



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TECNOLOGÍAS PARA EL USO DE BIOMASA  
TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN**

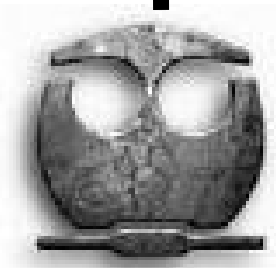
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**KARINA JIMÉNEZ COLÍN**

**MÉXICO, D.F.      DICIEMBRE      2010**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: M. en I. ALEJANDRO ANAYA DURAND

**VOCAL:** Profesor: Ing. JUAN JOSE RUÍZ LÓPEZ

**SECRETARIO:** Profesor: Dra. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Dr. ALFONSO DURAN MORENO

**2° SUPLENTE:** Profesor: Ing. JOSE LUIS ZARAGOZA GUTIÉRREZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.**

---

**ASESOR DEL TEMA: DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ**

---

(Nombre y firma)

**SUSTENTANTE (S): KARINA JIMÉNEZ COLÍN**

---

(Nombre (s) y firma (s))

# **Dedicatoria**

**Este trabajo se lo dedico a mis padres**

**La señora Enriqueta Colín Plata y**

**El señor Juan Antonio Jiménez Nieto**

**Quienes son las personas que más quiero, respeto y admiro.**

**Les agradezco todo su apoyo, su confianza, su cariño y sobre todo su  
paciencia.**

**Gracias por estar siempre para mí,**

**Gracias por ser los mejores padres que pude tener.**

**Los quiero mucho**

# Agradecimientos

Le doy gracias a mi madre y a mi padre por ser todo para mí.

A mis hermanas que tanto quiero y a mi sobrino que a pesar de ser tan pequeño llena de alegría la casa.

A mis amigas de la preparatoria, porque cada uno de sus logros es una motivación para seguir adelante.

A todas las personas que me han apoyado desde el inicio, que han estado conmigo y de las que he aprendido algo, y gracias a quien siempre me dijo que todo iba a estar bien.

Gracias a quienes hicieron más llevadero mi paso por la Facultad de Química: Rodolfo, Iris, Manuel, Daniel, Juan, Tmok, Alejandro, Annel y Arturo. Tengamos contacto o no, ustedes hicieron una diferencia en mi vida.

Gracias a ti Israel, por tus porras, tus regaños, tu apoyo, tu cariño, tu presencia y por supuesto gracias a ese reloj que nos puso puntual ahí.

Produce una inmensa tristeza pensar  
que la naturaleza habla  
mientras el género humano no escucha

---

Víctor Hugo

---

## Índice

---

	Página
Índice de contenido	I
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
Abreviaturas	VIII
Resumen	IX
Capítulo 1 Introducción	2
1.1. Objetivo general	3
Capítulo 2 Fundamentos	5
2.1. Biomasa	6
2.2. Clasificación de la biomasa	7
2.2.1. Biomasa natural	7
2.2.2. Biomasa residual	7
2.2.2.1. Residuos agrícolas y forestales	7
2.2.2.2. Residuos ganaderos y agroindustriales	9
2.2.2.3. Residuos urbanos	10
2.2.3. Cultivos energéticos	10
2.3. Características de la biomasa	11
2.3.1. Contenido de humedad	12
2.3.2. Poder o valor calorífico	13
2.3.3. Porcentaje de cenizas y densidad aparente	14
2.4. Biocombustibles	14
2.4.1. Biocarburantes	14
2.4.1.1. Bioalcoholes	15
2.4.1.2. Bioaceites	15
2.5. Conversión de biomasa a energía	16
2.5.1. Pre tratamiento de la biomasa	16
2.5.2. Tipos de procesos de conversión de biomasa a energía	18
2.5.2.1. Procesos termoquímicos	20
2.5.2.1.1. Combustión directa	20
2.5.2.1.2. Pirólisis	22
2.5.2.1.3. Gasificación	24
2.5.2.2. Procesos bioquímicos	25
2.5.2.2.1. Degradación anaerobia	25
2.5.2.2.2. Fermentación alcohólica	26
2.5.2.3. Procesos fisicoquímicos: Transesterificación	28

Capítulo 3. Producción de biogás por degradación anaerobia	31
3.1. Biogás	31
3.2. Degradación anaerobia o digestión	32
3.3. Etapas de la digestión	33
3.3.1. Hidrólisis	33
3.3.2. Acidogénesis	34
3.3.3. Acetogénesis	34
3.3.4. Metanogénesis	34
3.4. Digestores	36
3.5. Clasificación de digestores	39
3.5.1. Carga	39
3.5.2. Intensidad de mezcla	40
3.5.2.1. Intensidad de mezcla parcial	40
3.5.2.2. Intensidad de mezcla completa	40
3.5.3. Manejo de substrato	41
3.5.3.1. Filtro anaerobio	41
3.5.3.2. Lecho fluidizado	43
3.5.3.3. Reactor de lecho de lodos	43
3.5.4. Manejo bioquímico	44
3.5.4.1. Sistema de dos etapas	45
3.5.4.2. Sistema de dos fases	45
3.5.4.3. Sistemas híbridos	46
3.6. Factores que intervienen en la producción de biogás	46
3.6.1. Temperatura	46
3.6.2. pH	47
3.6.3. Contenido de sólidos	47
3.6.4. Ácidos grasos volátiles	47
3.6.5. Relación carbono/nitrógeno	48
3.6.6. Concentración de nutrientes	48
3.7. Biogás de vertederos o rellenos sanitarios	48
3.8. Ventajas de la degradación anaerobia	49
Capítulo 4 Tecnologías para uso de biomasa	52
4.1. Tecnología empleada en combustión	52
4.1.1. Hornos	52
4.1.2. Calderas	52
4.1.3. Estufas eficientes de leña	53
4.2. Tecnología empleada en gasificación	55
4.2.1. Gasificadores	55
4.2.2. Experiencias empleando gasificadores	56
4.2.3. Ejemplos de costos de gasificadores	58
4.2.4. Gasificación de plasma	59



4.3. Tecnología empleada en pirólisis	
4.4. Tecnología empleada en degradación anaerobia	60
4.4.1. Ejemplos de experiencias empleando digestores	62
4.4.2. Ejemplos de costos de digestores	
4.5. Nivel de desarrollo de tecnologías para uso de biomasa en Europa.	63
	66
4.6. Estado del arte de tecnologías para uso de biomasa	69
4.7. Costo de inversión de tecnologías	71
Capítulo 5. Financiamiento de proyectos	73
5.1. Reducción de gases de efecto invernadero	73
5.2. Protocolo de Kyoto	74
5.2.1. Comercio de emisiones o bonos de carbono	75
	77
5.2.2. Implementación conjunta	78
5.2.3. Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	79
5.3. Financiamiento del MDL	80
5.3.1. El Banco Mundial y el Fondo Prototipo de Carbono	80
	82
5.3.2. Otros financiamientos	82
5.4. Financiamientos en México	
5.5. Experiencias con proyectos financiados por el MDL en México	89
5.6. Evolución de proyectos MDL	92
Conclusiones	92
Referencias	96
Anexo 1	107
Anexo 2	108

## Índice de Figuras

---

	Página	
Figura 2.1	Origen de la biomasa	6
Figura 2.2	Pellets de madera	18
Figura 2.3	Métodos de obtención de energía a partir de diferentes residuos	19
Figura 2.4	Sistema de combustión mixta	21
Figura 2.5	Proceso industrial de pirólisis	22
Figura 2.6	Horno de tierra	23
Figura 2.7	Horno de mampostería	23
Figura 2.8	Generación de energía eléctrica a partir de gasificación de biomasa	24
Figura 2.9	Generación de energía eléctrica a partir de un proceso de digestión	26
Figura 2.10	Proceso de producción de etanol a partir de residuos de cosecha de caña	27
Figura 2.11	Proceso de transesterificación para obtener biodiesel	29
Figura 2.12	Conversión de biomasa a energía	29
Figura 3.1	Etapas de la degradación anaerobia	36
Figura 3.2	Producción de biogás en un digestor	37
Figura 3.3	Modelo clásico de un digestor actual	38
Figura 3.4	Reactores de mezcla completa	40
Figura 3.5	Reactor de lecho fijo	42
Figura 3.6	Reactor de filtro anaerobio	42
Figura 3.7	Reactor de lecho fluidizado	43
Figura 3.8	Reactor UASB	44
Figura 3.9	Esquema de un sistema de dos etapas	45
Figura 3.10	Esquema de un sistema híbrido	46
Figura 3.11	Producción de energía eléctrica en rellenos sanitario	49

Figura 4.1	Gasificador de Instituto de Ingeniería UNAM	56
Figura 4.2	Proceso de gasificación de plasma	60
Figura 4.3	Instalación de un digestor tubular de ferrocemento	66
Figura 4.4	Digestor de la granja “La Estrella”	66
Figura 4.5	Vista aérea de la planta Batocoop, en Hungría	66
Figura 4.6	Digestor industrial en Holanda	66
Figura 5.1	Efecto invernadero	73
Figura 5.2	Distribución de compradores de CER’s por país o región en 2005	76
Figura 5.3	Distribución de compradores de CER’s por país o región en 2006	77
Figura 5.4	Distribución de vendedores de CER’s por país o región en 2005	87
Figura 5.5	Distribución de vendedores de CER’s por país o región en 2006	88
Figura 5.6	Distribución de proyectos registrados en el mundo	88

## Índice de Tablas

---

	Página
Tabla 2.1 Coeficiente de generación de biomasa procedente de diversos tipos de cultivos	8
Tabla 2.2 Características físicas de la biomasa	12
Tabla 2.3 Poder calórico de algunos tipos de biomasa	13
Tabla 3.1 Composición química del biogás	31
Tabla 3.2 Composición del biogás derivado de diversas fuentes	32
Tabla 3.3 Clasificación de digestores por tipo de carga	39
Tabla 3.4 Reactores de mezcla completa	41
Tabla 3.5 Ventajas de la degradación anaerobia	50
Tabla 4.1 Experiencias con hornos de biomasa	52
Tabla 4.2 Ejemplos de biomasa que es incinerada en calderas para producción de energía eléctrica y vapor	53
Tabla 4.3 Costo de estufas eficientes	54
Tabla 4.4 Tipos de gasificadores y sus características	55
Tabla 4.5 Ejemplos de experiencias empleando gasificadores en América Latina	57
Tabla 4.6 Tipos de gasificadores de biomasa empleados en China	58
Tabla 4.7 Costo de gasificadores según su uso y capacidad	59
Tabla 4.8 Reactores de pirólisis rápida para producción de aceite	62
Tabla 4.9 Clasificación de digestores de acuerdo a su uso	63
Tabla 4.10 Ejemplos de experiencias de diferentes tipos de digestores empleados en países de América Latina	64
Tabla 4.11 Experiencias en producción de biogás en otros países	65
Tabla 4.12 Tipo de recurso, tecnología y su costo, para la obtención de biogás	67

Tabla 4.13	Resumen del estado y desarrollo en tecnología para producir energía eléctrica y calor a partir de biomasa, en Europa	68
Tabla 4.14	Análisis FODA de desarrollo de biomasa energética	69
Tabla 5.1	Proyectos registrados según el sector de desarrollo	80
Tabla 5.2	Fondos de carbono	81
Tabla 5.3	Organismos que subsidian la implementación de fuentes renovables de energía	82
Tabla 5.4	Organismos que fomentan proyectos MDL en México	83
Tabla 5.5	Proyectos y actividades financiados	84
Tabla 5.6	Distribución sectorial de los proyectos MDL con carta de aprobación en México	85
Tabla 5.7	Ejemplos de experiencias con proyectos financiados por MDL en México	78
Tabla 5.8	Análisis FODA de desarrollo de proyectos MDL	90
Tabla A1	Procedencia de Gases de Efecto Invernadero	107

## Vocabulario

---

AEA	Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica
AGV's	Ácidos grasos volátiles
ARTI	Appropriate Rural Technology Institute
BioCF	Fondo de Biocarbono
CAF	Cooperación Andina de Fomento
CEN	Comité Europeo de Normalización
CER	Certificado de Reducción de Emisiones
COMEGEI	Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CRE	Comisión Reguladora de Energía
EARTH	Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda
ERU	Unidades de Reducción de Emisiones
FCDC	Fondo Carbono para el Desarrollo Comunitario
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
FOMECAR	Fondo Mexicano del Carbono
FPC	Fondo Prototipo del Carbono
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIRA	Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada
HFC	Hidrofluorocarbono
HR	Humedad Relativa
IFC	Corporación Financiera Internacional
ISR	Impuesto sobre la Renta
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MAA	Montos Asignados Anualmente
MTBE	Metil ter butil éter
PFC	Perfluorcarbonos
PLAC	Programa Latinoamericano de Carbono
RMC	Reactor de mezcla completa
RSU	Residuos sólidos urbanos
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
UASB	Flujo ascendente anaerobio de manto de lodos (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

## Resumen

---

La biomasa es la fuente de energía renovable, es un conjunto de materiales de naturaleza biológica (desechos agrícolas y forestales, cultivos energéticos, desechos animales y basura urbana). Su importancia radica en que es susceptible de ser aprovechada para la producción de energía térmica y eléctrica, a la vez que se aprovechan los residuos. De ella pueden producirse prácticamente toda la gama de productos que hoy en día se obtienen del petróleo y su producción es mucho más rápida y barata que la formación de combustible fósiles.

Por otra parte, existen tecnologías ya maduras para su utilización como son: Los hornos y calderas de biomasa, los digestores y gasificadores y, en desarrollo nuevas tecnologías de producción y aplicación, por ejemplo las plantas de pirólisis, que contribuirán en un corto-medio plazo a la mayor rentabilidad de explotación de esta fuente.

Existen diferentes procesos para convertir biomasa en energía, en el presente trabajo se tratan estos, pero se hace hincapié en el proceso de degradación anaerobia. Dicho proceso consiste en la descomposición bacteriana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante el cual se obtiene biogás, un gas compuesto en su mayoría por metano y en menor medida por dióxido de carbono. Puede emplearse en sustitución de la leña o gas LP en lo que respecta a funciones domésticas o bien para producir energía eléctrica mediante turbinas o motogeneradores, y como residuo se produce un fertilizante natural.

Se abunda en los sistemas anaerobios en la fundamentación debido a que es el sistema bioquímico más utilizado en México y del cual se ha obtenido mayor financiamiento para su instalación por medio del Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente



## Capítulo 1. Introducción

---

Uno de los problemas más acuciantes que enfrenta la humanidad en nuestros tiempos es el de encontrar una solución al deterioro de las condiciones ambientales a escala global, como consecuencia de la actividad industrial de las últimas centurias, donde la política seguida para el desarrollo se ha basado en la explotación indiscriminada de los recursos, sin tener en consideración su impacto en el entorno.

Desde el protocolo de Kyoto, en 1997, muchas naciones acordaron la reducción del 5.2% de sus emisiones que contribuyen al llamado efecto invernadero, con lo cual se pone en evidencia la necesidad de buscar alternativas de obtención de energías “limpias”, que hagan posible un desarrollo energético suave, único camino posible para un desarrollo sostenible para la humanidad.

El uso de fuentes de energía renovables es ya indispensable para lograr los cambios necesarios y hacer frente a los impactos del calentamiento global.

La biomasa es la forma más común de energía renovable, ampliamente utilizada y que ha cobrado mayor importancia a últimas fechas, al identificar las especies adecuadas de biomasa, que pueden proporcionar productos de alta energía, para sustituir las fuentes convencionales de energía.

El tipo de biomasa requerida es determinada en gran medida por el proceso de conversión de energía y la forma en que se requiere. La conversión de biomasa en energía puede lograrse de distintas formas, entre las que se destaca la degradación anaerobia que constituye un proceso apropiado, al transformar la fracción orgánica de los residuos en un combustible renovable (biogás) y un residuo estabilizador que constituye un abono mejorador de suelos.

En tanto exista vida humana van a existir residuos, porque son el resultado de nuestra necesidad de producir y consumir, y considerando que hoy en día la población supera los 6,000 millones de personas, se genera una cantidad de residuos sin precedentes.

Más de 40% de residuos son de origen orgánico (Robles, 2008), es decir, biomasa, lo que también implica que es biodegradable, y es posible tratarlo mediante la degradación anaerobia y producir biogás.

El biogás es un recurso bioenergético de gran valor. Puede emplearse para producir electricidad, como gas de refrigeración, para la iluminación, la cocción de alimentos y el funcionamiento de motores de combustión interna de los medios de transporte automotores, y solucionar el problema ambiental de efluentes de producción agrícola, industrial y la basura municipal.

Con el desarrollo de energía renovable, en particular el aprovechamiento de biogás, se abre la posibilidad de que los desechos de granjas porcinas, establos y rastros, que presentan un gran potencial para generar biogás, puedan producir con esta energía eléctrica y térmica, y emplearla en diversos procesos productivos al interior de las explotaciones, de forma amigable con el medio ambiente.

### **1.1 Objetivo general**

Realizar un compendio de tecnologías para uso de biomasa y su conversión en energía.

Objetivos particulares

- Conocer la importancia de la biomasa como fuente de energía.
- Conocer los procesos de conversión para transformar biomasa en bioenergía, especialmente el proceso de degradación anaerobia para producir biogás.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

## Capítulo 2. Fundamentos

---

### 2.1 Biomasa

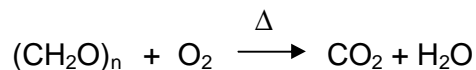
Biomasa es un término muy amplio, que se utiliza para describir el material de origen biológico reciente, que puede emplearse como fuente de energía (Bruton, 2007).

En el sentido estricto de la palabra, el término biomasa se refiere a la materia orgánica que se produce en las plantas verdes a través del proceso de fotosíntesis, así como a la originada en los procesos de transformación del material orgánico, considerando tanto los que se producen de forma natural, como de forma artificial. Cabe señalar, que la formación o transformación de la materia orgánica ha de ser reciente, lo que excluye del concepto a los combustibles fósiles (Lizana, 2007).

La biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. En dicho proceso, la energía contenida en la radiación solar se transforma en energía química, siendo el esquema general de la reacción, el siguiente:



Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. Y lo más importante, manteniendo el balance de dióxido de carbono en el ambiente (BUN-CA, 2002).



El dióxido de carbono producido no contribuye con el efecto invernadero, ya que las plantas y los árboles que están creciendo lo capturan nuevamente de la atmósfera. Lo que representa una de las ventajas del uso de la biomasa como fuente de energía, ya que no se altera el ciclo natural, siempre y cuando se use de forma sostenible.

La Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 (Comité Europeo de Normalización), define la biomasa como: Todo material de origen biológico, excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas, sufriendo un proceso de mineralización (carbón, petróleo y gas) que no cumplen con “el balance neutro de la biomasa” en lo que se refiere a las emisiones de dióxido de carbono (Rico, 2007).

La biomasa cubre un rango muy amplio de fuentes vegetales, incluyendo aquéllas utilizadas directamente para combustible por ejemplo, la leña, y aquéllas que se procesan en biocombustibles como son: Maíz, soya, la caña de azúcar, jatropha (Cotter y Reyes-Tirado, 2004). Como tal, incluye los árboles, cosechas, algas y otras plantas, así como residuos agrícolas y de bosque. También incluye muchos materiales que sean considerados como basura por nuestra sociedad como: Residuos de alimento, los lodos, los abonos, los subproductos orgánicos industriales, la fracción orgánica de la basura de la casa, los desechos biológicos animales y humanos, entre muchos otros (Bruton, 2007; Turkenburg, 2003), esto se resume en la Figura 2.1.

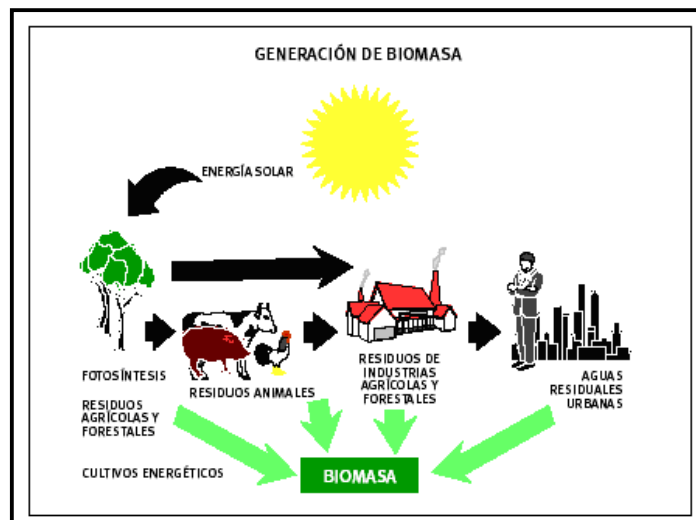


Figura 2.1. Origen de la biomasa (BUN-CA, 2002)

La disponibilidad de biomasa varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etcétera. Por esto, los aspectos relacionados con la

infraestructura, el manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso que se desee explotar.

## **2.2 Clasificación de la biomasa**

La biomasa se clasifica de acuerdo a su origen en:

- Biomasa natural
- Biomasa residual
- Cultivos energéticos

### **2.2.1 Biomasa natural**

La biomasa natural es la producida en ecosistemas naturales, es decir, aquellos que se desarrollan espontáneamente en tierras no cultivadas (Karekezi y col., 2004), entre los que tenemos: La vegetación de los bosques y selvas, las plantas marinas, etcétera.

### **2.2.2 Biomasa residual**

Es el conjunto de materiales de origen natural generados en las actividades de producción, transformación y consumo, que en el contexto en el que son generados no tienen ningún valor económico (Ballesteros, 2006).

Los residuos constituyen sustancias de composición muy variable, pero con un denominador común, que son potencialmente contaminantes y en algunos casos son difíciles de eliminar. La biomasa residual puede clasificarse dependiendo de su origen en:

- Residuos agrícolas y forestales
- Residuos ganaderos y agroindustriales
- Residuos urbanos

#### **2.2.2.1 Residuos agrícolas y forestales**

Los *residuos agrícolas* comprenden todas las partes de los cultivos alimentarios o industriales que no son consumibles o comercializables, como son: Raíces, tallos, hojas o frutos no aprovechables y en general, la parte aérea de la planta

que es preciso separar para facilitar la recolección o las labores agrícolas; algunos cultivos industriales como los textiles y oleaginosas (girasol, algodón), las pajas de los cereales grano y el cañote de maíz (Castells, 2004).

La agricultura genera cantidades considerables de desechos o rastrojo. Se estima que, en cuanto a desechos del campo, el porcentaje es mayor al 60%, y en desechos de proceso varía de 20% a 40%.

Para dar una idea de la proporción entre producto agrícola y la cantidad de residuo que se genera, en la Tabla 2.1 se estima el coeficiente de generación de residuos de biomasa, es decir, la relación entre la tonelada de residuo generado por tonelada de producto, según el tipo de cultivo. Considerando solo la caña de azúcar se observa que por 1.5 toneladas de residuos por una tonelada de producto.

Tabla 2.1  
Coeficiente de generación de biomasa procedente de diversos tipos de cultivos  
(Castells, 2004)

Tipo de cultivo	Coeficiente de generación (Ton residuo/Ton producto)
Cereales grano	
Trigo	1.20
Maíz	2.00
Arroz	1.50
Cebada	1.35
Avena	1.35
Centeno	1.35
Sorgo	1.70
Industriales	
Algodón	2.00
Caña de azúcar	1.50
Girasol	2.00
Frutales	
Cítricos	0.15
Olivar	1.55
Viñedo	0.85

Los *residuos forestales* son los residuos de las industrias de la transformación primaria de la madera. Son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada. De cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un 20%, mientras un 40% quedan sobre el

terreno en forma de cortezas, raíces, ramas y hojas y el otro 40% son los desechos del proceso de aserrío, que son las astillas y el aserrín.

Los residuos forestales, aparte de que puede emplearse para generar energía, presentan otras ventajas, el limpiar los bosques de éstos desechos evitara la propagación de incendios y de plagas, contribuyendo así al rendimiento de los bosques.

### **2.2.2.2 Residuos ganaderos y agroindustriales**

Los *residuos ganaderos*, como el estiércol de animal, usado como abono; ha pasado, en gran medida, a ser un residuo al ser sustituido por fertilizantes.

En las granjas que producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales, y se ocupan de él, lo tratan esparciéndolo en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficios de su valor nutritivo. Pero, si esto se práctica de forma desmedida, puede provocar una sobrefertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas (Castells, 2004).

Los *residuos agroindustriales* corresponden a aquellos de naturaleza orgánica que son producidos por las industrias derivadas de la agricultura (azucareras, fábricas de cervezas, destilerías, etcétera) y la ganadería (mataderos, lecherías, entre otras).

Los residuos que merecen destacarse por su importancia cuantitativa son los procedentes de la extracción de aceites de semillas (cáscaras), de la elaboración de frutos secos, de la industria conservera y de la fabricación de cerveza y malta.

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuente de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpas). Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.



### **2.2.2.3 Residuos urbanos**

Procedentes de la actividad humana en los núcleos urbanos. Su tratamiento y eliminación son un problema cada vez mayor, debido a su continuo crecimiento (Karekezi y col., 2004). Pueden dividirse en dos grandes grupos:

a) Residuos sólidos urbanos (RSU) o materiales procedentes de un proceso de fabricación, transformación, utilización y consumo cuyo poseedor los destina al abandono. Tienen composición muy variable aunque, en general, se puede afirmar que en un 50% están compuestos de materia orgánica y, por tanto, son susceptibles de ser aprovechados energéticamente.

Los residuos sólidos urbanos utilizables, por las características del proceso del aprovechamiento, provienen de núcleos de población de más de 100,000 habitantes, por ejemplo la Ciudad de México donde se generan 12 mil toneladas de basura al día (Robles, 2008), de la cual más de 7 mil toneladas corresponden a desechos orgánicos.

b) Aguas residuales, es decir, líquidos contaminados en su utilización con sustancias orgánicas o inorgánicas. Su tratamiento constituye una necesidad ambiental para evitar mayor contaminación en los cauces receptores de dichos líquidos. El fango obtenido en la depuración del agua residual tiene un alto contenido en materia orgánica y, por tanto, puede ser utilizado como residuo energético.

Se debe tener en cuenta que la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , entre otros), que contribuyen a aumentar el efecto invernadero, por lo que es necesario emplearlos en la generación de energía "limpia".

### **2.2.3 Cultivos energéticos**

Son cultivos específicos, dedicados exclusivamente a la producción de energía. Estos cultivos, a diferencia de los agrícolas tradicionales, tienen como principales características su gran productividad de biomasa (generalmente superior a las 12 Ton materia seca por hectárea y año), y su elevada rusticidad, expresada en términos como: Resistencia a las enfermedades y a la

sequía, vigor y precocidad de crecimiento, capacidad de rebrote y de adaptación a terrenos marginales (Ballester, 2006).

Para ello, se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su periodo de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que puedan ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación (Hoogwijk y col., 2003).

Una condición imprescindible para la viabilidad de este tipo de cultivos, es la necesidad de que el balance energético de todo el proceso productivo sea positivo, es decir, que se produzcan más calorías de las que se han consumido en su obtención.

Atendiendo a su origen, los cultivos de interés agroenergético están integrados por especies leñosas y herbáceas, entre las cuales se incluyen especies cultivadas en la agricultura tradicional como: El trigo, maíz, sorgo y caña de azúcar, igualmente se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como: Jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como bioetanol y biodiésel (Karekezi y col., 2004).

Los cultivos energéticos pueden clasificarse como:

- a) Especies leñosas. Por ejemplo el *populus*.
- b) Especies herbáceas. *Miscanthus*, *cynara*, entre otras.
- c) Cultivos para producir etanol. Trigo, maíz, patata, sorgo azucarero, etcétera.
- d) Cultivos para producir biodiésel. Colza, girasol, lino oleaginoso, etcétera.

### **2.3 Características de la biomasa**

Existen diferentes procesos de conversión para extraer energía de la biomasa. La selección del proceso adecuado técnica y económicamente depende del tipo de biomasa y las características de la misma. En la Tabla 2.2 se presentan algunas características típicas de la biomasa residual.

Tabla 2.2  
Características físicas de la biomasa (BUN-CA, 2002)

Recursos de Biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos Forestales	Restos de aserrío: Corteza, aserrín, astillas.	Polvo, sólido, HR >50%
	Restos de ebanistería: Aserrín, trozos, astillas.	Polvo, sólido, HR 30-45%
	Restos de plantaciones: Ramas, cortezas, raíces.	Sólido, HR > 55%
Residuos ganaderos y agroindustriales	Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad
	Residuos de cosecha: Tallos, hojas, cáscara, maleza, pastura.	Sólido, HR > 55%
	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, alto contenido de humedad
	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café).	Polvo, sólido, HR <25%
Residuos urbanos	Desechos domésticos orgánicos	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas negras.	Líquido

### 2.3.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad o humedad relativa, se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada en por ciento en peso. El valor de la humedad se puede indicar en base seca o base húmeda de acuerdo a las siguientes ecuaciones (BUN-CA, 2002).

$$\% \text{Base seca} = \frac{\text{Peso del agua contenido en la biomasa}}{\text{Peso del material seco}} * 100$$

$$\% \text{Base húmeda} = \frac{\text{P del agua contenido en la biomasa}}{\text{P material seco} + \text{P agua contenido en la biomasa}} * 100$$

El valor en base húmeda siempre es menor que en base seca, por lo que es importante indicar el método aplicado.

### 2.3.2 Poder o valor calorífico

Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. Expresa la cantidad de energía por unidad física de masa o volumen (por ejemplo: J/kg, kcal/m<sup>3</sup>).

El poder calorífico está relacionado directamente con la humedad relativa, ya que un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

El poder calorífico puede ser: Bruto o superior y neto o inferior. El bruto se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por el peso. El neto es la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua en la biomasa; es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable, y siempre es menor que el valor calorífico bruto.

En la Tabla 2.3 se presentan el poder calórico superior para algunas formas de biomasa.

Tabla 2.3  
Poder calórico de algunos tipos de biomasa (BUN-CA, 2002)

Tipo de biomasa	Valor calórico bruto (MJ/kg)
<b>Madera</b>	
Astillas de madera	20.89
Corteza de pino	20.95
Aserrín	19.34
Desechos industriales de madera	19.00
<b>Subproductos agrícolas</b>	
Paja de trigo	18.94
Caña	18.06
Bagazo	18.09
Cáscara de coco	18.60
Olote de maíz	17.72
Paga de arroz	15.61
Cascarilla de arroz	15.58

### 2.3.3 Porcentaje de cenizas y densidad aparente

El primero indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. La densidad aparente se define como el peso por unidad de volumen

del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Biomasa con alta densidad aparente favorece la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los periodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica algunos procesos de conversión y eleva los costos. Cabe señalar que la mayor parte de la biomasa tiene una densidad aparente baja.

## **2.4 Biocombustibles**

La biomasa puede ser transformada en productos líquidos, sólidos y gaseosos con potencial para generar energía, ya sea a través de su incineración o mediante otro proceso de conversión energética. Éstos productos son llamados biocombustibles; dicho término se aplica tanto a los combustibles que se utilizan en los medios de transporte como a los destinados a producir electricidad (Romero y Miralles, 2002).

Un biocombustible importante por lo que representa y para fines de este trabajo, es el biogás, que como su nombre lo indica es un gas que se obtiene a partir de biomasa. Éste está compuesto principalmente por metano y en menor proporción de dióxido de carbono. Se obtiene a partir de diferentes tipos de conversión que dependen de la naturaleza de la biomasa, entre los que se encuentran: La degradación anaerobia y la gasificación; se usa principalmente para generar energía eléctrica, calor y fuerza motriz. Dichos procesos se tratarán a fondo más adelante.

### **2.4.1 Biocarburantes**

Los biocombustibles que pueden emplearse en los medios de transporte son los biocarburantes, que definidos propiamente son combustibles líquidos provenientes de distintas transformaciones de la biomasa, que pueden utilizarse en motores de vehículos, substituyendo a los derivados de combustibles fósiles que se emplean en la actualidad. Los biocarburantes se dividen en dos tipos: Los bioalcoholes, y los bioaceites (Campos y Marcos, 2001; Romero y Miralles, 2002).

### 2.4.1.1 Bioalcoholes

Se obtienen a partir de alcoholes procedentes de la biomasa y son:

- Biometanol.  $\text{CH}_3\text{OH}$  o alcohol metílico. Se obtiene por destilación de la madera y actualmente del gas natural.
- Bioetanol.  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  o alcohol etílico. Se obtiene de la fermentación alcohólica de los monosacáridos (caña de azúcar, remolacha, cereales, etcétera).

Este último, el bioetanol, se emplea como biocombustible para automoción, dado que comparte unas propiedades físico-químicas muy parecidas a la gasolina, por la cual la puede sustituir ya sea solo o mezclado con está. El inconveniente que presentan en su uso es que es necesario realizar algunas modificaciones al motor del automóvil, ya que algunas partes del mismo, como los plásticos, son sensibles a los alcoholes (Campos y Marcos, 2001).

Así también a partir de bioetanol se puede producir ETBE (etil ter butil éter) que es apto para incluirse en la formulación de gasolinas como aditivo, sirve para aumentar el índice de octano de la gasolina (González, 2003), en sustitución del MTBE (Metil ter butil éter) de origen fósil.

### 2.4.1.2 Bioaceites

Son aceites vegetales que se obtienen a partir de procesos de trituración, compresión o extracción química de especies oleaginosas, fundamentalmente de las semillas, y los frutos de plantas como la soja, la colza, la palma y el girasol. Con este proceso, obtenemos un aceite bruto sin refinar que, aunque puede ser usado directamente como combustible, requiere una profunda transformación de los motores o la utilización de motores diseñados especialmente para su uso. Cabe señalar que también puede emplearse aceite vegetal de cocina reciclado.

- Biodiésel

Es el más importante de los bioaceites ya que puede emplearse como combustibles para motores diésel sin modificación alguna. Típicamente se usa como aditivo del diésel en proporción del 20% (Romero y Miralles, 2002),

aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir considerablemente las emisiones, el humo negro y el olor.

La Unión Europea considera biocarburantes una amplia gama de productos (bioaceites, bioalcoholes, biohidrógeno, biometanol), pero el biodiésel y el bioetanol son los que cuentan con un potencial de utilización más amplio y, el sector de los biocarburantes en Europa y el resto del mundo está constituido básicamente por estos productos (Ballester, 2006).

## **2.5 Conversión de biomasa a energía**

El primer paso para obtener energía a partir de la biomasa es la recolección y clasificación seguida del manejo, transporte y almacenamiento de la misma.

### **2.5.1 Pre tratamiento de la biomasa**

Para facilitar el manejo, transporte y almacenamiento de la biomasa, debe someterse a pre-tratamientos como son: Los procesos de trituración, astillado, secado, molienda, tamizado y densificación. Dichos procesos tienen por objetivo modificar el tamaño, la humedad y la composición de la biomasa de forma que la obtengamos lo más homogénea posible.

A continuación se explican estos procesos brevemente:

- Astillado. Es un proceso mediante el que se consigue una primera etapa de reducción granulométrica, que permite obtener astillas con un tamaño máximo de partícula que posibilita su manejo.
- Secado natural. Es una técnica simple basada en el aprovechamiento de las condiciones ambientales favorables para facilitar la deshidratación de los residuos y obtener niveles de humedad deseados (Ortiz, 2005).
- Secado forzado. Cuando no es posible reducir la humedad del combustible residual mediante técnicas de secado natural se recurre al secado forzado, utilizando equipos que, mediante la aportación de un flujo térmico, permiten la deshidratación de los residuos hasta los valores deseados. Para ello se

emplean secaderos neumáticos o rotatorios. Los de tipo neumático están basados en el arrastre de los residuos mediante un flujo térmico que durante el recorrido extrae la humedad de los sólidos. Suelen utilizarse cuando el producto es de granulometría fina y/o se requiere una deshidratación ligera. Los secaderos rotatorios de tipo trommel se suelen utilizar cuando se trabaja con materiales muy húmedos y/o de granulometría gruesa (Ortiz, 2005).

- Molienda. Es una práctica recomendable cuando se pretende utilizar residuos más finos que las astillas en equipos de conversión energética específicamente diseñados para ello (inyectores, hornos especiales, etc.). También es necesario realizar este tipo de transformación física cuando se trata de fabricar combustibles densificados como las briquetas y los pellets.
- Tamizado. Es la clasificación por tamaños de las partículas de residuos, permite eliminar fracciones indeseables o dividir distintas fracciones.
- Densificación o compresión. Es el proceso de compactar la biomasa aplicando alta presión, para disminuir los espacios vacíos entre las partículas y dentro de las partículas. Productos compactados con menos de 30 mm de diámetro son considerados convencionalmente pellets y con diámetros mayores, briquetas.

La materia prima puede ser residuos de la madera, como polvo o aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal. El producto de este tratamiento tiene forma de aglomerado de madera como se observa en la Figura 2.2.

Son residuos con una elevada densidad y muy adecuados para el almacenamiento y el transporte (Sánchez-Miño, 2003).





Figura 2.2. Pellets de madera (Morgan, y Hugh, 2007)

### **2.5.2 Tipos de procesos de conversión de biomasa a energía**

Los procesos de conversión de biomasa más relevantes se clasifican en las categorías siguientes:

- Procesos termoquímicos
  - Combustión directa
  - Pirólisis
  - Gasificación
- Procesos bioquímicos
  - Degradación anaerobia
  - Fermentación alcohólica
- Procesos fisicoquímicos
  - Transesterificación

En la Figura 2.3 se resumen los procesos de conversión de la biomasa residual, en ésta se puede observar los pre-tratamientos a los que deben someterse y se concluye que los procesos termoquímicos son factibles para residuos biomásicos de baja o nula humedad relativa, mientras que los procesos bioquímicos se emplean en líquidos y en residuos de alto contenido de humedad (McKendry, 2001).

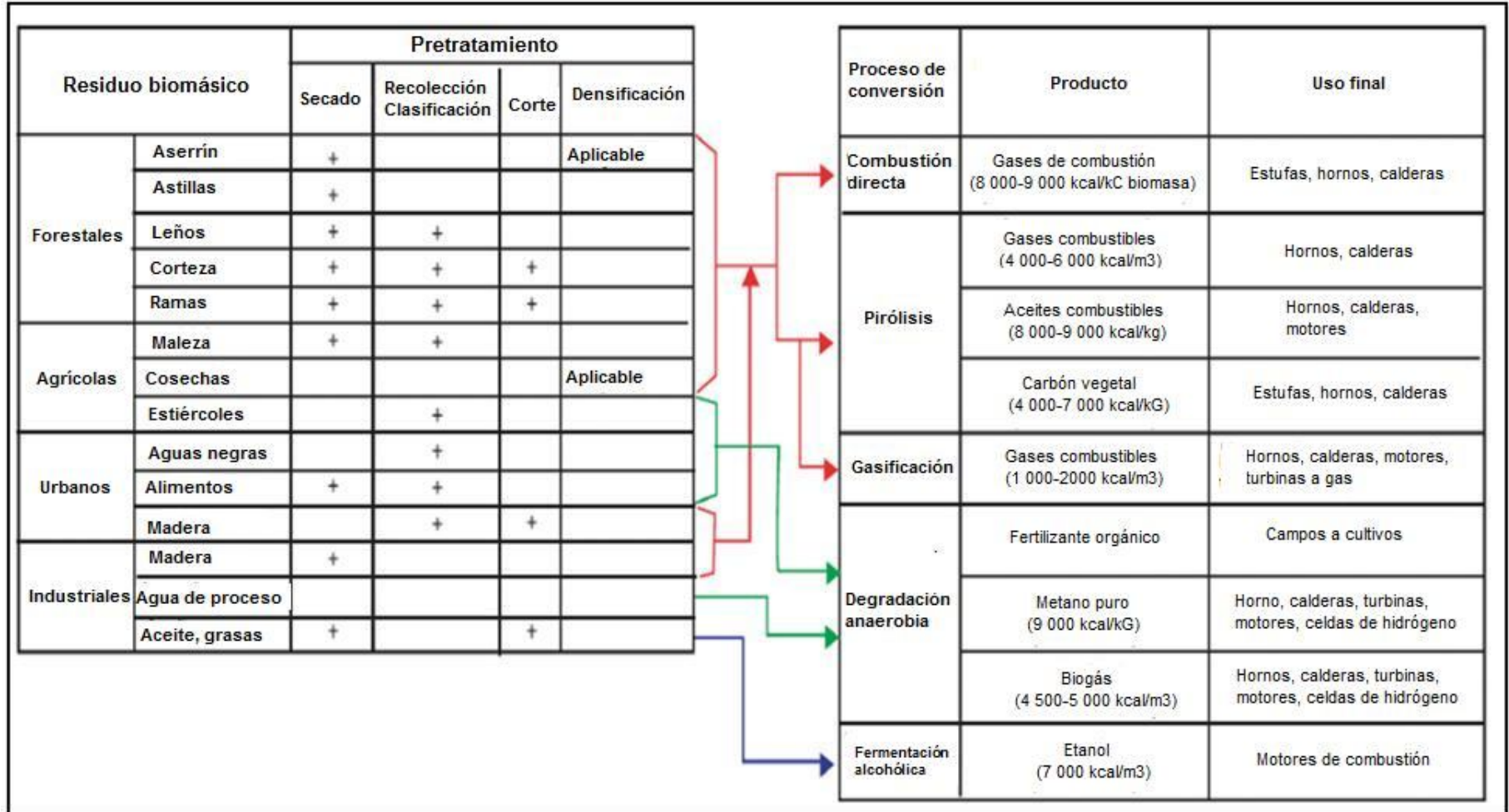


Figura 2.3 Métodos de obtención de energía a partir de diferentes residuos biomásicos (BUN-CA, 2002; ITE, 2007)

### **2.5.2.1 Procesos termoquímicos**

La conversión termoquímica está basada en la descomposición de la biomasa por medio de calor. Esta transforma a la biomasa en productos con un más alto valor o más convenientes y, dependiendo de las condiciones del proceso, se obtienen diferentes proporciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos

#### **2.5.2.1.1 Combustión directa**

Tradicionalmente, a la biomasa se le ha extraído la energía a través de la combustión, es decir, aprovechando su capacidad de oxidarse con el oxígeno del aire y disfrutando del calor que genera esta reacción, ya sea utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Básicamente el proceso consiste en la quema de la biomasa directamente en un caldero para la producción de calor o vapor que luego puede ser enviado a una turbina conectada a un generador para la producción de energía eléctrica (Sánchez-Miño, 2003), o como vapor para procesos industriales.

Los procesos de combustión tradicionales tienen como desventaja ser ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas. Estos resultados se podrían disminuir considerablemente, secar la biomasa antes de utilizarla reduce la cantidad de energía perdida por la evaporación del agua y la producción de monóxido de carbono (CO), y para procesos industriales, usar pequeños pedazos de leña y atender continuamente el fuego supliendo pequeñas cantidades resulta en una combustión más completa y, en consecuencia, en mayor eficiencia. Asimismo, equipos como los hornos se pueden mejorar con la regulación de la entrada del aire para lograr una combustión más completa y con aislamiento para minimizar las pérdidas de calor (McKendry, 2001).

Tiene aplicaciones actualmente en las industrias azucarera, papelera y de derivados de la madera, entre otras, siendo cada vez más importante su

aplicación a las basuras urbanas, aunque ambientalmente no es por todos aprobada.

➤ Combustión Mixta

El término combustión mixta o co-combustión se utilizan para hacer referencia a la combustión conjunta de biomasa con combustibles tradicionales como carbón, en la caldera de una central térmica (Sánchez-Miño, 2003).

Estos sistemas pueden quemar hasta un 15% de la biomasa, con pequeñas modificaciones. Los residuos biomásicos que pueden emplearse son: Aserrín, paja de cereal, restos de madera, virutas, etcétera. En la Figura 2.4 se presenta un sistema típico de combustión mixta.

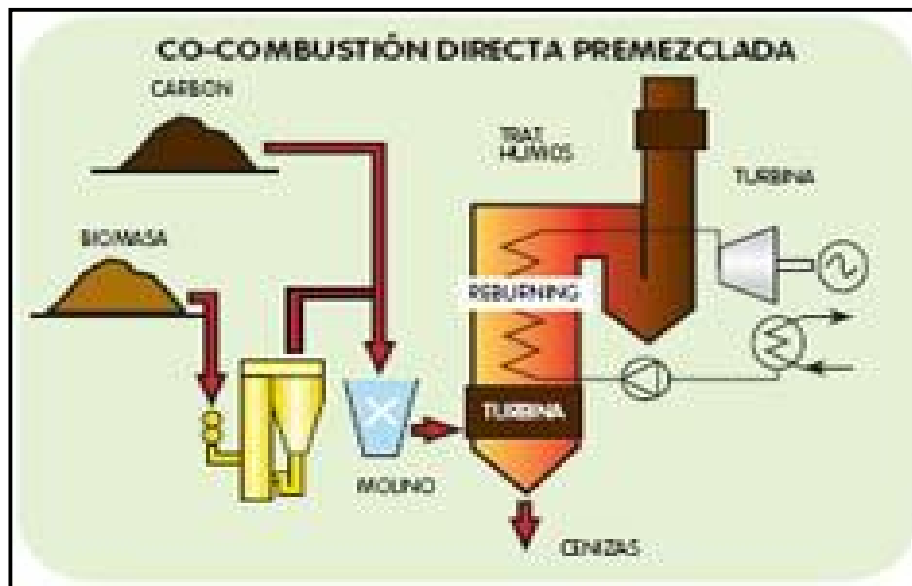


Figura 2.4 Sistema de combustión mixta (Hill, 2008)

Por otra parte, con esta tecnología, los costes de inversión por kW instalado son, en general, inferiores a los que requeriría una central 100% biomasa. Las centrales térmicas ganan además a las centrales 100% biomasa en eficiencia y rendimiento, y cuentan con una gran ventaja frente a ellas: Si se interrumpe el suministro de residuos (por problemas relacionados a la logística de la biomasa) pueden seguir operando haciendo uso solo de carbón (ITE, 2007).

### 2.5.2.1.2 Pirólisis

Es el proceso en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia total de oxígeno. En procesos lentos y temperaturas de 300 a 700°C el producto obtenido es carbón vegetal, mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800 a 1200°C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspectos aceitosos y de bajo pH denominados aceites de pirólisis y productos gaseosos de baja calidad (gas pobre), pero que puede servir de base para la síntesis de metanol, el cual tiene un importante poder energético y se puede usar como sustituto de los combustibles fósiles (Moragues y Rapallini, 2005; McKendry, 2001; Bridgewater, 1999.).

En la Figura 2.5 se muestra el proceso industrial de pirólisis explicado en el párrafo anterior.

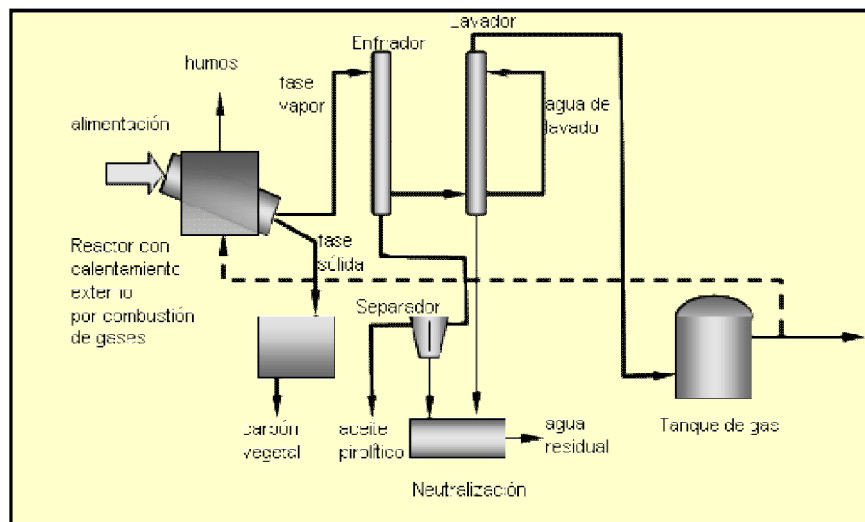


Figura 2.5 Proceso industrial de pirólisis (Moragues y Rapallini, 2005)

La pirólisis con aprovechamiento pleno de subproductos tuvo su gran auge antes de la difusión masiva del petróleo, ya que constituía la única fuente de ciertas sustancias (ácido acético, metanol, etc.), que luego se produjeron por la vía petroquímica. Hoy en día, sólo la producción de carbón vegetal reviste importancia cuantitativa. El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calórico mayor o, lo que es lo mismo, un peso menor para igual cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil.

➤ Producción de carbón vegetal

El proceso radica en quemar biomasa con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido que se obtiene es el carbón vegetal, el cual tiene mayor densidad energética que la biomasa original, y es ideal para uso doméstico. Usualmente, este carbón es producido de la madera, pero también se usan otras fuentes como cáscara de coco y algunos residuos agrícolas.

La forma más antigua, y probablemente aún la más empleada para producirlo, son los hornos de tierra y los de mampostería. El primero es una excavación en el terreno en la que se coloca la biomasa, la cual es luego cubierta con tierra y vegetación para prevenir la combustión completa.



Figura 2.6 Horno de tierra (ITE, 2007)

Los segundos son contruidos de tierra, arcilla y ladrillo, un ejemplo se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Horno de mampostería (FAO, 2007)

Los hornos modernos son conocidos como retortas y fabricados en acero; conllevan cierta complejidad por su diseño y operación, lo que incrementa considerablemente los costos de inversión en comparación con los

tradicionales, pero eleva su eficiencia y capacidad de producción, así como la calidad del producto.

### 2.5.2.1.3 Gasificación

Consiste en la quema de biomasa (fundamentalmente leña) en presencia de oxígeno, en forma controlada, de manera de producir un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido calórico, aproximadamente 5 MJ/m<sup>3</sup> (McKendry, 2002).

La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa. El gas pobre obtenido puede quemarse luego en una caldera para producir vapor, en quemador para obtener energía térmica, o bien ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca, a su vez, energía mecánica (Warren y col., 1995). Dicho proceso se ejemplifica en la Figura 2.8.

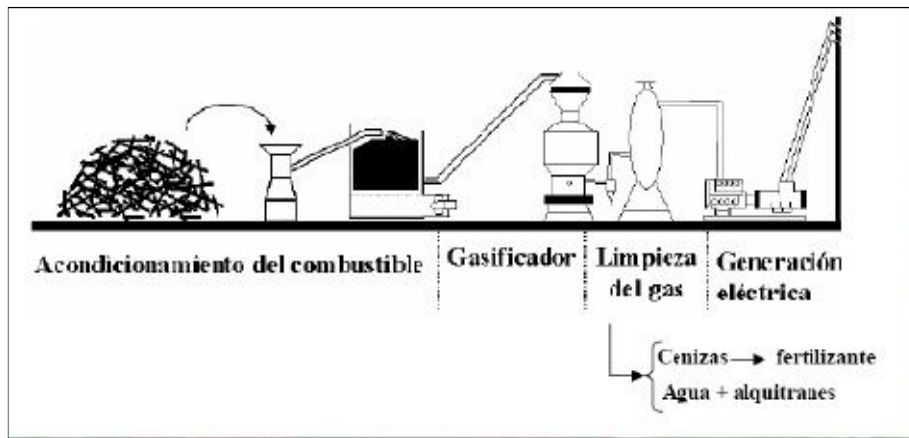


Figura 2.8 Generación de energía eléctrica a partir de gasificación de biomasa (ITE, 2007)

La eficiencia de la gasificación con madera es muy alta y puede llegar de un 80 a un 85%. La madera es un carbohidrato y, por lo tanto, se comporta igual que el carbón, con la ventaja que sus residuos contaminantes de azufre y nitrógeno son mucho menores. La temperatura de operación de los gasificadores es mejor bajo los 600°C. Un gasificador puede proporcionar cerca de 9 MJ de

energía aprovechable para calor o electricidad por cada kilo de madera, equivalente a 1.2 kWh de electricidad (Warren y col., 1995).

### **2.5.2.2 Procesos bioquímicos**

Se basan en la utilización de diversos tipos de microorganismos que degradan las moléculas a compuestos más simples de alta densidad energética. Son métodos adecuados para biomasa de alto contenido en humedad, los más conocidos son la fermentación alcohólica para producir etanol y la degradación anaerobia para producir biogás y/o biometano (McKendry, 2001).

#### **2.5.2.2.1 Degradación anaerobia**

Es un proceso complejo de descomposición bioquímica de la materia orgánica bajo el efecto de bacterias en ausencia de oxígeno. Los productos que se obtienen de la digestión de biomasa son:

- Biogás
- Biofertilizante

La degradación o digestión de biomasa por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaerobio) produce un gas combustible llamado biogás. Este proceso se realiza de manera natural en los sitios con disposición de residuos, pero puede acelerarse el proceso manipulando las condiciones en digestores o reactores anaeróbios.

En el proceso, se introduce la biomasa (generalmente se emplean residuos ganaderos) en un contenedor cerrado (el digestor) mezclado con agua y allí se deja fermentar, produciéndose un gas, que es mezcla de metano principalmente y dióxido de carbono. Este gas puede emplearse directamente para cocción de alimentos o mediante motogeneradores producir electricidad (ITE, 2007; Botero y Thomas, 1987). La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico (Mandujano, 1981).



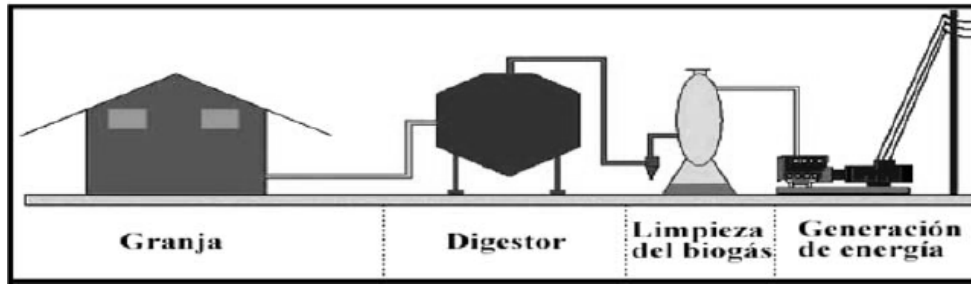


Figura 2.9 Generación de energía eléctrica a partir de un proceso de digestión (ITE, 2007)

La producción de biogás a partir de la degradación anaerobia es de especial interés para cubrir uno de los objetivos de este trabajo por lo que este tema es tratado a fondo en el capítulo 3.

#### 2.5.2.2 Fermentación alcohólica

Es el proceso que se emplea para la producción de bioetanol, que se obtiene de productos vegetales ricos en azúcares (Kostka y col., 2009).

Hoy en día se utilizan tres tipos de materias primas para la producción a gran escala de etanol de origen biológico:

- Materiales portadores de azúcares solubles (sacarosa, fructosa, glucosa) como: Caña de azúcar, remolacha, melazas y el sorgo dulce.
- Sustancias con alto contenido de almidón (mezcla de dos polisacáridos, la amilosa y amilopectina) como: El maíz y la patata.
- Sustancias con alto contenido de celulosa (polisacárido compuesto exclusivamente por moléculas de glucosa) como son: La madera y los residuos agrícolas.

Utilizando cualquiera de estas materias primas, el etanol se produce por fermentación de azúcares con levaduras. La materia prima de la primera clase fermenta directamente. La segunda consta de hidratos de carbono complejos, como el almidón, que primero se debe convertir en azúcares fermentables mediante la acción de enzimas. Las sustancias celulósicas de la tercera clase

se convierten en azúcares fermentables por hidrólisis con ácidos inorgánicos (Vaz Rossell, 2008).

Las de mayor interés son las materias primas del primer grupo, o sea, las materias azucaradas dentro de las cuales están: Caña de azúcar o remolacha, melazas, jugos de frutas y suero de leche, los cuales son los más fácilmente fermentables y en general basta la acción enzimática asociada al microorganismo para metabolizar el sustrato sin necesidad de tratamientos previos para la degradación de los carbohidratos (Kostka y col., 2009).

Las levaduras que se utilizan para la fermentación alcohólica contienen una enzima (la invertasa) que transforma primero a la sacarosa en glucosa y fructosa y luego otra enzima (la zimasa) transforma a estas hexosas y pentosas en alcohol y anhídrido carbónico. Posteriormente se destila esta mezcla para separar así el bioetanol. Dicho proceso puede observarse en la Figura 2.10.

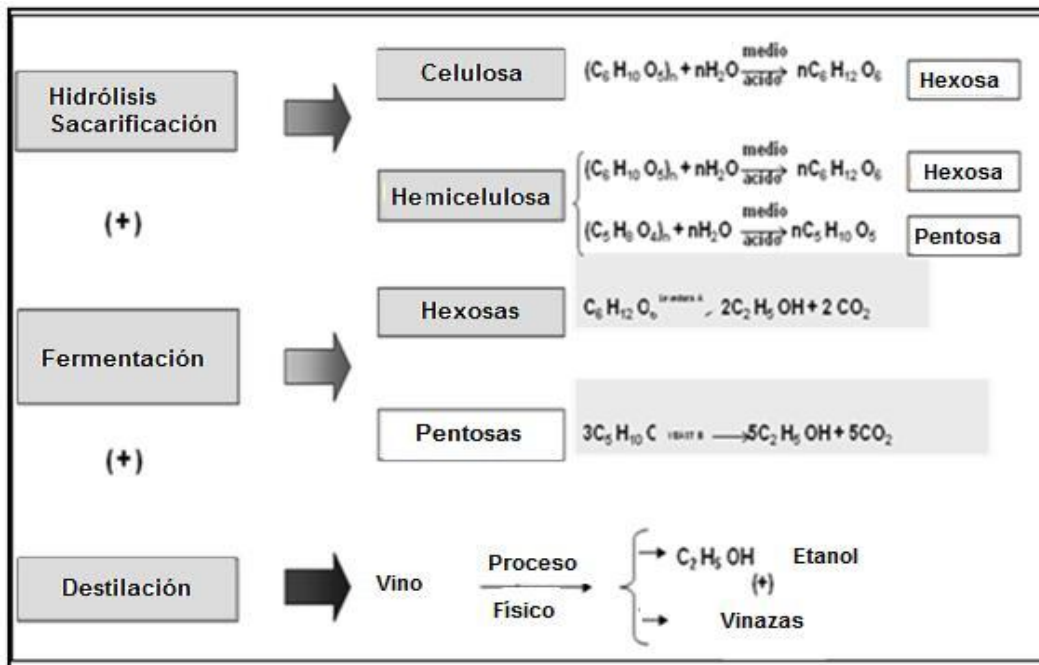


Figura 2.10 Proceso de producción de etanol a partir de residuos de cosecha de caña (Vaz Rossell, 2008)

En la actualidad tres países han desarrollado programas significativos para la fabricación de bioetanol como combustible: Estados Unidos a partir de maíz, Brasil y Colombia ambos a partir de caña de azúcar.

Es importante señalar que la destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhidro, es una operación muy costosa en energía. En estas condiciones la transformación de la biomasa en etanol y después la utilización de este alcohol en motores de explosión, tienen un balance energético global dudoso (Birur y col., 2007; McKendry, 2001). A pesar de esta reserva, ciertos países (Brasil, E.U.A.) tienen importantes proyectos de producción de etanol a partir de biomasa con un objetivo energético, la propulsión de vehículos (van Thuijl y col., 2003).

### **2.5.2.3 Procesos fisicoquímicos: Transesterificación**

Hay que mencionar los procesos fisicoquímicos dado que mediante ellos es que se produce el biodiésel.

El biodiésel es un éster, se obtiene a partir de los bioaceites (aceites vegetales) éstos son sometidos a un proceso llamado transesterificación. Esta reacción sustituye al alcohol del aceite vegetal (glicerol) por otro más simple (metanol o etanol). De este proceso, y tras una transformación química importante, se obtienen ésteres grasos (el éster etílico o el éster metílico).

Para que la reacción se produzca, hay que separar previamente el glicerol o primer subproducto, y posteriormente unir los ácidos grasos al otro alcohol (metanol o etanol). Finalmente, se obtiene el biodiésel, un diéster que tiene las mismas propiedades fisicoquímicas que el gasóleo, razón por la cual lo puede sustituir en todas sus aplicaciones.

En la Figura 2.11 se presenta el proceso de transesterificación para obtener biodiésel, donde cabe señalar que la esterificación es el pre-tratamiento que debe realizarse para obtener biodiésel a partir de aceites vegetales reciclados (The Royal Society, 2008).

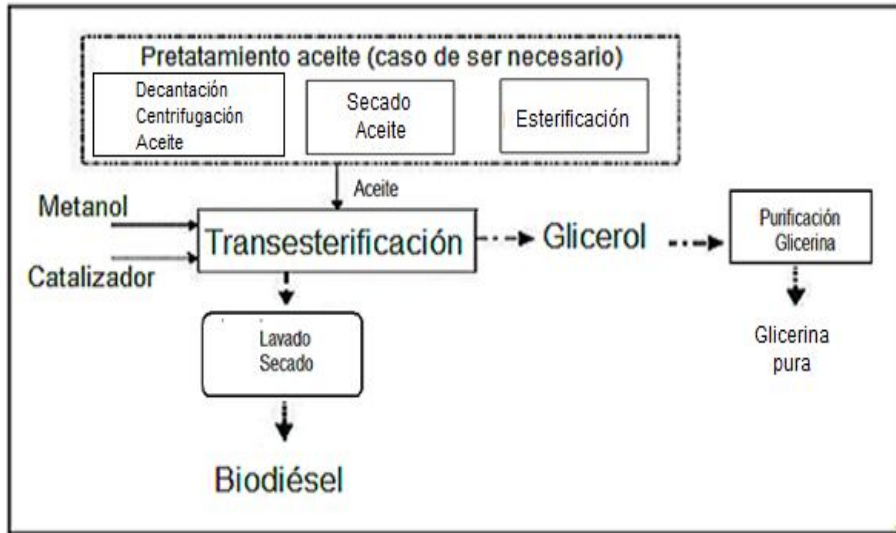


Figura 2.11 Proceso de transesterificación para obtener biodiésel (The Royal Society, 2008; van Thuijl y col., 2003)

Finalmente en la Figura 2.12 se resumen las formas de energía que se pueden obtener a partir de los procesos de conversión de la biomasa.

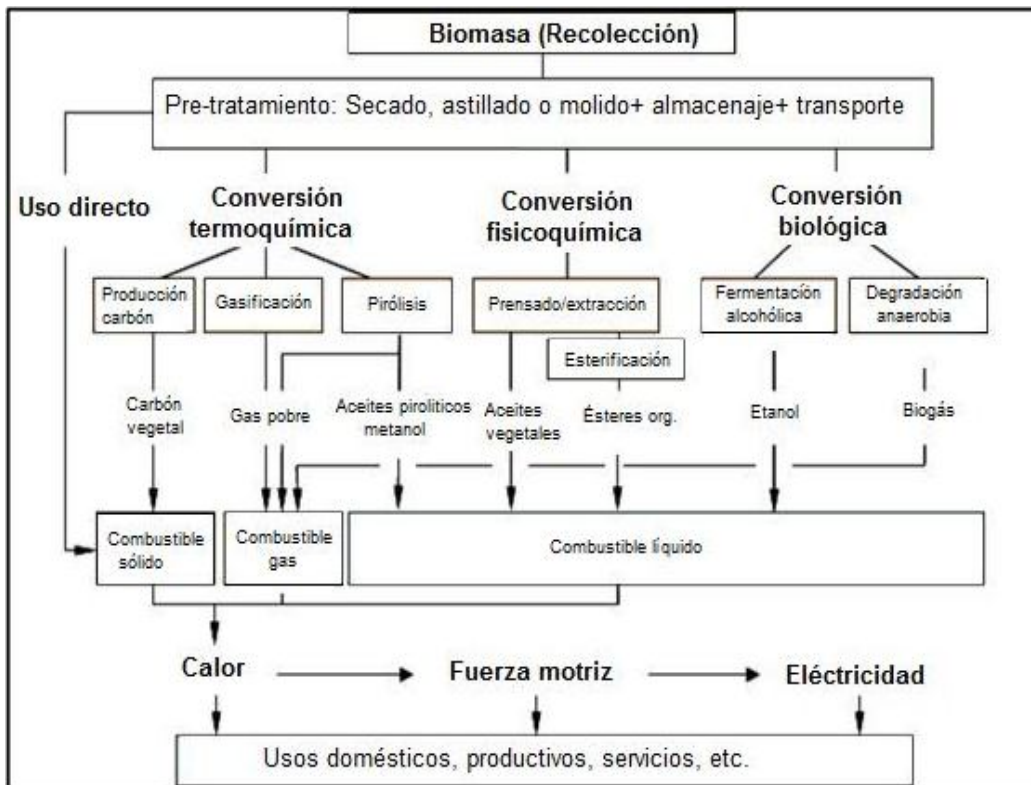


Figura 2.12 Conversión de biomasa a energía (McKendry, 2001; Turkenburg, 2003).

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

## Capítulo 3. Producción de biogás por degradación anaerobia

### 3.1 Biogás

El biogás es una mezcla de gases, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), aunque contiene mínimas cantidades de otros gases. Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de  $700^\circ\text{C}$  y su llama alcanza una temperatura de  $870^\circ\text{C}$ . En la Tabla 3.1 se muestra la composición química promedio del biogás.

Tabla 3.1  
Composición química del biogás (Mattocks, 1984)

Elemento	%
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50-70
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	30-50
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	0.5-3
Ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0.1-1
Vapor de agua	Trazas

El biogás es un gas combustible cuyo poder calórico promedio es de  $5,500 \text{ kcal/m}^3$ , lo que permite generar entre  $1.3\text{-}1.6 \text{ kWh}$ , lo cual equivale a medio litro de petróleo, aproximadamente (Guardado-Chacón, 2006). Dado que el metano es el principal componente del biogás, éste le confiere las características combustibles, por lo tanto este gas puede usarse como tal, sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores a  $50\%$ , ya que debajo de esta concentración deja de ser inflamable.

Se utiliza como cualquier otro combustible, tanto para la cocción de alimentos, en sustitución de la leña, el queroseno, el gas licuado, etcétera, como para el alumbrado, mediante lámparas adaptadas al biogás. Mezclas de biogás con aire, en una relación  $1:20$ , forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados (Guardado-Chacón, 2006; Hilbert, 2007).

Limpiando el biogás podemos extraer metano (conocido como biometano) y mezclarlo con el gas natural, que es empleado a nivel doméstico e industrial (Kapdi y col, 2005).

El biogás se produce de forma natural o espontánea, por acción de bacterias de fermentación que se encargan de descomponer el material orgánico en un entorno húmedo. Este proceso es llamado degradación anaerobia, ya que se produce en ausencia de oxígeno.

Por lo general, se puede obtener biogás a partir de cualquier material orgánico, comúnmente se emplean las excretas de cualquier índole, la cachaza, los desechos de destilerías, los componentes orgánicos de los desechos sólidos municipales, los residuos orgánicos de mataderos, el lodo de las plantas de tratamiento residuales, los residuales agropecuarios, los desechos orgánicos de las industrias de producción de alimentos, etc. (Guardado-Chacón, 2006). Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o junta, mediante lo que se llama co-digestión (Rico, 2007).

El valor calorífico del biogás varía entre 17 y 34 MJ/m<sup>3</sup> según el contenido de metano. En la Tabla 3.2 se resume la composición promedio del biogás según la fuente de la que provenga.

Tabla 3.2  
Composición del biogás derivado de diversas fuentes (Wheatley ,1990)

Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios
Metano (CH <sub>4</sub> )	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono(CO)	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

### 3.2 Degradación anaerobia o digestión

La digestión se puede definir como una bio-transformación que se lleva a cabo mediante diversos grupos de microorganismos, de las cuales las bacterias metanogénicas (anaerobios estrictos) son los responsables de la producción de metano (Saucedo-Castañeda, 2007; Schlegel y Zaborosch, 1993).

La degradación anaerobia de la materia orgánica requiere la intervención de diversos grupos de bacterias facultativas, es decir, que viven tanto en presencia como ausencia de oxígeno (Guardado-Chacón, 2006) y anaerobias estrictas, ambos grupos de bacterias utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados por cada grupo (Kaiser, 2009).

### **3.3 Etapas de la digestión**

La digestión involucra cuatro pasos de transformación:

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

Cada etapa presenta diferencias en el proceso de degradación del sustrato (término para designar el alimento de los microorganismos).

#### **3.3.1 Hidrólisis**

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos, por lo tanto, el primer paso de la digestión es la hidrólisis de compuestos orgánicos complejos (de alto peso molecular como: Hidratos de carbono, lípidos y proteínas), en moléculas más sencillas, solubles y fácilmente degradables (como: Azúcares, aminoácidos, glicéridos, ácidos grasos de cadena larga, alcoholes, etcétera). La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros (McCarty y Smith, 1986).

La hidrólisis es llevada a cabo por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas facultativas. Se trata de un proceso enzimático extracelular, porque dichas enzimas actúan al exterior de la célula. La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratándose de residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar al conjunto del proceso (Madigan y col., 1997).



### 3.3.2. Acidogénesis

En esta etapa los compuestos orgánicos simples, solubles, producto de la hidrólisis, son transformados en ácidos grasos de cadena corta o ácidos grasos volátiles (AGV's), por acción de bacterias acidogénicas, que ocasionan que disminuya el pH por debajo de 6.8.

Los productos que se obtienen principalmente en esta etapa son: Ácidos acéticos, propiónico, butírico y valérico, pero también pueden producirse alcoholes, cetonas, aldehídos, agua, dióxido de carbono e hidrógeno (McCarty y Smith, 1986).

Estas bacterias formadoras de ácidos, llamadas acidogénicas son también facultativas. Entre las especies más comunes de estas bacterias se encuentran: *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*.

### 3.3.3 Acetogénesis

A esta fase se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos resultantes de la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Esta conversión procede de la acción de las bacterias acetogénicas obligadas a producir hidrógeno.

Como ejemplos de las bacterias acetogénicas, cabe mencionar *Syntrophobacter wolinii*, que descompone el ácido propiónico, o *Syntrophomonas wolfei*, que descompone el butírico. Los ácidos valérico y butírico son descompuestos por las mismas especies. En el grupo de bacterias acetogénicas se incluyen las homoacetogénicas, capaces de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, perteneciente a los géneros *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium*.

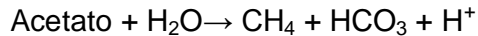
### 3.3.4 Metanogénesis

Constituye la fase final del proceso. Las bacterias que intervienen llamadas metanogénicas, estrictamente anaerobias, aumentan los valores de pH a 7.4, a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por

un enlace covalente. En esta fase final de la digestión los sustratos como el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a metano.

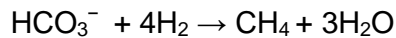
Existen dos caminos para la producción de metano:

- Metanogénesis a partir de acetato, que es la conversión de ácido acético a metano y dióxido de carbono.



Esta reacción se lleva a cabo a partir de bacterias metanogénicas acetoclásticas, encargadas de degradar el ácido acético. Es la principal vía de formación de metano, con alrededor del 70% del metano producido, de forma general. Pero a pesar de ser esta la vía más importante, solo microorganismos de los géneros *Methanosarcina* y *Methanothrix* son capaces de producir metano a partir de acético (Madigan y col., 1997).

- Metanogénesis a partir  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ , donde se obtiene metano por la reducción de dióxido de carbono a partir del hidrógeno naciente.



Las bacterias metanogénicas hidrogénofilas, consumidoras de hidrógeno, son las encargadas de la producción de metano a partir de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . Ejemplos de este tipo de bacterias son: *Methanobacterium*, *Methanococos*, *Methanobrevibacter* o *Metanogenium*, entre otros.

Un punto importante de señalar, es que la fermentación ácida tiende a bajar el pH, debido a la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs) y otros productos intermediarios. Mientras que la metanogénesis solo se desarrolla cuando el pH está cercano al neutro. Por lo tanto, si por alguna razón la tasa de remoción de AGVs a través de la metanogénesis no acompaña a la tasa de producción de AGVs, puede surgir una situación de inestabilidad: Baja significativamente el pH del sistema, causando la inhibición de las bacterias metanogénicas.

Lo anterior puede ser evitado cuando se garantiza un equilibrio entre la fermentación ácida y la fermentación metanogénica, a través de mantener una

alta capacidad metanogénica y una buena capacidad buffer en el sistema (Van Haandel y Lettinga, 1994).

En la Figura 3.1 se observa que solamente el 30% de la materia orgánica afluyente es convertida a metano por la vía hidrogenofílica, por lo tanto, una condición necesaria para obtener una óptima remoción de la materia orgánica en un sistema anaerobio, es que la metanogénesis acetoclástica se desarrolle eficientemente (Díaz-Báez y col., 2002).

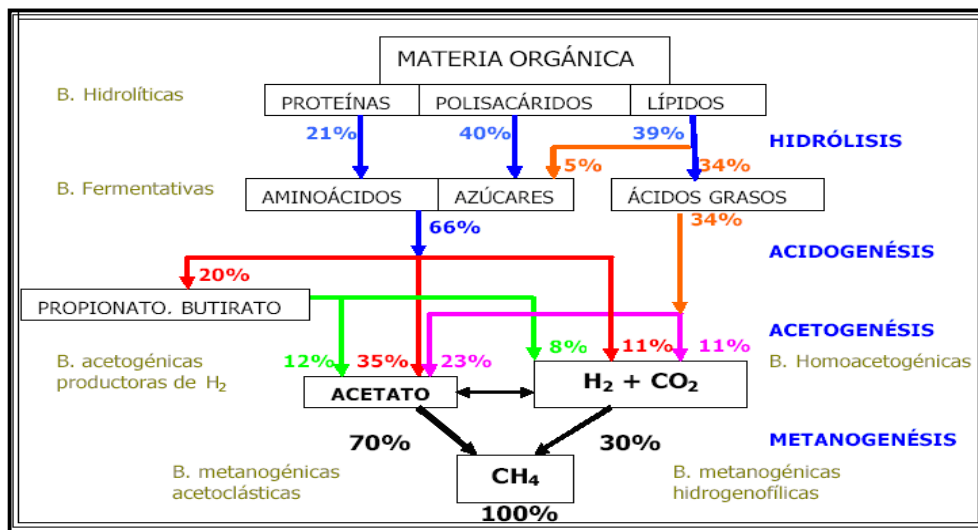


Figura 3.1 Etapas de la degradación anaerobia (Madigan y col., 1997; Van Haandel y Lettinga 1994)

### 3.4 Digestores

La digestión puede realizarse en tanques perfectamente cerrados llamados digestores, que deben permitir la carga y descarga de materiales y poseer un dispositivo para recoger el gas producido que puede ser almacenado en un gasómetro.

La primera instalación de la que se tiene noticias se construyó en Bombay, en 1859, y desde entonces en la India se han promovido pequeñas plantas, a escala familiar o local, tratando estiércol de ganado vacuno con el objetivo de producir gas para cocinar y obtener, a su vez, un producto fertilizante. A este nivel se encuentran multitud de pequeñas instalaciones, también, en Taiwán, Corea, Tailandia, Kenya, Sudáfrica, y China. También se sabe que durante la Segunda Guerra Mundial, muchos granjeros de Inglaterra, Francia e incluso

Alemania, construyeron digestores para producir gas combustible y con el alimentar tractores y producir electricidad, pero estas instalaciones cayeron en desuso a finales de 1950 (Cecchi y col, 2002; Mata- Álvarez y col., 2000).

La degradación anaerobia es un proceso que se lleva a cabo por sí mismo en los sitios de disposición de los residuos, sin embargo es un proceso lento por lo cual es necesario trabajarlo con un reactor o un digestor y así acelerar la degradación mediante la manipulación de los principales parámetros involucrados (Solari, 2004).

El método básico de operación consiste en alimentar el digestor con materiales orgánicos y agua, dejándolos un periodo de semanas o meses, a lo largo de los cuales, en condiciones ambientales y químicas favorables, el proceso bioquímico y la acción bacteriana se desarrollarán simultánea y gradualmente descomponiendo la materia orgánica hasta producir el biogás (Verástegui, 1980). En la Figura 3.2 se resume la forma de operar de un digestor.

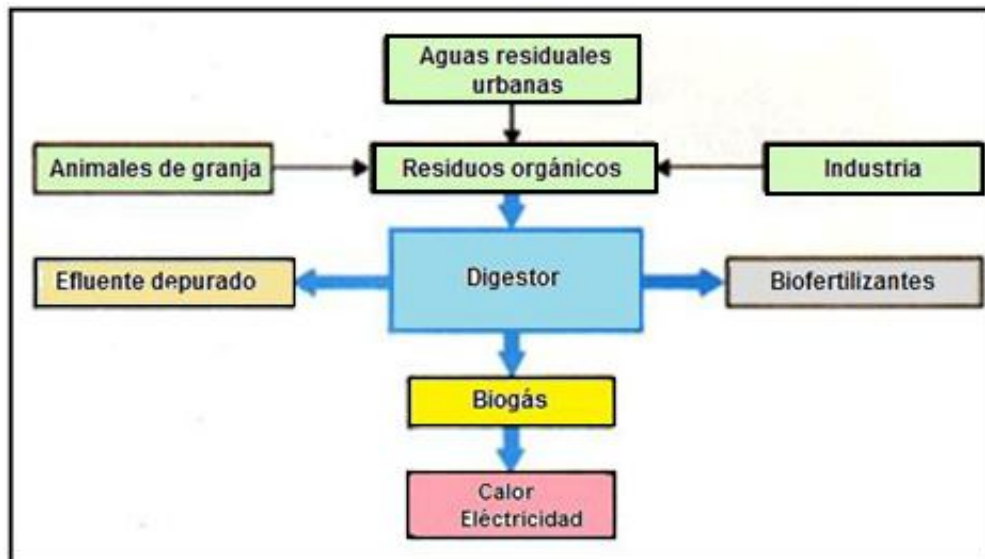


Figura 3.2 Producción de biogás en un digestor (Díaz-Báez y col, 2002)

Un digestor típico consiste de una cámara de digestión, un domo con un tubo de salida para el gas, una entrada y una salida para los sólidos y un agitador para el mezclado. La cámara de digestión puede ser un tanque de metal o simplemente un hoyo en el suelo emparejado con materiales locales (ladrillos o

piedras). El domo atrapa al biogás que está por encima de la pasta líquida y mantiene al gas bajo presión, para ser liberado a través del tubo de salida (Santerre y Smith, 1999).

Para una buena operación, es necesario que el digester reúna las siguientes características:

- Hermético, para evitar fugas del biogás o entradas de aire.
- Térmicamente aislado, para evitar cambios bruscos de temperatura.
- El contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad.
- Deberán tener acceso para mantenimiento.
- La característica principal de un digester es el tamaño, el cual es determinado por tres variables independientes: Concentración de sólidos degradables, velocidad de alimentación de sólidos y tiempo de residencia de los sólidos en el digester. En la Figura 3.3 se muestra la forma de operar de un digester actual.

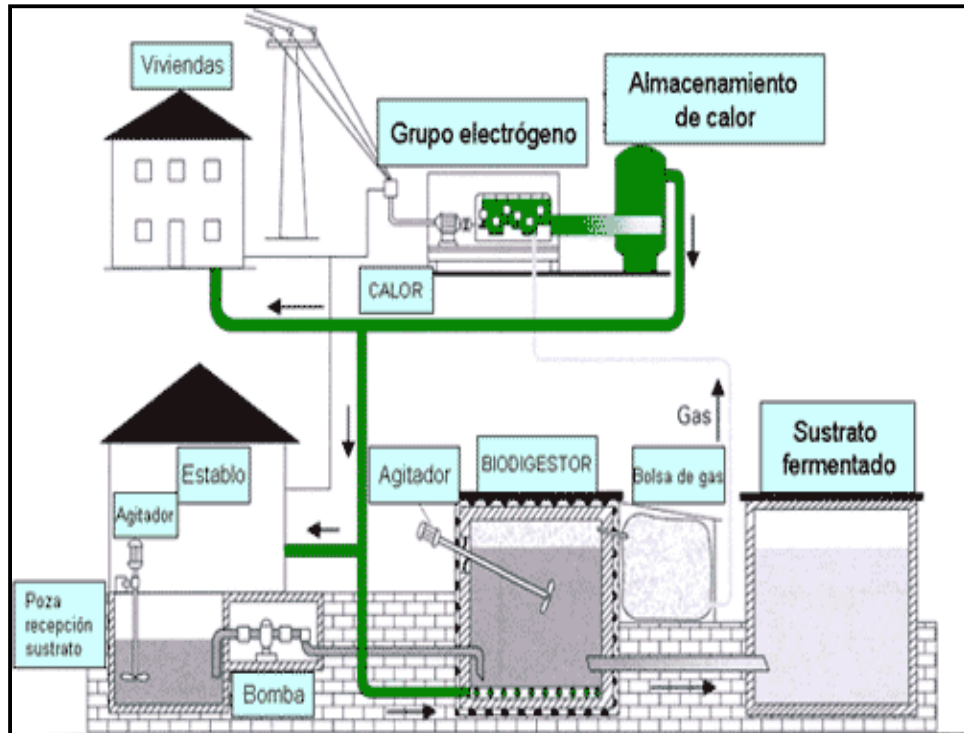


Figura 3.3 Modelo clásico de un digester actual (Díaz-Baéz y col, 2002)

### 3.5 Clasificación de digestores

A fin de simplificar el análisis y comprensión de los distintos tipos de digestores, se agruparon de acuerdo a diferentes criterios señalados a continuación:

- Carga
- Intensidad de mezcla
- Manejo de sustrato
- Manejo bioquímico

#### 3.5.1 Carga

Por la forma en que se carga el influente, los digestores se pueden clasificar en batch, régimen semicontinuo y continuo, en la Tabla 3.3 se presentan las características de cada uno.

Tabla 3.3  
Clasificación de digestores por tipo de carga (Hilbert, 2007)

Tipo de digestor o reactor	Características	Usos	Observaciones
Por lote o batch	Tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante donde se almacena el biogás.  Se cargan una sola vez y se descargan cuando han dejado de producir biogás o la biomasa está suficientemente degradada.	Generalmente para obtener fertilizante orgánico.	Empleo poco difundido.  Los que mayor difusión son el tipo Chino y el Hindú.
Régimen Semicontinuo	Se construyen enterrados, se cargan por gravedad, entrando la carga por un extremo del digestor y saliendo el efluente por el extremo opuesto, y en la parte superior flota una campana donde se almacena el gas (Viñas, 1994).	Empleado generalmente en el área rural para usos domésticos.	La mayor parte de los digestores en el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio.
Régimen continuo	El volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. De este modo el volumen del sustrato en la cámara de digestión se mantiene constante.	Tratamiento de aguas negras y otras aplicaciones industriales	Plantas muy grandes que emplean equipos para proporcionar calefacción y agitación, generalmente de tipo industrial (Mandujano, 1981).  Generan una gran cantidad de biogás.

### 3.5.2 Intensidad de mezcla

Mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana, evita la formación de costra que se forma dentro del digester, así como uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.

La intensidad con la que se mezcla el sustrato en un digester puede realizarse de dos formas: Parcial y completa.

#### 3.5.2.1 Intensidad de mezcla parcial

Los pequeños digestores rurales son los que emplean una intensidad de mezcla parcial, llamada así dado que se trata de métodos de agitación rudimentarios (de forma manual o por rotación de la campana gasométrica). Los que se realizan con el fin de evitar la formación de la perjudicial costra.

#### 3.5.2.2 Intensidad de mezcla completa

La mezcla completa se realiza en digestores que buscan que el sustrato en fermentación dentro de la cámara se mezcle en forma total, en general diariamente. En el caso de los reactores calefaccionados, esta acción asegura una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen. En la Figura 3.4 se muestran dos reactores típicos de mezcla completa, uno con recirculación y el otro de mezcla completa sencillo.

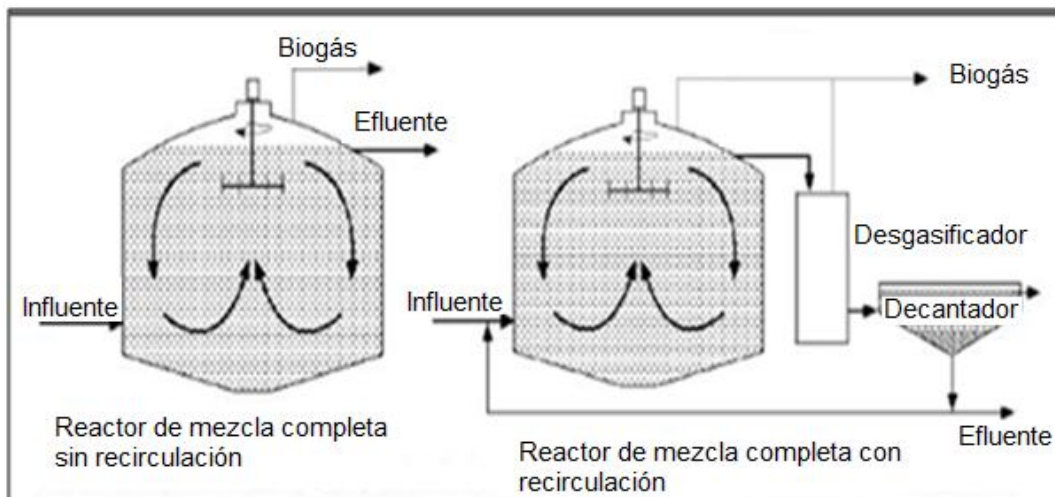


Figura 3.4 Reactores de mezcla completa (Flotats y col., 1997; Rico, 2007)

Existen diversos medios para lograr este fin, entre los que podemos mencionar: La agitación de líquidos mediante bombas internas o externas al digestor y la reinyección de biogás dentro de la cámara produciendo un intenso burbujeo. Cabe señalar que se debe tener cuidado en la intensidad y periodicidad de la agitación, para no afectar el delicado equilibrio bacteriano. En la Tabla 3.4 se presentan las características de cada uno de ellos.

Tabla 3.4  
Reactores de mezcla completa

Tipo de digestor o reactor	Características	Usos	Referencias
Mezcla completa sin recirculación	Reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos.  Tiempo de retención necesario alto.	Utilizado mayormente para residuos de consistencia líquida	(Itodo y Philips,2001; Rico, 2007)
Mezcla completa con recirculación	Al aumenta el tiempo de retención de los microorganismos, el tiempo de retención hidráulica es más bajo. al confinarlos en el sistema mediante la separación en el decantador y recirculándolos,	Solo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas recicladas de azucareras, cerveceras, etcétera)	(Flotats y col., 1997)

### 3.5.3 Manejo de sustrato

En los digestores y reactores anaerobios el objetivo es encontrar la forma para retener la mayor cantidad de bacterias activas dentro de la cámara de digestión, a fin de lograr menores tiempos de retención y consecuentemente menores volúmenes de digestor para tratar la misma cantidad de biomasa, reduciendo por tanto la inversión (Wheatley, 1990). Bajo este principio existen diferentes tipos de reactores anaerobios llamados de retención de biomasa que se describen a continuación.

#### 3.5.3.1 Filtro anaerobio

Estos reactores tienen la particularidad de ser alargados (relación alto/diámetro mayor a 1), en su interior poseen un medio fijo que puede estar constituido por cañerías reticuladas, piedra caliza, formas plásticas de gran relación superficie/volumen, etc. Sobre estos materiales no atacables se adhieren las



bacterias y así se evita su pérdida, que disminuye notablemente los tiempos de retención.

Este sistema ha estado extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y para residuos ganaderos, básicamente la fracción líquida de purines de cerdos (Rico, 2007; Flotats y col., 1997).

Existen dos variantes:

- Flujo descendente. Regular y orientado verticalmente, y en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas (Figura 3.5 )
- Flujo ascendente. Irregular y en este caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios (Figura 3.6).

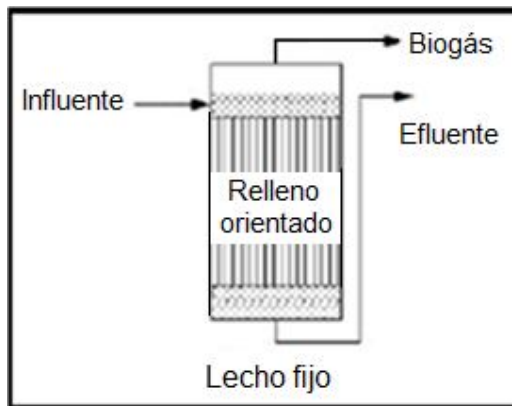


Figura 3.5 Reactor de lecho fijo (Flotats y col., 1997; Rico, 2007)

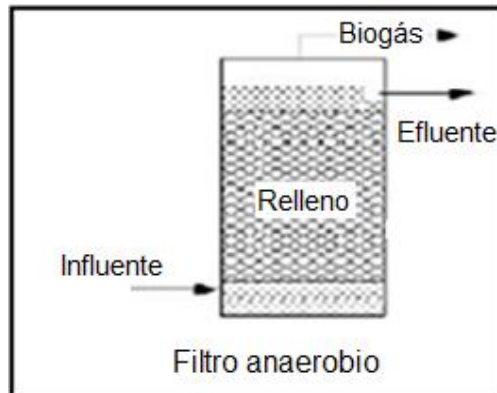


Figura 3.6 Reactor de filtro anaerobio (Flotats y col., 1997; Rico, 2007)

### 3.5.3.2 Lecho fluidizado

En este tipo de reactor unas pequeñas partículas se mantienen en suspensión dentro de la cámara de digestión, tal como se observa en la Figura 3.7. Las bacterias se adhieren a estas partículas, que no son atacadas y salen con ellas. Mediante el filtrado del efluente se pueden recuperar estas partículas juntamente a las bacterias y se reintroducen en el digestor.

Puede ser aplicado a aguas residuales, especialmente de la industria agroalimentaria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos ganaderos, aunque las experiencias en ese ámbito son limitadas.

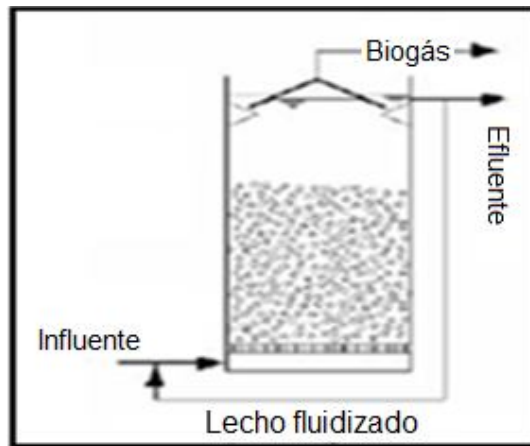


Figura 3.7 Reactor de lecho fluidizado (Rico, 2007; Flotats y col., 1997)

### 3.5.3.3 Reactor de lecho de lodos

El diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). En su interior posee separadores y mamparas estratégicamente ubicadas las que generan zonas de tranquilidad en las cuales las bacterias han conformado glomérulos (floculación) que sedimentan y así se evita que salgan con el efluente que es sacado por la parte superior de la cámara de carga.

Consiste en una zona de reacción en la parte inferior, en la que se acumula la biomasa, la de mejor sedimentabilidad en el fondo y encima los lodos más ligeros, formando todo el lecho de lodos (Campos y Anderson, 1991).

A medida que el líquido circula por el reactor de forma ascendente, se va depurando por la acción de las bacterias anaeróbicas, y se producen burbujas

de biogás que realizan un efecto de agitación suave, beneficioso para el proceso biológico que se desarrolla dentro del tanque (Conil, 2001).

En la parte superior del reactor se coloca un separador de tres fases (sólido - gas - líquido). Este permite retener el biogás producido para su conducción, por canales, hacia el exterior para su posterior consumo. También se tiene una zona libre de burbujas de biogás, donde se produce la sedimentación y retorno hacia el digester de sólidos que puedan ser arrastrados por el efluente hacia la parte superior, obteniéndose un efluente más depurado (Flotats y col., 1997). Las diferentes zonas del reactor se observan en la Figura 3.8.



Figura 3.8 Reactor UASB (Conil, 2001)

Este tipo de digester es especialmente apto para el tratamiento de desechos agroindustriales como la vinaza, en el tratamiento de aguas residuales muy diversas, de procesados alimenticios, industriales, urbanas y lixiviados (Hulshoff Pol y Lettinga, 1986). Pero no admite partículas insolubles.

#### 3.5.4 Manejo bioquímico

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar.

### 3.5.4.1 Sistema de dos etapas

Consiste en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa.

Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: Frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etcétera. El esquema de un sistema de dos etapas se muestra en la Figura 3.9.

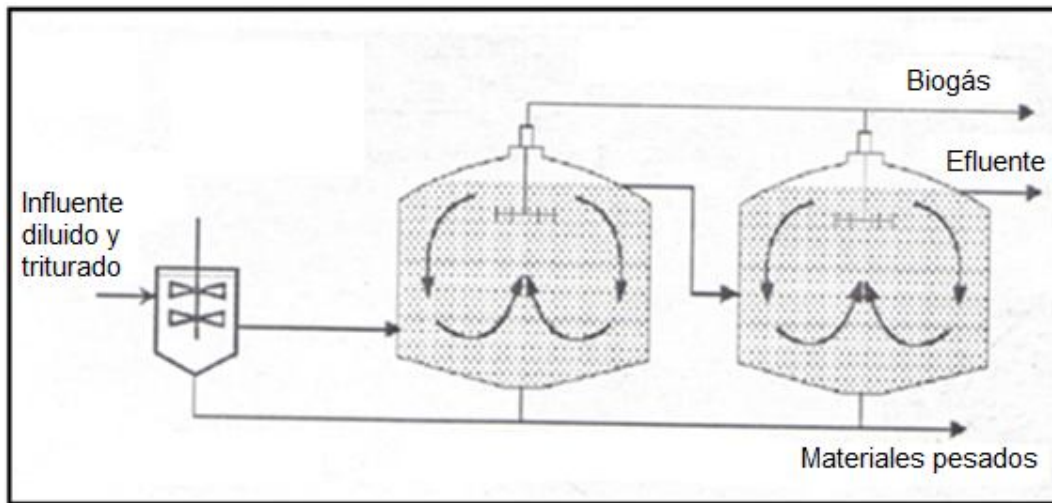


Figura 3.9 Esquema de un sistema de dos etapas (Flotats y col., 1997)

### 3.5.4.2 Sistemas de dos fases

Se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa.

Se controla el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a las más altas tasas de crecimiento de las bacterias acidogénicas.

Este tipo de sistema ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos con fibras y, en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis.

### 3.5.4.3 Sistemas híbridos

En general serán sistemas que combinen los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos. Se han realizado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos, en los cuales la parte baja de éste se comporta como un UASB y la parte superior como un filtro, como se muestra en la Figura 3.10

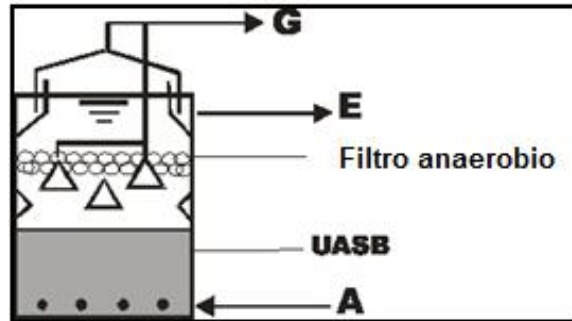


Figura 3.10 Esquema de un sistema híbrido (Flotats y col., 1997)

A fin de aprovechar las ventajas de los dos sistemas, se puede utilizar un diseño con manto de barro, que permite tener una buena densidad de biomasa en la parte inferior. En la parte superior donde la concentración de biomasa granulada se puede colocar una cierta altura de relleno. Esto permite el desarrollo de biomasa adicional, adherida al mismo, aumentando las posibilidades de depuración (Kiely, 1998).

## 3.6 Factores que intervienen en la producción de biogás

Entre los factores ambientales importantes para el funcionamiento de los digestores figuran: La temperatura, la concentración de sólidos, la concentración de ácidos volátiles, la formación de espuma, la concentración de nutrientes esenciales, las sustancias tóxicas y el pH (Taiganides, 1980).

### 3.6.1 Temperatura

La gama de temperatura para la digestión tiene dos zonas óptimas una mesófila (30-40°C) y otra termófila (45-60°C). Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperaturas mesófilas y la digestión óptima se obtiene a unos 35°C.

La producción de biogás a temperaturas superiores a 45°C es mayor que a temperaturas más bajas, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales especialmente una disminución repentina de sólo unos pocos grados (Taiganides, 1980). Y temperaturas mayores a 60°C la degradación se inhibe (Schlegel y Zaborosch, 1993).

En los climas cálidos, donde no existen temperaturas de congelación, los digestores pueden funcionar sin añadir energía pero, aumentar el tiempo de retención.

### **3.6.2 pH**

El pH óptimo para la digestión está entre 7.0 y 7.2, aunque el rango satisfactorio va de 6.6 a 7.6. La digestión comienza a inhibirse a pH 6.5 y por encima de 8.3 (Schlegel y Zaborosch, 1993; BOSTID, 1977). El proceso de inhibición parece completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración, cuando un digestor se descompensa tarda de 30 a 60 días en volver a la normalidad (Hilbert, 2007).

### **3.6.3 Contenido de sólidos**

Se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10% en sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.

### **3.6.4 Ácidos grasos volátiles**

Comúnmente la concentración de ácidos grasos volátiles no supera los 2 a 3 g/l, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la digestión cesará en dos o tres días debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen (Taiganides, 1980).

Las causas principales de una excesiva producción de ácidos volátiles son la elevada velocidad de carga, una baja temperatura y la formación de espuma que constituye una zona favorable para los acetógenos. La sedimentación de los materiales fibrosos y la espuma se puede evitar mezclando el contenido del digestor (BOSTID, 1977).

### **3.6.5 Relación carbono/nitrógeno**

Una relación carbono/nitrógeno de 16/1 se considera óptima para una buena producción de gas (Taiganides, 1980), aunque puede obtenerse biogás a valores mayores no se debe superar la relación 30/1.

### **3.6.6 Concentración de nutrientes**

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aerobio (Schlegel y Zaborosch, 1993).

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas.

### **3.7 Biogás de vertederos o rellenos sanitarios**

Otra forma de obtención del biogás es la desgasificación de los vertederos. El biogás se produce de forma natural en los vertederos, implicando cierto peligro ya que la mezcla de metano con oxígeno es altamente explosiva. De tal modo que la desgasificación permite aprovechar un residuo peligroso, que en última instancia acabaría contaminando el ambiente (Arbizu y Huacuz, 2003).

El proceso de generación comienza con la extracción del biogás a través de pozos verticales perforados en toda la profundidad del relleno sanitario. Mediante una red superficial de tuberías, el biogás es conducido a un condensador a donde pasa a una balsa de lixiviación a fin de quitar la humedad y otras sustancias indeseables. Ya que se han separado los lixiviados, el biogás se conduce a la planta de generación eléctrica, alimentando los motores

de los correspondientes alternadores, la corriente producida pasa a un transformador de alta tensión a partir del cual se inyecta a la red (Martínez, 2005). Este proceso se muestra esquemáticamente en la Figura 3.11

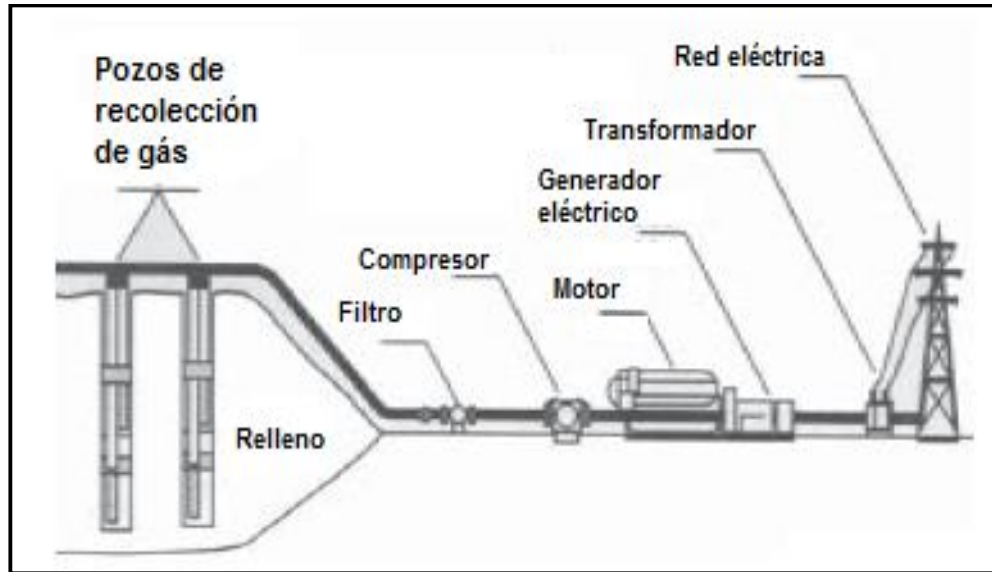


Figura 3.11 Producción de energía eléctrica en rellenos sanitarios (Arbizu y Huacuz, 2003)

Se suele instalar una antorcha de seguridad en la que se queman los excedentes de gas.

En vertederos que no disponen del sistema de recolección del gas es posible instalarlo a posteriori, aunque el rendimiento de la recogida de gas es mucho menor, ya que la mayor parte del gas se produce en las primeras fases de la descomposición de la basura. Los vertederos más modernos ya incorporan un sistema de recolección para el biogás, que después es utilizado para generar **energía eléctrica** para la propia planta de residuos asociada al vertedero (Themelis y Ulloa, 2006; Kaufman y col., 2004).

### 3.8 Ventajas de la degradación anaerobia

Una planta de biogás es una instalación estéticamente agradable que aporta grandes ventajas que se resumen en la Tabla 3.5



Tabla 3.5  
Ventajas de la degradación anaerobia

Beneficios	Referencias
<b>Energía</b>	
Autoabastecimiento de energía eléctrica y térmica.	Guardado-Chacón, 2006
Sustitución de gas natural.	Kaiser, 2009
<b>Biofertilizante</b>	
El residuo de un digestor es un sustrato estable, ya que no contiene materia orgánica y todos los minerales de los sustratos con los cuales se ha alimentado el digestor.	Kaiser, 2009; Noyola y Monroy, 1994
<b>Medioambiente</b>	
La producción de energía eléctrica a partir de biogás permite sustituir combustibles fósiles y por lo tanto se favorece en disminuir la concentración de gases efecto invernadero.	Moser y col., 2004; IPCC, 2000
Durante su producción es posible eliminar patógenos presentes en el estiércol y en los residuos, evitando la contaminación de aguas subterráneas. Además al degradar la fase orgánica del sustrato fermentado, el residuo de un digestor no presenta olores al ser aplicado como fertilizante.	Lusk 1998; Noyola y Monroy, 1994; Pain y col., 1990
<b>Económicos</b>	
Autoabastecimiento y venta.	Moser y Mattocks, 2004; IPCC, 2000
Ahorro en fertilizante.	Kaiser, 2009
Venta bonos CO <sub>2</sub> .	Moser y Mattocks, 2004; IPCC, 2000
<b>Social</b>	
El sistema de producción de biogás en la agricultura permite la descentralización de la producción eléctrica, pudiéndose producir en sectores rurales que hoy en día no cuentan con abastecimiento eléctrico.	Kaiser, 2009; Guardado-Chacón, 2006
La producción de biogás en la agricultura permite ciclos cerrados productivos y por lo tanto contribuye al sistema de producción limpia y aumenta el grado de sustentabilidad.	Kaiser, 2009; Marchaim, 1992

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

## Capítulo 4. Tecnología para uso de biomasa

### 4.1 Tecnología empleada en combustión

Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas de madera para uso domestico así como hornos y calderas (BUN-CA, 2002)

#### 4.1.1 Hornos

Los hornos de combustión directa están ampliamente difundidos en todas las operaciones agroindustriales de América. Básicamente consisten en una cámara de combustión en la que se quema la biomasa (leña, cascarilla de arroz o café, bagazo, cáscara de macadamia o coco, etc.), para luego usar el calor liberado en forma directa o indirecta (en un intercambiador de calor). En la Tabla 4.1 se citan algunas experiencias con el uso de hornos de combustión directa que emplea biomasa.

Tabla 4.1  
Experiencias con hornos de biomasa

País	Empresa	Giro	Horno	Biomasa que emplea	Usos	Comentario	Referencias
México (Orizaba, Veracruz)	Grupo SOS	Productora de arroz, aceite y galletas	Dos hornos quemadores de biomasa serie TEO IV	Cascarilla de arroz	Secado de grano	En Colombia, Panamá, Honduras y Costa Rica han instalado hornos de este tipo	Juaréz – Medellín, 2007
Perú, Ecuador y Colombia	-----	Ladrilleras	Horno artesanal	Cascarilla de arroz (en sustitución de leña)	Cocci-ón de ladrillos	Su objetivo es reducir costos de operación y evitar la deforestación	Talo-Sabine, 2008

#### 4.1.2 Calderas

Las calderas que operan con base en la combustión de biomasa (leña, aserrín, cascarilla de café, arroz, etcétera.) están dotados de una cámara de combustión en su parte inferior (en el caso de las calderas a leña) en la que se quema el combustible; los gases de la combustión pasan a través del intercambiador de calor, transfiriendo calor al agua. En algunas calderas se

usan inyectores especiales para alimentar biomasa en forma de polvo (aserrín, cáscara de grano, entre otros), a veces, junto a algún otro tipo de combustible líquido (por ejemplo, búnker; combustible residual que se obtiene de la destilación y refinación de los hidrocarburos, empleado en calderas y hornos). Se pueden distinguir varios tipos de calderas para la combustión de biomasa. Generalmente el tipo de caldera empleada son las tradicionales con parrilla fija o móvil que trabajan a temperaturas menores de 1000 °C (ITE, 2007).

Las calderas y hornos se emplean generalmente para producir vapor, ya sea para el secado de granos, madera o productos agrícolas (BUN-CA, 2002) o bien para emplearlo en el proceso industrial y generando electricidad por cogeneración (Enciso-Encinas, 2007). En la Tabla 4.2 se presentan algunos ejemplos del uso que se le da a la biomasa como combustible en calderas para generar vapor y electricidad.

Tabla 4.2  
Ejemplos de biomasa que es incinerada en calderas para producción de energía eléctrica y vapor.

País	Empresa/Giro	Biomasa empleada como combustible	Energía generada	Uso	Referencia
El Salvador	Central Izalco Ingenio azucarero	Bagazo de caña	Durante zafra 10.88 MW/hora	Venta de 1,875 kW/h a la central eléctrica. El resto en ingenio.	BUN-CA, 2002
México	De 48 ingenios azucareros	Bagazo de caña	426 MW	Operación de ingenios	Barnés, 2006
México	De 2 papeleras	Licores negros	20 MW	Operación industrial	Barnés, 2006

#### 4.1.3 Estufas eficientes de leña

Son las sucesoras del tradicional fogón empleado en áreas rurales para la cocción de alimentos, pero estas estufas tienen como ventaja reducir el consumo de madera en más del 50% y sobre todo disminuir casi totalmente las emisiones de humo al interior de la cocina evitando el riesgo de contraer enfermedades respiratorias, dolores de cabeza e irritación de ojos (Warwick y Doig, 2004). Otras características son:

- La entrada de aire a la cámara de combustión y su salida por la chimenea mejora la calidad de la combustión, permitiendo un aprovechamiento del aire caliente y eliminando la dispersión del humo en la cocina.
- Los materiales básicos de construcción como el lodo, el barro, la arena, adobe, tabiques, ladrillos o cemento, son fáciles de conseguir en la región o localidad.

En La Tabla 4.3 se observa que los conceptos de mano de obra y capacitación, son los más costosos, y estos dependen del instructor o formador. De cualquier manera, al analizar los beneficios que se obtienen con una estufa ahorradora de leña, se justifica plenamente la inversión (Chávez-López y Cruz-Santiago, 2007).

Tabla 4.3  
Costo de estufas eficientes (Chávez-López y Cruz-Santiago, 2007)

Material	Costo de insumos externos	Costo de material, capacitación y mano de obra	Costo total
Estufa de lodo y arena con chimenea	\$280 pesos	\$2, 500 a \$4, 000 pesos	\$2,780 a \$3,720 pesos
Estufa de adobe y cemento con chimenea	\$300 a \$600 pesos	\$4, 400 a \$6,400 pesos	Entre \$5,000 y \$7, 000 pesos

En México, en las zonas rurales de los estados de Michoacán, Jalisco y Oaxaca, se han instalado estufas eficientes del tipo “Patsari”. Esta se construye de de una mezcla de barro, arena y una cantidad pequeña de cemento e incluye comales metálicos y chimenea que aseguran la salida de humo hacia el exterior.

Las estufas eficientes están adquiriendo gran importancia en las regiones rurales de América Latina gracias a la promoción que les dan mediante programas gubernamentales de cada país y no gubernamentales, que se ha dado a la tarea de facilitar recursos en las zonas más vulnerables.

## 4.2 Tecnología empleada en gasificación

El proceso de gasificación se lleva a cabo en equipos llamados gasificadores.

### 4.2.1 Gasificadores

Los gasificadores típicos se describen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4  
Tipos de gasificadores y sus características

Tipo de Gasificador	Características	Referencias
De flujo ascendente o up draft	<p>Se utilizan para biomásas trituradas o "pelletizadas" con dimensiones de 1 a 10 cm .La entrada de aire se realiza por la parte inferior y los gases producidos salen por la parte superior.</p> <p>Desventaja: Produce un alto contenido de alquitrán del gas producido.</p> <p>El combustible y el gas se mueven en la misma dirección. El gas producido sale por la parte inferior.</p> <p>Ventaja: Producen un bajo contenido de alquitrán.</p>	Hislop y Hall, 1996
De flujo descendente o down draft	<p>Desventaja: Comparándolos con los up draft, tienen una eficiencia más baja, necesitan utilizar combustibles preparados, forman más escoria, no existe intercambio interno de calor y el gas producido es más pobre.</p> <p>Los gasificadores down draft son apropiados en sistemas con potencias inferiores a 1 MW.</p> <p>El agente gasificante se introduce a través de un lecho de partículas sólidas con el objeto de que éstas se mantengan en suspensión.</p> <p>El combustible se introduce por la parte inferior del gasificador, se mezcla con el lecho calentándose hasta alcanzar la temperatura del lecho. Como consecuencia, el combustible se piróliza obteniéndose una mezcla elevada en gases.</p>	Warren y col., 1995
De lecho fluidizado	<p>Desventaja: Combustión incompleta del carbono y la mala respuesta a los cambios de carga, por lo que requiere disponer de adecuados equipos de regulación y control.</p> <p>Ventajas: Se obtiene un gas con pocas impurezas y con una composición de salida controlada</p> <p>Funcionamiento para diferentes tipos de biomasa aunque se puede necesitar una trituración previa del material sólido para obtener una buena fluidización.</p> <p>Es el más apropiado para su utilización en aprovechamientos para la generación de energía eléctrica, y sobre todo, en producción a gran escala de varios MW</p>	Leung y col., 2004; Hislop y Hall, 1996

El principio de funcionamiento de los gasificadores es aplicable tanto a combustibles convencionales, como para la biomasa (Velazco, 2005). No obstante, la capacidad de procesamiento, el tamaño del sistema de generación de energía en su conjunto, la calidad deseada del gas a obtener, el tipo y las características de biomasa empleada son factores que deciden su elección (McKendry, 2002; Warren y col., 1995)

#### **4.2.2 Experiencias empleando gasificadores**

En México la gasificación no es una tecnología empleada. Solo el Instituto de Ingeniería de la UNAM, cuenta con un gasificador, actualmente no se utiliza, pero está destinado a la producción de electricidad para uso de Ciudad Universitaria. Dicho gasificador se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Gasificador del Instituto de Ingeniería UNAM (Aguillón, 2005)

Otros países de América Latina están implementando esta tecnología, la mayoría se trata de emprendimientos particulares o con fines de investigación por parte de universidades. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 4.5

Tabla 4.5 Ejemplos de experiencias empleando gasificadores en América Latina

País	Empresa	Giro	Tipo de gasificador	Biomasa empleada como combustible	Energía generada	Uso	Referencia
Costa Rica	Cooperativa de Caficultores de Tilarán	Exportación de café y macadamia	Down draft (origen alemán)	Madera	250 kWth	Secado de café	BUN-CA, 2002
Chile	Facultad de Ciencias Forestales	Investigación	Down draft	Biomasa forestal	Motor diésel de 74.57 kW	Energía eléctrica para aserraderos	UCh., 2009
Cuba	Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables	Investigación	Down draft	Madera	20 kW con motor de combustión interna	Electricidad a una comunidad rural	Revuelta-Pereiro, 2006
Paraguay	Imbert, Compañía alemana	Generación de energía eléctrica	Down draft (2 de origen alemán y 1 local)	Madera	525 kW c/u	Electricidad a una cooperativa agrícola, panaderías, lecherías, escuelas y unas 1,500 familias	FAO, 2007
Nicaragua	Universidad Internacional de Miami, Florida	Investigación	Down draft Maquina llamada BioMax 50 *	Madera y cáscara de coco	50 kWh	Provee energía eléctrica por 6.5 horas a un Regimiento de caballería (Fase de prueba)	FAO, 2007

\*BioMax 50 Maquina diseñada por la Universidad de Miami, que trabaja bajo el principio de la gasificación



En Estados Unidos y Europa los gasificadores son una tecnología madura. Mientras que en Asia el uso de esta tecnología ha venido creciendo considerablemente, China es el mejor ejemplo de ello. En Tabla 4.6 se mencionan proyectos que se han desarrollado exitosamente en este país.

Tabla 4.6

Tipos de gasificadores de biomasa empleados en China (Leung y col., 2004)

Empresa /Giro	Biomasa	Propósito	Capacidad	Tipo de gasificador
Huirou .Equipos de madera	Aserrín	Secado	200 kWt	Down draft
Zhanjiang. Aserradero	Madera en polvo	Caldera	1000 kWt	CFB
Lushuihe. Aserradero	Madera en polvo	Caldera	7000 kWt	CFB
Huantai. Red de abastecimiento de gas	Residuos de cosecha	Cocina	300 kWt	Down draft
Dalian. Pirólisis de biomasa y sistemas de gas	Residuos de madera	Cocina	700 kWt	Fixed bed
Dalian. Red de abastecimiento de gas	Residuos de cosecha	Cocina	300 kWt	Down draft
PutianHuagang. Molino de arroz	Cáscara de arroz	Electricidad	1000 kWe	CFB
Sanya. Aserradero	Madera en polvo	Electricidad	1000 kWe	CFB
Handan. Obras de acero	Rastrojo	Electricidad	600 kWe	CFB

### 4.2.3 Ejemplo de costos de gasificadores

En la Tabla 4.7 se muestra el costo de diversos gasificadores de acuerdo a su uso y capacidad dada en kW.

Tabla 4.7

Costo de gasificadores según su uso y capacidad (Leung y col., 2004; Sun, 2002)

Gasificadores	Capacidad (kW)	Costo (U\$)
Empleados en sistemas de calor	200 kWt	6,200
	3000 kWt	36,900
	10,000 kWt	73,800
Empleados en la red de abastecimiento de gas	180 kWt	12,300
	500 kWt	14,700
	800 kWt	18,400
Empleados en sistemas de generación de energía	200 kWe	19,700
	1000 kWe	61,500
	2000 kWe	86,100

#### 4.2.4 Gasificación de plasma

Países como Estados Unidos, Australia, Grecia, entre otros, principalmente de Europa han puesto en marcha plantas de gasificación de plasma.

La gasificación de plasma emplea temperaturas muy altas en condiciones de ausencia casi total de oxígeno para descomponer los materiales del desecho a tratar a una estructura molecular básica, no quema como lo hacen las calderas más bien convierte los desechos orgánicos en un gas compuesto de monóxido de carbono e hidrógeno que todavía contiene la energía del desecho, y los residuos inorgánicos los transforma en un subproducto en forma de cristal vitrificado que puede emplearse como relleno inerte para la construcción de carreteras, ladrillos u otros usos (Taboada-González y col., 2009). En la Figura 4.1 se observa el proceso.

Dependiendo de la naturaleza del material suministrado a unidad de conversión de la máquina, el cristal vitrificado puede ser utilizado para crear baldosas o encimeras. Algunos científicos, advierten no obstante, que este cristal podría probablemente contener metales pesados tóxicos (Katou y col., 2001).

Se lleva a cabo en el interior de un vaso de acero inoxidable sellado y repleto de aire común, se hace pasar un alto voltaje entre dos electrodos que arranca electrones del aire, convirtiendo al gas en plasma. La energía del arco de plasma es tan potente que rompe la materia en sus partes componentes desmontando los electrones de valencia de los átomos, y rompiendo sus ataduras moleculares. Los quemadores o antorchas operan de 5,000 a 8,000F a causa de estas altas temperaturas el desecho es completamente destruido y transformado a sus componentes básicos (Huang y Tang. 2007).

El proceso produce suficiente gas sintético como para aportar la energía que la unidad consume, además de un excedente que podría venderse directamente o emplearse para generar un extra de electricidad, lo cual aporta una fuente de ingresos adicional a la instalación.

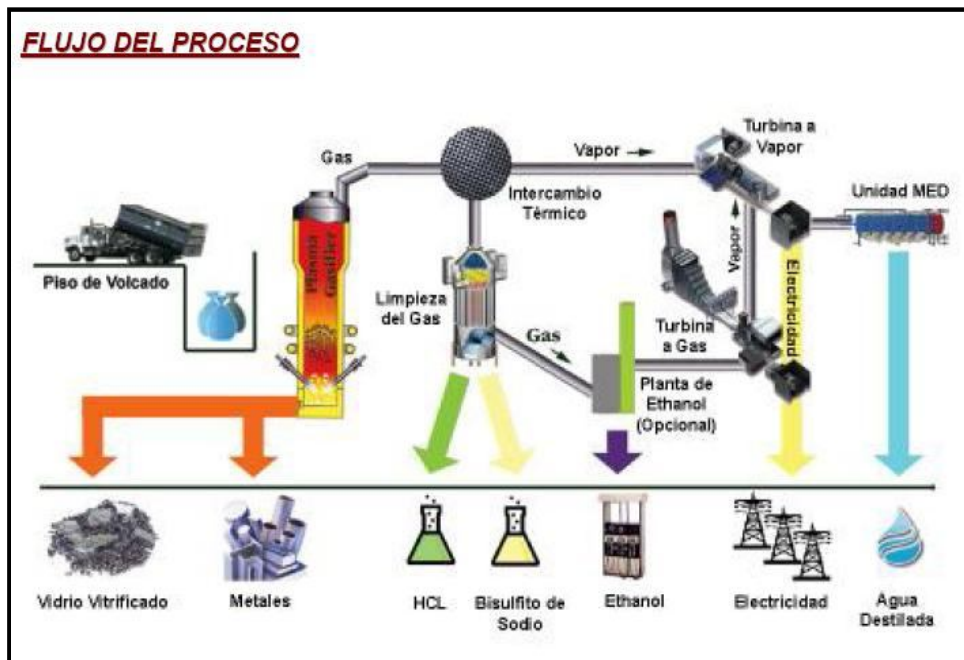


Figura 4.2 Proceso de gasificación de plasma (Huang y Tang. 2007)

### 4.3 Tecnología empleada en pirólisis

El estado actual de la tecnología de plantas de pirólisis aún se encuentra en desarrollo, salvo la producción de carbón vegetal que es una práctica muy difundida en América Latina, empleando hornos de tierra o de mampostería que

son los más comunes (ITE, 2007; FAO, 2007), pero de baja eficiencia en la transformación de leña a carbón, del 12 al 20% de peso seco de la leña. La producción eficiente de carbón vegetal puede lograrse mediante el uso de hornos a base de ladrillo como el modelo Rabo Quente o metálicos (Arias, 2008).

En México el mayor productor de carbón vegetal es el estado de Tamaulipas, donde la Conafor implemento nuevas tecnologías a las comunidades rurales. Con una inversión de siete mil pesos se puede construir un horno de ladrillo para la fabricación de carbón vegetal, que beneficia a los productores obteniendo una mayor producción con menos leña (Salazar de León, 2010).

La pirólisis rápida todavía es una industria incipiente con limitadas oportunidades comerciales. Pese que las aplicaciones potenciales del aceite de pirólisis son variadas, ya que puede usarse para sustituir al petróleo crudo en múltiples aplicaciones como: Calentadores de agua, calderas, motores y turbinas para la generación de calor o electricidad. También puede mejorarse para ser usado como combustible en el transporte, pero actualmente no resulta económico.

Se han desarrollado diferentes tipos de reactores para realizar la pirólisis rápida de la biomasa. De acuerdo a la PyNe (European network on pyrolysis) toda esta tecnología ha demostrado con éxito la producción del combustible líquido a pequeña escala y en varias plantas piloto de hasta 200 Ton/ día biomasa de capacidad, que se encuentran en operación.

Debido al desarrollo en el conocimiento y la construcción de plantas de demostración, las actividades de la pirólisis rápida en Europa están aumentando. Por ejemplo, en ciertas industrias forestales de Suecia y Canadá se está desarrollando la producción de aceite de pirólisis para su uso como combustible en calentadores de agua (Nutek, 2004).

Un resumen de los diferentes reactores de pirólisis rápida se muestra en la Tabla 4.8 donde se puede identificar las características del reactor más prometedor y del menos prometedor.

Tabla 4.8  
Reactores de pirólisis rápida para producción de aceite (Elliott y Leader, 2009)

Reactor	Nivel de desarrollo	% peso de aceite	Complejidad	Tamaño de alimentación	Gases inertes necesarios	Tamaño específico
Cama fluidizada	Demostrativo	75	Medio	Pequeña	Altos	Medio
CFB	Piloto	75	Alto	Medio	Altos	Grande
Arrastre	Ninguno	65	Alto	Pequeña	Altos	Grande
Cono rotativo	Piloto	65	Alto	Pequeña	Bajos	Pequeño
Ablativo	Laboratorio	75	Alto	Grande	Bajos	Pequeño
Vacío	Demostrativo	60	Alto	Grande	Bajos	Grande

Las casillas en gris muestran características indeseables

Las casillas en verde muestran características moderadamente aceptables

Las casillas en blanco muestran características aceptables.

En cuanto al nivel de desarrollo los que se encuentran en etapa de demostración comprenden de 200 a 2,000 kg/h al igual que las plantas piloto, mientras que a nivel laboratorio la capacidad es de 1 a 20 kg/h.

#### 4.4. Tecnología empleada en degradación anaerobia

Los reactores anaerobios son una tecnología madura que se usa en todos los continentes. China e India están entre los países líderes en el empleo de la tecnología del biogás. El desarrollo tecnológico a gran escala alcanzado por países como Dinamarca, Suecia y Alemania es también importante, siendo este último el líder en esta tecnología (Arrastía-Ávila, 2009). México cuenta en su haber con 150 reactores y digestores en funcionamiento, entre ellos experiencias en la industria, plantas de tratamiento de aguas residuales, los instalados en granjas y zona rurales así como plantas piloto de investigación. En la Tabla 4.9 se clasifican los digestores según el área donde se emplea.

Tabla 4.9  
Clasificación de digestores de acuerdo a su uso

Tipo de digestor	Características	Objetivo	Nivel de desarrollo
Digestor rural	<p>Digestores de mínimo costo y mantenimiento, fáciles de operar pero con eficiencias pobres y bajos niveles de producción de energía</p> <p>Generalmente alimentados con estiércol animal. También se han instalado con éxito unidades más pequeñas, alimentadas con los desperdicios de las cocinas, lodos acuáticos y excremento humano.</p>	<p>Dar sanidad, biogás de uso doméstico y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o sectores rurales con difícil acceso a las fuentes convencionales de energía.</p>	<p>Esta tecnología es conocida en la mayoría de los países en vías de desarrollo, misma que ha alcanzado un extenso uso en las últimas décadas (Huang y Shih, 1981)</p>
Digestor agropecuario y agroindustrial	<p>Dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos.</p> <p>Los digestores desarrollados para esta aplicación tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento</p>	<p>Solucionar graves problemas de contaminación agropecuaria o agroindustrial</p> <p>Empleo del biogás para la generación de electricidad Obtener fertilizante de mayor valor y controlar de manera considerable los malos olores.</p>	<p>Tecnología conocida y usada cada vez más gracias a programas de fomento y a la venta de bonos de carbono (Suneerat y col., 2009)</p>
Digestor industrial	<p>Son de enormes dimensiones (más de 1,000 m<sup>3</sup> de capacidad), trabajan a temperaturas mesofílicas (20°C a 40°C), o termofílicas (más de 40°C) poseen sofisticados sistemas de control y están generalmente conectados a equipos de cogeneración</p>	<p>Producir calor, electricidad y un efluente sólido de alto contenido proteico, para emplearse como fertilizante o alimento de animales.</p>	<p>La mayoría se encuentran instalados en Europa; en el resto del mundo no se ha superado aún la etapa de unidades demostrativas o emprendimientos particulares (Hilbert, 2007).</p>

#### 4.4.1 Ejemplos de experiencias empleando digestores

En la Tabla 4.10 se muestran algunos ejemplos de experiencias con cada tipo de digestor tratados en la Tabla 4.9. Donde se observan las diferencias que existen entre la capacidad de biomasa empleada, el producto obtenido y el uso que se le da, según el tipo de digestor o reactor anaerobio empleado.

Tabla 4.10  
Ejemplos de experiencias con diferentes tipos de digestores

País	Empresa	Giro	Tipo de digestor	Biomasa empleada como sustrato	Producto	Energía generada	Uso	Comentarios	Referencia
México	Granja "Tierramor"	Agricultura	Rural (tubular de ferrocemento)	100 l/día de aguas negras de baños WC	Biofertilizante y biogás	-----	Biofertilizante de uso en granja y biogás para uso doméstico		Marsilli, 2008
México	Granja "La estrella"	Producción de leche de vaca	Agropecuario	Estiércol de 1,020 vacas	1,400 m <sup>3</sup> /día de biogás y 5 Ton/día bioabono	110 kWh/día	Combustible de 2 motogeneradores para producir electricidad y venta de bioabono a productores de aguacate orgánico de la región	Premio de Innovación Tecnológica Guanajuato 2008	Rangel-Delgadillo, 2008
Hungría	Agropecuaria Batocoop	Producción de leche de vaca y engorda de pollos	Complejo de digestores Agropecuario	Estiércol de 2,700 vacas, 50 Ton excreta seca de corrales y aguas de un camal de 20,000 pollos.	6,600 Nm <sup>3</sup> /año biogás, y bioabono.	5,000 MWh electricidad y 8,700MWh calor.	Electricidad empleada en la red pública	Procesa alrededor de 400 m <sup>3</sup> sustrato/día, por lo que es el digestor para fines agropecuarios más grande del mundo	Zeitung e Infantes, 2008
Cuba	Mielera Heriberto Duquense	Producción de alcohol y rones	Reactor industrial UASB (origen holandés)	3, 000 m <sup>3</sup> aguas residuales de la destilería	16,000 m <sup>3</sup> / día biogás	12 MW	Utilizado en calderas de la destilería y suministro de energía eléctrica a la población aledaña al complejo industrial	Reduce la carga contaminante de 50 Ton/día materia orgánica que vertía al río Guaní. El costo del reactor fue de U\$2,600,000	Bazán, 2005

Los países industrializados tienen algunos programas de divulgación para el uso de los digestores, y han construido digestores más grandes y con un control más elaborado. En estos países, los digestores de metano tienden más a usar los lodos de aguas residuales, los desechos municipales sólidos o las aguas orgánicas residuales de origen industrial (procesamiento alimenticio, lecherías, cervecerías, farmacéuticas, pulpa y papel y producción de alcohol).

Dentro de Europa, Alemania es el mayor generador de biogás. Hasta finales de 2007 había en funcionamiento más de 3,700 plantas agrícolas de biogás con una capacidad total de 1,270 Megavatios de potencia eléctrica.

Tabla 4.11  
Experiencias en producción de biogás en otros países (Arrastía-Ávila, 2009)

País	Empresa/giro	Biomasa empleada	Uso	Comentarios
Noruega	Gobierno de Cd. Capital Oslo	Heces fecales humanas	El biogás se usa como combustible de 80 ómnibus	A los ómnibus se les suministrará un metano libre de sustancias que puedan afectar sus motores
Alemania	Planta vitivinícola	Aguas residuales y desechos	Energía eléctrica de la planta	Primera planta piloto vitivinícola completamente sostenible (Dobelmann y Müller, 2000)
Suecia	Planta de biogás anexa a matadero de reses.	Vísceras de vacas	Energía eléctrica de la planta	La descomposición de los residuos de una sola vaca produce suficiente biogás como para impulsar un tren unos cuatro kilómetros
Suecia	Planta de biogás	Alfalfa y trigo (subproductos de cultivos de bajo contenido de lignina)	Energía eléctrica a partir de biogás	El uso de alfalfa es preferible por sus bajos costos de insumos (Gustavsson, 1998; Johansson, 1996)
Israel	Plantas de biogás	Desechos municipales y agrícolas	Generación de electricidad en motores de diésel modificados, o como una fuente de calor en procesos industriales.	Al ser un país con clima seco y no disponer de áreas agrícolas para la bio-conversión de combustibles, explota sus desechos municipales agrícolas y aguas residuales en producción de biogás



En las Figuras 4.3 a la 4.6 se observan algunos ejemplos de diferentes tipos de digestores, desde aquellos de poca capacidad hasta grandes plantas de degradación anaerobia.



Figura 4.3 Instalación de un digestor tubular de ferrocemento (Rangel-Delgadillo, 2008)



Figura 4.4 Digestor de la granja “La Estrella” (Marsilli, 2008)



Figura 4.5 Vista aérea de la planta Batocoop, en Hungría (Zeitung e Infantes, 2008)



Figura 4.6 Digestor industrial Holanda (Turkenburg, 2003)

#### 4.4.2 Ejemplo de costos de digestores

En la Tabla 4.12 se comparan los costos de diferentes digestores iniciando con los de pequeña escala, es decir, los de geomembrana de PVC o de polietileno, empleados únicamente para fines rurales y con aplicaciones domésticas. Continuando con los digestores semi-industriales, empleados para fines de generación de vapor y energía eléctrica.

Tabla 4.12

Tipo de recurso, tecnología y su costo, para la obtención de biogás (RMB, 2006)

Materia prima	Tecnología	Escala (m <sup>3</sup> /año)	Costo de inversión (US)	Costo unitario (US/MW)	Producto obtenido	Costo producto (US/MWh)
Estiércol	Digestor de geomenbrana de PVC	24	100	ND	Biogás	ND
Estiércol	Digestor de polietileno	24	33	ND	Biogás	ND
Estiércol	Digestor semi-industrial	24, 638 (18 MW)	51, 750	2,875	Biogás, vapor y electricidad	49,266
Estiércol y residuos de maíz	Digestor industrial	semi- 53, 271 (36 MW)	66, 825	1, 856	Biogás, vapor y electricidad	16,202
Estiércol y residuos de alimentos	Digestor industrial	semi- 72, 158 (50 MW)	146, 925	2, 939	Biogás, vapor y electricidad	15,266

ND, No disponible

Cabe señalar que la información de costos de inversión, el costo unitario, la situación actual de la tecnología y el costo del producto se obtuvieron de plantas que actualmente se encuentran en operación. Para los dos primeros casos los datos son del 2003 y para los últimos tres casos los datos corresponden al 2000. Así también que el costo del producto expresado en dólares por MWh corresponde al vapor y a la electricidad generada a partir de biogás (RMB, 2006).

#### 4.5 Nivel de desarrollo de tecnología para uso de biomasa en Europa

La biomasa en Europa constituye el 29% del total de la producción de energía renovable en Europa (Faaij, 2006). El incremento en la producción de calor y electricidad y el crecimiento de los mercados de biomasa debe su éxito a las políticas nacionales, que permiten a estos países disponer de varias opciones tecnológicas. En la Tabla 4.13 se resumen estatus de los procesos de conversión de biomasa a bioenergía.

Tabla 4.13

Resumen del estado y desarrollo en tecnología para producir energía eléctrica y calor a partir de biomasa, en Europa (van Loo y Koppejan, 2002; van den Broek y col., 1998; Kaltschmitt y col., 1996; Faaij y col., 1998)

Proceso de conversión		Rango de capacidad típica	Eficiencia neta	Estado y desarrollo en Europa
Degradación anaerobia	Producción de biogás	Varios MWe	10-15% (eléctrica)	Tecnología bien establecida. Extensamente aplicado a desperdicios orgánicos húmedos y aguas negras.
	Producción de biogás en rellenos sanitarios	Varios MWe	Eficiencia del motor de gas	Opción atractiva para la mitigación de GEI. Ampliamente aplicado en Europa, donde existen políticas para el tratamiento de los residuos en la mayoría de los países.
	Calor	Doméstico 1-5 MWth	Muy bajo para chimeneas clásicas, y entre 70-90% para hornos modernos.	La madera es aún ampliamente empleada, pero está siendo desplazada por sistemas de calefacción modernos (automatizados, con limpieza de gases de combustión, de pellets)
Combustión	Autónomo	20-100sMWe	20-40% (eléctrica)	Tecnología bien establecida, especialmente en países escandinavos donde han desarrollado tecnología avanzada de lecho fluidizado, dando alta eficiencia, bajos costos y alta flexibilidad comercial.
	Co-combustión	5-20MWe en estaciones de carbón existentes	30-40% (eléctrica)	Ampliamente empleado y en estado creciente en los últimos años, en zonas con grandes cantidades de biomasa
	Cogeneración	0.1-10MWe	60-90% total	Ampliamente empleado en países Escandinavos Austria, Alemania y Francia.
Gasificación	Calor	Pequeña, alrededor de 100kWth.	80-90%	Comercialmente disponible, sin embargo la producción energética es limitada.
	BIG/CC	30-100MWe	40-50% (o superior eléctrica)	Comercialmente disponible y empleado.
Pirólisis	Bio-oil	Pequeña capacidad alrededor de 100kWth.	60-70% de calor contenido de BioOil / como materia prima.	No disponible comercialmente, solo plantas piloto, demostrativas y emprendimientos autónomos.

## 4.6 Estado del arte de las tecnologías para uso de biomasa

Tabla 4.14  
Análisis FODA sobre las condiciones de desarrollo de la biomasa energética

Aspecto	Fortalezas y oportunidades	Debilidades y amenazas
Ambientales	<p>Puede integrarse con procesos de recuperación ambiental, principalmente cuando corresponden a la utilización de subproductos de procesos productivos.</p> <p>Sustituye o disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub>.</p> <p>Posibilita el uso productivo de tierras marginales, en pendientes o semiáridas.</p>	<p>Puede promover la monocultura extensiva y reducir la biodiversidad.</p> <p>Puede incrementar la erosión y la degradación de los suelos.</p> <p>Puede emitir partículas en la combustión.</p>
Tecnológicos	<p>Disponibilidad de varios sistemas de tecnología probada para su uso racional y diversificado en sus diversas formas.</p> <p>Gran parte de los equipos necesarios pueden ser fabricados localmente.</p> <p>Amplia gama de capacidades, tecnologías y condiciones para su uso.</p>	<p>Los sistemas requieren comparativamente más mantenimiento y atención en la operación.</p> <p>La eventual heterogeneidad en tamaño, alta humedad o baja densidad del biocombustible puede imponer sistemas de preparación previa.</p> <p>Existen pocos sistemas suficientemente confiables y de operación sencilla.</p>
Institucionales	<p>Los cambios institucionales en el sector energético en muchos países estimulan la producción privada de energía e indirectamente, el uso de la biomasa energética.</p>	<p>Normalmente no existe un marco institucional eficiente para estimular la producción y utilización racional de la bioenergía.</p> <p>Los sistemas de información disponibles muchas veces no permiten fundamentar acciones e definir estrategias bioenergéticas.</p>

Continuación de la Tabla 4.14  
Análisis FODA sobre las condiciones de desarrollo de la biomasa energética

Aspecto	Fortalezas y oportunidades	Debilidades y amenazas
Capacitación y difusión	<p>Existe en la actualidad un número razonable de personas capacitadas e instituciones con conocimientos, pero aún poco articuladas para actuar en temas bioenergéticos.</p> <p>Los nuevos sistemas de comunicación permiten incrementar el intercambio de información entre las instituciones y otros actores del escenario bioenergético.</p> <p>El conocimiento y la tecnología bioenergética pueden considerarse de libre disponibilidad, sobre todo cuando se comparan con otras cadenas energéticas.</p>	<p>Los sistemas de información disponibles muchas veces no permiten fundamentar acciones y definir estrategias bioenergéticas.</p> <p>Algunas veces existen prejuicios para la utilización de la biomasa por falta de conocimiento de las oportunidades de sostenibilidad de esta fuente energética.</p> <p>La temática bioenergética es poco considerada en los programas de formación profesional y en los niveles de postgrado son pocas las oportunidades de formación, que aborden los distintos aspectos de las bioenergías.</p>
Socioeconómicos	<p>Favorece la generación de empleo en las áreas rurales.</p> <p>Contribuye a internalizar las inversiones y a reducir las desigualdades.</p> <p>Presenta un menor componente en divisas en comparación con otros sistemas de suministro energético.</p> <p>En muchas situaciones presenta competitividad frente a combustibles fósiles, particularmente en el contexto agroindustrial.</p> <p>En algunos países existen modalidades de financiamiento para el suministro energético en localidades aisladas.</p>	<p>La relación oferta-consumo frecuentemente es definida por el mismo agente, sin una valorización explícita del recurso.</p> <p>Los sistemas bioenergéticos presentan en general costos de capital comparativamente más elevados que los sistemas convencionales basados en energía fósil.</p> <p>El costo de transporte tiene una fuerte incidencia y típicamente las distancias factibles en términos económicos entre los sitios de producción y utilización son inferiores a pocas centenas de kilómetros.</p>

#### 4.7 Costos de inversión de tecnologías

Con el fin de comparar el costo de inversión de las tecnologías que trabajan empleando biomasa, en la Tabla 4.14 se muestran los costos estimados de aquellas tecnologías de mayor uso y capacidades típicas empleadas en América Latina.

Tabla 4.15  
Costos de inversión estimados para algunos procesos de conversión  
(BUN-CA, 2002)

Tecnología	Tipo de biomasa	Producto	Producción	Potencia térmica	Costo estimado (US\$)
Horno de carbón de ladrillos	Madera	Carbón vegetal	3 Ton/mes	NA	3,500
Gasificador	Madera	Gas pobre	660m <sup>3</sup> /h	600 kW	12,000
Digestor de estiércol	Estiércol	Metano	8m <sup>3</sup> /día	NA	500
Caldera	Bagazo de caña de azúcar	Energía eléctrica	10-20 kWh/Ton caña molida	NA	1,500-2,000 por kW
Horno de combustión directa	Madera, cascarilla de café	Energía térmica	150 m <sup>3</sup> /h de área, 60°C	2MW	30,000

NA =No aplica

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

## Capítulo 5. Financiamiento de proyectos

### 5.1 Reducción de gases de efecto invernadero

El efecto invernadero es el calentamiento natural de la tierra por el cual mantiene su temperatura en equilibrio mediante una delicada relación entre la energía solar entrante (radiación onda corta) que absorbe la tierra y la energía infrarroja saliente (radiación de onda larga) que emite, parte de la cual escapa al espacio (Erickson, 1992). Los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y algunos compuestos halogenados) dejan pasar la radiación solar a través de la atmósfera de la tierra casi sin obstáculo, pero absorben la radiación infrarroja de la superficie de la tierra e irradian parte de la misma nuevamente hacia la tierra. Este invernadero natural mantiene la temperatura de la superficie de la tierra permitiendo con ello la vida (Erickson, 1992).



Figura 5.1 Efecto invernadero (Ramírez-Páez, 2001)

Pero a partir de la revolución industrial, la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado de forma significativa, como consecuencia de la combustión de derivados del petróleo y reducción de la masa forestal principalmente, lo que está ocasionando un aumento gradual en la temperatura del planeta que a la larga causará severos problemas en los ecosistemas; de 1900 a la fecha la temperatura aumentó 0.7°C y se prevé que la temperatura media de la superficie del planeta aumente entre 1.4 y 5.8°C de aquí a 2100. Por ello, la



comunidad mundial ha decidido hacer frente a la situación, dando como paso principal la creación del Protocolo de Kyoto (Nieto y Santamarta, 2003).

## **5.2 Protocolo de Kyoto**

El **Protocolo de Kyoto** es un acuerdo internacional asumido en 1997 en el ámbito de Naciones Unidas que trata de frenar el cambio climático. Entró en vigor el 16 de febrero de 2005, cuando 55 naciones lo ratificaron, actualmente lo han hecho 175 países, aunque hay grandes ausencias como la de Estados Unidos.

Su objetivo es reducir un 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos (Erickson, 1992). Para ello contiene objetivos legalmente obligatorios para que los países industrializados reduzcan las emisiones de 6 gases de efecto invernadero (GEI) de origen humano: Dióxido de carbono, metano, óxido nitroso ( $N_2O$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ).

Esto puede lograrse empleando energías renovables y realizando mejoras en la eficiencia energética principalmente. Cabe señalar que la energía nuclear queda excluida de los mecanismos financieros de intercambio de tecnología y emisiones asociados al Protocolo de Kyoto (Lozano y col., 2007; Nieto y Santamarta, 2003).

El Protocolo incluye tres mecanismos diseñados para incrementar el costo-efectividad de la mitigación del cambio climático.

Los tres mecanismos son:

- **Comercio de emisiones**
- **Implementación conjunta**
- **Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)**

### 5.2.1 Comercio de emisiones o bonos de carbono

Los bonos de carbono son un instrumento económico. Cada bono de carbono equivale a una tonelada de dióxido de carbono equivalente (t CO<sub>2</sub> eq.) que ha sido dejada de emitir a la atmósfera (Colina-Rubio, 2006).

El comercio de los bonos de carbono está basado en dos puntos:

- No importa en qué parte del planeta se eviten las emisiones de GEI, el resultado es el mismo. Evitar que una tonelada de carbono sea liberada a la atmósfera tiene el mismo efecto en la mitigación del cambio climático, sin importar si la reducción de emisiones se hizo en México, Venezuela o Rusia (Martínez y col., 2004).
- En términos ambientales, no es tan importante si las emisiones se evitan hoy o en unos años. Dado el tiempo de permanencia de los GEI en la atmósfera, el efecto ambiental de evitar las emisiones el día de hoy o en unos años es el mismo, siempre y cuando realmente se evite.

Existen diferentes esquemas para el comercio de bonos de carbono. a continuación se explican cada uno:

- El certificado de reducción de emisiones (CER). Es el que obtienen los países industrializados que inviertan en proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio por un monto correspondiente a la cantidad de CO<sub>2</sub>eq que se dejó de emitir a la atmósfera como resultado del proyecto.
- Los montos asignados anualmente (AAU). Corresponden al monto total de emisiones de gases de efecto invernadero que a un país se le permite emitir a la atmósfera durante el primer período de compromiso (2008-2012). Cada país divide y asigna su respectivo monto a empresas localizadas en su territorio a manera de límite de emisión por empresa.
- Unidades de reducción de emisiones (ERU). Son el monto específico de emisiones de gases de efecto invernadero que dejaron de ser emitidas por la ejecución de un proyecto de Implementación Conjunta.

- Unidades de remoción de emisiones (RMU). Son los créditos obtenidos por un país durante proyectos de captura de carbono. Estas unidades o créditos solamente pueden ser obtenidas por países industrializados y pueden obtenerse también en proyectos de Implementación Conjunta.

No hay un valor oficial sobre el precio de una tonelada de CO<sub>2</sub> reducida o no emitida. El precio de la tonelada está sujeto a la oferta y demanda de bonos de carbono en el mercado. Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, el precio por cada tonelada de CO<sub>2</sub> oscila; en 2005 se encontraba entre 5 y 12 €, en 2007 registro los precios más bajos llegando a los 2 € la tonelada, el precio promedio en 2008 fue de 19 €, a principios del 2009 subió hasta los 23 € y en mayo del mismo año ha estado oscilando en los mercados de Chicago y la Unión Europea entre los 12 y 19 € (Graham, 2009). En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestra la distribución de compradores de bonos de carbono por MDL para el año 2005 y 2006 respectivamente.



Figura 5.2 Distribución de compradores de CER's por país o región (Fernández-Rozado, 2008; IETA, 2007).



Figura 5.3 Distribución de compradores de CER's por país o región (Fernández-Rozado, 2008; IETA, 2007).

Las operaciones de compra-venta se dan con empresas europeas y japonesas. Algunas son negociaciones privadas e individuales, otras comenzaron a realizarse a través de los mercados electrónicos como el español SENDECO2, el holandés Alianza Climex, el europeo European Climax Exchange, e inclusive el americano Chicago Climatex (Colina-Rubio, 2006; Martínez y col., 2004).

#### 5.2.2 Implementación conjunta

Este mecanismo permite que un país industrializado invierta en otro país industrializado para la ejecución de un proyecto encaminado a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El país inversor obtiene certificados para reducir emisiones a un precio menor del que le habría costado en su ámbito nacional, y el país receptor de la inversión recibe la inversión y la tecnología. Pueden participar los gobiernos, empresas y otras organizaciones privadas.

Deberán cumplirse determinados requisitos para poder hacer uso de este mecanismo, y en cualquier caso, los proyectos deberán someterse a su certificación por entidades independientes (Martínez y col., 2004).

### **5.2.3 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)**

El Mecanismo de Desarrollo Limpio es un procedimiento en donde países industrializados, a través del estado mismo o de la empresa privada, pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero dentro de países en desarrollo, y recibir a cambio certificados de reducción de emisiones para cumplir con sus metas de reducción de emisiones de GEI a las que están obligados (IPCC, 2007; Martínez y col., 2004).

Así también los países en desarrollo a través del estado o de la empresa privada podrán ejecutar tales proyectos en forma independiente y vender los certificados de reducción de emisiones directamente a países industrializados.

El MDL está destinado a cumplir dos objetivos del Protocolo de Kyoto:

- Debe ayudar a los países industrializados a cumplir sus metas de emisión.
- Al mismo tiempo, debe apoyar a los países en crecimiento en su desarrollo sostenible.

Esto último se consigue poniendo al servicio de los países en desarrollo el capital, los conocimientos especializados y la tecnología indispensables, sobre todo para el uso de energías renovables y el aumento de la eficiencia energética. Realizar estos proyectos no sólo contribuye a la modernización de un sector específico, sino también aporta una contribución positiva a la protección del clima global

Las reducciones de emisión se miden y se contabilizan en forma de certificados de reducción (CER) a favor de las metas de emisión de los países inversionistas.

El MDL es regulado y supervisado por el Consejo Ejecutivo del mismo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Landa, 2008).

Un proyecto que participa en el MDL debe cumplir con el ciclo establecido por el Consejo Directivo del MDL antes de poder recibir los beneficios económicos que resultan de esa participación (Hamish, 2006; Lozano y col., 2007). Los pasos para el proceso de certificación (Landa, 2008) son los siguientes:

- 1.- Diseño. Se crea el documento llamado Diseño de Proyecto.
- 2.- Validación. Se garantiza el cumplimiento del proyecto.
- 3.- Registro. El proyecto ingresa al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).
- 4.- Implementación del Diseño. Se garantiza la reducción
- 5.- Vigilancia. Se monitorean y comparan emisiones.
- 6.- Verificación. Se audita y certifica la reducción de emisiones contaminantes.
- 7.- Orden de expedición. Se otorga el Bono de Carbono.

En México **el responsable de los proyectos MDL es el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y de Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI)**, presidido por SEMARNAT, cuya función es la de otorgar cartas de aprobación a proyectos como requisito indispensable para que puedan ser considerados para su registro como proyectos MDL.

Hasta el 2009 se habían registrado 2,802 proyectos MDL a nivel mundial (UNFCCC, 2009). México ha contribuido con 123, de los cuales 92 están relacionados con la degradación anaerobia. En la Tabla 5.1 se desglosa el número de proyectos registrados de acuerdo el sector\* o área de desarrollo en el mundo, en la cual se resaltan los conceptos relacionados directamente con la biomasa.

\* En el Anexo 2 se muestra la Clasificación oficial del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), acerca de los sectores clasificados y los proyectos típicos.

Tabla 5.1  
Proyectos registrados según el sector de desarrollo (UNFCCC, 2009)

Sector	Número de proyectos registrados
Industrias de energía (renovable y no renovable)	1,755
<b>Manipulación y eliminación de residuos</b>	<b>476</b>
Emisiones fugitivas	138
Industria manufacturera	135
<b>Agricultura</b>	<b>127</b>
Química industrial	67
Minería	27
Otros (transporte, reforestación, construcción, etc.)	50

### 5.3 Financiamiento del MDL

Los proyectos de MDL involucran directamente a promotores de proyectos en países en vías de desarrollo que hayan ratificado el Protocolo de Kyoto, y las entidades de países desarrollados que están obligados por el Protocolo a reducir sus emisiones.

También participan en este mercado fondos específicos, que se han conformado en entidades de cooperación internacional o en la banca multilateral para manejar paquetes de inversión orientados a identificar y promover proyectos MDL, con recursos financieros aportados por empresas o gobiernos de países obligados a reducir sus emisiones (Black-Arbeláes, 2004).

Estos fondos específicos, que además de comprar los bonos de carbono, **pueden llegar a financiar los proyectos que se realicen con este objetivo**, son: El Fondo Prototipo de Carbono del Banco Mundial, el Netherlands Carbon Facility de la Corporación Financiera Internacional, entre otros (Rizzi, 2009). La característica común de estos fondos es que son iniciativas mixtas, públicas y privadas, a través de fideicomisos administrados por el Banco Mundial.

#### 5.3.1 El Banco Mundial y el Fondo Prototipo de Carbono (FPC)

Maneja alrededor de \$US800 millones a través de distintos fondos de bonos de carbono (Osborne y col., 2005).

El objetivo del Fondo Prototipo de Carbono fue el de iniciar un mercado internacional de reducciones de gases de efecto invernadero basados en proyectos acogidos a los mecanismos de Kyoto, adquiriendo con ello una experiencia muy importante para su puesta en operación.

En primer lugar, hay un proceso de selección y aceptación en el que se concretan las compras de certificados de un portafolio de proyectos MDL con reducciones de emisiones. Estas reducciones son asignadas posteriormente a los gobiernos y entidades de los países obligados a reducir sus emisiones de GEI, que han capitalizado el fondo. Los participantes en el Fondo Prototipo de Carbono son los gobiernos de Canadá, Finlandia, Holanda, Noruega y Suecia, e importantes empresas. Estos participantes han contribuido al fondo con un total de 180 millones de dólares.

En cuanto al tipo de tecnologías seleccionadas, las compras de certificados del FPC se concentran en proyectos de energías renovables y de eficiencia energética. El FPC tiene interés, aunque no limitado, en energía eólica, biocombustibles, pequeñas hidroeléctricas, geotérmica, solar térmica y solar fotovoltaica, combustibles de residuos urbanos y de residuos agrícolas (cáscaras de arroz y café, bagazo de caña y madera). A partir de este fondo se crearon dos más, que se explican en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2  
Fondos de carbono (Osborne y col., 2005)

Fondo	Objetivos
Fondo del Carbono para el Desarrollo Comunitario (FCDC)	<p>Extender conceptos del FPC a proyectos de pequeña escala.</p> <p>El Banco Mundial busca vincular inversionistas privados con proyectos de desarrollo comunitario como: Mini centrales hidráulicas, energía eólica, pequeños aprovechamientos energéticos de residuos municipales y agrícolas.</p>
Fondo del Biocarbono (BioCF)	<p>Compra de reducciones de GEI en proyectos de sumideros de carbono, con plantaciones agrícolas y de árboles, a países en desarrollo.</p>



### 5.3.2 Otros financiamientos

Existen diversos organismos que brindan apoyo o subsidios a países en desarrollo para implementar fuentes renovables de energía tanto dentro como fuera del marco del MDL. En la Tabla 5.3 se mencionan algunos organismos que subsidian la implementación de fuentes renovables de energía.

Tabla 5.3  
Organismos que subsidian la implementación de fuentes renovables de energía

Organismo	Quiénes son	Objetivos/Actividad a desarrollar
Programa Latinoamericano del Carbono (PLAC)	Institución financiera multilateral, cuyos países accionistas son: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, España, Jamaica, México, Panamá, Paraguay, Perú, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela.	Su objetivo es facilitar e incentivar la participación e ingreso de países latinoamericanos y caribeños en el mercado de reducción de emisiones de GEI.  Apoya proyectos individuales con potencial MDL, desde la identificación de la oportunidad, desarrollo y ejecución de proyectos MDL en América Latina hasta la comercialización de las CER, destacando en los sectores de energía, industria y transporte.
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (PNUD)	Es la red mundial de las Naciones Unidas en materia de desarrollo.	Entre sus actividades está la de promover las tecnologías de energía limpia para disminuir los cambios climáticos, y en aumentar el acceso a la financiación de inversiones en energía sostenible, incluyendo el Mecanismo de Desarrollo Limpio.
La Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica (AEA)	Es una iniciativa originada en el marco de la Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas en Johannesburgo 2002.	Promover las energías renovables en los países de Centroamérica.  Apoya proyectos de generación de energía solar, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas, bioenergía, utilización eficiente de biomasa, y geotermia

### 5.4 Financiamientos en México

México cuenta con diversos organismos que tienen por propósito fomentar, instruir y financiar proyectos MDL entre sus funciones. En la Tabla 5.4 se resumen algunos de ellos.

Tabla 5.4  
Organismos que fomentan proyectos MDL en México

Institución	¿Qué es?	Funciones	Comentarios	Referencias
Fondo Mexicano del carbono FOMECAR	Es un fideicomiso sin fines de lucro que apoya técnica y financieramente a proyectos MDL	Ofrecer a la comunidad empresarial y a proyectos MDL, asistencia técnica y financiera.	Financia y asume los riesgos de validación y registro de los proyectos MDL. Sólo en el caso de que el proyecto se implemente exitosamente, los gastos asumidos por FOMECAR son recuperados apropiándose de la parte correspondiente de la venta de CER del proyecto.	Barrientos, 2007
Fideicomiso de Riesgo Compartido FIRCO	Agencia gubernamental, promotora de agro negocios y que adicionalmente realiza acciones de fomento y promoción de la energía renovable.	Fomentar agro negocios, desarrollo rural e impulsar el uso de energías renovables en unidades de producción.	Los recursos los aporta sin costo financiero, sin derecho a participar de las utilidades alcanzadas y asumiendo el riesgo de no recuperarlos en el caso de que el proyecto apoyado fracase. En el caso de que los recursos empleados sean clasificados como subsidios, la recuperación de los mismos se hará en beneficio de los propios productores.	Ochoa-Bautista y Ortega-Rivas, 2007
Programa de acción climática de la Ciudad de México 2008-2012	Proyecto de financiamiento del D.F.	Reducir los GEI provenientes de sistemas sépticos en el D.F, la construcción de una planta de producción de composta en la central de abastos, la captura y aprovechamiento de biogás del relleno sanitario bordo poniente.	Con estos proyectos se pretende evitar la emisión de 1, 570, 500 ton de CO <sub>2</sub> al año.	SMA, 2010
AgCert	Empresa líder en venta de CER con la finalidad específica de la generación a gran escala de estos.	Contactar al productor y firmar el contrato con él, evalúa la tecnología a utilizar y desarrolla la ingeniería, incluye el proyecto específico en uno más amplio y lo gestiona ante la ONU y el gobierno del país donde se ejecute el proyecto construye e instala los equipos, se encarga de la operación y mantenimiento de los mismos, la venta de los bonos de carbono y la gestión.	Aunque el negocio de la empresa consiste en eliminar GEI, al hacer esto ofrece al productor como beneficio adicional un porcentaje de la venta de los bonos de carbono.  En Brasil y México sobresale su participación en proyectos del sector agrícola principalmente, aunque también se ha desempeñado en otros sectores.	Rotherds y col., 2009

En la Tabla 5.5 se presentan, por citar algunos ejemplos, actividades y/o proyectos en los que han colaborado las instituciones mencionadas.

Tabla 5.5  
Proyectos y actividades financiados

Organismo	Ejemplos de proyectos y actividades donde han colaborado	Referencias
Fondo Mexicano del Carbono	Ha canalizado a bancos 2 proyectos de aprovechamiento de vapores residuales para co-generar energía y calor y 1 proyecto para elevar el factor de potencia en horno eléctrico.  En proceso previo a licitación el diseño de un MDL: Tres proyectos de rellenos sanitarios, cambio de combustible para la flota de vehículos utilitarios de un estado de la república, apoyo financiero para construir una planta de etanol a partir de sorgo, entre otros. Así como fomentar proyectos MDL a partir de conferencias y talleres que ellos organizan.	Aguirre-Nienau, 2008
Fideicomiso de Riesgo Compartido FIRCO	Algunas de las acciones emprendidas a diciembre del 2008 han sido la instalación de 45 digestores y 11 motogeneradores en 56 granjas porcinas y establos lecheros así como la utilización de un esquema del MDL en 36 digestores en Yucatán, el cual permitió la reducción de los costos de transacción.	Padierna-Rodríguez, 2009
Programa de acción climática de la Ciudad de México 2008-2012	En proceso	SMA, 2010
AgCert	Tiene una larga lista en proyectos de mitigación de GEI y recuperación de metano en México y otros países de América. Ha financiado la compra e instalación de digestores y motogeneradores en 16 granjas: 9 en Sonora, 5 en Jalisco y 1 en Nuevo León, entre otros. También véase la Tabla 5.6 y 5.7.	AgCert, 2009

### 5.5 Experiencias con proyectos financiados por el MDL

Actualmente existen cerca de 3,000 proyectos registrados por la Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio. La región Latinoamericana se presenta como una de las de mayor potencial para el desarrollo de proyectos MDL y cuenta con más del 32% de los proyectos registrados. Países como Brasil, México y Chile destacan como líderes en este mercado. En Centroamérica se debe destacar los crecientes esfuerzos de Honduras y Costa Rica, donde las relaciones con los gobiernos de Japón, Holanda y España han sido fundamentales (riocc, 2008).

Los proyectos se ubican principalmente en los sectores de energías renovables, reducción de emisiones de metano y eficiencia energética en generación eléctrica. En la Tabla 5.6 Distribución sectorial de los proyectos MDL tramitados en México.

Tabla 5.6  
Distribución sectorial de los proyectos MDL con carta de aprobación en México  
(Guijarro, 2009)

Tipo de proyectos	Número de proyectos	Ubicación	Promotor	Número de proyectos
Manejo de residuos en granjas porcícolas	88	AGS., CHIH., CHIS., COAH., DGO., EDO. MEX., GTO., JAL., MICH., NL., NAY., PUE., QRO., SIN., S.L.P., SON., OAX., TAMP., VER., YUC.	AgCert	55
			EcoSecurities	31
			GPM	2
Manejo de residuos en establos de ganado vacuno	55	AGS., B.C., CHIH., COAH., GTO., DGO., JAL., N.L., PUE., QRO., SIN., TLAX.	AgCert	53
			S.P.R. de R.L de C.V.	1
			Western Environmental Eng. Co	1
			EcoSecurities	6
Metano de rellenos sanitarios	14	AGS., B.C., CHIH., DGO., EDO. MEX., GTO., JAL., MOR., N.L., SIN., YUC	PASA	2
			Preactiva	1
			Biogás de Juárez	1
			Tu Transformas	1
			TAM	1
			Benilesa	1
			Eteisa	1
			AgCert	2
Manejo de aguas residuales	3	SON., OAX., PUE	U. de las Américas+ESM	1
			EcoSecurities	4
Cogeneración y Eficiencia Energética	12	B.C., COAH., EDO. MEX., HGO., JAL., MICH., N.L., PUE., SIN., S.L.P., SON., TAB., TAMP., Q. ROO., VER., YUC.	Cemex	4
			La Costeña	1
			Grupo Petrotremex	1
			DNMX	1
			Beta San Miguel	1
			Hidroelectricidad del Pacífico	1
Energía hidroeléctrica	4	GRO., JAL., MICH.y OAX	Electricidad del Istmo	1
			Proveedora de Elect. De Occ.	1
			MEXHIDRO	1
			Gamesa Energía	2
			CEMEX	1
			CFE	1
			PEM	1
Energía eólica	10	B.C. y OAX	B.C. 2000	1
			S.A.P.I. de C.V.	2
			Econergy Brasil	2
			Banco Mundial	1
			Soluciones Químicas para el Campo y la Industria	1
Transporte	1	D.F.	Banco Mundial	1
Mitigación de N <sub>2</sub> O en Industria	1	VER.	Soluciones Químicas para el Campo y la Industria	1
Incineración HFC-23	1	N.L.	Quimobásicos	1
Emisiones Fugitivas	2	COAH., VER	Statoil	1
			AHMSA	1

La participación de México en el mercado de bonos de carbono a través del MDL inicio en febrero de 2005 con la autorización de un proyecto de MDL de productores agropecuarios de Guanajuato y Querétaro. En la tabla 5.7 se citan ejemplos.

Tabla 5.7  
Ejemplos de experiencias con proyectos financiados por MDL en México

Proyecto	Estado	Toneladas de CO <sub>2</sub> eq	Financiamiento otorgado	Institución que realizó la negociación	Comentarios	Referencias
Manejos de residuos en granja porcícolas	Guanajuato y Querétaro	147 mil	-----	Agcert	Con este proyecto inicio la participación de México en el Mercado de bonos de carbono	Mentado, 2008
Transporte metrobús de la Ciudad de México corredor Insurgentes	Distrito Federal	1 <sup>er</sup> año 29 mil 2 <sup>do</sup> año 38 mil	121 mil Euros 200 mil Euros	Banco Mundial por parte del Fondo Español	1 <sup>er</sup> proyecto de transporte en el mundo que logra vender su reducción de emisiones.  Por 10 años serán verificadas las reducciones de emisiones y todos los años recibirán un pago equivalente al de los primeros	Mentado, 2008; Vázquez, 2007; Colina-Rubio, 2006
Aprovechamiento de metano emitido por rellenos sanitarios	Durango	700 mil	Más de 1 millón de dólares	Consultoría ambiental EcoSecurities	-----  Capacidad de 12.72 MW.	Eseverri, 2007
Captura y destrucción de metano de relleno sanitario	Salinas Victoria, Nuevo León	-----	5 millones de dólares	Banco Mundial	La energía se emplea en el alumbrado público de nueve municipios, en el sistema de transporte Metrorrey, en oficinas del estado, el DIF y para el sistema de bombeo de agua y drenaje de Monterrey.	Simeprode, 2009

## 5.6 Evolución de proyectos MDL

La implementación del MDL ha mostrado ser un saludable impulso para las industrias que los desarrollan, generando una reputación ambiental beneficiosa a nivel internacional y creando al mismo tiempo empleos (Osborne y col., 2005).

Lamentablemente América Latina no está aprovechando su potencial en la venta de derechos de emisiones contaminantes y se ha quedado rezagada respecto a China y la India, (Puertas-Agudo, 2006).

La distribución de vendedores de bonos de carbono por MDL de acuerdo al país o región se muestra en las Figuras 5.4 y 5.5 donde también se observan las diferencias entre el año 2005 y 2006, y como en tan poco tiempo China acaparó la mayor parte de este mercado, con un 60%, seguida por la India con 12%. En tercer lugar, la región Latinoamericana con el 9%, liderada como siempre por Brasil con 4%, pero por debajo de lo que ha obtenido otros años (Plauchú, 2008; IETA, 2007).

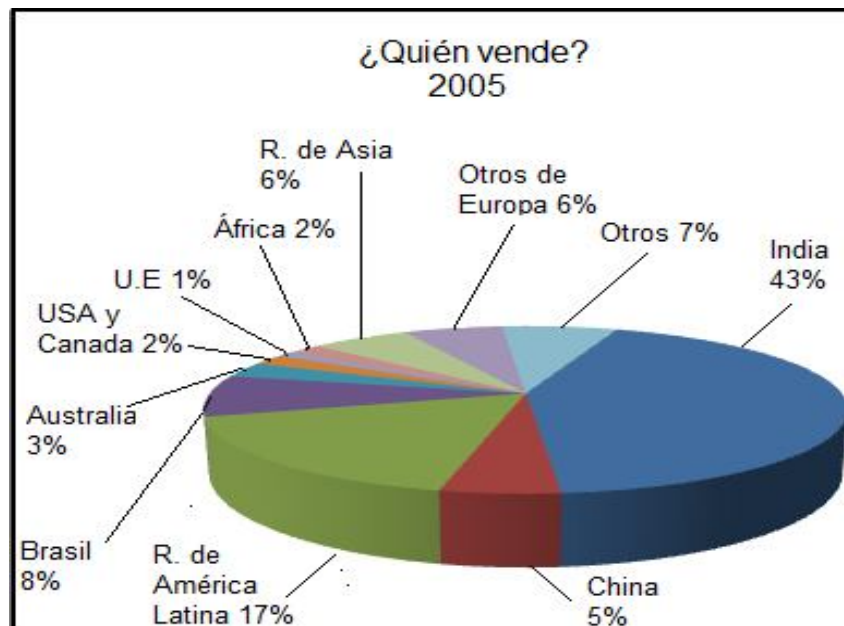


Figura 5.4 Distribución de vendedores de CER's por país o región en 2005 (Fernández-Rozado, 2008; IETA, 2007).

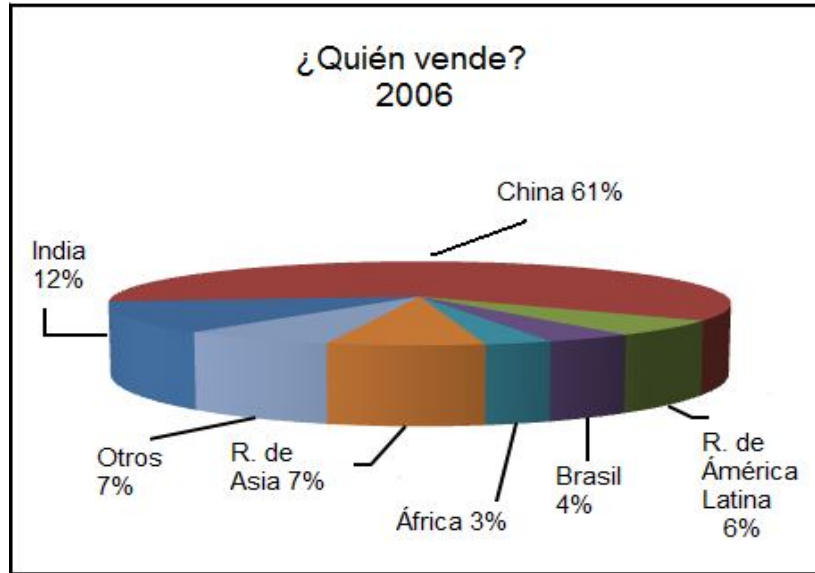


Figura 5.5 Distribución de vendedores de CER's por país o región en 2006 (Fernández-Rozado, 2008; IETA, 2007).

La distribución de proyectos MDL registrados en el mundo hasta el 2009, se muestran en la Figura 5.6. Se observa que los países líderes en venta de CER's son China, India, Brasil y Corea, dejando a México en quinto lugar. Los puntos rojos equivalen a proyectos a gran escala, los anaranjados a mediana y los amarillos son proyectos de baja escala.

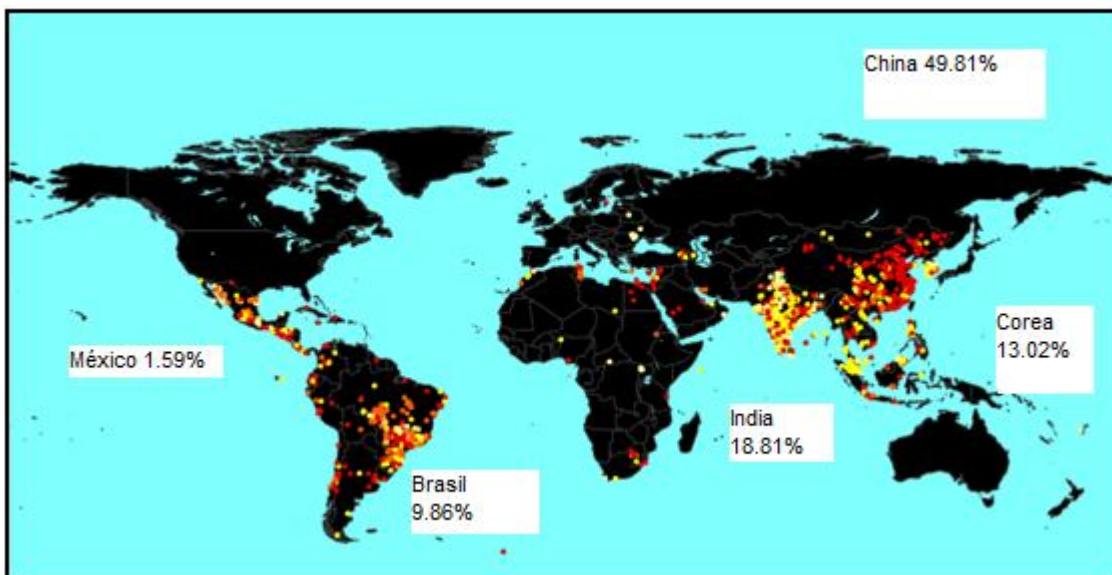


Figura 5.6 Distribución de proyectos registrados en el mundo (UNFCCC, 2009)

A pesar de los recursos renovables que posee América Latina, los proyectos basados en fuentes de energía renovable no están alcanzando el volumen necesario como para que verdaderamente encuentren un espacio en el desarrollo energético de los países Latinoamericanos (Plauchú, 2008).

La escasa penetración de este tipo de proyectos se debe fundamentalmente:

- Elevados costes de inversión y escasos incentivos al desarrollo de energías renovables, convirtiendo en no rentables muchos de dichos proyectos.
- Proyectos de poca capacidad instalada y poca producción.
- Problemas de evacuación de la energía producida.

En líneas generales, la mayoría de los países que integran Latinoamérica presentan situaciones dispares en relación al desarrollo del marco regulatorio vigente del sector energético y el relativo a la generación eléctrica basada en fuentes de energías renovables.

En este sentido, mientras algunos países ya han iniciado el desarrollo de un sistema para el fomento de proyectos basados en fuentes de energías renovables, otros continúan sin definir políticas tendentes a impulsar este tipo de proyectos. (Fernández-Rozado; 2008, Plauchú, 2008).

Latinoamérica cuenta con una oportunidad de negocio importante como anfitriones en el desarrollo de proyectos de inversión MDL. El abanico de futuros inversores es muy amplio, no limitándose únicamente a Europa y al sector energético (Puertas-Agudo, 2006; Fernández-Rozado, 2008).

Los proyectos de energías renovables suponen una gran oportunidad para los países de esta área geográfica frente a la fuerte competencia de los países asiáticos. Los reguladores energéticos latinoamericanos tienen ante sí una oportunidad histórica para encauzar el desarrollo energético sostenible aprovechando las iniciativas y los recursos adicionales del MDL.



Es el momento idóneo para incentivar el desarrollo de energías renovables y eliminar barreras a la eficiencia de los mercados de generación (Puertas-Agudo, 2006).

### 5.7 Análisis FODA del desarrollo de proyectos MDL

En la Tabla 5.8 se presenta un análisis FODA sobre las perspectivas que afrontan los países en desarrollo susceptibles de desarrollar proyectos MDL.

Tabla 5.8  
Análisis FODA sobre desarrollo de proyectos MDL (Borghini y col., 2009)

Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
Alta disponibilidad de gases para la generación energética.	Alto costo capital fijo concentrado al inicio de la operación: barrera de salida.	Perspectiva expansiva de el mercado de CER's.	Dilación en acuerdos concretos en reducción de emisiones por parte de los países desarrollados.
Bajo costo de administración.	Precios regulados de Electricidad y gas.	Alta de precios de bonos de carbono.	Incertidumbre respecto de perspectivas post 2012.
Beneficios ambientales mesurables mediante modelos estimativos (clave para la calificación MDL)	Incertidumbre respecto de los tiempos de aprobación de los proyectos MDL, puede demorar la fuente de ingreso	Beneficio económico por protección del medio ambiente y externalidades (comercialización de mejoradores de suelo al cierre del proyecto).	Cambios en el marco regulatorio del mercado de CER's.  Incertidumbre respecto de las políticas públicas en materia de energía.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

## Conclusiones

---

La importancia de la biomasa radica en que es la fuente de energía renovable más antigua utilizada por el hombre, es susceptible de ser aprovechado para la producción de energía térmica y eléctrica, y su producción es mucho más rápida y barata que la formación de combustible fósiles.

Es tan versátil que pueden producirse de ella prácticamente toda la gama de productos que hoy en día se obtienen del petróleo.

Los procesos para tratar la biomasa y transformarla en energía dependen del tipo y características de la misma. Para biomasa de baja humedad, generalmente de origen agrícola y forestal, se prefieren los procesos termoquímicos. Cuando se trata de biomasa húmeda como son: El estiércol, residuos sólidos urbanos de origen orgánico, los residuos y subproductos de la industria alimenticia, etc., se emplean los procesos bioquímicos.

Los procesos termoquímicos comprenden: La combustión, gasificación y pirólisis.

La tecnología empleada dentro del proceso de combustión de biomasa incluye desde las estufas eficientes de leña, que van cobrando mayor importancia a nivel rural, hasta los hornos y calderas ampliamente empleados en operaciones agroindustriales en América Latina.

El costo de las estufas eficientes de leña oscila entre \$3,000 y \$7,000 pesos. Mientras que las calderas de biomasa, cuyo propósito final es la producción de energía eléctrica, tienen un costo de \$1,500 a \$2,000 dls/kW y los hornos de combustión directa, de una capacidad típica de 2MW empleados en la producción de energía térmica tiene un costo de inversión aproximado de \$30,000 dólares.

El proceso de gasificación se realiza en gasificadores que son una tecnología madura en Estados Unidos y Europa. En Asia su uso está creciendo considerablemente, China es el mayor representante de ello, donde su uso se ha

vuelto indispensable en aserraderos y molinos de arroz, así como en otros establecimientos que disponen de residuos de madera que lo venden a redes de abastecimiento de gas y energía eléctrica.

La gasificación en América Latina está en desarrollo, solo destacan algunos emprendimientos particulares y otros con objeto de investigación en universidades. Estos gasificadores son solo del tipo down draft y generar menos de 600 kW/día.

El costo de los gasificadores oscila dependiendo del tipo y su capacidad (kW), y se encuentran entre \$6,000 dólares aquellos empleados en sistemas de calor con capacidad de 200 kW y \$90,000 dólares los empleados en sistemas de generación de energía eléctrica con capacidad de 2,000 kW.

Lo que se refiere a pirólisis, son plantas con una tecnología en desarrollo, con limitadas oportunidades comerciales, pese a las múltiples aplicaciones potenciales del aceite de pirólisis. Esto es, debido a que los reactores empleados para realizar la pirólisis rápida tienen un alto nivel de complejidad y costo. Solo hay plantas a nivel demostrativo y piloto, en Europa, Estados Unidos y Canadá. Siendo Europa donde se emplea más, liderado por Suecia donde cada vez hay más industrias forestales donde producen aceite de pirólisis y lo emplean como combustible de calentadores de agua.

En América Latina destaca la producción de carbón vegetal, empleando hornos de tierra o de mampostería generalmente u hornos a base de ladrillo que resultan de mayor eficiencia para la producción del carbón. El costo de estos hornos va de \$6,000 a \$35,000 pesos, este último en el caso de los hornos de ladrillo.

Dentro de los procesos bioquímicos, destaca la degradación anaerobia que se lleva a cabo en digestores o reactores anaerobios. Estos reactores son una tecnología madura que se usa en todos los continentes. China e India están entre

los países líderes en el empleo de la tecnología del biogás. El desarrollo tecnológico a gran escala alcanzado por países como Dinamarca, Suecia y Alemania es también importante, siendo este último el líder en esta tecnología. México cuenta en su haber con 150 reactores y digestores en funcionamiento, entre ellos experiencias en la industria, plantas de tratamiento de aguas residuales, los instalados en granjas y zona rurales así como plantas piloto de investigación.

El costo de inversión sobre los digestores depende del tipo: Los digestores de polietileno de uso rural se encuentran entre \$30 y \$100 dólares, los semi-industriales van de \$50,000 a \$150,000 dólares y los digestores de tipo industrial tienen un costo de inversión mayor a los \$100, 000 dólares.

De estos procesos de conversión, la degradación anaerobia es el de mayor uso a nivel mundial y en México es la tecnología más empleada y de la cual ha obtenido el mayor financiamiento de proyectos MDL. Ésto es debido a que es una tecnología madura, fácil de implementar en los sitios con disposición de estos residuos.

A nivel rural es una tecnología barata, que aporta un abono orgánico, gas de uso doméstico y la eliminación de residuos y excrementos que contaminan el ambiente. En granjas de ganado porcino y bovino ha generado el mayor financiamiento por parte de proyectos MDL, beneficiando a productores haciendo sus centros de producción energéticamente sostenibles y mejorando su entorno con la reducción de olores y de la contaminación de suelos y aguas subterráneas.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

## Referencias

---

- AgCert. 2009. Proyectos AgCert. Publicación de AgCert México. México, Distrito Federal, México.
- Aguillón-Martínez, J. 2005. Energía de la biomasa. En: Seminario sobre la situación actual y prospectiva energética en México y el mundo. Michoacán, México.
- Aguirre-Nienau, M. 2008. Participación del Fondo Mexicano de Carbono FORO: El futuro de los Mercados de Carbono tras la Cumbre de Bali. El papel de las Energías Renovables. Oportunidades para las empresas. Madrid, España.
- Arias, T. 2008. Áreas temáticas de bioenergía. En: Memorias V Reunión Nacional Rembio. Morelia, Michoacán, México.
- Arrastía-Ávila, M. 2009. El biogás no es símbolo de pobreza. Programa de difusión. Publicación de Juventud Rebelde. La Habana, Cuba.
- Arvizu, J. y Huacuz, J. 2003. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. Boletín IIE. Publicación del Instituto de Ingeniería Eléctrica. Cuernavaca, Morelos, México.
- Ballesteros, M. 2006. La biomasa como recurso energético. Publicación del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Madrid, España.
- Barnés, J. 2006. Energía generada en México a partir de biomasa. Publicación de la Comisión Reguladora de Energía, México, D.F., México
- Barrientos, G. 2007. Oportunidades MDL. Publicación de FOMECAR. Chihuahua, Chihuahua, México.
- Bazán, Y. 2005. Prueban planta de biogás más grande de Cuba. Publicación de BuenavistaVCuba. La Habana, Cuba.
- Birur, D. Hertel, T. Tyner, W. 2007. The biofuels boom: implications for world food markets. In: Food economy conference. The Hague, Suecia.

- Black-Arbeláez, T. 2004. Lineamientos para promover la inserción nacional en el emergente mercado del Carbono. En: Memorias del Taller Nacional de Diálogo. Quito, Ecuador.
- BOSTID. 1977. Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes. Report of National Academy of Sciences, Washington, EUA.
- Botero, M. y Thomas, R. 1987. Digestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Publicación del Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
- Bridgewater, A. 1999. The status of fast pyrolysis of biomass in Europe. En: Proceedings of the 10th European Biomass Conference and Technology Exhibition. Wurzburg, Alemania. pp.268–271
- Bruton, C. 2007. Bioenergy. Report of International Energy Agency (IEA), EUA.
- BUN-CA. 2002. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Publicación de Biomass Users Network. San José, Costa Rica.
- Campos, C. y Anderson, G. 1991. The effect of the liquid upflow velocity and the substrate concentration on the star-up and the steady state periods of lab-scale UASB reactors. En: 6° International Symposium on anaerobic Digestion. Sao Paulo, Brasil.
- Campos, M. y Marcos, F. 2001. Los biocombustibles. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Castells, X. 2004. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ed. Díaz de Santos. Madrid, España.
- Cecchi, F., Traverso, P., Pavan, P., Bolzonella, D. y Innocenti, L. 2002. Characteristics of the MSW and behaviour of the anaerobic digestion process. En: Biomethanisation of Organic Wastes, Editado por Mata-Alvarez, J. Pag. 141–178. IWA Publishing, Londres, Inglaterra.
- Chavez-Lopez, A. y Cruz-Santiago D. 2007. Estufas ahorradoras de leña. Publicación de SAGARPA. Edo. De México, México.
- Colina-Rubio, V. 2006. El negocio de limpiar el aire, los Bonos de Carbono. Publicación de BANOBRAS. México D.F., México.



- Conil, P. 2001. La tecnología anaerobia UASB en el tratamiento de las aguas residuales domésticas: 10 años de desarrollo y maduración en América Latina. Santiago, Chile.
- Cotter, J. y Reyes-Tirado, A. 2004. Políticas sobre bioenergía. Unidad de Ciencias Ambientales. Publicación de Greenpeace. España.
- Díaz Báez, M., Espitia, S. y Molina, F. 2002. Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología. Ed. UNIBIBLIOS. Bogotá, Colombia
- Dobelmann K. y Müller, H. 2000. The sustainable winery. Report of ABIRER, Alemania.
- Elliott, D. y Leader, T. 2009, Pyrolysis of Biomass: Technical Report No.1. Publicación de European network on pyrolysis. Liege, Bélgica.
- Enciso-Encinas, E. 2007. Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa forestal. Madrid, España.
- Erickson, J. 1992. El efecto invernadero: El desastre de mañana, hoy. Ed. McGraw-Hill. Madrid, España.
- Eseverri, J. 2007. México: Se suma Durango a los bonos verdes. Publicación de Grupo Reforma. México, D.F., México.
- Faaij, A. 2006. Bio-energy in Europe: Changing technology choices. **Energy Policy**. 34 :322–342
- Faaij, A., Meuleman, B. y Van Ree, R. 1998. Long term perspectives of BIG/CC technology, performance and costs. Department of Science, Technology and Society, Utrecht University and The Netherlands Energy Research Foundation (ECN), Report prepared for NOVEM (EWAB 9840).
- FAO. 2007. Análisis de la contribución forestal a la producción de energía en América. Publicación del Departamento Forestal. Zaragoza, España.
- Fernández-Rozado, C. 2008. La regulación y el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Publicación de Task Force MDL-ARIAE. México, D.F., México.
- Flotats, X., Bonmatí, A., y Seró, M. 1997. Clasificación de tecnologías de digestión anaerobia: Aplicación al aprovechamiento energético de residuos ganaderos. Aprovechamiento energético de residuos orgánicos. Sevilla, España.

- González, P. 2003. Biomasa. En manual del curso: Provincial de energías renovables. Habana, Cuba.
- Graham, J. 2009. Mercado de bonos de carbono. Publicación de CO<sub>2</sub>-solutions. Chicago, EUA.
- Guardado-Chacón, J. 2006. Tecnología del biogás. Manual del usuario. Ed. Cubasolar. Ciudad de la Habana, Cuba.
- Guijarro, A., Lumbreras, J., Habert, J. y Guereña, A. 2009 Impacto de los proyectos MDL sobre el desarrollo humano Análisis de experiencias en Marruecos, Guatemala y México. Publicación de INTERMÓN OXFAM. Madrid España.
- Gustavsson, L. 1998. Bioenergy in the environment: Some examples of bioenergy applications in Sweden. Report of Universidad de Lund , Suecia.
- Hamish, K. 2006. Beneficios del MDL en los países en desarrollo. Publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Hilbert, J. 2007. Manual para la producción de biogás. Publicación del Instituto de Ingeniería Rural. Buenos Aires, Argentina.
- Hill, J. 2008. Procesos de combustión, mejoras. Publicación de grupo hc-energía. Buenos Aires, Argentina.
- Hislop, D. y Hall, D., 1996. Biomass Resources for Gasification Plant, ETSU B/M3/00388.
- Hoogwijk, M., Faaij, A., van den Broek, R., Berndes, G., Gielen, D. y Turkenburg, W., 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. ***Biomass and Bioenergy*** 25: (2),119–133.
- Huang, H. y Tang, L. 2007. Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. ***Energy Conversion and Management*** 48: 1331–1337.
- Huang, H. y Shih, J. 1981. The potential of biological methane generation from chicken manure. ***Biotechnol. Bioeng.***, 23: 2307-14.
- Hulshoff, Pol E. y Leetinga, G. 1986. New technologies for anaerobic waste water treatment on anaerobic treatment in tropical countries. En: International seminar, EAWPRC. p30-46. Sao Paulo, Brasil.

- IETA, 2007. Seller of Greenhouse Gases. Report of International Emissions Trading Association. <http://www.ieta.org>
- IPCC, 2000. Good practice and uncertainty management. En: National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Tokio, Japón.
- IPCC, 2007. Mitigation of Climate Change In: Working Group III Report. Publicación del Intergovernmental Panel On Climate Change.
- ITE, 2007. Energía de la Biomasa. Publicación del Instituto de Tecnología Eléctrica. Valencia, España.
- Itodo, I. y Phillips, T. 2001. Determination of suitable material for anaerobic biogas-digesters. En: Proceedings of the second international conference and 23rd annual general meeting of the Nigerian, vol. 23. Report of Institution of Agricultural Engineers. Abuja, Nigeria.
- Johansson, B. 1996. Transportation fuels from Swedish biomass - Environmental and cost aspects. *Transpn- Res.* D I(1): 47-62.
- Juaréz-Medellin, E. 2007. Hornos quemadores de cascarilla de arroz. Publicación de grupo SOS. Orizaba, Veracruz, México.
- Kaiser, F. 2009. Producción de biogás: Europa y potencial para Chile. HBS Energía. Santiago, Chile.
- Kaltschmitt, M., Rosch, C. y Dinkelbach, L. 1996. Biomass Gasification in Europe. Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), University of Stuttgart. Report prepared for the European Commission, DG XII, EUR 18224. Stuttgart, Holanda.
- Kapdi, S., Vijay, V., Rajesh, K. y Prasad R. 2005. Biogas scrubbing, compression and storage: Perspective and prospectus in Indian context. *Renew. Energy.* 30:1195–202.
- Karekezi, S., Lata, K. y Coelho, S. 2004. Traditional biomass energy. En: International Conference for Renewable Energies. Bonn, Alemania.
- Katou, K., Tomonori, A., Yoshihito, K. y Ryoji, S. 2001. Melting municipal solid waste incineration residue by plasma melting furnace with a graphite electrode. *Thin Solid Films.* 386: 183 188.

- Kaufman, S., Goldstein, N., Millrath, K. y Themelis, N. 2004 The state of garbage in America. **BioCycle**. p31–41.
- Kiely, G. 1998. Environmental Engineering. International Ed. Boston: Irwin, McGraw-Hill. p. 979.
- Kostka, G. Polzin, C. y Scharrer, J. 2009. The future of sugarcane in the PRC and India supply constraints and expansion potential. **Appl. Energy**. 86:100–107.
- Landa, H. 2008. Mercado de Desarrollo Limpio. Publicación de la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- Leung, D., Yin, X. y Wu, C. 2004. A review on the development and commercialization of biomass gasification technologies in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 8: 565–580
- Lizana, D. 2007. Biomasa: Origen y clasificación. Energías renovables no convencionales. Publicación de la Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.
- Lozano, D., De Marín, O. y Molina-Salas, A. 2007. Protocolo de Kyoto. Publicación del Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.
- Lusk, D., 1998. Methane recovery from animal manures: The current opportunities casebook. Report of National Renewable Energy Laboratory US Department of Energy, Washington, EUA.
- Madigan, M., Mertinko, J. y Parker, J. 1997. Biology of Microorganisms. Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Mandujano, M. 1981. Biogás: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
- Marchaim, U. 1992. Biogas Process for Sustainable Development. FAO Agricultural Service Buletition 9-5. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia.
- Marsilli, K. 2008. Granjas mexicanas instalan digestores tubulares de ferrocemento. Publicación Planeta Azul. Madrid, España.

- Martínez, J. 2005. La biomasa como fuente de energía renovable . Anales de la Real Sociedad Española de Química. Madrid, España.
- Martínez, J., Fernández-Bremauntz, A. y Osnaya, P. 2004. Cambio climático, una visión desde México. Publicación del Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S. y Llabres, P. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. ***Bioresource Technol.***, 74:3–16.
- Mattocks, R. 1984. Understanding biogas generation, Technical Paper No. 4. Volunteers in Technical Assistance. Virginia, Estados Unidos.
- McCarty, P. y Smith, D. 1986. Anaerobic wastewater treatment 4. ***Envir. Sci. Techn.*** 20 (12): 54-59.
- McKendry, P. 2001. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. ***Bioresource Technology***. 83: 37–46.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. ***Bioresource Technology*** 83: 55–63.
- Mentado, P. 2008. Casos de éxito en el transporte. Publicación de Energía Hoy. México, D.F., México.
- *Moragues, J. y Rapallini, A.* 2005. Energía de la biomasa. Publicación del Instituto Argentino de Bioenergía. Buenos Aires, Argentina.
- Morgan, D. y Hugh, J. 2007. GHG Market Report. Publication of International Emissions Trading Association. Geneva, Suecia.
- Moser, M. y Mattocks, R. 2004. Pre-Design study and feasibility assessment of anaerobic digesters and cogeneration: Moffett farms, New Brunswick, Canada. RCM Digesters, Berkeley, CA. EUA.
- Moser, M., Mattocks, R., Gettier, S. y Ross, K. 2004. Benefits, costs and operating experience at seven new agricultural anaerobic digesters. En: Proceedings, BioEnergy. Madison, Wisconsin, EUA.
- Nieto, J. y Santamarta, J. 2003. Evolución de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España (1990-2002). Publicación de la revista World Watch, Madrid, España.

- Noyola, A. y Monroy, O. 1994. Experiencias y expectativas del tratamiento de residuales porcinos en México. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa. pp. 331-340. En: III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales". Montevideo, Uruguay.
- Nutek. 2004. Bioenergy. Report of International Energy Agency. En: Annual Report 1997. Boden, Suecia.
- Ochoa-Bautista, R. y Ortega-Rivas, C. 2007. Aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Publicación de SAGARPA, revista Claridades Agropecuarias. México, D.F., México.
- Ortiz, L. 2005. Procesos de transformación física de la biomasa residual. San Jose, Costa Rica.
- Osborne, T., Ebro, K. y Jellinek, S. 2005. Desarrollo sostenible: Financiamiento del carbono. Buenos Aires, Argentina.
- Padierna- Rodríguez, H. 2009. Fideicomiso de Riesgo Compartido aplicado en granjas de Yucatán. Publicación Energía verde es ahora. Mérida, Yucatán, México.
- Pain, F., Misselbrook, H., Clarkson, C. y Rees, J., 1990. Odour and ammonia emissions following the spreading of anaerobically-digested pig slurry on grassland. *Biological Wastes*. 34: 259–267.
- Plauchú, J. 2008. MDL/Metano a mercados: Oportunidades y casos de éxito. En: Primer Encuentro de expertos sobre desarrollo sustentable. Monterrey, Nuevo León , México.
- Puertas-Agudo, J. 2006. Mercado de Carbono y las Oportunidades Energéticas en América Latina. En: El Encuentro de Reguladores Iberoamericanos de la Energía. Cartajena de Indias, Colombia.
- Ramírez-Páez, J. 2001. Importancia del efecto invernadero. Publicación de Ecolosfera. Bogotá, Colombia.
- Rangel-Delgadillo, J. 2008. Sistema innovador para la generación de energía eléctrica y producción de biosólidos a partir de la digestión anaeróbica de el estiércol de bovino. Publicación de Premio a la Innovación Tecnológica. Guanajuato, México.

- Revuelta-Pereiro, J. 2006. Biomasa y gasificación. Publicación del Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables CUBASOLAR. Spiritus, Cuba.
- Rico J. 2007. Energía de la biomasa, Instituto para la diversificación y ahorro de la energía IDAE. Fondo editorial IDEA, serie: Manuales de energía renovables. Madrid, España.
- Riocc, 2008. Principales proyectos e iniciativas del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Publicación de Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático. Cartagena de Indias, Colombia.
- Rizzi, A. 2009. Movimientos financieros dentro del MDL. Publicación del periódico El país, 9 de abril. Madrid España.
- RMB, 2006. La bioenergía como catalizador de desarrollo sustentable. Publicación de la Red Mexicana de Bioenergía. Michoacán, México.
- Robles, J. 2008. Sin lugar para poner la basura. Publicación de El Universal, 21 de julio. México, D.F., México.
- Romero, J. y Miralles, J. 2002. Perspectiva ambiental: Biocombustibles. Associacio de Mestres Rosa Sensat Drassanes. Barcelona, España.
- Rotherds, L. y A David, J. y Sainz, C. 2009. El papel de Agcert en América Latina. Publicación de Agcert México. México, D.F., México.
- SAGARPA. 2004. Decreto que regula el Fideicomiso de Riesgo Compartido. Publicación del Diario Oficial de la Federación. México, D.F., México.
- Salazar de León, R. 2010. Ocupa Tamaulipas primer lugar en producción de carbón vegetal. Publicación de la Comisión Nacional Forestal (Conafor). México, D.F. México.
- Sánchez-Miño, S. 2003. Energías renovables, conceptos y aplicaciones. Publicación de Fundación Natura. Quito, Ecuador.
- Santerre, M. y Smith, K. 1999. Measures of appropriateness: The resource requirements of anaerobic digestion (biogas) systems. **World Development** 10: 239-261.
- Saucedo-Castañeda, G. 2007. Degradación y estabilización acelerada de residuos sólidos urbanos por tratamientos aerobios y anaerobios. Publicación

de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa. México D.F., México.

- Schlegel, H. y Zaborosch, C. 1993. General Microbiology. 2° edición. Cambridge University Press. Londres, Inglaterra.
- Simeprode, 2009. Energías Renovables: Una planta de biogás producirá toda la energía del metro de Monterrey, en México. Publicación de Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos. Monterrey, Nuevo León, México.
- SMA, 2010. Programa de acción climática Ciudad de México. Publicación de la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal, México, Distrito Federal, México.
- Solari, G. 2004. Proyecto de construcción de un sistema de digestión batch de 10 m<sup>3</sup> de capacidad para la producción de biogás utilizando los residuos vacunos del I Fondo agropecuario de la Universidad Alas Peruanas. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Alas Peruanas. Lima, Perú.
- Sorhuet-Gelós, H. 2008. Mecanismo de Desarrollo Limpio. Publicación de El País Digital, Montevideo, Uruguay.
- Sun, L. 2002. Biomass gasification system for central gas supply—economic evaluation of gasification system at Tengzhai, Huantai. Bioenergy. European Energy Net. Boden, Suecia.
- Suneerat, P., Sommas, K. y Tharapong, V. 2009. Economic assessment of biogas to electricity generation system with H<sub>2</sub>S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**. 86 :669–674
- Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q. y Armijo-de Vega, C. 2009. Plasma technology and solid waste. **Ingeniería**. 13(2): 51-56
- Taiganides, E. 1980. Biogás: Recuperación de energía de los excrementos animales. **Zootecnia** 35: 2-12.
- Talo-Sabine, G. 2008. Ladrilleras vanguardistas. Publicación de Clean Energy. Lima, Perú.



- The Royal Society. 2008. Sustainable biofuels: Prospects and challenges. Publicación de The Royal Society. Reino Unido.
- Themelis, N. y Ulloa, P. 2006. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**. 32:1243–1257
- Turkenburg, W. 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. **Biomass and Bioenergy**. 25 (2): 119–133.
- UCh. 2009. Gasificador a partir de Biomasa. Publicación de **Universia**. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. La Pintana, Santiago de Chile.
- UNFCCC, 2009. Green Gas Inventory Data. Publication of United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/2860.php>
- van den Broek, R., Faaij, A. y van Wijk, A. 1998. Biomass combustion for power generation. **Biomass and Bioenergy**. 11 (4): 271–281.
- van Haandel, A. y Lettinga G. 1994. Tratamiento Anaerobio de Esgotos. Ed. EPGRAF. Campina Grande, Brasil.
- van Loo, S. y Koppjan, J. 2002. Handbook biomass combustion and co-firing. Twente University Press, Enschede, Países Bajos.
- van Thuijl, E., Roos, C. y Beurskens, L. 2003. An overview of biofuel technologies, markets and policies in Europe. Report of Energy Research Foundation of the Netherlands. La Haya, Países Bajos.
- Vaz Rossell, C. 2008. Bioethanol production. Proceedings of the Workshop on Bioethanol from Sugarcane Residues. State University of Campinas. Sao Paulo, Brasil.
- Vázquez, O. 2007. Cambio climático; MDL en la Ciudad de México. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. México, D.F., México.
- Velazco, R. 2005. Biomasa, gasificación y residuos forestales. Publicación del Instituto de Generación Eléctrica. Valencia, España.
- Verastegui, L. 1980. El biogás como alternativa energética para zonas rurales. Publicación de la Organización Latinoamericana de Alternativas de Energía. Boletín Energético del Ecuador 14:57-94.

- Warren, T., Poulter, R. y Parfitt, R. 1995. Converting biomass to electricity on a farm-sized scale using downdraft gasification and a spark-ignition engine. ***Bioresource Technology***. 52: 95–98.
- Warwick, H. y Doig, A. 2004. Smoke the killer in the kitchen. Indoor Air Pollution in Developing countries. ITDG Publishing. Appendix 1: Lessons to be learnt from improves stoves programmes. Nairobi, Kenia.
- Wheatley, A. 1990. Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology. Elsevier Science Publisher Ltd., Barking, Essex.
- Yuan, H., Wu, Z., Huang, H. y Lin, F. 2002. Research and development of biomass energy in China. ***J. Energy Technol. Policy***. 1(3/4):108–44.
- Zeitung, S. e Infantes, P. 2008. Hungría. Funciona el mayor complejo de digestores. Publicación de engormix. Monterrey, Nuevo León, México.

## Anexo 1

Tabla A1  
 Procedencia de Gases de Efecto Invernadero (Guijarro, 2009)

Gas de Efecto Invernadero	Composición molecular	Origen
Bióxido de carbono	$\text{CO}_2$	Quema de biomasa fósil y no fósil, incendios forestales
Metano	$\text{CH}_4$	Cultivo de arroz, producción pecuaria, residuos sólidos urbanos, emisiones fugitivas
Óxido nitroso	$\text{N}_2\text{O}$	Uso de fertilizantes, degradación de suelos, algunos usos médicos
Hidrofluoro-carbonos	HFC-23	Refrigeración, aire acondicionado, extinguidores, petroquímica, solventes en producción de espumas, refrigerantes y aerosoles, producción y uso de halocarbonos
	HFC-125	
	HFC-134a	
	HFC-152a	
	HFC-227ea	
	HFC-236fa	
Perfluoro-carbonos	$\text{CF}_4$	Refrigerantes industriales, aire acondicionado, producción de aluminio, solventes, aerosoles, producción y uso de halocarbonos
	$\text{C}_2\text{F}_6$	
	$\text{C}_4\text{F}_{10}$	
Hexafluoruro de azufre	$\text{C}_6\text{F}_{14}$	Aislante dieléctrico en transformadores e interruptores de redes de distribución eléctrica, refrigerante industrial, producción de aluminio, magnesio y otros metales, producción y uso de halocarbonos
	$\text{SF}_6$	

## Anexo 2

---

### Sectores clasificados oficialmente por MDL

De acuerdo con la Clasificación oficial del Mecanismo de Desarrollo Limpio , los sectores clasificados y los proyectos típicos se clasifican de la siguiente forma (UNFCCC, 2009):

1. Industrias energéticas (fuentes renovables/no renovables)
  - Generación de energía renovable:
    - Eólica
    - Hidráulica
    - Biomasa
    - Fotovoltaica
    - Termosolar
    - Geotérmica
    - Nuclear
    - Mareomotriz
  - Generación de energía No renovables:
    - Gas natural
    - Cogeneración
    - Sistemas de aislamiento eléctrico en redes eléctricas.
2. Distribución de Energía
  - Sistemas de aislamiento eléctrico en redes eléctricas
3. Demanda de Energía
  - Eficiencia en el uso de energía eléctrica y/ o térmica
  - Mejora de eficiencia en bombeo de agua
  - Iluminación eficiente
  - Modificación de procesos con ahorro de energía
  - Cambio de combustible
  - Mejoramiento de eficiencia en calderas

#### 4. Industrias Manufactureras

- Cambio de procesos y materiales en la industria cementera
- Recuperación de calor en plantas cementeras y en otras industrias
- Mitigación de metano en plantas de carbonización de madera
- Eliminación de emisiones a partir de residuos de biomasa en plantas de celulosa y papel.
- Disminución del consumo de coke en plantas de acero.

#### 5. Industrias Químicas

- Descomposición de óxido nitroso ( $N_2O$ ) en plantas de ácido nítrico
- Descomposición de óxido nitroso ( $N_2O$ ) en plantas de ácido atípico
- Eliminación de emisiones de Hidrofluorocarbonos (HFC) en la producción de espumas de poliuretano.
- Sustitución de  $CO_2$  en la producción de compuestos inorgánicos.
- Descomposición de óxido nitroso ( $N_2O$ ) en plantas de caprolactama.
- Cambio de materia prima en la producción de amoníaco-urea
- Recuperación de sosa cáustica en la producción de papel
- Producción de hidrógeno a partir de metano a partir de biogás.

#### 6. Construcción

- Vivienda sustentable (con ahorro de energía eléctrica y térmica)  
Iluminación y aire acondicionado eficiente en grandes edificaciones.

#### 7. Transporte

- Ahorro de combustible en transporte rápido y masivo (Metrobús)
- Ahorro de energía eléctrica en trenes eléctricos
- Reducción de emisiones en vehículos
- Gasolina por gas natural ó biocombustibles

#### 8. Minería/producción de minerales

- Eliminación de perfluorocarbonos (PFC) en la producción de aluminio
- Eficiencia energética en la producción de aleaciones de manganeso

#### 9. Producción de metales

- Captura de metano en minas de carbón

#### 10. Emisiones fugitivas a partir de combustibles (sólidos, aceites y gas)

- Eliminación de fugas en líneas de gas natural.
- Quema de gas natural proveniente de corrientes de petróleo

11. Emisiones fugitivas a partir de la producción y el consumo de halocarburos y hexafluoruro de azufre

- Reducción de hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) en redes eléctricas

12. Uso de Solventes

13. Manejo y disposición de residuos orgánicos

- Plantas de tratamiento de aguas
- Rellenos sanitarios

14. Forestación y reforestación

- Plantaciones comerciales en áreas no forestadas ó deforestadas.
- Plantación de oleaginosas en áreas no forestadas ó deforestadas

15. Forestación y reforestación

- Generación de electricidad a partir de biomasa de residuos agrícolas.
- Recuperación de metano de actividades agrícolas de pequeña escala.
- Instalación de digestores en granjas pecuarias

