea posible su aprovechamiento energético, su transformación es ineficiente y costosa.
4. De la biomasa terrestre, gran parte es necesaria conservarla y protegerla con el objeto de preservar los ecosistemas.
5. No existen programas de gobierno que garanticen la reproducción y aprovechamiento de estas y de otras formas de biomasa.

- La biomasa residual

Se define como aquella que se genera en cualquier actividad humana, principalmente en los del propio hombre tales como:

- residuos sólidos
 - Urbanos
 - Industriales
 - Agrícolas
- aguas residuales.

Estos se originan de la cosecha, beneficio procesamiento o comercialización de la biomasa natural y de desechos orgánicos tanto de animales en pie, como en procesamiento; debido a su importancia se puede argumentar que la actividad urbana del hombre genera gran cantidad de biomasa desconectando el componente orgánico de las basuras municipales, los residuos de mercados y los vertedero orgánicos domésticos a los alcantarillado. Por otra parte los residuos agropecuarios también tienen mucha importancia tales como la pulpa de café, la cascarilla de arroz y residuos del sacrificio de animales.

A continuación se profundizará un poco en cada uno de las formas en las cuales se puede obtener biomasa a partir de los distintos residuos y su definición, adicionalmente su tratamiento:

Residuos Sólidos

Definición de Residuos Sólidos

Los residuos sólidos representan la fracción de los materiales de desecho que se producen tras la fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo, que no se presentan en estado líquido o gaseoso.

Tipos de Residuos Sólidos

Los residuos pueden ser generados en una variedad de ámbitos ya sea agrarios, urbanos o industriales, pero la mayor parte de ellos es generada en las ciudades. Estos residuos proceden de las actividades domésticas en las residencias familiares, los edificios como colegios, las actividades de construcción, entre otras. Existen otro tipo de residuos tales como sustancias inflamables, radiactivas o tóxicas. Estos residuos son producidos en las industrias y a menudo merecen un tratamiento especial. En cualquier caso, la

producción de cantidades enormes de residuos sólidos plantea el problema de su eliminación.⁶

Residuos Sólidos Urbanos

Residuos sólidos urbanos: los residuos producidos por los habitantes urbanos comprenden basura, muebles y electrodomésticos viejos, embalajes y desperdicios de la actividad comercial, restos del cuidado de los jardines, la limpieza de las calles, etc. El grupo más voluminoso es el de las basuras domésticas.⁷

Tratamiento de los RSU⁸

Gestionar adecuadamente los RSU es uno de los mayores problemas de muchos municipios en la actualidad. El tratamiento moderno del tema incluye varias fases:

- **Recogida selectiva.**- La utilización de contenedores que recogen separadamente el papel y el vidrio está cada vez más extendida y también se están poniendo otros contenedores para plásticos, metal, pilas, etc. En las comunidades más avanzadas en la gestión de los RSU en cada domicilio se recogen los distintos residuos en diferentes bolsas y se cuida especialmente este trabajo previo del ciudadano separando los diferentes tipos de basura. En esta fase hay que cuidar que no se produzcan roturas de las bolsas y

⁶ Microsoft. Biblioteca Premium Microsoft Encarta 2006.

⁷ <http://www.tecnun.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/110ReSolUrb.htm>

⁸ www.tecnun.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/110ReSolUrb.htm

contenedores, colocación indebida, derrame de basuras por las cales, etc. También se están diseñando camiones para la recogida y contenedores con sistemas que facilitan la comodidad y la higiene en este trabajo.

- **Recogida general.**- La bolsa general de basura, en aquellos sitios en donde no hay recogida selectiva, o la que contiene lo que no se ha puesto en los contenedores específicos, se deposita en contenedores o en puntos especiales de las calles y desde allí es transportada a los vertederos o a las plantas de selección y tratamiento.
- **Plantas de selección.** En los vertederos más avanzados, antes de tirar la basura general, pasa por una zona de selección en la que, en parte manualmente y en parte con máquinas se le retiran latas (con sistemas magnéticos), cosas voluminosas, etc.
- **Reciclaje y recuperación de materiales.**- Lo ideal sería recuperar y reutilizar la mayor parte de los RSU. Con el papel, telas, cartón se hace nueva pasta de papel, lo que evita talar nuevos árboles. Con el vidrio se puede fabricar nuevas botellas y envases sin necesidad de extraer más materias primas y, sobre todo, con mucho menor gasto de energía. Los plásticos se separan, porque algunos se pueden usar para fabricar nueva materia prima y otros para construir objetos diversos.

- **Compostaje.**- La materia orgánica fermentada forma el "compost" que se puede usar para abonar suelos, alimentar ganado, construir carreteras, obtener combustibles, etc. Para que se pueda utilizar sin problemas es fundamental que la materia orgánica no llegue contaminada con sustancias tóxicas. Por ejemplo, es muy frecuente que tenga exceso de metales tóxicos que hacen inútil al compost para usos biológicos al ser muy difícil y cara su eliminación.

Para la realización de este proceso se deben llevar a cabo 3 pasos tales como:

1. Procesamiento de RSU
2. Descomposición aerobia de la fracción orgánica
3. Preparación y comercialización del producto

Lo anterior son los tres pasos básicos en el desarrollo de compostaje pero para poder desarrollar el segundo paso hay que decir que existen tres métodos tales como:

- Hilera con volteo periódico
- Pila estática aireada
- Flujo pistón en biorreactor

En cuanto a la descripción del proceso de compostaje hay que decir se encuentran activos microorganismos aerobios facultativos y obligados.

Hay que tener en cuenta ciertas bacterias que se deben presentar en este orden, iniciando desde la primera etapa hasta las ultimas respectivamente, las primeras bacterias en presentarse son las mesofilicas las cuales deben aparecer en la primera etapa, luego le siguen las termofilicas y en las ultimas etapas o por así decirlo en el periodo de maduración se deben presentar los mohos y actinomicetos; por otra parte también hay que comentar que para que se lleve a cabo esta proceso de manera satisfactoria se deben tener en cuenta ciertas condiciones o parámetros para controlar el proceso tales como humedad, relación carbono nitrógeno y temperatura.

Parámetros de diseño

Para el diseño de y funcionamiento del proceso de descomposición biológica de residuos sólidos se deben tener presentes algunas variables como se muestran a continuación:

- Tamaño de partícula
- Relación carbono – nitrógeno
- Mezcla y siembra
- Contenido de humedad

- Mezcla/volteo
 - Temperatura
 - Control de patógenos
 - Requisitos de aire
 - Control de pH
 - Grado de descomposición
 - Necesidades de terreno
-
- **Vertido.**- El procedimiento más usual, aunque no el mejor, de disponer de las basuras suele ser depositarlas en vertederos. Aunque se usen buenos sistemas de reciclaje o la incineración, al final siempre quedan restos que deben ser llevados a vertederos. Es esencial que los vertederos estén bien contruidos y utilizados para minimizar su impacto negativo. Uno de los mayores riesgos es que contaminen las aguas subterráneas y para evitarlo se debe impermeabilizar bien el suelo del vertedero y evitar que las aguas de lluvias y otras salgan del vertedero sin tratamiento, arrastrando contaminantes al exterior. Otro riesgo está en los malos olores y la concentración de gases explosivos producidos al fermentar las basuras. Para evitar esto se colocan dispositivos de recogida de gases que luego se queman para producir energía. También hay que cuidar cubrir adecuadamente el vertedero, especialmente cuando termina su utilización, para disminuir los impactos visuales

- **Incineración.**- Quemar las basuras tiene varias ventajas, pero también algún inconveniente. Entre las ventajas está el que se reduce mucho el volumen de vertidos (quedan las cenizas) y el que se obtienen cantidades apreciables de energía. Entre las desventajas el que se producen gases contaminantes, algunos potencialmente peligrosos para la salud humana, como las dioxinas. Existen incineradoras de avanzada tecnología que, si funcionan bien, reducen mucho los aspectos negativos, pero son caras de construcción y manejo y para que sean rentables deben tratar grandes cantidades de basura.

Residuos Sólidos Industriales

Residuos sólidos industriales: En este ámbito son generadas grandes cantidades de residuos muchos de los cuales son recuperables. La problemática radica en que las tecnologías para aprovechar los residuos y hacerlos útiles son a menudo muy caras con largos periodos de recuperación de inversión o incluso no económicamente viable. De todas formas, está aumentando la proporción de residuos que se valorizan para usos posteriores.

Dentro de los residuos industriales podemos encontrar dos clases; los residuos industriales inertes y los residuos peligrosos.

Residuos industriales inertes

Son de naturaleza similar a los residuos sólidos urbanos, entre estos tenemos escombros, arena, ladrillos entre otros, y se disponen de igual manera en apropiados vertederos o se reutilizan en otras actividades.

Residuos peligrosos

Son las sustancias que representan alguna amenaza al medio ambiente y a la integridad física de las personas. Por lo general son de tipo inflamables, corrosivas, tóxicas o pueden producir reacciones químicas si las condiciones son las adecuadas

Según las directivas de la Unión Europea los residuos tóxicos y peligrosos son aquellos que contienen altas concentraciones de determinadas sustancias tales como:

- As, Cd, Be, Pb, Se, Te, Hg, Sb y sus compuestos.
- Compuestos de cobre solubles.
- Fenol, éteres, solventes orgánicos, hidrocarburos policíclicos aromáticos cancerígenos.
- Isocianatos, cianuros orgánicos e inorgánicos.
- Biocidas y compuestos fito farmacéuticos.
- Compuestos farmacéuticos.
- Polvo y fibras de asbesto.
- Peróxidos, cloratos y percloratos.
- Carbonilos de metales.
- Ácidos y bases usados en el tratamiento de metales.
- Compuestos de cromo hexavalente.
- Organohalogenados no inertes.
- Alquitranes.

- Materiales químicos de laboratorio, no identificados o nuevos compuestos de efectos ambientales no conocidos.

Residuos Sólidos Agrarios

Los Residuos sólidos agrarios están compuestos por los desechos provenientes del sector primario de la economía el cual esta formado por las actividades de agricultura, ganadería, pesca, explotación forestal y cinegética; igualmente los desechos provenientes de las industrias alimenticias, desde los mataderos y las empresas lácteas hasta las harineras y el tabaco.

Gran parte de estos residuos son orgánicos provenientes de plantas tales como: maíz, arroz, algodón, sorgo, yuca, plátano, ñame y restos de animales etc. Muchos de ellos se utilizan como abono en los suelos de cultivo y como forraje en el campo generando así algún tipo de utilidad y desvirtuando su consideración como residuo. En algunos casos aumenta el riesgo de incendio en los bosques, pero si lo miramos desde un punto de vista ecológico, si se retira la materia orgánica se reduciría la productividad y la maduración del ecosistema.

Tratamiento de los residuos agrarios

En las prácticas agrícolas y ganaderas tradicionales casi todos los restos se aprovechaban. Se quemaban para obtener energía; se usaban para abonar los campos; la paja servía para alimentar al ganado, etc.

Los métodos modernos de explotación del campo han convertido en residuos muchos de estos restos antes aprovechables. Ya no hay ganado que trabaje los campos y la paja ha perdido su valor porque es más rentable alimentar al ganado con piensos compuestos; los abonos químicos son más baratos que los orgánicos que exigen ser manipulados.

La principal dificultad para un aprovechamiento adecuado de estos residuos es la económica y por eso se deben pensar incentivos que faciliten su uso. Ayudas a la agricultura ecológica que usa abonos naturales o al uso de la biomasa para obtener energía.

Otra dificultad importante para la adecuada gestión de estos residuos es el tamaño y la dispersión de las explotaciones que muchas veces no tienen capacidad económica suficiente para tratarlos bien y se convierten en importantes fuentes de contaminación.

Aguas Residuales⁹

Las aguas residuales son básicamente agua contaminada por diferentes agentes y actividades que son usualmente realizadas por las personas de una comunidad y por lo tanto representan otro tipo más de residuos sólidos urbanos.

Entre estos agentes tenemos a las bacterias, virus, parásitos, entre otros que provienen de los desechos orgánicos algunos de los cuales utilizan el oxígeno para descomponerlos y así aniquilan toda forma de vida acuática debido al agotamiento del oxígeno.

Por otra parte tenemos la contaminación debido a las labores domésticas las cuales contaminan el agua con residuos fecales y detergentes. Los trabajos agrícolas y ganaderos tienen una gran importancia debido a que son capaces de producir una gran cantidad de contaminación en las aguas de los ríos y los acuíferos, sobre todo a los vertidos de aguas cargadas de residuos orgánicos, las cuales proceden de la transformación de productos vegetales, o de los excrementos de los animales. Entre otras fuentes de contaminación de las aguas tenemos a las industrias. Algunas de ellas, como la papelera, química, textil y siderúrgica, necesitan del agua para poder desarrollar sus procesos. Las centrales térmicas también necesitan de una gran cantidad de agua para ser

⁹ http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/25agua.html

operativas; en este caso el agua residual, no presenta contaminantes orgánicos o inorgánicos, pero debido a que se manejan temperatura bastante elevadas, más que la de los cauces a los cuales va dirigida y por esta razón ocasiona graves trastornos en los ecosistemas acuáticos.

Como en la industria más que todo se manejan sustancias químicas orgánicas (Ácidos, compuestos de metales tóxicos Mercurio, Plomo) y otras inorgánicas (Petróleo, plásticos, plaguicidas, detergentes) que pueden ocasionar que el agua se envenene.

Como se dijo anteriormente las aguas negras son generadas por las actividades humanas y sólo en los países desarrollados son tratadas parte de ellas, para eliminarles los componentes considerados peligrosos y para reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) antes de ser arrojados a los conductos de aguas negras. No obstante, en casi todos los países todavía el sector industrial arroja las aguas de desecho a los desagües sin ningún tipo de tratamiento previo y en la mayoría de los países subdesarrollados muy pocas las entidades que le realizan algún tipo de tratamiento antes de desecharlas, lo que quiere decir que a hay un gran problema en lo referente a la generación de aguas negras debido a que aumenta de manera significativa la población, la industria y las demás actividades humanas y por ende un aumento en los residuos que terminan en la contaminación de las aguas.

A los contaminantes biodegradables de las aguas negras se les puede realizar procesos naturales o en sistemas de tratamientos hechos por el hombre, los cuales aceleran el proceso de descomposición de la materia orgánica con microorganismos.

A continuación se muestra el tratamiento que se le debe hacer a las aguas negras:

Tratamiento de Aguas Negras¹⁰

Básicamente el tratamiento de agua se divide en tres, los cuales son los encargados de eliminar todo tipo de partículas y residuos orgánicos, ahora mostramos las tres divisiones de tratamiento de agua:

- Tratamiento primario de aguas negras: Es el proceso que se utiliza para eliminar todo tipo de sólidos de las aguas contaminadas.
- Tratamiento Secundario de aguas negras: En este punto lo que se hace es reducir la cantidad de materia orgánica por la acción de bacterias (disminuir la demanda bioquímica de oxígeno).
- Tratamiento terciario de aguas negras: También conocido como el tratamiento avanzado de aguas negras tiene como fin principal eliminar los

¹⁰ http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/25agua.html

productos químicos tales como fosfatos, nitratos, plaguicidas, sales, materia orgánica persistente, entre otros.

Para poder desarrollar esta tecnología de tratamiento de aguas negras se hace necesario que intervengan ciertas las disciplinas que participan en los proceso de tratamientos de aguas contaminadas entre las cuales encontramos: ingenierías y ciencias exactas (ingeniería química, ingeniería civil, ingeniería mecánica y eléctrica, química y física), ciencias de la vida (biología, biología marina, microbiología, bacteriología), ciencias de la tierra (geología, hidrología, oceanografía)

Tratamiento primario

En este tratamiento primario se ha desarrollado una serie de pasos o procesos para poder llevar a cabo de manera eficiente la eliminación de sólidos de mayor tamaño en el agua, entre las cuales tenemos las operaciones de: filtración, la sedimentación, la flotación, la separación de aceites y la neutralización.

Este es un proceso mecánico que utiliza cribas para realizar una separación de los desechos de mayor tamaño como palos, piedras y trapos. Luego las aguas negras que proceden de las alcantarillas son dirigidas a una cámara de dispersión en donde se encuentran las cribas, de donde pasan al tanque de sedimentación, luego todo tipo de sedimentos pasan a un tanque digestor y

luego al lecho secador, para luego ser utilizados como fertilizante en las tierras de cultivo o a un relleno sanitario o son arrojados al mar. Del tanque de sedimentación el agua es conducida a un tanque de desinfección con cloro (para matarle las bacterias) y una vez que cumpla con los límites de depuración sea arrojada a un lago, un río o al mar.

Otra manera de hacer el tratamiento primario a las aguas negras conocidas también como aguas crudas de albañal, consiste en hacerla pasar a través de una criba de barras para separar los objetos de mayor tamaño. Algunas plantas de tratamiento de aguas negras tienen trituradores para los objetos grandes con el objeto de que no obstruyan esta etapa del tratamiento. Luego pasan las aguas a un tanque de sedimentación donde fluye lentamente para que sedimenten las piedras, arena y otros objetos pesados. De éste tanque las aguas negras pasan a otro grande llamado de asentamiento, en donde se sedimentan los sólidos en suspensión (quedan como lodos en el fondo del tanque) y, los aceites y las grasas flotan en forma de nata o espuma. Después de este proceso, en algunos casos, el agua que queda entre el lodo y la nata se escurre o libera al ambiente o se le da un tratamiento con cloro (proceso de cloración) para matarle las bacterias antes de ser arrojadas al ambiente o se hace pasar al tratamiento secundario.

El tratamiento primario de las aguas negras elimina alrededor del 60 % de los sólidos en suspensión y el 35 % de los materiales orgánicos (35 % de la demanda bioquímica de oxígeno).

Solamente en los países desarrollados se trata cerca del 30 % de las aguas negras domésticas mediante el tratamiento primario y cerca del 60 % se somete al tratamiento secundario ya que éste cuesta aproximadamente el doble de lo que cuesta el tratamiento primario.

Tratamiento secundario de las aguas negras

Entre las operaciones que se utilizan en el tratamiento secundario de las aguas contaminadas están: el proceso de lodos activados, la aireación u oxidación total, filtración por goteo y el tratamiento anaeróbico.

El tratamiento secundario de aguas negras es un proceso biológico que utiliza bacterias aerobias como un primer paso para remover hasta cerca del 90 % de los desechos biodegradables que requieren oxígeno.

Después de la sedimentación, el agua pasa a un tanque de aireación en donde se lleva a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica y posteriormente pasa a un segundo tanque de sedimentación, de ahí al tanque de desinfección por cloro y después se descarga para su reutilización.

El tratamiento secundario más común para el tratamiento de aguas negras es el de los lodos activados. Las aguas negras que provienen del tratamiento primario pasan a un tanque de aireación en donde se hace burbujear aire o en

algunos casos oxígeno, desde el fondo del tanque para favorecer el rápido crecimiento de las bacterias y otros microorganismos. Las bacterias utilizan el oxígeno para descomponer los desechos orgánicos de las aguas negras. Los sólidos en suspensión y las bacterias forman una especie de lodo conocido como lodo activado, el cual se deja sedimentar y luego es llevado a un tanque digestor aeróbico para que sea degradado. Finalmente el lodo activado es utilizado como fertilizante en los campos de cultivo, incinerado, llevado a un relleno sanitario o arrojado al mar.

Otras plantas de tratamiento de aguas negras utilizan un dispositivo llamado filtro percolador en lugar del proceso de lodos activados. En este método, las aguas negras a las que les han sido eliminados los sólidos grandes, son rociadas sobre un lecho de piedras de aproximadamente 1.80 metros de profundidad. A medida que el agua se filtra entre las piedras entra en contacto con las bacterias que descomponen a los contaminantes orgánicos. A su vez, las bacterias son consumidas por otros organismos presentes en el filtro. Del tanque de aireación o del filtro percolador se hace pasar el agua a otro tanque para que sedimenten los lodos activados. El lodo sedimentado en este tanque se pasa de nuevo al tanque de aireación mezclándolo con las aguas negras que se están recibiendo o se separa, se trata y luego se tira o se entierra.

Una planta de tratamiento de aguas negras produce grandes cantidades de lodos que se necesitan eliminar como desechos sólidos. El proceso de

eliminación de sólidos de las aguas negras no consiste en quitarlos y tirarlos, sino que se requiere tratarlos antes de tirarlos y su eliminación es muy complicada y costosa.

Algunas plantas de tratamiento de aguas negras utilizan filtros trompa, en donde las bacterias aerobias llevan a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica cuando las aguas escurren a través de un lecho grande lleno de piedra triturada cubierta de bacterias aerobias y de protozoarios.

Como los tratamientos primario y secundario de aguas negras no eliminan a los nitratos ni a los fosfatos, éstos contribuyen a acelerar el proceso de eutroficación de los lagos, de las corrientes fluviales de movimiento lento y de las aguas costeras.

Como los tratamientos primario y secundario de las aguas negras no eliminan productos químicos persistentes como los plaguicidas, ni los radioisótopos de vida media grande, los ambientalistas los consideran insuficientes, limitados e imperfectos, por lo que exigen que se debe hacer un mejor tratamiento de las aguas negras y de los desechos industriales, así como evitar una sobrecarga.

Entre el tratamiento primario y secundario de las aguas negras eliminan cerca del 90 % de los sólidos en suspensión y cerca del 90 % de la materia orgánica (90 % de la demanda bioquímica de oxígeno). Una parte de los sólidos

eliminados en este tratamiento se utiliza para la elaboración de fertilizantes pero la mayor parte de ellos se usa de relleno de terrenos o se tira al mar.

En Estados Unidos, el tratamiento primario y el secundario, combinados deben ser utilizados en todas las comunidades que cuenten con plantas de tratamiento de aguas de desecho. Sin embargo, este procedimiento deja todavía en el agua tratada entre un 3 y un 5 % en peso de los desechos que requieren oxígeno, 3 % de los sólidos en suspensión, 50 % del nitrógeno (principalmente en forma de nitrato), 70 % del fósforo (principalmente en forma de fosfatos) y 30 % de la mayoría de los compuestos de metales tóxicos y de productos químicos orgánicos.

Tratamiento terciario de las aguas negras

Entre las operaciones que se utilizan en el tratamiento terciario de aguas contaminadas están: la microfiltración, la coagulación y precipitación, la adsorción por carbón activado, el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la remoción de nutrientes, la cloración y la ozonización.

A cualquier tratamiento de las aguas negras que se realiza después de la etapa secundaria se le llama tratamiento terciario y en este, se busca eliminar los contaminantes orgánicos, los nutrientes como los iones fosfato y nitrato o cualquier exceso de sales minerales. En el tratamiento terciario de aguas negras de desecho se pretende que sea lo más pura posible antes de ser

arrojadas al medio ambiente. Dentro del tratamiento de las aguas de desecho para la eliminarles los nutrientes están la precipitación, la sedimentación y la filtración. Actualmente se aplican muy pocos tratamientos terciarios a las aguas negras domésticas.

- La biomasa producida

Este se puede considerar la principal forma de biomasa y es aquella cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en vez de producir alimentos.

1.2 Ventajas Y Desventajas

1.2.1 Ventajas de la Biomasa

Aunque la energía de la biomasa se ha aprovechado desde que el hombre descubrió el fuego, la consideración actual de la biomasa como una fuente de energía limpia se hace bajo nuevos criterios y enfoques.

- El balance de CO₂ emitido por la combustión de la biomasa es neutro. La combustión de biomasa, si se realiza en las condiciones adecuadas, produce agua y CO₂, pero la cantidad emitida de CO₂, principal responsable del efecto invernadero, fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, el

CO₂ de la biomasa viva forma parte de un ciclo de circulación continuo entre la atmósfera y la vegetación, sin que suponga incremento de ese gas en la atmósfera con tal que la vegetación se renueve a la misma velocidad que se degrada.

- La biomasa no emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas.
- Una parte de la biomasa para fines energéticos procede de materiales residuales que es necesario eliminar. El aprovechamiento energético supone convertir un residuo en un recurso o lo que es lo mismo, reciclar.
- Los cultivos excedentes serán sustituidos por los cultivos energéticos en el mercado de alimentos y esto puede llegar a ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola.
- La producción de la biomasa es totalmente descentralizada, ya que el recurso utilizado por esta energía está disperso por el territorio, que puede generar un gran cambio social y económico en el mundo rural.
- La utilización de la biomasa como energía también disminuye la dependencia externa para el abastecimiento de combustibles.

- La biomasa también es un importante campo de innovación tecnológica. Las respuestas tecnológicas que se están realizando están dirigidas a mejorar por completo el rendimiento energético de la biomasa, minimizar los efectos ambientales de los residuos aprovechados, incrementar la competitividad comercial de los productos y posibilitar nuevas aplicaciones de los biocombustibles.
- Desde el punto de vista ambiental y sanitario, el balance de utilización de residuos orgánicos y energéticos es bastante bajo, debido al desconocimiento de las potencialidades para su aprovechamiento energético en cualquiera de sus posibilidades. Por lo tanto, éstos se han constituido en elementos de polución o contaminación en los factores urbano y rural con profunda incidencia sobre la salud de personas y la estabilidad de los agro ecosistemas. La utilización de la biomasa residual daría un uso racional a estos elementos de polución y contaminación en las poblaciones.
- La biomasa puede llegar a constituir por si misma un suministro de materia prima para la industria.

1.2.2 Desventajas de la Biomasa

Como toda tecnología tiene sus pros y contras debemos decir que existen ciertas desventajas.

Los principales obstáculos para la aplicación de la biomasa no son de carácter tecnológico sino de mentalidad y de capacidad organizacional en todos los sectores sociales implicados.

Incluso el subsector de los biocombustibles, que es seguramente el menos desarrollado, cuenta con recursos científico-técnicos suficientes en el mundo.

También se podrían considerar como obstáculos para el desarrollo de la biomasa como energía los siguientes.

- La planificación de recogida de materias primas, en el caso de los cultivos energéticos y de residuos de cultivo, así como la de los residuos forestales.
- La dispersión espacial del recurso es irregular.
- La estacionalidad.
- La variabilidad de producción.

- La dificultad de planificar podas, limpiezas, siegas, y coordinar al personal humano necesario para estas actividades.
- La dificultad de almacenamiento y manejo en planta, sea para la transformación de la materia prima en otros productos como para consumo directo.
- La necesidad de grandes espacios y una planificación adecuada para poder automatizar las operaciones.
- La insuficiencia de las acciones de demostración y del apoyo hacia proyectos de este tipo en todas sus aplicaciones.
- La falta de información sobre los recursos y las tecnologías disponibles.
- La falta de conciencia sobre el interés ambiental y social de la biomasa como fuente de energía.
- Gestión inadecuada para todas las barreras anteriores.
- La especificidad agrícola y ganadería con aspectos de topografía, tenencia de tierra, clima y calidad de suelos y tecnología bien diferentes.

- La no existencia de capacitación técnica-profesional como herramienta de transmisión tecnológica, y la ausencia de programa de investigación en centros de formación en las áreas de la agronomía e ingeniería.
- Los pocos esfuerzos sobre su potencialidad son escasos, de baja cobertura y desarrollados principalmente por particulares.
- Algunas aplicaciones han sido fruto del empirismo y de intenciones puntuales y aisladas.
- El transporte de grandes masas o volúmenes con alto contenido de humedad.

1.3 Tecnología de Procesamiento de Biomasa

1.3.1 Métodos termoquímicos

1.3.1.1 Combustión

Es la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial entre otras aplicaciones.

1.3.1.2 Gasificación

La gasificación de la biomasa es una tecnología de más de cien años de antigüedad. Hoy es vista como una alternativa a los combustibles convencionales. Gasificación es un proceso térmico en el cual combustibles sólidos tales como madera, residuos agrícolas y otros tipos de biomasa seca son convertidos en un gas combustible con el objeto de producir el llamado “Sinter gas” o también llamado “gas producido” que puede ser quemado en motores de combustión interna, turbinas o en equipos de producción de calor y potencia. Un sistema de gasificación para producción de calor y potencia básicamente consiste en un gasificador, un limpiador de gas y un convertidor de energía que generalmente es un motor o una turbina. En este proceso, la mayor dificultad estriba en el filtrado del “sinter gas”, pues se requiere de equipos con capacidad para operar con gases a elevadas temperaturas, con partículas en suspensión de diferentes tipos y algunas veces altos flujos de masa. En la siguiente figura se puede apreciar un sistema de gasificación que posee accesorios para el filtrado y lavado del gas que posteriormente es usado en un motor de combustión interna.

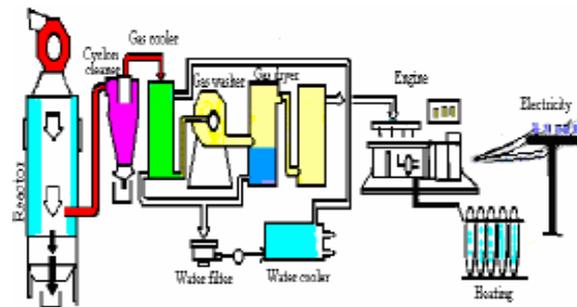


Figura 4. Esquema de un sistema de gasificación con filtrado y lavado del “siter gas” que alimenta un motor de combustión interna

Los principios básicos de la gasificación de la biomasa han sido conocidos desde finales del siglo XVIII, pero las primeras aplicaciones comerciales datan de 1830. Hacia comienzos de 1850 un gran número de lámparas de alumbrado público en Londres ya funcionaban con gas producido de la gasificación de biomasa, este experimento constituyó en el comienzo definitivo de las investigaciones en esta área. Cuando la producción de petróleo comenzó a estar disponible, el gas combustible producto de la gasificación de biomasa cayó, pero después, la crisis energética de los años 70 disparó el interés en este tipo de alternativa energética. En el presente existe una creciente preocupación en el medio ambiente, que ha hecho generar una serie de cuestionamientos sobre continuar usando combustibles fósiles y por ello la necesidad de producir energía sostenible ha incrementado la investigación en este campo y especialmente en el campo de la gasificación.

1.3.1.2.1 Proceso de la gasificación

En esencia la gasificación es el proceso de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible que contiene monóxido de carbono e hidrogeno principalmente por medio de un proceso termoquímico. Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera un poco por debajo de la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla en varias etapas como sigue:

Secado

En este proceso el agua contenida en la biomasa es removida a una temperatura superior a los 100oC

Pirolisis

Es el proceso en el cual la biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno. La pirolisis habitualmente es dividida en pirolisis lenta y pirolisis rápida

Oxidación

Aire es introducido en el proceso. A parte del oxígeno y del vapor de agua, algunos gases inertes también son adicionados. Este procedimiento se realiza entre 700- 2000oC.

Reducción

En la zona de reducción, numerosas reacciones químicas a alta temperatura se presentan.

1.3.1.2.2 Gasificadores

La gasificación se produce al interior de gasificadores. Estos dispositivos son unos cilindros especialmente diseñados para este propósito; son caracterizados por el tipo de combustible sólido utilizado y de acuerdo a la manera como el combustible y el aire entran al mismo produciendo la reacción deseada. Los tipos más importantes de gasificadores son:

1.3.1.2.2.1 Gasificador Updraft

Este tipo de gasificador tiene bien definidas las zonas de combustión parcial, reducción y pirolisis. El aire es admitido por la parte baja de gasificador y este circula en contracorriente. El gas combustible es entregado por la parte superior a unas temperaturas relativamente bajas; Pues, el calor sensible del gas es utilizado para precalentar y secar el combustible; con ello, se logran altas eficiencias. Las desventajas que acusa este sistema de gasificación, son el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, y por ende la imposibilidad de generación de gas continuo

que redundan en dificultades para la utilización en motores de combustión interna.

1.3.1.2.2 Gasificador Downdraft

El gasificador downdraft entrega el gas combustible por la parte baja y la admisión de aire es realizada por la parte media del mismo. Las dificultades que se tiene que enfrentar en esta configuración es el contenido de cenizas y humedad en el gas producido; por otra parte, requiere de un tiempo prolongado de encendido que puede estar en un rango de 20 a 30 minutos. En general este tipo de configuración es más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas.

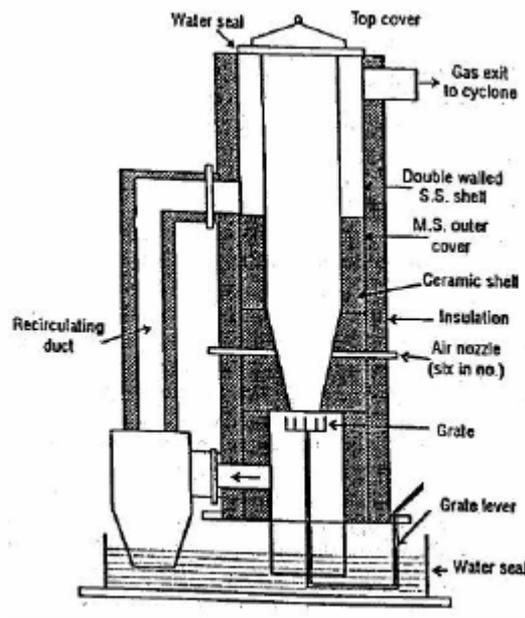


Figura 5. Gasificador Downdraft o de flujo descendente

1.3.1.2.3 Gasificador Crossdraft

Este gasificador tiene ventajas significativas sobre los gasificadores updraft y downdraft. El tiempo de arranque es de alrededor 5 minutos, tienen capacidad de operar con combustibles húmedos o secos y la temperatura del gas producido es relativamente alta. De ahí se desprende que la composición del gas producido tiene un bajo contenido de hidrógeno y de metano. Como desventaja se debe considerar la necesidad de se utilizados con combustibles con bajo contenido de cenizas, como son la madera y el carbón mineral.

1.3.1.3 Gas producido de gasificación de biomasa y sus constituyentes

El gas generado después de un proceso de gasificación contiene una mezcla de gases combustibles y no combustibles, agua, polvo y compuestos de sulfuro como (H₂S) y compuestos de nitrógeno como (NH₃, HCN) que son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los NO_x que son grandes contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida.

Una característica general de los gases combustibles producto de la gasificación de biomasa es el valor de su poder calorífico bajo (LHV) que oscila entre 4.5 y 5 MJ/m³. Este valor es muy inferior al poder calorífico de los hidrocarburos de uso común en la industria y en el transporte. En la siguiente

tabla se ilustran algunos tipos importantes de biomasa con sus composiciones y sus poderes caloríficos.

1.3.1.4 Pirolisis

Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 °C, se utiliza desde hace tiempo para producir carbón vegetal. Mientras que en procesos rápidos, del orden de los segundos, y temperaturas entre 800°C a 1200°C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspectos aceitosos y de bajo pH, denominados aceites de pirolisis.

1.3.2 Métodos Biológicos

1.3.2.1 La fermentación alcohólica

Consiste en general en la obtención de etanol a partir de biomasa. Pero la destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhídrido, es una operación que genera grandes costos en energía. Los alcoholes son los biocombustibles más utilizados actualmente en algunos países, tanto para dar una salida a excedentes agrícolas convertibles en alcohol como por dificultades financieras en la importación de combustibles fósiles. En principio, es posible obtener alcoholes a partir de cualquier producto que contenga glúcidos fermentables, pero los rendimientos son muy desiguales. Los dos combustibles de mayor aplicación son el bioetanol y el biodiesel. El primero Se aplica a la combustión en motores de gasolina, mezclado con ella o sustituyéndola. El

segundo Se aplica a motores diesel, mezclado en ciertas proporciones con gasoil o, más raramente, sustituyéndolo. La densidad de energía es menor que la de la gasolina, pero su combustión, en cambio, es mejor. La única contraindicación para su utilización es que causa problemas de corrosión.

A continuación se muestra en la Tabla 1 las distintas técnicas de utilización de biomasa con sus respectivos rangos de temperaturas y composición del gas combustible producido.

| <u>Conversion technique</u> | <u>Temperature range</u> | <u>Pressure</u> | <u>Main products</u> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------|---|
| Combustion | 800 - 1200 °C | atm . - high | Heat, CO ₂ , H ₂ O |
| Pyrolysis | 400 - 800 °C | atm . - high | C har, oil, gas |
| Gasification | 650 - 1100 °C | atm . - high | CO , H ₂ ,C H ₄ , CO ₂ |
| Hydrothermal Upgrading | 250 - 600 °C | very high | Oil, char, gas, CO ₂ |
| Aerobic fermentation | < 100 °C | atm . | Ethanol, CO ₂ |
| Anaerobic fermentation | < 100 °C | atm . | C H ₄ , H ₂ O |

Tabla 1. Rangos de temperatura para los cuales se realizan los distintos procesos de transformación.

1.4 Estado Del Arte De La Biomasa En El Mundo

Con el pasar de los años la experiencia a mostrado que al mundo le ha tomado unos 60 años transitar desde una dependencia primaria de un recurso energético fundamentalmente biomásico, a uno nuevo, o a un nuevo conjunto

de recursos energéticos. Prueba de ello es el hecho de que en 1860 el 85% del total de la energía primaria de Estados Unidos tenía su origen en la biomasa, cantidad que se redujo a 2.5% en 1973.

Gran parte de la humanidad parece haber adoptado los combustibles fósiles como si fuesen a estar disponibles para siempre, o como si cualquier otra transición energética fuese una tarea de las futuras generaciones, pero no de la presente. Actualmente parecen estar surgiendo las limitaciones ambientales derivadas del uso ilimitado de los combustibles fósiles, con implicaciones negativas y potencialmente gigantescas para todas las naciones.

Desde el año 2000 los recursos energéticos renovables han emergido con la suficiente madurez tecnológica y comercial, como para comenzar a afectar la producción global de energía primaria, sin embargo, su impacto aún es modesto en términos del porcentaje total.

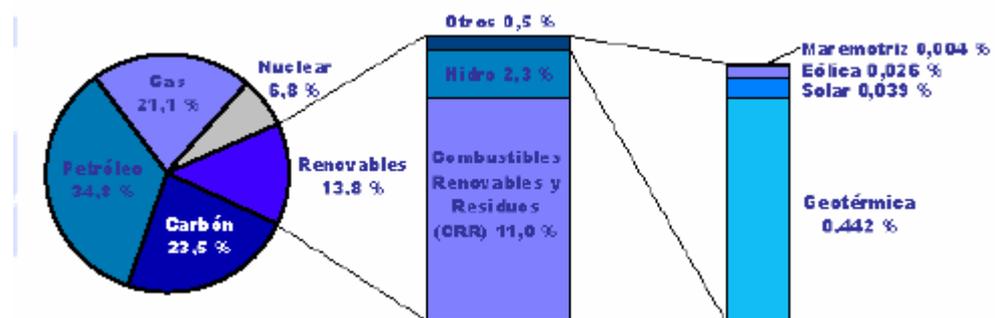


Figura 6. Distribución de suministro mundial de energía primaria
Fuente: Datos de la Agencia Internacional de la Energía, Noviembre de 2002.

Es preocupante el hecho de que la mayor fuente de energía se este acabando y a su vez esta produciendo un impacto ambiental bastante grande debido a las emisiones de dióxido de carbono. Son estos dos problemas núcleo los que han impulsado el desarrollo de las energías renovables en busca de una mejor distribución del suministro de energía.

1.4.1 La biomasa en el contexto de la Unión Europea

De todas las fuentes de energía renovables, la biomasa es la más importante en el conjunto de la Unión Europea. Si se tiene en cuenta la producción energética con renovables en el año 1995 (72.876 ktep), la energía de la biomasa representó aproximadamente un 55% (40.081 ktep) frente a las demás fuentes de este tipo. Le siguen en orden de importancia la energía hidráulica (24.950 ktep) y la geotérmica (2.518 ktep). En la figura siguiente se puede observar el reparto de la producción energética con energías renovables en la Unión Europea en el año 1995. Respecto al aprovisionamiento energético total del conjunto de la Unión Europea, la biomasa contribuye con más del 3%.

Es en el sector doméstico donde más se utiliza la biomasa, principalmente en hogares y pequeñas calderas. Las aplicaciones industriales por lo general contribuyen en menor medida a este consumo de combustibles biomásicos.

Si se tienen en cuenta las cantidades de biomasa consumidas por los países de la Unión Europea, Francia es el país que registra el mayor consumo,

superior a 9 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep). El segundo puesto lo ocupa Suecia (6,5 millones de tep) y le sigue Finlandia con 5 Mtep. En estos dos países el consumo de biomasa está más extendido a escala industrial dado el gran número de empresas de transformación de la madera y de fabricación de papel que allí existen. España ocupa el cuarto lugar por orden de importancia cuantitativa con 3,6 millones de tep.

Existen una serie de factores que condicionan el consumo de biomasa en los países europeos y que hacen que éste varíe de unos a otros, tanto cuantitativamente como en el aprovechamiento de la energía final. Estos factores se pueden dividir en tres grupos:

- Factores geográficos: Inciden directamente sobre las características climáticas del país condicionando, por tanto, las necesidades térmicas que se pueden cubrir con combustibles biomásicos.
- Factores energéticos: Dependiendo de los precios y características del mercado de la energía en cada momento, se ha de decidir si es o no rentable el aprovechamiento de la biomasa como alternativa energética en sus diversas aplicaciones.
- Disponibilidad del recurso: Hace referencia a la posibilidad de acceso al recurso y la garantía de su existencia. Estos factores son los más importantes

ya que inciden directamente tanto en el consumo energético de biomasa como en sus otras posibles aplicaciones.

Como ya se ha mencionado, las aplicaciones a las que va destinado el consumo de biomasa varían mucho de unos países a otros. Se muestra en el gráfico siguiente cómo distribuyen los países su consumo de biomasa entre el sector industrial y el sector doméstico y servicios.

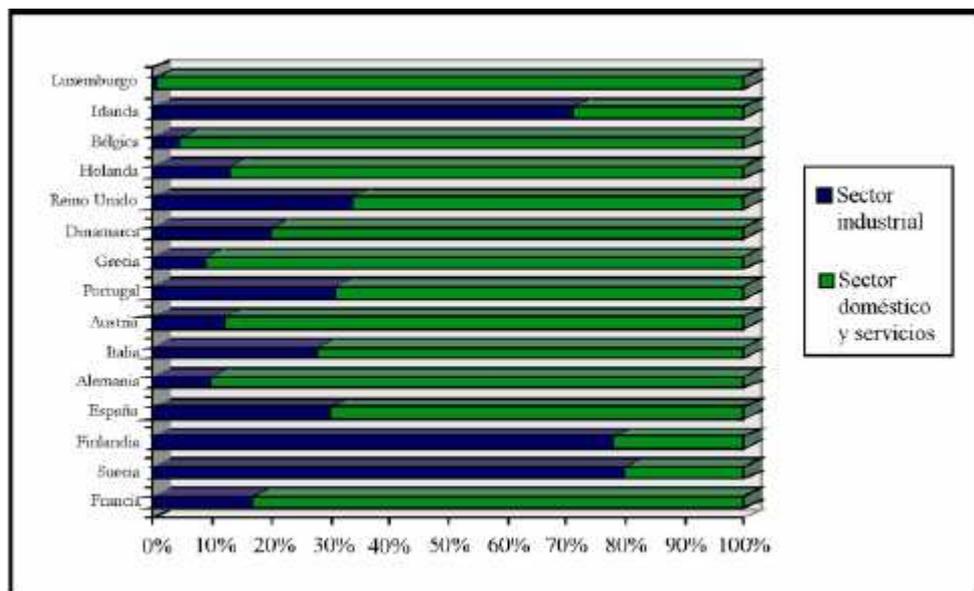


Figura 7. Distribución del consumo de biomasa en los países de la UE.

En cuanto a las perspectivas del uso de los combustibles biomásicos en Europa hay que destacar que además de las ventajas energéticas que supone, el desarrollo de sector puede tener unas repercusiones muy favorables en otros campos. El aspecto medioambiental es uno de los más importantes. La reducción de emisiones contaminantes (CO_2 , NO_x , SO_2) a la atmósfera es uno

de los objetivos primordiales de la Unión Europea. Por otra parte, el aprovechamiento energético de los residuos forestales puede contribuir a reducir los costes de la limpieza de los bosques.

La utilización de los cultivos energéticos también cuenta con un gran potencial de desarrollo en determinadas regiones de Europa al igual que el aprovechamiento energético del biogás generado en la digestión anaerobia de los residuos ganaderos y los lodos de depuración de aguas urbanas.

La elaboración de biocarburantes a partir de productos agrícolas es también una alternativa a tener en cuenta no sólo por la reducción de la contaminación atmosférica ocasionada por los vehículos a motor sino también por contribuir a la diversificación de las actividades en el mundo rural. Según las previsiones de la Comisión Europea, se estima que en el año 2010 los biocarburantes podrían conseguir una participación del 3% en el consumo de energía del sector del transporte europeo.

1.4.2 La biomasa en el contexto de América

1.4.2.1 La biomasa en el gigante del norte

Las energías renovables no constituyen una fuente apreciable dentro de la distribución de consumo de energía en los Estados Unidos. Tanto en la historia como en las proyecciones las energías renovables, y dentro de estas la

biomasa, no se contemplan como un renglón importante en la matriz energética local. Antes que estas se privilegian las tecnologías en el uso de los combustibles fósiles emergentes, es decir el carbón y el gas natural. Como podemos observar en las proyecciones contenidas en la Figura 8.

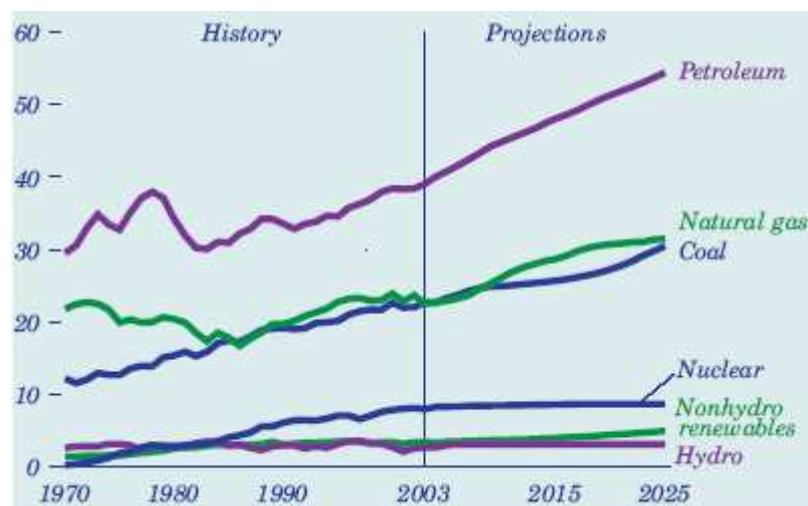


Figura 8. Consumo de energía por combustible en los Estados Unidos, 1970-2025 (quadrillones de BTU)¹¹

Este fenómeno es aun más apreciable en la generación de electricidad donde el gas natural es responsable de 630 billones de kWh en 2003 ocupando el segundo lugar dentro de los combustibles utilizados para esta tarea. Además las proyecciones esperan que en 2025 las plantas eléctricas de gas natural produzcan 1406 billones de kWh. El uso de las tecnologías renovable se

¹¹ Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2005 Overview.

espera que tenga un crecimiento bastante moderado y representaba en el 2003, 359 billones de kWh. Mientras que en el 2025 se proyectan 489 billones de kWh provenientes de las tecnologías renovables incluyendo la cogeneración.

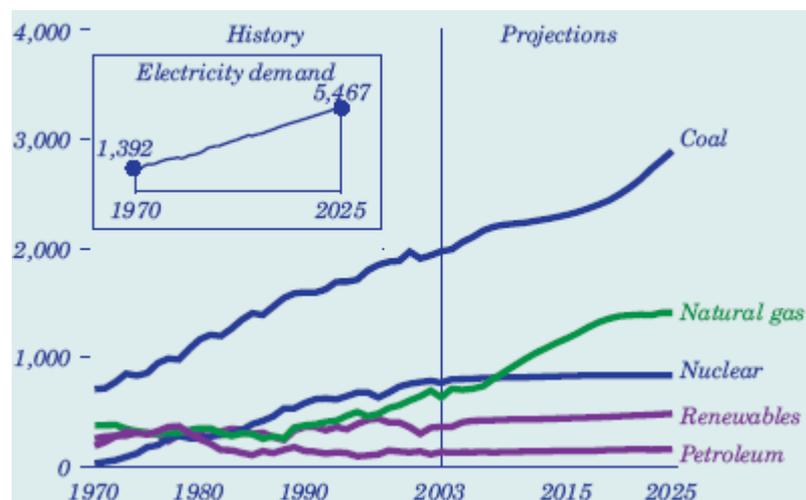


Figura 9. Generación de electricidad por combustible en los Estados Unidos, 1970-2025 (billones de kWh)¹²

Siendo este el panorama de consumo en los Estados Unidos la producción de energía inevitablemente seguirá el mismo patrón concentrándose en el incremento de la producción de gas natural. Relegando la producción de combustibles alternativos y otras tecnologías renovables a pesar de la necesidad de importación que su alta dependencia en combustibles fósiles genera.

¹² *Ibíd.*

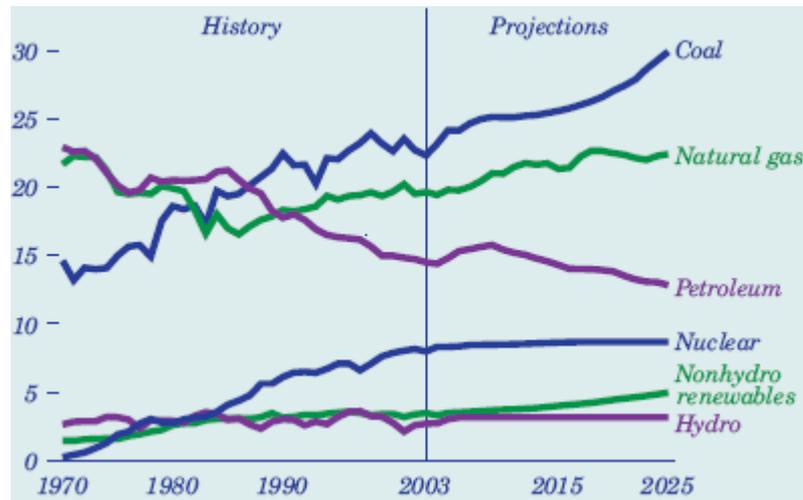


Figura 10. Producción de energía por combustible en los Estados Unidos, 1970-2025 (quadrillones de BTU)¹³

A pesar del panorama desalentador de crecimiento para las energías renovables, en Estados Unidos si se realizan esfuerzos en el campo de la investigación y desarrollo con miras a la consolidación de programas en pro de la utilización de biomasa como fuente renovable de recursos para el consumo domestico. En la actualidad el departamento de energía de los Estados Unidos esta desarrollando lo que en este país se conoce como el programa de biomasa se divide en cinco secciones bien definidas

- Investigación y Desarrollo (I&D) de la interfase de suministros
- I&D de la plataforma del azúcar
- I&D de la plataforma termoquímica
- I&D de productos
- Biorefinerías integradas

¹³ *Ibíd.*

La interfase de suministros se centra en el desarrollo de suministros viables de biomasa para las dos plataformas siguientes. La plataforma del azúcar se interesa por el desarrollo de la capacidad para la utilización de biomasa para producir azúcares que puedan ser utilizadas para la producción de combustibles, otros químicos y materiales.

La plataforma termoquímica ahonda en el tema de la energía proveniente de la biomasa. Esta plataforma busca asegurar que las tecnologías de gasificación de biomasa sean compatibles con la producción de combustibles y químicos basándose en tecnologías actualmente disponibles para el petróleo.

La plataforma de productos orienta sus esfuerzos a la reducción de la dependencia de combustibles extranjeros y a la creación de una bioindustria domestica eliminando la brecha entre el desarrollo de tecnologías y el mercado interno.

Por ultimo la plataforma de biorefinerías integradas tiene como objetivo ayudar al establecimiento de biorefinerías a través de la alianza entre la industria y la academia siendo esta la culminación del trabajo de I&D realizado por las demás áreas del programa.

Este tipo de programas en los Estados Unidos no solo son muy importantes para la economía domestica, también revisten gran importancia a nivel mundial

debido a la posición de los Estados Unidos como contaminante global. En 2003 las emisiones de dióxido de carbono alcanzaron los 5789 millones de toneladas métricas. El crecimiento de las emisiones solo en este contaminante se espera que aumenten a 8062 millones de toneladas métricas en el 2025 a una tasa de crecimiento anual de 1.5 por ciento.

En resumen hay esfuerzos importantes en el campo del uso sostenible de biomasa como recurso renovable y limpio. Sin embargo, los esfuerzos de Estados Unidos resultan ínfimos comparados con el tamaño de su economía en ambos campos el productivo y el ambiental.

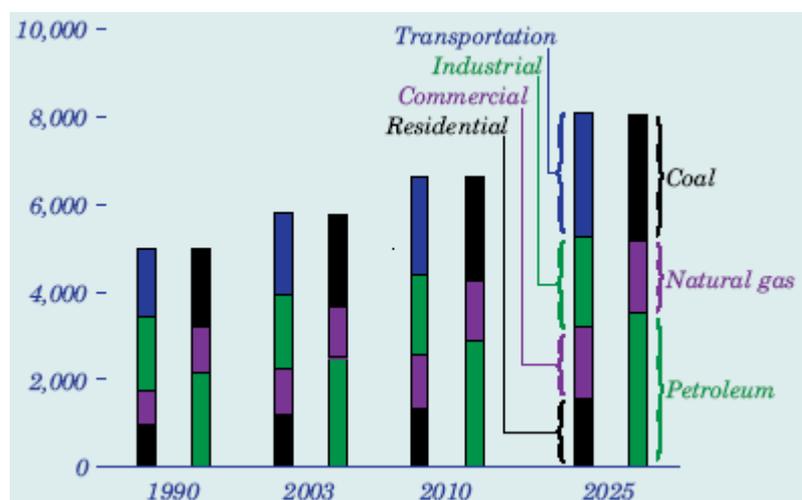


Figura 11. Emisiones proyectadas de dióxido de carbono por sector y combustible, 1990-2025 (millones de toneladas métricas)¹⁴

¹⁴ Ibíd.

1.4.2.2 La biomasa en el contexto de Brasil

Hace aproximadamente 30 años, el 40% de la energía primaria provenía de la biomasa fundamentalmente de la leña, hoy en día la atención se vuelca a la producción de energía barata y limpia es decir renovable.

Para este propósito se dispone de 90 millones de hectáreas para ser aprovechados sin mayores impactos ambientales.

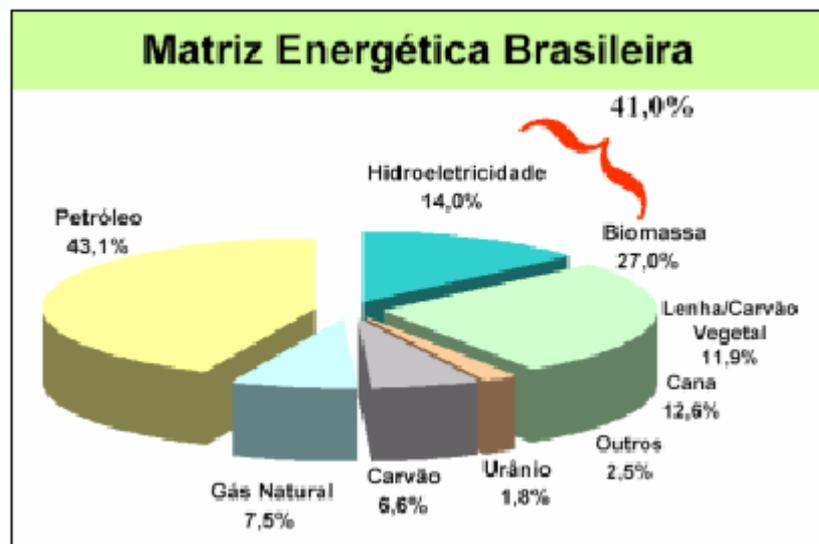


Figura 12. Distribución energética de Brasil.¹⁵

Colocando a la biomasa en el segundo renglón entre las fuentes energéticas que se utilizan en Brasil. Sabemos que Brasil es uno de los grandes productores agrícolas del mundo debido a la gran producción de materias primas y los bastos procesos agroindustriales se generan grandes cantidades de residuos de los cuales señalamos los más importantes en la tabla 2:

¹⁵ Fuente MME 2005

| Matéria Prima | Produção Agrícola (tons)* | Produção de Resíduos (tons)** |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Cana (bagaço) | 396.012.158 | 59.401.824 |
| Arroz (casca) | 10.334.603 | 2.937.094 |
| Café (casca) | 2.454.470 | 1.662.658 |
| Mandioca (rama) | 21.961.082 | 6.542.206 |
| Milho (palha e sabugo) | 48.327.323 | 64.028.870 |
| Soja (restos de cultura) | 51.919.440 | 80.746.839 |
| Mamona | 111.100 | - |
| Algodão | 2.199.268 | - |

Tabla 2 Principales residuos agroindustriales en Brasil.¹⁶

PRODUCCIÓN FORESTAL DE BRASIL.

Brasil es uno de los mayores productores de madera en el mundo proveniente de la reforestación, de los cuales se están utilizando 2.965.000 ha de eucalipto las cuales dejan unos residuos de aproximadamente 16.8 millones de toneladas al año de cáscara, y por otra parte se tienen los pinos de los cuales se está utilizando aproximadamente un área de 1.840.050 ha de producción de las cuales se obtienen al año unos aproximadamente 2.2 toneladas de cáscara de pino lo que muestra obviamente que la producción de Brasil en este ámbito es bastante grande en comparación con otros países.

A continuación se muestra un panorama del uso de la leña en Brasil para el año del 2002:

¹⁶ IBGE 2004 calculado en Base seca.

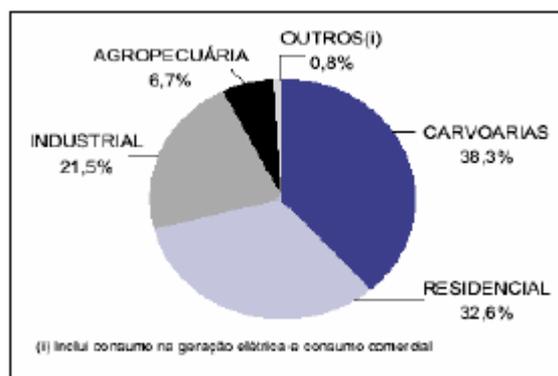


Figura 13. Panorama del uso de leña en Brasil en el año 2002¹⁷

Como bien podemos ver en la figura anterior el consumo de leña en Brasil es bastante elevado y por ende los volúmenes de producción deben satisfacer la demanda que este exige, por lo tanto se les muestra a continuación una tabla la cual podemos observar los volúmenes de consumo de madera para la generación de energía teniendo en cuenta si trata de eucalipto, pinos, acacias, entre otros:

| Gênero | Volume (m ³) |
|--------------|--------------------------|
| Eucalipto | 1.823.204,82 |
| Pinus | 2.013.607,28 |
| Araucária | 1.451,00 |
| Acácia | 0,00 |
| Outros | 531.475,00 |
| TOTAL | 4.369.738,10 |

Tabla 3. Volumen de consumo de empresas para producción de energía¹⁸

¹⁷ Bracelpa 2002

¹⁸ Bracelpa 2003

En cuanto a los residuos forestales, los cuales básicamente son los que se utilizan para la generación de energía hay que decir que estos se recolectan de manera organizada y se transportan a unos patios en donde se le realizan los tratamientos necesarios para lograr la creación de otro tipo de propiedades y así llegar a obtener un buena calidad de energía.

Cada vez que se realiza este proceso se obtiene un volumen de aproximadamente 1.5 o 1.6 m³ de material sólido (cuando se realiza la recolección), y tiene un peso aproximado de 500 Kg. En cuanto a la energía producida hay que decir que esta varía entre 2.5 y 3.5 MWh lo cual es equivalente a 100 litros de combustible.



Figura 14. Proceso de recolección de los residuos de madera.¹⁹

¹⁹ UNICAMP

PANORAMA DEL SECTOR AZUCARO ALCOLERO EN EL AÑO 2004

Brasil es el mayor productor de caña de azúcar del mundo debido a que este país produce aproximadamente el 25% del total de la producción mundial y además de eso es responsable del 13.5% de producción mundial de azúcar y en lo que constituye una cifra aun más importante produce el 55% de bioetanol en el mundo.

| | |
|---|-------------|
| Área plantada (ha)* | 5.434.818 |
| Produção cana (ton)* | 397.740.542 |
| Rendimiento/(ton/ha*) | 73.184 |
| Produção de álcool (m ³) ** | 14.639.923 |

Tabla 4. Producción, rendimiento, área de la caña de azúcar, y producción de alcohol.²⁰

Según los datos encontrados gracias a las investigaciones que hemos realizado en documentos que hablan de la producción de caña de azúcar en brasil podemos afirmar que la energía producida en dicho país por el producto mencionado es de 600 (GJ), esta cantidad es producida en 1 hectárea en la cual se producen 82 toneladas de residuos de caña de azúcar en 13 (TEP).

²⁰ IBGE Y DAA/SPC/MAPA 2004



Figura 15. Proceso de recolección de la caña de azúcar

Hay que mencionar que la caña se aprovecha de distintas maneras y por ende este tipo de producción arroja una cierta cantidad de energía la cual la han distribuido de la siguiente manera:

- 145 Kg. de azúcar producen 2300 MJ de energía.
- 140 Kg. de fibra de bagazo producen 2500 MJ de energía.
- 140 Kg. de fibra de palma producen 2500 MJ de energía.

A continuación mostraremos un recuadro que muestra la tasa de crecimiento de la plantación de caña de azúcar en brasil y además un panorama dirigido hacia el futuro, que tanto puede aumentar la plantación de caña de azúcar debido a la demanda de producción de Bioetanol a nivel mundial.

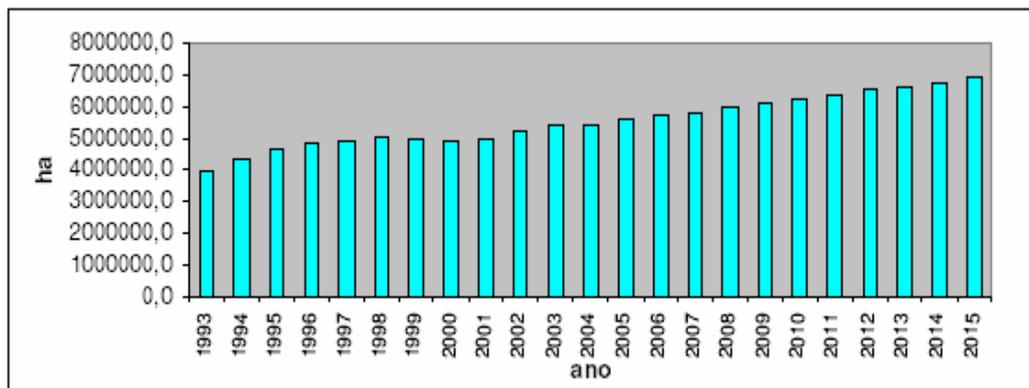


Figura 16. Panorama del crecimiento del área plantada en brasil de caña de azúcar.²¹

Esta figura lo que muestra es la tasa de crecimiento del área plantada desde el año 1993 hasta el año 2004 la cual es de 134.706,5 de hectáreas al año. Lo que muestra un índice alto de crecimiento de la plantación aunque apenas representa el 1.5 del área agricultora en todo el país.

Ahora se muestra como esta creciendo la demanda de producción de caña de azúcar en brasil en los últimos años ya que estos datos han marcado la historia de este sector en dicho país.

Esta figura lo que nos muestra es la producción de barriles de bioetanol que se producen anualmente en brasil.

²¹ IBGE 2004

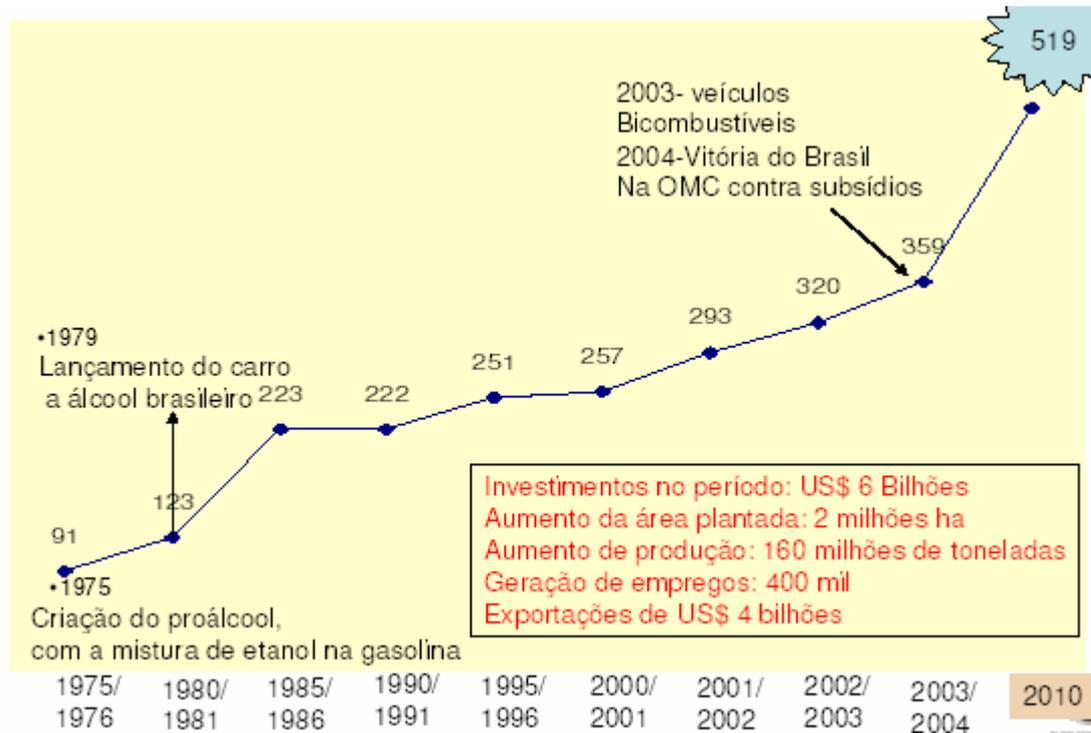


Figura 17. Producción de biocombustibles por año en millones de toneladas.²²

En esta figura también se muestra cual es el crecimiento del PIB (producto interno bruto) el cual aumenta anualmente del 3 a 4%, por otra parte podemos observar que en la industria automotriz se ve un alza de aproximadamente 5 al 6% en las ventas de vehículos los cuales, se les pronostica que para el 2007 el 67% de los carros nuevos trabajaran con el 75% de bioetanol.

²² Ibíd.

CÁSCARA DE ARROZ EN EL USO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN BRASIL.

La cáscara de arroz representa el 20% del peso del grano. Al quemar estos residuos para la generación de sistemas termoeléctricos podrían generar unos aproximados 200MW de energía en brasil lo cual equivale al 1% de la energía producida en todo el país lo cual nos dice que este volumen de energía es suficiente para poder abastecer una ciudad de más de 800 mil habitantes.

A continuación se muestra una tabla que ilustra el potencial de generación de energía a partir de la cáscara del arroz.

| | Arroz (milhões de t) | Casca (milhões de t) | Energia (MW) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Produção - Brasil | 10,65* | 2,07 | 200** a 258 |
| Produção - RS | 5,46* | 1,09 | 109 a 136 |
| Beneficiamento - RS | 3,80 | 0,76 | 76 a 95 |

Tabla 5. Potencial de generación de energía de la cáscara de arroz.

La generación de energía a partir de cáscara de arroz tiene sus ventajas entre las cuales están la preservación del medio ambiente, disminuye el costo de transporte y almacenamiento del residuo industrial del arroz, reduce gastos con respecto al uso de la energía eléctrica.

1.5 Situación del maíz en Cartagena

1.5.1 Composición de la planta

La planta de maíz, *Zea Mays*, se divide en: tallo, hojas, espiga, capacho (envoltura que cubre la mazorca), y por supuesto la mazorca que contienen los granos, alojados a su vez en un conjunto denominado tusa. Durante su crecimiento la evolución del peso de las distintas partes constituyentes de la planta fue evaluada en un experimento llevado a cabo por E. C. Millar que arrojó los resultados de la Fig. 1. en la que podemos advertir las semanas en las cuales cada parte alcanza su mayor peso. Con esta información sería incluso posible plantear una recolección selectiva de los residuos para optimizar los procesos en los que estos serán utilizados. Es de especial interés la semana 13 en la cual los tallos, las hojas y el capacho alcanzan la plenitud de su peso.

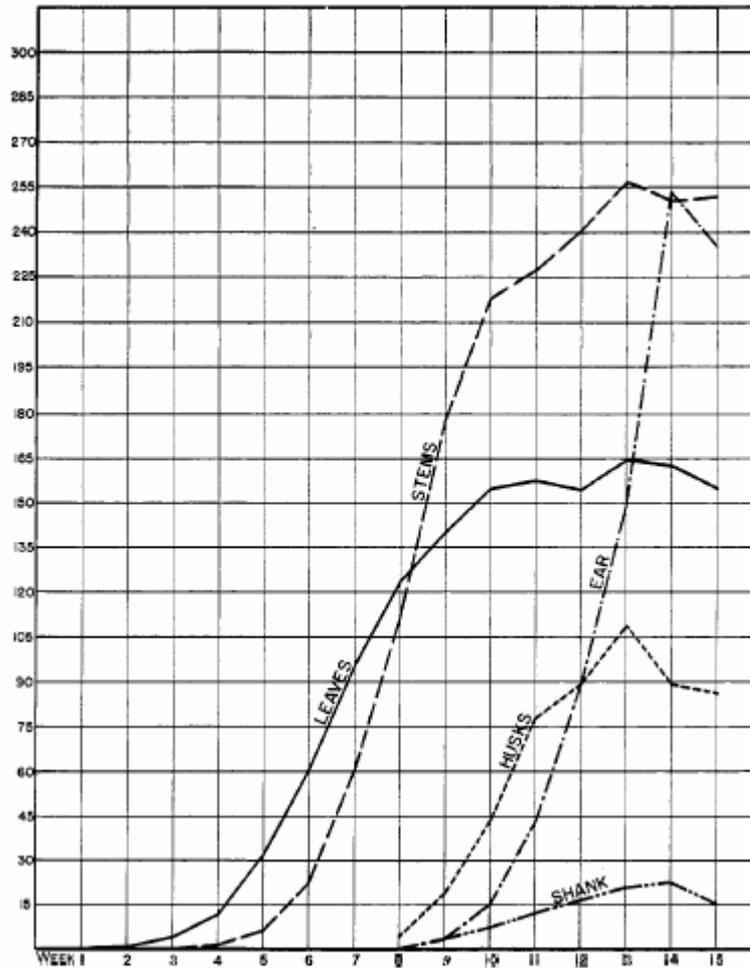


Figura 18. El peso promedio en gramos de cada parte de la planta de maíz al final de cada semana durante las temporadas de crecimiento de 4 años consecutivos. Leaves = hojas, stems = tallos, husks = capacho, ear = espiga, shank = tusa²³

²³ Miller, E. C. Relation between age and dry weight of the corn plant. 1943.

1.5.2 Producción de maíz

Actualmente en Bolívar podemos encontrar dos etapas distintas en cuanto al cultivo del maíz. En primer lugar tenemos los cultivos tradicionales. Estos habitualmente suelen mezclarse con cultivos de yuca o ñame. En segundo lugar observamos los cultivos tecnificados en los cuales se realiza un mayor aprovechamiento de los recursos y se utilizan mayores extensiones de tierra y producen más toneladas por hectárea que los tradicionales. El maíz tecnificado, sin embargo, todavía no está muy extendido en nuestro territorio. Este hecho probablemente convierte al maíz tradicional en la mejor opción en cuanto a volúmenes de producción bruta.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|--------------------|---------|---------|----------------------|
| Maíz Tecnificado | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 6260 | 6390 | 2% |
| Área Cosechada(Ha) | 6010 | 6390 | 6% |
| Producción(Tons) | 23930 | 26015 | 8% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 3981.70 | 4071.21 | 2% |
| Maíz Tradicional | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 62950 | 71629 | 12% |
| Área Cosechada(Ha) | 58256 | 66941 | 13% |
| Producción(Tons) | 105516 | 116469 | 9% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 1811.25 | 1739.88 | -4% |

Tabla 6. Producción de maíz tecnificado y tradicional²⁴

²⁴ Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaría de agricultura de la gobernación de Bolívar.

En la Tabla 6 podemos admirar las diferencias anteriormente citadas entre las dos culturas de cultivo. Entre los datos más relevantes en el maíz tecnificado observamos la cantidad de hectáreas cosechadas que se encuentran convenientemente cerca al número de hectáreas sembradas. En cuanto al maíz tradicional observamos que, a pesar del gran crecimiento de las hectáreas sembradas y cosechadas. Se obtiene una disminución de 4% en la proporción de kilogramos de grano producido a número de hectáreas cosechadas.

1.5.3 Descripción de los residuos

El tallo de la planta es una caña cilíndrica que crece hasta alrededor de dos metros su interior es de una consistencia esponjosa. Las hojas son de forma alargada y ensanchada son de color verde en un principio tornándose amarillas de manera paulatina.

La espiga aloja la parte masculina del aparato reproductivo de la planta responsable de la producción del polen necesario para la polinización. El capacho tiene una estructura fibrosa y presenta un color verde.

La tusa como mencionamos anteriormente es un conjunto compuesto por anillo, salvado fino y grueso y corazón.

El anillo es de una textura leñosa, presenta un color blanco a rosado tenue.

Tiene una dimensión de entre 3 y 4mm y se sitúa entre el corazón y el salvado.

El salvado fino esta formado por una estructura que se conoce con el nombre de glumas. En este caso por las glumas externas. El salvado grueso se forma de las mismas estructuras que el anterior. Ambos, el salvado fino y el salvado grueso, son de una textura leñosa, dura y de un color blanco o matices de blanco. El corazón representa poco del peso de la tusa es de color blanco intenso y es esponjoso.

1.6 Situación del arroz en Cartagena

1.6.1 Composición de la planta

El arroz se clasifica en el género *Oryza* de la familia de las Gramíneas (Gramineae). Casi todas las variedades cultivadas derivan de la especie *Oryza sativa*



Figura 19. Planta de arroz en un campo inundado.

La planta de arroz esta compuesta básicamente por las siguientes partes: el tallo, las hojas, la espiga y el grano con cáscara. El tallo es de color verde con forma cilíndrica. Las hojas son de color verde y forma alargada. La espiga inicialmente es de un color verdoso pero se torna de un color amarillo que llega a ser muy intenso en el momento de la cosecha. El grano con cáscara es llamado arroz paddy en el momento de la cosecha es amarillo dado que este es el color de la cáscara.

1.6.2 Producción de arroz

El 89.4 % del arroz que se produce en Bolívar se cultiva en la modalidad de seco, el resto que es aproximadamente el 10.6 % es de la modalidad de riego. Las cosechas se hacen dos veces al año y su época de recolección es en los meses de enero y diciembre, julio y agosto donde en su mayoría los sistemas de producción son mecánicos donde la producción es de 64720 toneladas. En bolívar el municipio con mayor producción es Maria la Baja el cual se encuentra relativamente cerca de la ciudad de Cartagena y por ende sería bastante sencillo su transporte lo que se quiere decir es que costos de generación de energía utilizando estos residuos serian relativamente bajos.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|-----------------------|---------|---------|----------------------|
| Arroz Riego | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 2540 | 3445 | 26% |
| Área Cosechada(Ha) | 2540 | 3445 | 26% |
| Producción(Tons) | 15780 | 22503 | 29% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 6212.60 | 6532.08 | 5% |
| Arroz Secano Manual | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 8030 | 8745 | 8% |
| Área Cosechada(Ha) | 8030 | 8295 | 3% |
| Producción(Tons) | 20248 | 18767 | -8% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 2521.54 | 2262.45 | -11% |
| Arroz Secano Mecánico | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 16377 | 20183 | 19% |
| Área Cosechada(Ha) | 16372 | 15550 | -5% |
| Producción(Tons) | 70102 | 64720 | -8% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 4281.82 | 4162.06 | -2% |

Tabla 7. Producción de arroz en los sistemas riego, secano manual y secano mecánico²⁵

En la Tabla 7 se pueden observar las diferencias entre los tres sistemas los cuales muestran que las modalidades de secano mecánico y de riego están creciendo en cuanto a hectáreas se refiere por sobre la modalidad de secano

²⁵ Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaria de agricultura de la gobernación de Bolívar.

manual. Esto es un hecho positivo ya que estas dos modalidades tienen un mayor rendimiento en producción y utilizan procesos más tecnificados cuya buena cultura puede favorecer a la recolección de los residuos.

En la producción del arroz el proceso sigue las siguientes etapas:

- Recolección mecánica o manual.
- Secamiento y limpieza.
- Almacenamiento.
- Trillado y pulido.
- Disposición de desechos.

En primer lugar se realiza la recolección ya sea mecánica o manual. En caso de realizarse de manera mecánica la maquina se encarga de separar el arroz paddy del resto de los residuos. Luego para almacenar el grano este debe ser secado y limpiado. El arroz paddy debe almacenarse a una humedad menor del 14 %. Posteriormente el arroz paddy se almacena para luego ser trillado y pulido obteniendo así el arroz blanco.

1.6.3 Descripción de los residuos

En la recolección mecánica o manual del arroz se genera como desecho el tamo que se encuentra formado por las hojas, los tallos y los granos descartados. Este tamo también conocido como paja esta inicialmente húmedo,

sin embargo, debido a que se deja en el suelo se seca en un tiempo relativamente corto.

Durante el trillado y pulido del arroz paddy se genera un segundo desecho constituido por la cáscara.

1.7 Situación del algodón en Cartagena

1.7.1 Composición de la planta

La planta de algodón esta compuesta básicamente por el capullo o yema floral inmadura. Esta se transforma posteriormente en una bola oval, que al madurarse se abre y desprende un gran numero de semillas de color café o también pueden ser de color negro; las cuales están cubiertas de una masa de pelos blancos. Luego de que estos se secan y que se maduran, podríamos decir que cada uno de estos pelos es una célula aplanada tubular la cual se encuentra unida a la semilla. Para seguir dando detalles acerca de la planta de algodón hay que agregar que las longitudes de cada una de las fibras individuales son aproximadamente de entre 1, 3 y 6 cm., para terminar con esta descripción debemos comentar que de las semillas también salen otras fibras de un menor tamaño. La otra parte de la planta es la soca compuesta principalmente por el tallo y las hojas. Las hojas son verdes y poseen una estructura en el envés con forma de copa cuya función es el almacenamiento

de néctar. El tallo es alargado con longitudes entre 0.5 y 2m, esbelto y cilíndrico con diámetros de 1 a 5cm; de un rojizo.



Figura 20. Planta de algodón madura.

1.7.2 Producción del algodón

El proceso de producción del algodón se divide en dos. En primera instancia esta el proceso de producción agrícola. En segundo lugar esta el desmote del producto. La primera parte del proceso comprende todas las actividades necesarias para la obtención del algodón-semilla desde la preparación del terreno hasta la cosecha final. La recolección del algodón puede realizarse manual o mecánicamente. En este proceso la soca permanece en el campo como desecho.

El desmote se realiza en una planta desmotadora. En esta etapa la semilla es separada de la fibra. En este proceso la merma es el desecho generado.

El aparato industrial que se fundamenta en el algodón va más allá de estas dos etapas anteriormente mencionadas. La semilla puede ser utilizada para la obtención de aceite y por su puesto para el cultivo de esta planta. En estos dos procesos se genera un desecho que se conoce como línter. Además en la extracción del aceite se hace necesaria la separación de la cáscara que recubre la semilla.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|--------------------|---------|---------|----------------------|
| Algodón | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 2074 | 3963 | 47% |
| Área Cosechada(Ha) | 2070 | 3827 | 45% |
| Producción(Tons) | 3490 | 6770 | 48% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 1685.99 | 1769.01 | 5% |

Tabla 8. Producción de algodón 2003 y 2004²⁶

En la Tabla 8 observamos que la superficie sembrada y por tanto la producción de algodón esta aumentando significativamente.

²⁶ Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaría de agricultura de la gobernación de Bolívar.

1.7.3 Descripción de los residuos

El primer residuo generado en el proceso de producción del algodón es la soca constituida por los tallos las hojas y la capsulas. Los tallos, que son el principal elemento constitutivo, ya fueron descritos anteriormente. Este residuo se genera durante la recolección del algodón-semilla, que se realiza casi en su totalidad de manera manual. Sea mecánica o manual su recolección, este residuo permanece en el suelo de cultivo disperso en el campo.

Un segundo residuo que se produce en las desmotadoras es la llamada merma constituida por tallos, hojas, tierra y fibra que permanece en el algodón semilla luego de su recolección.

Otro material que anteriormente era considerado un residuo es la semilla. La semilla se ha convertido en la actualidad en otro subproducto pues puede ser utilizado para la extracción de aceite y de un subproducto denominado torta de algodón. Para la obtención de estos dos subproductos se hace necesario remover la cáscara que recubre la semilla, generando así otro residuo.

Además de la cáscara, en el proceso para la obtención de la semilla desnuda, se genera un residuo conocido como línter. El línter esta constituido por fibras que no fueron removidas durante el proceso de desmote. Además de ser producido como residuo en la extracción de aceite, el línter es formado también en la obtención de semillas para cultivo.

1.8 Situación del sorgo en Cartagena

1.8.1 Composición de la planta

El sorgo pertenece a la familia de las gramíneas, la familia más extensa de plantas con flor y la más importante a nivel económico y ecológico. El sorgo es un cereal resistente a condiciones de temperatura y sequía. En condiciones normales alcanza hasta 3 metros de altura. Pero se han desarrollado variedades enanas que solo llegan a casi un metro. Las semillas están dispuestas en estructuras llamadas panículas apicales comúnmente denominadas panojas. Las panojas cargan el grano maduro y son recolectadas durante la cosecha.

Las hojas adquieren un color verde oscuro a veces claro o amarillo cuando la planta alcanza su madurez. Presentan una forma achatada de bordes alargados. El ancho de la hoja más grande está comprendido entre 5 y 12 centímetros.



Figura 21. Grano de sorgo.

Los tallos tienen una longitud de entre medio metro y poco más de un metro. Son de forma cilíndrica. Poseen una película de cera y una corteza gruesa, que esconde un interior seco o ligeramente jugoso.

1.8.2 Producción del sorgo

En Bolívar el sorgo se cultiva dos veces al año. Como se observa en la Tabla 10 el área sembrada con sorgo al año es de un tamaño considerable, el área más grande dentro de los cultivos aquí reseñados. También podemos observar los grandes volúmenes de producción obtenidos para este cereal. Los rendimientos por hectárea sembrada permanecen normalmente fluctuantes entre 3 y 4 toneladas por hectárea. Esto debido a que el sorgo se utiliza como cultivo de rotación para el algodón en función de las precipitaciones y calidades del suelo.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|--------------------|---------|---------|----------------------|
| Sorgo | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 11120 | 14035 | 21% |
| Área Cosechada(Ha) | 11120 | 14035 | 21% |
| Producción(Tons) | 46098 | 46071 | 0% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 4145.50 | 3282.58 | -26% |

Tabla 9. Producción de Sorgo 2003 y 2004²⁷

²⁷ Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaría de agricultura de la gobernación de Bolívar.

El proceso de producción del sorgo inicia con la cosecha que se realiza fundamentalmente de manera mecánica cuando la planta alcanza una humedad de entre 15 y 18%. Los granos pueden tomar dos caminos en el proceso. En su mayoría va a plantas de concentrados donde se producen alimentos para animales. Un segundo destino lo constituyen las plantas productoras de semilla. En ninguno de estos procesamientos industriales se generan desechos apreciables para ningún uso en particular.

1.8.3 Descripción de los residuos

En el proceso productivo del sorgo no hay desechos agroindustriales. Solo podemos encontrar desechos de la agricultura. Estos desechos son generados durante la recolección del sorgo y consisten en las hojas y tallos que quedan dispersos en el campo de cultivo luego de la cosecha.

Los tallos son en un 26.1% fibra, un 66.2% de extracto no nitrogenado, 3.9% ceniza, 3% proteína y 0.8% extracto de éter. Posee un poder calorífico de 3000kcal/kg.²⁸ Las hojas son en un 29.9% fibra, un 51.1% de extracto no nitrogenado, 8.2% ceniza, 7.7% proteína y 3.1% extracto de éter. Posee un poder calorífico de 3000kcal/kg.²⁹

²⁸ Cárdenas, Héctor W. Devia, Jorge R. Situación energética de la costa atlántica Residuos agropecuarios. Pesenca. Barranquilla 1989.

²⁹ *Ibíd.*

1.9 Situación de la yuca en Cartagena

1.9.1 Composición de la planta

La yuca, mandioca o casava es una planta que crece en regiones con climas tropicales. Es un arbusto frondoso y ramificado. Alcanza los 2.5 metros de altura. Genera flores de color amarillo verdoso. El tallo es de colores que van desde el carmelita oscuro hasta el gris claro pasando por varios matices de rojo. El diámetro del tallo es de 2 a 4 centímetros. Las hojas también presentan gran variedad de colores que van desde el color verde hasta rojizo. Color que se acentúa en el pecíolo. La raíz alcanza incluso 8cm de diámetro y 90 centímetros de longitud.

Existen dos variedades de yuca, la amarga o toxica y la dulce o no toxica. Esta toxicidad es volátil de manera que es posible eliminarla mediante el suministro de calor.

La yuca es un arbusto perenne que se propaga por medio de material vegetativo. Los tacones son una estructura de constitución leñosa y diámetros que varían entre 5 y 10 centímetros con una longitud de entre 30 y 40 centímetros que sirve de sostén para el tubérculo.

1.9.2 Producción de la yuca

La yuca o mandioca suele cultivarse en asocio con otros frutos. En Bolívar es común que se encuentre asociada con el ñame. La yuca se cosecha una vez al año con rendimientos de más de 10 toneladas por hectárea al año. La recolección tiene lugar luego de 10 a 12 meses de haber sido sembrada.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|--------------------|----------|----------|----------------------|
| Yuca | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 30602 | 32587 | 6% |
| Área Cosechada(Ha) | 27988 | 28976 | 3% |
| Producción(Tons) | 321368 | 315066 | -2% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 11482.35 | 10873.34 | -6% |

Tabla 10. Producción de Yuca 2003 y 2004³⁰

La yuca se cosecha en dos fases. Durante la primera fase se cortan las hojas y los tallos llamados follaje. Mientras que en la segunda fase se extraen los tubérculos dejando en el campo los tacones.

La agroindustria alrededor de la yuca tiene tres núcleos de trabajo. En primer lugar el consumo humano directo para el cual es necesario remover la cáscara. El segundo uso de la yuca como producto es su utilización como forraje para el

³⁰ Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaría de agricultura de la gobernación de Bolívar.

cual se hace necesario picar y secar la yuca mas ya que estos procesos se realizan aun con cáscara no se generan desechos. El ultimo uso agroindustrial es la utilización de la yuca para la producción de almidón de yuca mas este uso no esta muy extendido en el territorio colombiano pero puede resultar de interés en el futuro a mediano plazo.

1.9.3 Descripción de los residuos

Durante la recolección de la yuca, que se realiza en dos fases como se mencionó anteriormente, se generan varios residuos. Durante la primera fase se cortan las hojas y tallos que forman el follaje. El follaje yace en el campo de cultivo como primer residuo. Durante la segunda fase al extraer la yuca quedan los tacones la estructura que le proveía sostén como residuo en el campo.

El follaje fue descrito en apartados anteriores. Esta compuesto por los tallos que presentan una forma cilíndrica y confieren al arbusto su altura. Las hojas presentan anchos de entre 1.5 y 5 centímetros.

1.10 Situación de la ñame en Cartagena

1.10.1 Composición de la planta

El ñame es una planta originaria de regiones tropicales. Pertenece al género de las monocotiledóneas. El tubérculo del ñame, que constituye la parte comestible, puede alcanzar hasta 2.5 metros de longitud y 45kg de peso. Las flores inconspicuas son de color blanco o amarillo verdoso. Las flores se agrupan en racimos o espigas. El cáliz de las flores presenta seis piezas mientras que la corola posee seis lóbulos, seis estambres y un pistilo. El fruto de las flores es una capsula que dispone de tres alas membranosas.

Existen otras especies, además de la común ya reseñada, que se siembran alrededor del mundo. El barbasco o cabeza de negro, *Discorea mexicana*, es una especie silvestre que se siembra en zona tropical. Tiene valor para la industria farmacéutica debido a que su rizoma se utiliza como materia prima en la fabricación de hormonas sintéticas. El ñame de China, *Discorea batatas*, forma tubérculos muy gruesos y de hasta un metro de longitud. La papa voladora, *Discorea bulbifera*, es originaria del sureste asiático y da tubérculos aéreos de varios kilogramos. Ninguna de estas variedades se siembra en Cartagena. En Bolívar se siembra la especie denominada ñame de agua, *Discorea alata*.



Figura 22. Ñame

1.10.2 Producción del ñame

En Bolívar el ñame se siembra en una gran extensión del territorio. Se asocia con yuca en la mayoría de las áreas sembradas. El cultivo de este tubérculo produce rendimientos grandes de más de 13 toneladas por hectárea al año. La recolección del ñame es en su totalidad manual. A pesar de que la cosecha se puede realizar entre los 6 o 7 meses, cuando el tubérculo alcanza la plenitud de su peso y el follaje esta todavía verde, en Bolívar la recolección se realiza de manera anual cuando la parte aérea de la planta esta seca. Luego de la extracción de los rizomas; por medio de cavadores o barretones con el suelo húmedo, queda en el suelo del campo el follaje compuesto por las hojas, los tallos y las flores que se dan muy poco en las variedades plantadas en Bolívar.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|--------------------|----------|----------|----------------------|
| Ñame | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 9672 | 11482 | 16% |
| Área Cosechada(Ha) | 9282 | 11280 | 18% |
| Producción(Tons) | 139674 | 149040 | 6% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 15047.83 | 13212.77 | -14% |

Tabla 11. Producción de Ñame 2003 y 2004³¹

La agroindustria alrededor de este tubérculo no es abundante. Los usos más frecuentes son el consumo humano directo y la alimentación animal. Al igual que en el caso de la yuca en el consumo animal no se generan desechos ya que no se retira la cáscara que recubre el rizoma. De la misma manera en el caso del consumo humano directo se genera como residuo la cáscara pero esta demasiado disperso para su aprovechamiento y las cantidades que pueden encontrarse en las fincas productoras son muy pocas.

1.10.3 Descripción de los residuos

Como se menciona en la sección 1.10.2 los desechos generados por las actividades agrícolas y agroindustriales desarrolladas en el proceso productivo del ñame son fundamentalmente tres: Las hojas y tallos que forman el follaje, y la cáscara.

³¹ Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaría de agricultura de la gobernación de Bolívar.

Las hojas poseen largos pecíolos y una forma acorazonada o trifoliar. Los tallos can desde el verde hasta tonalidades moradas o carmelitas. Los tallos aéreos se sujetan a su soporte por medio de estructuras llamadas zarcillos, que se enredan alrededor del tallo. Cada planta puede llegar a tener hasta 8 zarcillos. Por ultimo, la cáscara es de una textura rugosa y leñosa.

1.11 Situación del plátano en Cartagena

1.11.1 Composición de la planta

El plátano, *Musa paradisíaca*, pertenece a la familia de las Musáceas. Las especies del género *Musa* son nativas del sureste asiático. La planta posee una raíz perenne también llamada rizoma. La planta se perpetúa a través de los brotes del rizoma llamados de igual manera yemas. Los tallos que constituyen las yemas son entonces el medio para la realización de la nueva cosecha.



Figura 23. Plátano

El tallo, ya adulto, puede alcanzar los 12 metros de altura. La planta posee una copa provista de hojas ovales de gran tamaño con pecíolos y nervadura bastante gruesas. De la planta brotan flores tanto masculinas como femeninas localizadas en espigas, que a su vez brotan de la copa de foliar. Las flores femeninas se ubican en la base de la espiga mientras que las masculinas se localizan en el ápice.

Los frutos se disponen en racimos que pueden llegar a pesar poco menos de 20 kilogramos. Cada tallo da frutos solo una vez y origina varios rotes que puede llegar a fructificar tres veces. Las hojas y tallos poseen abundante fibra.

1.11.2 Producción del plátano

El plátano en Bolívar es en su mayoría un cultivo de subsistencia caracterizado por pequeñas áreas sembradas y pocos rendimientos. El rendimiento supera las 7 toneladas por hectárea al año y se cosecha durante virtualmente todo el año. Su recolección es manual.

| | 2003 | 2004 | Variación Porcentual |
|--------------------|----------|----------|----------------------|
| Ñame | | | |
| Área Sembrada(Ha) | 9672 | 11482 | 16% |
| Área Cosechada(Ha) | 9282 | 11280 | 18% |
| Producción(Tons) | 139674 | 149040 | 6% |
| Rendimiento(Kg/Ha) | 15047.83 | 13212.77 | -14% |

Tabla 12. Producción de Plátano 2003 y 2004³²

Previo a la recolección se realizan el deshije y el deshoje. El deshije o desmache, consiste en la eliminación de los colinos deformes y que en general sobran luego de la escogencia de aquel que remplazará la planta una vez fructifique. Este proceso se realiza aproximadamente dos meses después de haber sido realizada la siembra.

El deshoje no es más que la eliminación de las hojas secas, amarillas y dobladas. Es una práctica necesaria para la eliminación de las hojas superfluas e infectadas.

³² Tomado del informe de coyuntura subsector agrícola llevado a cabo por la secretaría de agricultura de la gobernación de Bolívar.

Para realizar la cosecha el racimo se hace necesario cortarlo. Durante esta operación se dejan en el campo las hojas y el seudo tallo que se descartan del racimo y el seudo tallo junto con las demás estructuras que han sido denominados coloquialmente galápago. Luego se procede a cortar el galápago a ras de piso, es decir se corta el resto del seudo tallo.

Para proceder a la comercialización del plátano se debe cortar del racimo el vástago quedando este como residuo en el lugar donde se corte. Sin embargo, el lugar donde se corta este vástago varía según la destinación del plátano.

1.11.3 Descripción de los residuos

Los colinos al aflorar se tornan verdes siendo en un principio de una tonalidad amarilla. Emiten hojas triangulares o lanceoladas de manera preliminar pues son de un tamaño reducido. Luego aparecen las hojas normales de estos brotes de la planta.

Las hojas son de color verde en dos tonalidades distintas en el frente y el envés. Tienen un ancho de entre 70 centímetros y un metro y un largo de entre 2 y 4 metros. El seudo tallo es un cilindro con diámetros de 24 a 30 centímetros presenta un color verde o rojizo. El vástago es de color verde. Es estriado y fibroso.

2 Potencial energético de los residuos sólidos

2.1 Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos

2.1.1 Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos Domésticos

Existen pocos estudios acerca de la composición de los residuos sólidos en la ciudad de Cartagena y hasta ahora solo un estudio publica composiciones promedio de los residuos sólidos urbanos domésticos, es decir los residuos recogidos en el casco urbano de la ciudad de Cartagena, utilizando una metodología precisa y confiable.

El estudio fue sectorizado y solo tomo en cuenta parte de la estratificación de la población, a saber los estratos 4; 5 y 6, por lo cual se espera un sesgo importante al ser generalizados los valores como aquellos de toda la población.

Por las razones expuestas estos datos no son utilizados para el cálculo del potencial energético de los residuos sólidos urbanos domésticos en la ciudad de Cartagena, sin embargo, el estudio brinda información valiosa acerca de la composición de los residuos generados por los cartageneros que posibilitan la escogencia de tecnologías factibles para su aprovechamiento como recurso biomásico.

| Componentes de los residuos sólidos | | Promedio (kg) | Proporción (%) |
|--|---------------------|------------------|-------------------|
| RESIDUOS ORGANICOS | | 265.71 | 61.3 |
| Residuos de comida | | 50.78 | 34.8 |
| Residuos de jardín | | 114.93 | 26.5 |
| RESIDUOS POTENCIALMENTE RECICLABLES | | 117.76 | 27.2 |
| Vidrio | | 23.72 | 5.5 |
| | | 6.35 | 1.5 |
| Productos Metálicos | Metales Ferrosos | 4.56 | 1.1 |
| | Metales no ferrosos | 1.78 | 0.4 |
| Papel Mezclado | | 22.40 | 5.2 |
| Cartón | | 19.89 | 4.6 |
| Huesos | | 0.21 | 0 |
| Plástico | | 45.21 | 10.4 |

| | | | |
|---|---------------------------|--------|-----|
| | Plástico de Alta densidad | 12.11 | 2.8 |
| | Plástico de Baja densidad | 33.10 | 7.6 |
| RESIDUOS APROVECHABLES | | 9.45 | 2.2 |
| Madera | | 3.48 | 0.8 |
| Textiles | | 3.34 | 0.8 |
| Caucho y Cuero | | 2.63 | 0.6 |
| RESIDUOS NO APROVECHABLES | | 37.03 | 8.5 |
| Productos cerámicos | | 3.48 | 0.8 |
| Material Sanitario | | 32.92 | 7.6 |
| Especiales (Medicamentos, Pilas Usadas) | | 0.63 | 0.1 |
| OTROS | | 3.20 | 0.7 |
| TOTAL | | 433.14 | 100 |

Tabla 13. Consolidado promedio de la composición de los residuos sólidos domésticos en los estratos 4, 5 y 6 de Cartagena de Indias³³

En la tabla 13 se observa claramente que los residuos orgánicos son el componente predominante en los RSU Domésticos. Adicionalmente a nivel internacional los RSU presentan la composición citada en la tabla 14. En dicha tabla se presentan los pesos específicos típicos en las condiciones en que son recogidos los residuos si no se afirma lo contrario.

³³ BRIGANTI FERNANDEZ, Johanna Margarita. Et al. Lineamientos para la separación en la fuente de residuos sólidos producidos por el sector residencial (Estratos 4, 5 y 6) de la ciudad de Cartagena D. T. y C. CARDIQUE-UTB. Cartagena. 2003.

| Tipos de residuos | Peso específico, kg/m ³ | | Contenido de Humedad, % en peso | |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | Rango | Típico | Rango | Típico |
| Domésticos(no compactados) | | | | |
| Residuos de comida (mezclados) | 131-481 | 291 | 50-80 | 70 |
| Papel | 42-131 | 89 | 4-10 | 6 |
| Cartón | 42-80 | 50 | 4-8 | 5 |
| Plásticos | 42-131 | 65 | 1-4 | 2 |
| Textiles | 42-101 | 65 | 6-15 | 10 |
| Goma | 101-202 | 131 | 1-4 | 2 |
| Cuero | 101-261 | 160 | 8-12 | 10 |
| Residuos de jardín | 59-225 | 101 | 30-80 | 60 |
| Madera | 131-320 | 237 | 15-40 | 20 |
| Vidrio | 160-481 | 196 | 1-4 | 2 |
| Latas de hojalata | 50-160 | 89 | 2-4 | 3 |
| Aluminio | 65-240 | 160 | 2-4 | 2 |
| Otros metales | 131-1151 | 320 | 2-4 | 3 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 320-1000 | 481 | 6-12 | 8 |
| Cenizas | 650-831 | 745 | 6-12 | 6 |
| Basuras | 89-181 | 131 | 5-20 | 15 |
| Residuos de jardín domésticos | | | | |
| Hojas (sueltas y secas) | 30-148 | 59 | 20-40 | 30 |
| Hierba verde(suelta y húmeda) | 208-297 | 237 | 40-80 | 60 |
| Hierba verde húmeda y compactada) | 593-831 | 593 | 50-90 | 80 |
| Residuos de jardín (tritutados) | 267-356 | 297 | 20-70 | 50 |
| Residuos de jardín (compostados) | 267-386 | 326 | 40-60 | 50 |
| Urbanos | | | | |

| | | | | |
|--------------------------------|-----------|------|-------|----|
| En camión compactador | 178-451 | 297 | 15-40 | 20 |
| En vertedero | | | | |
| Medianamente compactados | 362-498 | 451 | 15-40 | 25 |
| Bien compactados | 590-742 | 600 | 15-40 | 25 |
| Comerciales | | | | |
| Residuos de comida (húmedos) | 475-950 | 540 | 50-80 | 70 |
| Aparatos | 148-202 | 181 | 0-2 | 1 |
| Cajas de madera | 110-160 | 110 | 10-30 | 20 |
| Podas de arboles | 101-181 | 148 | 20-80 | 5 |
| Basura (combustible) | 50-181 | 119 | 10-30 | 15 |
| Basura (no combustible) | 181-362 | 300 | 5-15 | 10 |
| Basura (mezclada) | 139-181 | 160 | 10-25 | 15 |
| Industriales | | | | |
| Fangos químicos (húmedos) | 801-1101 | 1000 | 75-99 | 80 |
| Cenizas volantes | 700-900 | 800 | 2-10 | 4 |
| Restos de cuero | 100-250 | 160 | 6-15 | 10 |
| Chatarra metálica (pesada) | 1501-2000 | 1780 | 0-5 | - |
| Chatarra metálica (ligera) | 498-900 | 740 | 0-5 | - |
| Chatarra metálica (mezclada) | 700-1500 | 900 | 0-5 | - |
| Aceites, alquitranes, asfaltos | 801-1000 | 950 | 0-5 | 2 |
| Serrín | 101-350 | 291 | 10-40 | 20 |
| Residuos textiles | 101-220 | 181 | 6-15 | 10 |
| Madera (mezclada) | 400-676 | 498 | 30-60 | 25 |

Tabla 14. Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas³⁴

³⁴ TCHOBANOGLIOUS, Geroge. THEISEN, Hilary. VIRGIL, Samuel A. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGrau-Hill. España. 1994

Observamos que el promedio local de residuos de comida es de 34.8% mientras que el internacional se encuentra muy por debajo con casi un 16%. Igualmente el porcentaje local de residuos de jardín de 26.5% comparado con el internacional de 5.5% es bastante alto.

El alto porcentaje de materia orgánica y la humedad relativamente alta de los RSU domésticos hacen de los métodos biológicos de degradación la mejor alternativa para su degradación.

Como se menciona anteriormente el utilizar los datos de la tabla 13 para estimar un potencial energético introduciría grandes sesgos en la cifra obtenida ya que estos resultados no provienen de una muestra representativa de toda a ciudad de Cartagena.

La firma CICON Ltda. Responsable por el manejo del relleno sanitario de la ciudad de Cartagena publicó una cifra de generación mensual de residuos en la ciudad de 28000m³. Si utilizáramos los valores típicos de la tabla 14 para el cálculo del potencial energético incurriríamos en grandes errores debido a la notable diferencia entre los valores reales de la composición de RSU domésticos en Cartagena y los valores típicos internacionales. Por lo tanto, para el cálculo del potencial energético haremos uso de la cifra reportada por

INGEAMBIENTE LTDA. Entidad que estima una generación diaria de residuos de 933.33m³ equivalentes a 700 toneladas por día³⁵.

Debido a que en Colombia no se ha llevado a cabo un experimento para determinar el poder calorífico de los RSU utilizamos el poder calorífico inferior en base seca publicado para la ciudad de Buenos Aires, 1624kcal/kg. Utilizando estos datos se obtiene un potencial energético de los RSU Domésticos de 4,76x10⁰⁹kJ/día. Esta cifra contiene todos los residuos generados en la ciudad de Cartagena incluyendo aquellos provenientes de la industria, el turismo y el comercio mas estos focos generan muy poca cantidad de residuos comparado con el casco urbano y su inclusión tiene poco efecto en resultado.

2.1.2 Potencial Energético de las Aguas Negras

En Cartagena se genera un volumen diario de aguas negras que alcanzaba los 200000m³ y actualmente puede ser mayor. Este caudal se distribuye hacia tres vertederos. Entre un 50-60% fluye hacia la Ciénaga de la Virgen de 22.5 km²; entre un 35-40% es vertido en la Bahía de Cartagena un estuario de 82km² de superficie y el tercer vertedero esta representado por una serie de caños y cuerpos de agua urbanos que reciben entre un 5 y un 15% de as aguas negras en Cartagena.³⁶

³⁵ INGEAMBIENTE LTDA. Estudio e identificación de residuos sólido urbanos en la ciudad de Cartagena. CARDIQUE. Diciembre 1998.

³⁶ íbid.

El poder calorífico de las aguas negras es de aproximadamente 6330kJ/m^{337} lo que arroja un potencial calorífico de $1,27 \times 10^{09}$ para el caudal total de Cartagena.

En el caso particular de las aguas vertidas en la Ciénaga de la Virgen el caudal promedio que recibe es de aproximadamente 62900m^3 que significan una demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de 11.52Ton/día . Las aguas negras que llegan a la Ciénaga representan $3,98 \times 10^{08}\text{kJ/día}$. Las aguas negras llegan a la Ciénaga por la zona sur y sur occidental. Esta localización puede facilitar la colocación de una planta de depuración de aguas mediante métodos biológicos de degradación de la materia.

Un caso contrario es el de la Bahía de Cartagena, que recibe que recibe además de las aguas negras los vertimientos industriales que ascienden a casi 70000m^3 , pero los focos de contaminación presentan una mayor difusión a excepción del emisario submarino, una tubería de 800m de largo que vierte los desechos líquidos mar adentro.

³⁷ SHIZAS, Ioannis. BAGLEY, David M. Experimental Determination of Energy Content of Unknown Organics in Municipal Wastewater Streams. Journal of Energy Engineering © ASCE. Agosto. 2004.

2.2 Potencial Energético de los Residuos Sólidos Industriales

Los residuos sólidos industriales como se menciona anteriormente pueden ser divididos en dos grupos: una parte muy similar a la de los residuos sólidos urbanos domésticos y otra a la que denominamos residuos peligrosos. En este ejercicio teórico no se tendrán en cuenta las estadísticas de residuos peligrosos pues su manipulación y transporte se encuentra fuertemente regulada por la legislación ambiental para prevenir episodios críticos de contaminación puntual y las estadísticas al respecto se encuentran muy dispersas y a menudo se manejan de manera confidencial a pesar de su carácter de información pública.

De esta manera nos concentraremos en la parte de los residuos sólidos industriales similar a los ya descritos residuos sólidos urbanos (RSU) domésticos y que llamaremos residuos sólidos urbanos industrial o de origen industrial.

2.2.1 Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos Industriales

La generación mensual de RSU industriales en Cartagena es de 684453kg³⁸. Esta cifra representa una proporción menor de la anteriormente reportada generación diaria de residuos en la ciudad de Cartagena alcanzando solo un 3% aproximadamente.

³⁸ INGEAMBIENTE LTDA. Estudio e identificación de residuos sólido urbanos en la ciudad de Cartagena. CARDIQUE. Diciembre 1998.

Con solo un 3% del total de residuos generados no vale la pena dedicarse al aprovechamiento exclusivo de los RSU industriales. Esto se ve confirmado por el bajo potencial energético, $1,55 \times 10^{05}$ kJ/día.

2.2.2 Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos Comerciales

En el informe presentado por INGEAMBIENTE LTDA a CARDIQUE se toman mediciones además de los residuos sólidos generados por el comercio y el sector turismo que son recolectados de manera independiente a las rutas de recolección de basuras en el casco urbano de la ciudad. El resultado fue una generación mensual de residuos de 136559kg que igual que el apartado anterior sigue siendo una proporción bastante baja del total de residuos generados en la ciudad.

El potencial energético de estos residuos es de $3,09 \times 10^{04}$. El cual es como era de esperarse muy bajo en comparación con los demás potenciales aquí referenciados.

2.3 Potencial Energético de los Residuos Agrarios

2.3.1 Arroz

2.3.1.1 Descripción de los residuos

En la recolección mecánica o manual del arroz se genera como desecho el tamo que se encuentra formado por las hojas, los tallos y los granos descartados. Este tamo también conocido como paja esta inicialmente húmedo, sin embargo, debido a que se deja en el suelo se seca en un tiempo relativamente corto.

Durante el trillado y pulido del arroz paddy se genera un segundo desecho constituido por la cáscara.

2.3.1.2 Cantidad de residuos

Por cada 100kg de arroz paddy se generan 120kg de tamo o paja, 20kg de cáscara y 58kg de arroz blanco. Utilizando estas cifras en conjunto con los montos producidos anualmente podemos estimar los tonelajes de residuos generados en el proceso productivo del arroz.

| Residuos | Peso 2003 (Ton) Arroz Riego | Peso 2003 (Ton) Arroz Secano Manual | Peso 2003 (Ton) Arroz Secano Mecánico | Peso 2003 (Ton) Total | Peso 2004 (Ton) Arroz Riego | Peso 2004 (Ton) Arroz Secano Manual | Peso 2004 (Ton) Arroz Secano Mecánico | Peso 2004 (Ton) Total |
|----------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Tamo | 32648 | 41892 | 145038 | 177686 | 46557 | 38828 | 133903 | 172731 |
| Cáscara | 5441 | 6982 | 24173 | 29614 | 7759 | 6471 | 22317 | 28788 |

Tabla 15. Cantidades estimadas de residuos de arroz riego, secano manual y secano mecánico 2003 y 2004

De estos resultados hay que resaltar la gran cantidad de residuos de tamo que se generan en el proceso de producción del arroz. El volumen producido de cáscara aunque muy inferior al del tamo resulta interesante pues es producto del proceso de trillado y pulido y se encuentra localizado en el sitio en el que se realiza este proceso.

| Residuo | Humedad (%) | Poder Calorífico (kcal/kg) | Potencial Energético 2004 (kJ/día) |
|---------|-------------|----------------------------|------------------------------------|
| Tamo | 9.4 | 3000 | 5,94E+09 |
| Cáscara | 11 | 3200 | 1,06E+09 |

Tabla 16. Humedad, poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción del arroz

La humedad de ambos residuos es óptima para su uso en procesos termoquímicos para generación de calor y potencia. El valor reportado como potencial energético es una cifra para la producción total de residuos en todo el año.

2.3.1.3 Usos de los residuos del proceso productivo

El tamo yace en el campo de cultivo luego de la recolección del grano. La quema se ha reducido y solo se recomienda en caso de que su presencia pueda propiciar un ambiente favorable para la generación de enfermedades. Además se utiliza como abono para los suelos de cultivo y como forraje para el ganado pues es un producto rico en nitrógeno y de alto valor nutricional.

La cáscara del arroz no es de utilidad para la mayoría de los molinos. Es una práctica común el quemar este residuo. Su uso como combustible es rara vez explotado.

En conclusión estos dos residuos pueden ser utilizados como materia para la generación de energía mas en cuanto al tamo se rivaliza con dos usos que lo demandan. En cuanto a la cáscara su uso en la generación de calor y potencia es beneficioso para los molinos pues este desecho constituye una tarea logística que demanda tiempo además del requerimiento de un espacio físico para su colocación.

2.3.2 Algodón

2.3.2.1 Descripción de los residuos

El primer residuo generado en el proceso de producción del algodón es la soca constituida por los tallos las hojas y la capsulas. Los tallos, que son el principal elemento constitutivo, ya fueron descritos anteriormente. Este residuo se genera durante la recolección del algodón-semilla, que se realiza casi en su totalidad de manera manual. Sea mecánica o manual su recolección, este residuo permanece en el suelo de cultivo disperso en el campo.

Un segundo residuo que se produce en las desmotadoras es la llamada merma constituida por tallos, hojas, tierra y fibra que permanece en el algodón semilla luego de su recolección.

Otro material que anteriormente era considerado un residuo es la semilla. La semilla se ha convertido en la actualidad en otro subproducto pues puede ser utilizado para la extracción de aceite y de un subproducto denominado torta de algodón. Para la obtención de estos dos subproductos se hace necesario remover la cáscara que recubre la semilla, generando así otro residuo.

Además de la cáscara, en el proceso para la obtención de la semilla desnuda, se genera un residuo conocido como línter. El línter esta constituido por fibras

que no fueron removidas durante el proceso de desmote. Además de ser producido como residuo en la extracción de aceite, el línter es formado también en la obtención de semillas para cultivo.

2.3.2.2 Cantidad de residuos

Por cada 100kg de algodón semilla permanecen 170kg de soca en el campo de cultivo. Además, se obtienen 34kg de fibra de algodón y 10.5kg de merma en las desmotadoras, 4.11kg de línter en los procesos de producción de semilla y extracción de aceite. Así como 23.44kg de cáscara por cada 100kg de algodón semilla en este último proceso, la extracción de aceite.

| Residuos | Peso 2003 (Ton) Algodón | Peso 2004 (Ton) Algodón |
|----------|-------------------------|-------------------------|
| Soca | 5933 | 11509 |
| Merma | 366 | 710 |
| Línter | 143 | 278 |
| Cáscara | 818 | 1586 |

Tabla 17. Cantidades estimadas de residuos del cultivo en 2003 y 2004 de algodón.

A pesar de que las cifras en la Tabla 17 no revelan cantidades mayores, mas bien algo inferiores, a las cantidades de desechos generadas por los otros procesos productivos aquí señalados; la explotación de los desechos del

proceso productivo del algodón puede resultar muy interesante basándose en los usos de que son objeto los distintos desechos, que serán abordados en la siguiente sección. Otro factor determinante en la viabilidad de la utilización de los desechos de la producción de algodón es humedad de los desechos. Como se observa en la Tabla 18 todos poseen humedades relativamente bajas. Podemos catalogar toda la biomasa sólida proveniente del cultivo del algodón como biomasa seca susceptible de transformada mediante procesos termoquímicos.

| Residuo | Humedad % | Poder Calorífico (kcal/kg) | Potencial Energético 2004 (kJ/día) |
|---------|--------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Soca | 10.00 | 3000 | 3,96E+08 |
| Merma | 9.19 | 3000 | 2,44E+07 |
| Línter | 6.74 | 5500 | 1,75E+07 |
| Cáscara | 10.00 | 4000 | 7,27E+07 |

Tabla 18. Humedad, poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción del algodón

2.3.2.3 Usos de los residuos del proceso productivo

La soca permanece en el campo de cultivo una vez realizada la cosecha. Su permanencia por tiempo prolongado no es recomendable por razones sanitarias, pues puede convertirse en un ambiente propicio para el desarrollo

de plagas y enfermedades para el futuro cultivo. Para su destrucción parte de la soca suele utilizarse como forraje para la alimentación del ganado en época de verano o época seca que es cuando normalmente se realiza la cosecha. Sin embargo, el ganado no deglute los tallos dejándolos en el suelo de cultivo. Una práctica común y muy recomendable es la utilización de estos tallos como abono incorporándolos al suelo. No obstante, estos manejos solo se realizan en algunos cultivos haciendo de la quema una industria usual en las zonas de cultivo del algodón.

La merma, por otra parte, posee dos usos principales. El primero consiste simplemente en botar el residuo. Y el segundo lo constituye la quema en hornos de carácter fundamentalmente artesanal.

El línter puede ya sea venderse a nivel nacional a la industria de tapicería o más raramente exportarse a países en los que pueda ser requerido como materia prima.

La cáscara se quema de manera simultánea con la merma de ser posible. Su uso más común consiste en alimento para ganado ya sea en su estado original mezclada con heno o maleza o en su procesamiento para la obtención de pellets.

Resumiendo, todos los residuos del algodón a excepción del línter pueden resultar de interés a la hora de plantear su uso en otros procesos productivos. Es de particular interés la cáscara pues no se rivaliza en realidad con un uso de gran fuerza. Bajo otro campo de acción cabe destacar que la tecnología utilizada para la quema de la merma puede ser modificada y mejorada. Incluso la soca o por lo menos parte de ella pueden hacer parte de otros procesos productivos además del cultivo de algodón.

2.3.3 Sorgo

2.3.3.1 Descripción de los residuos

En el proceso productivo del sorgo no hay desechos agroindustriales. Solo podemos encontrar desechos de la agricultura. Estos desechos son generados durante al recolección del sorgo y consisten en las hojas y tallos que quedan dispersos en el campo de cultivo luego de la cosecha.

Los tallos son en un 26.1% fibra, un 66.2% de extracto no nitrogenado, 3.9% ceniza, 3% proteína y 0.8% extracto de éter. Posee un poder calorífico de 3000kcal/kg

Las hojas son en un 29.9% fibra, un 51.1% de extracto no nitrogenado, 8.2% ceniza, 7.7% proteína y 3.1% extracto de éter. Posee un poder calorífico de 3000kcal/kg.

2.3.3.2 Cantidad de residuos

Por cada 100kg de grano de sorgo cosechados se originan 120.6kg de residuos distribuidos en 89kg de tallos y 31.6kg de hojas. Utilizando estas cifras en conjunto con la producción anual de sorgo podemos estimar la cantidad de residuos producidos por la actividad agrícola del cultivo del sorgo. Estos estimados pueden ser observados en la Tabla 19.

| Residuos | Peso 2003 (Ton) Sorgo | Peso 2004 (Ton) Sorgo |
|----------|-----------------------|-----------------------|
| Tallos | 41027 | 41003 |
| Hojas | 14566 | 14558 |

Tabla 19. Cantidades estimadas de residuos del cultivo de sorgo en 2003 y 2004.

Estos residuos son dejados en el campo de cultivo. El efecto calórico del sol hace que pierdan humedad de manera que podemos catalogar estos residuos como biomasa seca disponible para ser utilizada en procesos de en procesos termoquímicos de transformación.

| Residuo | Poder Calorífico (kcal/kg) | Potencial Energético 2004 (MW) |
|---------|----------------------------|--------------------------------|
| Tallos | 3000 | 1,41E+09 |
| Hojas | 3000 | 5,01E+08 |

Tabla 20. Poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción del sorgo

2.3.3.3 Usos de los residuos del proceso productivo

Los desechos del cultivo del sorgo forman la soca. Al igual que en otros cultivos esta se utiliza para la alimentación de animales, especialmente del ganado. Los sobrantes se incorporan al suelo mediante arado y rastrillado.

2.3.4 Yuca

2.3.4.1 Descripción de los residuos

Durante la recolección de la yuca, que se realiza en dos fases como se mencionó anteriormente, se generan varios residuos. Durante la primera fase se cortan las hojas y tallos que forman el follaje. El follaje yace en el campo de cultivo como primer residuo. Durante la segunda fase al extraer la yuca quedan los tacones la estructura que le proveía sostén como residuo en el campo.

El follaje fue descrito en apartados anteriores. Esta compuesto por los tallos que presentan una forma cilíndrica y confieren al arbusto su altura. Las hojas presentan anchos de entre 1.5 y 5 centímetros.

2.3.4.2 Cantidad de residuos

Por cada 100kg de yuca cosechados se generan 20kg de follaje y 5kg de tacones por parte de los procesos de agricultura. Además, el consumo humano directo de yuca genera por cada 100kg de producto 17.5kg de cáscara. Como se dijo anteriormente las actividades agroindustriales realizadas con la yuca no presentan tamaños significativos.

| Residuos | Peso 2003 (Ton) Yuca | Peso 2004 (Ton) Yuca |
|----------|----------------------|----------------------|
| Follaje | 64273 | 63013 |
| Tacones | 16068 | 15753 |
| Cáscara | 56239 | 55136 |

Tabla 21. Cantidades estimadas de residuos del cultivo de la yuca en 2003 y 2004.

Observamos en la Tabla 21 que las cifras son significativamente altas en relación a las de otros cultivos. Resulta de especial interés el follaje Y los tacones pues representa el residuo de mayor volumen. Sus condiciones de humedad, con un porcentaje conjunto de 76.2, hacen de este un residuo apto para procesos biológicos de transformación. Sin embargo, el encontrarse disperso en el campo de cultivo puede representar un obstáculo en su aprovechamiento.

| Residuos | Humedad % |
|----------|-----------|
| Follaje | 77,65 |
| Tacones | 73,3 |
| Cáscara | 72.0 |

Tabla 22. Humedad de los residuos del proceso de producción de la yuca

2.3.4.3 Usos de los residuos del proceso productivo

Los residuos del proceso de recolección, a saber, follaje; formado por hojas y tallo; y tacones no se utilizan en los suelos como otras socas. La práctica común a realizar con estos residuos es la formación de un cúmulo de estos residuos. De los tallos, como se menciona anteriormente, se obtiene una sección que se utiliza para la siembra del siguiente cultivo de yuca.

La cáscara de ser obtenida en la finca se utiliza como forraje en la alimentación principalmente de cerdos.

De esta manera podemos afirmar que el conjunto formado por el follaje y los tacones constituye una buena fuente de residuos agrarios para ser aprovechados en otras actividades ya que su uso no rivaliza con ninguna otra práctica. Los métodos sugeridos para su aprovechamiento son los biológicos, debido a su gran contenido de humedad.

En cuanto a la cáscara de la yuca, su aprovechamiento es demasiado complejo pues el consumo humano directo constituiría el mayor uso generador de este residuo haciendo que se encuentre profusamente disperso. La ínfima cantidad que se encuentra localizada de manera puntual en las fincas productoras no podría ser utilizada para producción de calor y energía ya que rivaliza con su uso como alimento para animales.

2.3.5 Ñame

2.3.5.1 Descripción de los residuos

Los desechos generados por las actividades agrícolas y agroindustriales desarrolladas en el proceso productivo del ñame son fundamentalmente tres: Las hojas y tallos que forman el follaje, y la cáscara.

Las hojas poseen largos pecíolos y una forma acorazonada o trifoliar. Los tallos can desde el verde hasta tonalidades moradas o carmelitas. Los tallos aéreos se sujetan a su soporte por medio de estructuras llamadas zarcillos, que se enredan alrededor del tallo. Cada planta puede llegar a tener hasta 8 zarcillos. Por ultimo, la cáscara es de una textura rugosa y leñosa.

2.3.5.2 Cantidad de residuos

El follaje, que resulta el principal desecho y el único con posibilidades de uso energético, representa en el momento de la cosecha, que como se mencionó esta entre los 10 o 12 meses luego de la siembra, 3% del peso del producto. Es oportuno mencionar que si la cosecha se realizara en el momento en que el ñame alcanza la plenitud de su peso, el follaje; aun verde, alcanzaría un 10% del peso del producto.

Utilizando estos datos podemos estimar que en el 2003 los desechos agrarios generados por el proceso productivo del ñame fueron de 4190 toneladas y en el 2004 de 4470 toneladas. A pesar de no ser particularmente altas el ñame podría ser e interés para la producción de calor y potencia.

2.3.5.3 Usos de los residuos del proceso productivo

El follaje luego de la recolección del ñame suele amontonarse en varios lugares de las fincas productoras. En ocasiones se quema en otras simplemente se desecha. La cáscara como se indicó no representa un residuo con posibilidades de uso por su ubicación y cantidad.

El follaje del ñame puede constituir un desecho con posibilidades de aprovechamiento utilizando medios de transformación termoquímicos porque el follaje en el momento de la cosecha está seco. Se ubica disperso en el campo de cultivo más su recolección puede no representar grandes retos pues es una práctica común apilar este desecho.

2.3.6 Plátano

2.3.6.1 Descripción de los Residuos

Los colinos al aflorar se tornan verdes siendo en un principio de una tonalidad amarilla. Emiten hojas triangulares o lanceoladas de manera preliminar pues son de un tamaño reducido. Luego aparecen las hojas normales de estos brotes de la planta.

Las hojas son de color verde en dos tonalidades distintas en el frente y el envés. Tienen un ancho de entre 70 centímetros y un metro y un largo de entre

2 y 4 metros. El seudo tallo es un cilindro con diámetros de 24 a 30 centímetros presenta un color verde o rojizo. El vástago es de color verde. Es estriado y fibroso.

2.3.6.2 Cantidad de Residuos

Por cada 100 kilogramos se generan 467 kilogramos, 100 kilogramos de hojas y 10 kilogramos de vástago. Los resultados totales en toneladas de las producciones en los años 2003 y 2004 se consignan en la Tabla 23.

| Residuos | Peso 2003 (Ton) Plátano | Peso 2004 (Ton) Plátano |
|-------------|-------------------------|-------------------------|
| Seudo tallo | 229605 | 198694 |
| Hojas | 49116 | 42547 |
| Vástago | 4916 | 4254 |

Tabla 23. Cantidades estimadas de residuos del cultivo del plátano en 2003 y 2004.

Observamos las grandes cifras que representan las hojas y los seudo tallos que además se encuentran secos en el campo de cultivo representando una fuente viable e recursos para la generación de calor y potencia.

El vástago representa una cantidad menor y en su mayoría dispersa pudiendo ser descartado su utilización ulterior a la cosecha

| Residuo | Poder Calorífico (kcal/kg) | Potencial Energético 2004 (MW) |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|
| Seudo tallo | 3000 | 6,83E+09 |
| Hojas | 3000 | 1,46E+09 |
| Vástago | 3000 | 1,46E+08 |

Tabla 24. Poder calorífico y potencial energético de los residuos del proceso de producción del plátano

2.3.6.3 Usos de los residuos del proceso productivo

El seudo tallo y las hojas constituyen la soca en este cultivo y como tal se utilizan como abono en el suelo de cultivo y en algunos casos el seudo tallo se usa como forraje, es decir como alimento para el ganado. Las hojas en ocasiones se usan para cubrir el producto igual que en el piso de los camiones transportadores.

El vástago se utiliza también como forraje en las fincas productoras. En los mercados donde se comercializa el plátano suele botarse.

Las grandes cantidades de seudo tallo pueden ser aprovechadas más se rivaliza con los otros modos de usos que se le dan a este residuo. Las hojas de igual manera pueden constituir una fuente de materia biomásica para procesos termoquímicos mas se hace necesaria su recolección.

2.4 Conclusión

En la tabla 25 se presentan los resultados en orden descendente de los distintos potenciales energéticos de los residuos señalados a lo largo de este capítulo. Observamos el gran potencial que hay en los residuos agrícolas provenientes del proceso recolección del proceso de recolección del plátano y el arroz, sin embargo, como se menciona igualmente en acápite anteriores; estos residuos poseen usos que rivalizan con su utilización en un esquema que aproveche la mayor parte posible de este potencial.

| Producto | Residuo | kcal/kg | kJ/kg | kJ/día | elegibilidad |
|----------|-------------------------------|---------|----------|----------|--------------|
| Plátano | Seudo tallo | 3000 | 12552 | 6,83E+09 | |
| Arroz | Tamo | 3000 | 12552 | 5,94E+09 | |
| RSU | Generación diaria de residuos | 1624 | 6794,816 | 4,76E+09 | 1 |
| Plátano | Hojas | 3000 | 12552 | 1,46E+09 | 1 |
| Sorgo | Tallos | 3000 | 12552 | 1,41E+09 | |
| RSU | Aguas Servidas | 1513 | 6330 | 1,27E+09 | 1 |
| Arroz | Cáscara | 3200 | 13388,8 | 1,06E+09 | 1 |
| Sorgo | Hojas | 3000 | 12552 | 5,01E+08 | |
| RSU | Ciénaga de la Virgen | 1513 | 6330 | 3,98E+08 | 1 |

De igual manera en la Figura 24 dimensionamos la distribución del potencial total existente en los residuos alrededor de las actividades domésticas y económicas en Cartagena. En este diagrama de Pareto debemos prestar atención a las columnas cuya categoría en el eje de las abscisas están resaltados en negrilla pues estos residuos representan el 80% del potencial energético de la biomasa residual en la ciudad. Dentro de este porcentaje, sin embargo; como ya se hizo notar; no podemos considerarlas como alternativas viables por las razones que ya se han expuesto.

De esta manera la única opción elegible, luego de descartar las anteriores, para su aprovechamiento son los RSU representados por las aguas negras de la ciudad de Cartagena. Los cuales además suponen beneficios agregados gracias a que disminuyen la contaminación a cuerpos de agua ya casi saturados.

3 Propuesta Tecnológica

3.1 SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE RSU

BIODIGESTORES

Un biodigestor de desechos orgánicos es un contenedor cerrado, hermético e impermeable el cual se le conoce también con el nombre de reactor, en el cual se deposita el material orgánico que se va a fermentar en determinada dilución de agua para que se descomponga y produzca a su vez biogás, entre los materiales a fermentar tenemos:

- excrementos animales y humanos.
- desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican

Este sistema puede que incluya una cámara de carga y nivelación de agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de hidropresión y postratamiento a la salida del reactor.

La biodigestión se da por el hecho de que existen microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en la materia fecal que en el momento en que actúan sobre los desechos orgánicos ya sea de origen vegetal o animal, producen una mezcla de gases con altos contenidos de metano mas conocido como biogás, el cual puede verse como una alternativa de uso como combustible y además

por el hecho de ser muy eficiente en cuanto a motores se trata. En el momento de finalización de dicho proceso de biodigestión nos podemos dar cuenta de que se generan grandes cantidades de residuos con alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.

En el momento en que se utiliza un sistema de este tipo hay que tener en cuenta ciertos parámetros para la utilización eficiente del mismo tales como: pH, presión y temperatura con el fin de que se pueda obtener un óptimo rendimiento.

Como ya sabemos el biodigestor es un sistema simple y fácil de implementar, es económico y además ayuda a solventar la problemática ambiental que puede surgir por la disposición final de los desechos que se procesan en este. Por otra parte la producción de biogás representaría un punto a favor porque representa una alternativa para generación de energía.

3.1.1 TIPOS DE BIODIGESTORES

Actualmente se emplea una clasificación de los biodigestores dependiendo de la distribución de concentraciones en su interior. La clasificación más general que podemos observar es la siguiente:

- Biodigestores discontinuos
- Biodigestores continuos

3.1.1.1 Biodigestores Discontinuos

Este tipo de reactores básicamente son tanques que normalmente se encuentran dotados de sistemas tales como de agitación y de intercambio de calor para poder mantener la temperatura de la reacción que se este dando en el instante en que se encuentre operando siempre y cuando se encuentre dentro del intervalo deseable.

Estos biodigestores son adecuados para llevar las reacciones de una manera paulatina o lenta (varias horas de duración); en este tipo de reactores debido a la agitación se mantiene la uniformidad de la masa de reacción y además favorece la transferencia de calor. A su vez hay que decir que estos biodigestores trabajan en fase liquida, solo cuando se emplean como semicontinuos es que trabajan con un fluido diferente en este caso el gas de solubilidad limitada el cual puede alimentarse del biodigestor de manera gradual.

Los biodigestores discontinuos son muy utilizados actualmente debido a su flexibilidad en lo referente a los tiempos de reacción, los tipos de reacciones que maneja y además del número de las mismas que son posibles procesar.

3.1.1.2 Biodigestores Continuos

A diferencia de los discontinuos estos son utilizados para obtener mayor producción siempre y cuando el tiempo de reacción sea razonablemente corto y además si se desea que la temperatura sea uniforme dentro del reactor.

Actualmente existen una variedad de biodigestores pero el que se describe a continuación se considera uno de los más importantes el cual se conoce con el nombre de REACTOR TIPO TANQUE AGITADO (CSTR), estos pueden ser utilizados de manera individual o como una especie de reactores en serie, asimismo se pueden encontrar tanto en unidades separadas como simples, un ejemplo de esto son los de carcasa compartida.

En este tipo de biodigestores los balances de materia y energía se basan de las ecuaciones de conservación de masa y energía, para el caso de que las reacciones se encuentren en fase líquida y que operan en estado estacionario se deben manejar caudales constantes tanto a la entrada como de salida, debido a que el nivel del líquido que se maneja para este caso es fijo. Este nivel de flujo puede ser regulado a la salida del tanque y se debe hacer actuando en la corriente de salida del mismo; hay que hacer la salvedad de que si las condiciones de la mezcla son las más óptimas, tanto como la concentración de especies como la temperatura son uniformes y a su vez estas coinciden con las propiedades de la corriente de salida.

3.2 Modelo de un biodigestor

El primer paso para alcanzar los objetivos de control del proceso de digestión anaerobia es el desarrollo de un modelo que represente de manera confiable la interacción entre los diferentes elementos que hacen parte de este proceso.

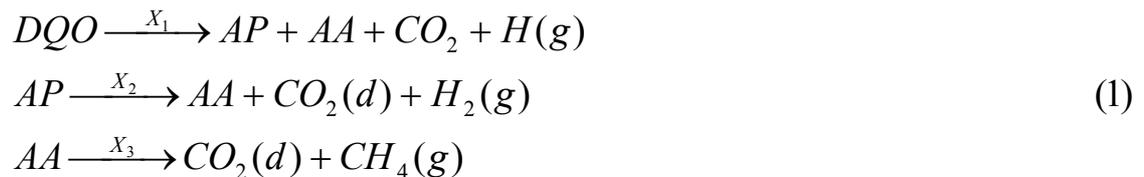
El modelo está fundamentado en cuatro hipótesis.

- El comportamiento fisicoquímico de todos los ácidos grasos volátiles (AGV) es similar al del ácido acético (AA)³⁹. Sin embargo, se excluye de este grupo al ácido propiónico (AP), debido a su importancia como agente inhibidor.
- Dados los esquemas de recirculación y mezclado del bioreactor, éste puede ser aproximado a un Reactor Continuo de Tanque Agitado (RCTA)⁴⁰.
- El pH del medio acuoso del sistema anaerobio, fluctúa entre 6 y 8, y la temperatura se mantiene en condiciones mesofílicas, es decir, 35-38°C.
- La dinámica de la fase gaseosa se considera en estado cuasiestacionario⁴¹.

³⁹ Bernard et al., 2001

⁴⁰ *Ibíd.*

Para poder desarrollar este modelo se deben considerar ciertos parámetros para la digestión anaerobia en los cuales deben intervenir ciertos mecanismos de reacción que se rigen por las siguientes ecuaciones:



En donde DQO, es la demanda bioquímica de oxígeno; AP y AA, de acuerdo a la primera hipótesis, son las concentraciones de ácido propiónico y ácido acético, respectivamente.

Con base en la segunda hipótesis descrita anteriormente y en el mecanismo de reacción en (1) el balance de masa arroja un sistema de 6 ecuaciones diferenciales no lineales.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= (\mu_1 - \alpha D)x_1 & \dot{s}_1 &= D(s_{1,in} - s_1) - k_1\mu_1x_1 \\
 \dot{x}_2 &= (\mu_2 - \alpha D)x_2 & \dot{s}_2 &= D(s_{2,in} - s_2) + k_2\mu_1x_1 - k_3\mu_2x_2 + k_4\mu_3x_3 \\
 \dot{x}_3 &= (\mu_3 - \alpha D)x_3 & \dot{s}_3 &= D(s_{3,in} - s_3) + k_5\mu_1x_1 - k_6\mu_3x_3
 \end{aligned} \tag{2}$$

Donde x_1 (g/l), x_2 (g/l) y x_3 (g/l) representan las concentraciones de las especies microbiológicas en cada una de las etapas del proceso de digestión, acidogénica, acetogénica y metanogénica acetoclástica. s_1 (g/l), s_2 (mmol/l) y s_3 (mmol/l) son las concentraciones de DQO, AP y AA; el subíndice *in* significa concentración a la entrada del bioreactor. El parámetro α es la fracción

⁴¹ V. Alcaraz, R. Salazar, V. González y O. Bernard. Modelado Dinámico de Tratamiento de Aguas Residuales por Digestión Anaerobia Considerando Acumulación de Ácido Propiónico

biomásica retenida por el reactor, de esta manera $\alpha = 0$ corresponde al reactor ideal de lecho fijo y $\alpha = 1$ corresponde al RCTA ideal. D es la tasa de dilución. Las constantes k_1 a k_6 son las constantes de rendimiento de las reacciones químicas respectivas.

En este modelo se considera que la cinética de reacción para la fase acidogénica o degradación de la DQO es descrita por una especificación de tipo Monod y que las cinéticas de reacción para las fases acetogénica, sujeta una baja presión parcial de hidrogeno, y metanogénica son del tipo Haldane específicamente. Es decir

$$\mu_1 = \frac{\mu_{\max,1}}{\frac{k_{s,1}}{s_1} + 1}, \quad \mu_2 = \frac{\mu_{\max,2}}{\frac{k_{s,2}}{s_2} + 1 + \frac{s_2}{k_{I,2}}}, \quad \mu_3 = \frac{\mu_{\max,3}}{\frac{k_{s,3}}{s_3} + 1 + \frac{s_3}{k_{I,3}}}, \quad (3)$$

Aquí $\mu_{\max,i}$ para $i = 1..3$ son las tasas máximas de crecimiento específico para la biomasa en cada fase del proceso de degradación. $k_{s,1}$, $k_{s,2}$ y $k_{s,3}$ son las constantes de afinidad y $k_{I,2}$ y $k_{I,3}$ son las constantes de inhibición de los substratos para las fases acetogénica y metanogénica; respectivamente.

Por ultimo

$$q_{CH_4} = k_{10} \mu_3 x_3 \quad (4)$$

Donde k_{10} es la constante de rendimiento de la reacción química.

3.3 Análisis de resultados

En base al modelo descrito en la sección anterior, se realizó un algoritmo en el programa MATLAB 5.3 para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que describen el proceso de digestión anaerobia.

En este programa se definió como la variable a modificar el parámetro D , es decir, la tasa de dilución. Que se refiere a la fracción de biomasa que es arrastrada fuera del biodigestor por la masa entrante. La tasa de dilución se da en notación porcentual y no puede ser mayor que el parámetro α que define el tipo de reactor. Este parámetro es igual a 0 para el reactor de lecho fijo, es decir, un biodigestor discontinuo. Mientras que toma un valor de 1 para el reactor continuo de tanque agitado ideal.

El modelo parte de la suposición de que el proceso se encuentra en estado estacionario, se asume que ha transcurrido un tiempo prolongado desde que se inició el proceso.

Este proceso está definido por dos grupos de ecuaciones. Un primer grupo representa la evolución de las especies microbiológicas encargadas de los procesos de transformación. Un segundo grupo que predice el comportamiento de los reactivos y productos de cada reacción.

Las primeras tres ecuaciones representan la tasa de cambio de las especies microbiológicas. Esta ecuación posee dos componentes una parte que indica la tasa de crecimiento específico de cada microorganismo y una segunda parte que toma en consideración la fracción de microorganismos que es impulsada fuera del biodigestor por la biomasa arrastrada. Cuando la tasa de dilución, D , es cero la cantidad de microorganismos permanece constante asemejándose a un reactor discontinuo. En el momento en que este valor cambia, siendo su valor máximo 1, la cantidad de microorganismos dentro del biodigestor disminuye a medida que el valor de dicha variable aumenta.

Las tres ecuaciones restantes describen el cambio en la demanda química de oxígeno (DQO), la concentración ácido propiónico y ácido acético. La primera ecuación determina la cantidad de reactivo disponible para ser transformado. La DQO depende de las condiciones de entrada, las condiciones existentes y el rendimiento de la reacción química. La cantidad de ácido propiónico (AP) es establecida por la segunda ecuación y depende de igual manera de las condiciones de entrada, de las condiciones existentes y los rendimientos de las reacciones de DQO y AP. Y la última ecuación modela el comportamiento del ácido acético y depende de las mismas condiciones y rendimientos de reacción que las ecuaciones mostradas anteriormente.

Para el modelamiento del biodigestor es necesaria la utilización de varias constantes. Para este modelo utilizamos las siguientes constantes.

| Parámetro | Valor y unidades |
|---------------|---|
| $\mu_{max,1}$ | 1.2 (d ⁻¹) |
| $\mu_{max,2}$ | 0.5 (d ⁻¹) |
| $\mu_{max,3}$ | 0.74 (d ⁻¹) |
| $k_{s,1}$ | 7.1 (g DQO/l) |
| $k_{s,2}$ | 5.4 (mM AGV1) |
| $k_{s,3}$ | 9.28 (mM AGV2) |
| $k_{I,2}$ | 3.288 (mM AGV1) ^{1/2} |
| $k_{I,3}$ | 16 (mM AGV2) ^{1/2} |
| k_1 | 10.53 (g DQO/g x ₁) |
| k_2 | 9.45 (mmol AGV1/ g x ₁) |
| k_3 | 20.37 (mmol AGV1/ g x ₂) |
| k_4 | 28.6(mmol AGV2/g x ₁) |
| k_5 | 8.83(mmol AGV2/g x ₂) |
| k_6 | 1074(mmol AGV2/gx ₃) |
| k_{10} | 1740 (mmol CH ₄ / g x ₃) |
| α | 0.5 (adimensional)) |

Tabla 26 Parámetros del modelo (Bernard et al., 2001; Dochain et al., 1991, (Kus y Weissmann, 1995)⁴².

⁴² Íbid.

Teniendo en cuenta las ecuaciones mencionadas anteriormente se obtuvo un rendimiento de metano descrito por la figura 26.

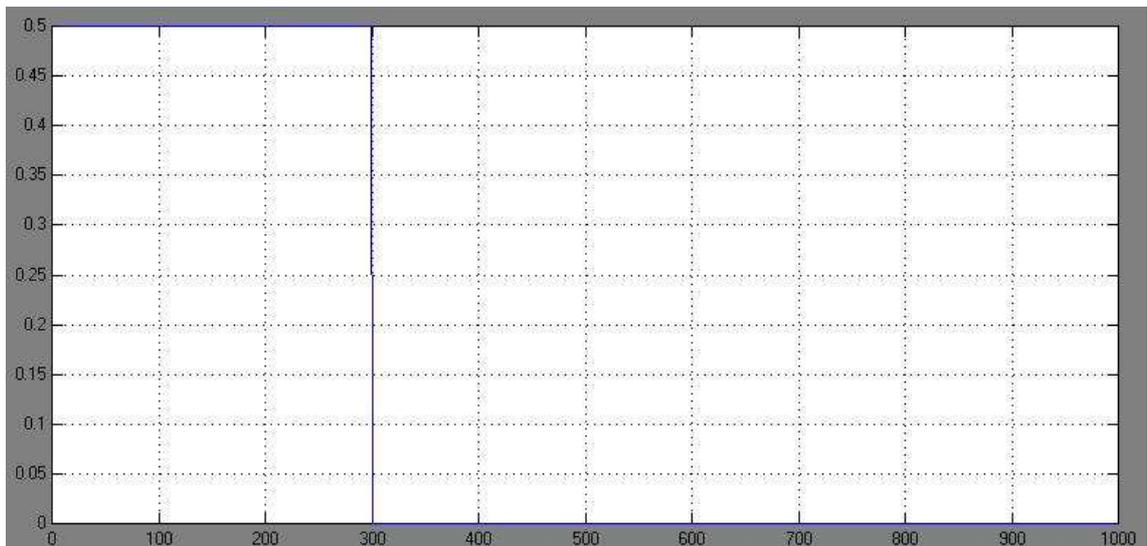


Figura 25. Taza de dilución d^{-1} vs. T

La operación que se muestra en la figura 25 es el cargue del biodigestor a razón de 50% de taza de dilución para posteriormente terminar con una taza de dilución de cero, es decir, el biodigestor actúa como un reactor discontinuo.

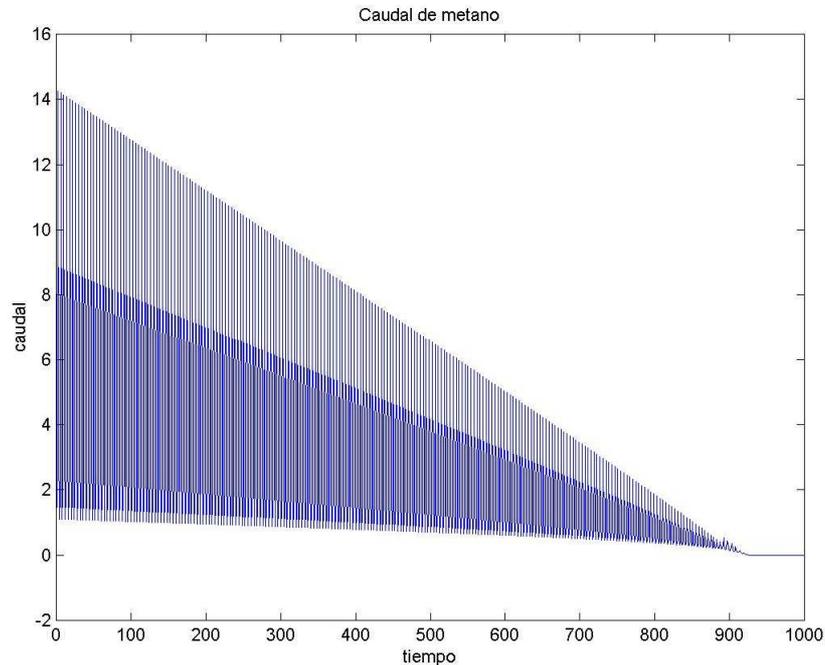


Figura 26. Caudal de metano producido al final del proceso de digestión anaerobia.

Esta figura muestra el caudal de metano a la salida del proceso. El caudal total logrado por el biodigestor es de $2.4881 \text{ mol/día} \times l$.

Por ultimo hay que decir que durante el proceso de carga del biodigestor la producción de metano presenta oscilaciones de gran amplitud y esta a su vez va disminuyendo debido a que en el biodigestor la cantidad de materia que le entra a su vez tiene que ser evacuada y por esto la biomasa que entra arrastra una gran cantidad de microorganismos y esto ocasiona que la producción de metano vaya disminuyendo.

4. CONCLUSIONES

En el primer capítulo se hizo evidente el atraso del país y de la región en cuanto al aprovechamiento de los recursos renovables disponibles en nuestro entorno. Aun a pesar de la crítica situación que acaece en el tema de hidrocarburos a nivel nacional e internacional, es notable el poco interés de los países por mejorar en la proporción de energía primaria renovable con respecto al total.

En el segundo capítulo se realizó un diagrama de Pareto de las potencialidades de los distintos desechos generados en la ciudad de Cartagena y sus alrededores. A pesar de que los desechos agrícolas arrojaron los mayores potenciales, su aprovechamiento es difícil debido a que se encuentran dispersos en su mayoría y en otros casos se rivaliza con otros usos del desecho.

En el caso específico de los residuos sólidos urbanos domésticos su utilización se dificulta debido a la mezcla de los residuos utilizables con otros desechos superfluos que hacen mandatorio un proceso de separación que puede representar un encarecimiento en los costos de una solución por medio de esta vía. La separación en la fuente es un camino a seguir pero implica altos costos y riesgos en campañas de educación ciudadana y arreglos logísticos en la

recolección. De esta manera el desecho más viable para ser aprovechado son las aguas negras.

Por ultimo, se propuso la utilización de un sistema de digestión anaerobia para el aprovechamiento de las aguas negras. Se obtuvo entonces el caudal específico para una operación normal de cargue al 50%. Este caudal resultante dependerá de las dimensiones del digestor. Entonces para un digestor de 1 m^3 . El caudal resulta igual a 2488.1 mol/día . Si consideramos el peso molecular del metano como 16.04 l/mol (Wark y Richards, 2001) el caudal volumétrico sería igual a $39909,124 \text{ l/día}$. El próximo paso sería entonces un análisis económico de distintas alternativas de procesos con distintos productos finales o combinaciones de ellos. Sin embargo, esta cifra por si sola nos permite afirmar que vale la pena mirar de cerca esta alternativa tecnológica pues tiene el potencial de generar réditos considerando el gran volumen de aguas negras y su localización puntual.

5 RECOMENDACIONES

A partir del estudio descriptivo realizado acerca de los recursos biomásicos de la región circundante a la ciudad de Cartagena es posible realizar estudios de localización costo efectiva de centro de recolección en el futuro para minimizar los costos debidos a transporte y recolección de desechos agrarios in situ.

De igual manera es posible a partir del análisis de los potenciales de los desechos biomásicos priorizar en futuras iniciativas que persigan el aprovechamiento de algunos de los recursos aquí analizados.

Es posible, además, a partir del modelo, que se incluye en el CD, construir procesos con distintos productos finales creando escenarios diferentes para realizar estudios de factibilidad económica y social. Para que estos proyectos sean valorados en su verdadera dimensión se recomienda utilizar un enfoque costo-beneficio en lugar de las estrategias habituales; como Tasa Interna de Retorno, Valor Presente Neto, entre otras; para así tomar en cuenta los beneficios intangibles que este proyecto generaría en la calidad de vida y del agua de los actores involucrados.

6 BIBLIOGRAFIA

BRIGANTI FERNANDEZ, Johanna Margarita. Lineamientos para la separación en la fuente de residuos sólidos producidos por el sector residencial (Estratos 4, 5 y 6) de la ciudad de Cartagena D. T. y C. Cartagena. CARDIQUE-UTB. 2003.

CÁRDENAS, Héctor W. Devia, Jorge R. Situación energética de la costa atlántica Residuos agropecuarios. Barranquilla. Pesenca. 1989.

ECOPETROL. Dirección General de Planeación y Riesgos. Estadísticas Volumétricas de la Industria Petrolera. Periodicidad Mensual. Cartagena. ECOPETROL. 2005.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Annual Energy Outlook 2005 Overview. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. 2005.

GARCIA, Marcelo. Biomassa Brasil – Palestra. 2005. 29p

GARCIA, Marcelo. Biomassa Brasil – Bracelpa. 2002 - 2003

INGEAMBIENTE LTDA. Estudio e identificación de residuos sólido urbanos en la ciudad de Cartagena. Cartagena. CARDIQUE. Diciembre 1998.

MILLER, E. C. Relation between age and dry weight of the corn plant. Kansas. Kansas State College of Agriculture and Applied Science. 1943.

OLADE. Sistema de Información Económica-Energética, energía en cifras. **16**. Quito. OLADE. 2004.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. Colombia invertirá us\$80 millones por año en exploración petrolera. Bogota. Presidencia de la Republica. 23 de mayo 2005. <http://www.presidencia.gov.co/sne/2005/mayo/23/03232005.htm>.

SHIZAS, Ioannis. BAGLEY, David M. Experimental Determination of Energy Content of Unknown Organics in Municipal Wastewater Streams. Journal of Energy Engineering © ASCE. Agosto. 2004.

TCHOBANOGLIOUS, Geroge. THEISEN, Hilary. VIRGIL, Samuel A. Gestión Integral de Residuos Sólidos. España. McGrau-Hill. 1994.