

**PROPUESTA PARA LA GENERACION DE ENERGIA ALTERNATIVA A  
PARTIR DE LOS RESIDUOS SOLIDOS GENERADOS EN UNA VIVIENDA  
RURAL EN SANTANDER**

**Diana Cristina Parada Agudelo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2011**

**PROPUESTA PARA LA GENERACION DE ENERGIA ALTERNATIVA A  
PARTIR DE LOS RESIDUOS SOLIDOS GENERADOS EN UNA VIVIENDA  
RURAL EN SANTANDER**

**Diana Cristina Parada Agudelo**  
Ingeniera Química

Monografía presentada como requisito para optar al título de  
Especialista en Química Ambiental

Director:  
Julio Cesar Calvo Corredor  
Ingeniero Químico-Ingeniero Civil  
Especialista en Química Ambiental

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2011**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo primero a Dios, pues su presencia en mi vida me ha permitido alcanzar grandes triunfos, no sólo intelectuales sino también espirituales, y quien además siempre me ha dado fe, fortaleza, salud y esperanza para continuar luchando por mis sueños.

Además dedico este trabajo a mis padres, quienes siempre me han apoyado en cada camino que emprendo y han estado conmigo para celebrar cada logro alcanzado, o para ayudarme a levantar en cada adversidad. Su amor incondicional ha sido mi fuerza y mi motor para ser siempre una mejor persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero brindar un agradecimiento muy especial a mis compañeros de la especialización, quienes llegaron a mi vida para acompañarme en ese nuevo camino lleno de retos, y colmarlo de gratos momentos de compañerismo, empatía y amistad, lo cual nos permitió trabajar en equipo y salir victoriosos de este gran reto.

Quiero agradecer también a los profesores, quienes a parte de sus aportes académicos, tuvieron una gran muestra de receptividad y apoyo para mí y para mis compañeros haciendo el camino mucho más llevadero.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	18
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
3.	JUSTIFICACIÓN.....	21
4.	OBJETIVOS.....	22
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	22
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
5.	MARCO TEÓRICO.....	23
5.1	LOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	23
5.1.1	<i>Definición</i> .....	23
5.1.2	<i>Clasificación de los residuos</i> .....	23
5.1.2.1	<i>Clasificación por estado de agregación</i> .....	24
5.1.2.2	<i>Clasificación por origen</i> .....	24
5.1.2.3	<i>Clasificación por tipo de manejo</i> .....	25
5.2	RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	25
5.2.1	<i>Definición</i> .....	25
5.2.2	<i>Clasificación</i> .....	25
5.2.2.1	<i>Según su fuente de generación</i> .....	25
5.2.2.2	<i>Según su naturaleza</i> .....	27
5.2.3	<i>Propiedades biológicas de los residuos sólidos orgánicos</i> .....	28
5.3	APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	29
5.3.1	<i>Alimentación animal</i> .....	29
5.3.2	<i>Compostaje</i> .....	29
5.3.3	<i>Bocashi</i> .....	30
5.3.4	<i>Lombricultura</i> .....	30
5.3.5	<i>Biocombustibles</i> .....	31
5.3.5.1	<i>Bioetanol</i> .....	31
5.3.5.2	<i>Biodiesel</i> .....	31
5.3.5.3	<i>Biogás</i> .....	32
5.4	LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS (GIRS).....	32
5.4.1	<i>Reducción en la fuente</i> .....	32
5.4.2	<i>Aprovechamiento y valorización</i> .....	32
5.4.3	<i>Tratamiento y transformación</i> .....	33
5.4.4	<i>Disposición final controlada</i> .....	33
6.	MARCO LEGAL.....	34

6.1 RESÍDOS SÓLIDOS.....	34
6.2 RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	35
6.3 BIOCOMBUSTIBLES.....	36
<b>7. BASES DE MICROBIOLOGÍA APLICADA AL TRATAMIENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....</b>	<b>37</b>
7.1 CICLOS DE LA MATERIA.....	38
<b>7.1.1 Ciclos del Carbono y del Oxígeno .....</b>	<b>38</b>
<b>7.1.2 Ciclo del Nitrógeno.....</b>	<b>38</b>
<b>7.1.2.1 Asimilación Fotosintética.....</b>	<b>38</b>
<b>7.1.2.2 Amonificación.....</b>	<b>39</b>
<b>7.1.2.3 Nitrificación.....</b>	<b>39</b>
<b>7.1.2.4 Denitrificación.....</b>	<b>39</b>
<b>7.1.2.5 Fijación de Nitrógeno .....</b>	<b>39</b>
<b>7.1.3 Ciclo del Azufre.....</b>	<b>40</b>
<b>7.1.3.1 Asimilación del Sulfato.....</b>	<b>40</b>
<b>7.1.3.2 Reducción de Sulfatos.....</b>	<b>40</b>
<b>7.1.4 Ciclo del Fósforo.....</b>	<b>40</b>
7.2 EL UNIVERSO MICROBIOLÓGICO.....	40
<b>7.2.1 Protistas Eucarióticos.....</b>	<b>41</b>
<b>7.2.1.1 Los Hongos.....</b>	<b>41</b>
<b>7.2.2 Protistas Procarióticos.....</b>	<b>42</b>
<b>7.2.2.1 Algas verdeazuladas.....</b>	<b>42</b>
<b>7.2.2.2 Las bacterias.....</b>	<b>42</b>
7.3 EL METABOLISMO MICROBIANO.....	42
<b>7.3.1 La fermentación.....</b>	<b>43</b>
<b>7.3.2 La respiración .....</b>	<b>43</b>
<b>7.3.2.1 Respiración aeróbica.....</b>	<b>44</b>
<b>7.3.2.2 Respiración anaeróbica.....</b>	<b>44</b>
7.4 EL CRECIMIENTO MICROBIANO.....	45
<b>7.4.1 Velocidad de crecimiento como función de la temperatura.....</b>	<b>46</b>
<b>7.4.2 Velocidad de crecimiento como función de la concentración de nutrientes.....</b>	<b>47</b>
<b>8. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS .....</b>	<b>48</b>
8.1 DIGESTIÓN ANAERÓBIA.....	48
<b>8.1.1 Etapas de la digestión anaeróbica.....</b>	<b>48</b>
<b>8.1.1.1 Hidrólisis de polímeros complejos.....</b>	<b>48</b>
<b>8.1.1.2 Fermentación acidogénica .....</b>	<b>49</b>

8.1.1.3 Acetogénesis.....	49
8.1.1.4 Metanogénesis.....	49
8.1.2 Variables relacionadas con la digestión anaerobia .....	49
8.1.2.1 Temperatura de operación.....	50
8.1.2.2 El pH de la fase líquida.....	51
8.1.2.3 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N).....	51
8.1.2.4 Inhibidores.....	51
8.1.2.5 Niveles de amoníaco.....	51
8.1.2.6 Porcentaje de sólidos.....	52
8.1.2.7 Potencial Redox.....	52
8.2 EL BIOGÁS.....	52
8.2.1 Reacciones involucradas en la generación de biogás.....	53
8.2.2 Propiedades del biogás.....	54
8.2.3 Efectos de los principales componentes del biogás.....	56
8.2.3.1 Efectos del CO <sub>2</sub> .....	56
8.2.3.2 Efectos del ácido sulfhídrico, H <sub>2</sub> S.....	57
8.2.3.3 Efectos de Amoníaco, NH <sub>3</sub> .....	57
8.2.3.4 Efectos del N <sub>2</sub> y del O <sub>2</sub> .....	58
8.2.3.5 Efectos de los compuestos de sílice.....	58
8.2.4 Aplicaciones del biogás.....	58
8.2.4.1 Aplicaciones a nivel industrial.....	58
8.2.4.2 Aplicación a nivel rural.....	59
8.3 BIODIGESTORES.....	59
<b>9. DISEÑO DE BIODIGESTORES.....</b>	<b>60</b>
9.1 TIPOS DE BIODIGESTORES.....	60
9.1.1 Biodigestores tipo continuo.....	60
9.1.2 Biodigestores tipo batch.....	60
9.1.3 Biodigestores tipo semi batch.....	61
9.1.3.1 Biodigestor de domo fijo (tipo Chino).....	61
9.1.3.2 Biodigestor de domo Flotante (tipo Hindú).....	63
9.1.3.3 Biodigestores de flujo inducido.....	64
9.1.3.4 Biodigestor de estructura flexible.....	64
9.1.3.5 Biodigestor de tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.....	66
9.2 VARIABLES OPERACIONALES DE UN BIODIGESTOR.....	67
9.2.1 Método de carga.....	67
9.2.2 Proporción excretas/agua.....	67

9.2.3	<i>Temperatura</i> .....	67
9.2.4	<i>Tiempo de retención</i> .....	68
10.	<b>PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE UNA VIVIENDA RURAL DE SANTANDER PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b> .....	69
10.1	CARACTERIZACIÓN DE LA VIVIENDA RURAL.....	69
10.1.1	<i>El Clima</i> .....	69
10.1.2	<i>Estructura familiar</i> .....	70
10.1.3	<i>Manejo de los residuos</i> .....	71
10.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESÍDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LA VIVIENDA OBJETO DE ESTUDIO.....	72
10.3	DISEÑO DEL BIODIGESTOR.....	73
10.3.1	<i>Estimación de la carga diaria</i> .....	74
10.3.1.1	<i>Estimación de la cantidad de sólidos</i> .....	75
10.3.1.2	<i>Estimación de la cantidad de agua que se debe adicionar</i> .....	76
10.3.1.3	<i>Carga de mezcla diaria en litros por día (M)</i> .....	76
10.3.2	<i>Tiempo de retención en días (TR)</i> .....	77
10.3.3	<i>Volumen del digestor (V<sub>T</sub>)</i> .....	77
10.3.4	<i>Estimación del volumen de biogás a producir</i> .....	77
10.3.5	<i>Dimensionamiento de biodigestor</i> .....	78
10.3.6	<i>Ubicación del digestor</i> .....	80
10.3.7	<i>Consideraciones adicionales</i> .....	82
10.3.7.1	<i>Producción de fertilizante</i> .....	82
10.3.7.2	<i>Consideraciones adicionales en el caso de trabajar con heces humanas</i> .....	83
10.3.8	<i>Estimación de los costos</i> .....	83
11.	<b>CONCLUSIONES</b> .....	86
12.	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	87
13.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	88
	<b>ANEXOS</b> .....	91

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Clasificación de los Residuos Orgánicos según su fuente.....	26
<b>Figura 2.</b> Clasificación generalizada de los residuos sólidos orgánicos.....	27
<b>Figura 3.</b> Curva característica del crecimiento bacteriano.....	46
<b>Figura 4.</b> Relación temperatura-tiempo de residencia en un reactor anaerobio....	50
<b>Figura 5.</b> Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía.....	55
<b>Figura 6.</b> Biodigestor de domo fijo.....	62
<b>Figura 7.</b> Biodigestor de domo Flotante. ....	63
<b>Figura 8.</b> Biodigestor de balón de plástico. ....	65
<b>Figura 9.</b> Biodigestor tradicional y cúpula de polietileno.....	66
<b>Figura 10.</b> Tiempo de retención en función de la temperatura.....	68
<b>Figura 11.</b> Fotos representativas de la finca objeto de estudio. ....	70
<b>Figura 12.</b> Esquema metodológico de diseño. ....	73
<b>Figura 13.</b> Esquema de la zanja.....	81
<b>Figura 14.</b> Esquema básico del biodigestor. ....	81

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Comparación entre el proceso del compostaje y el bocashi.....	30
<b>Cuadro 2.</b> Clasificación de las bacterias según la temperatura de crecimiento ....	47
<b>Cuadro 3.</b> Inhibidores y concentración inhibidora de la digestión anaerobia.....	52
<b>Cuadro 4.</b> Caracterización del biogás en función del sustrato .....	53
<b>Cuadro 5.</b> Productos en la generación de biogás .....	54
<b>Cuadro 6.</b> Propiedades del metano.....	54
<b>Cuadro 7.</b> Propiedades de una composición estándar de biogás .....	55
<b>Cuadro 8.</b> Componentes del biogás y sus principales efectos .....	56
<b>Cuadro 9.</b> Usos y consumo de biogás .....	59
<b>Cuadro 10.</b> Producción diaria de estiércol.....	72
<b>Cuadro 11.</b> Producción de estiércol .....	74
<b>Cuadro 12.</b> Contenido de sólidos totales en los principales sustratos. ....	75
<b>Cuadro 13.</b> Sólidos totales diarios.....	76
<b>Cuadro 14.</b> Potencial de generación de biogás a partir de los estiércoles disponibles.....	78
<b>Cuadro 15.</b> Estimación de costos para el digestor propuesto. ....	84

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Procesos y productos con biomasa húmeda. ....	91
<b>Anexo 2.</b> Esquema del ciclo de la materia, con la generación de energía a partir del biogás.....	92
<b>Anexo 3.</b> Resumen de características de algunos tipos de biodigestores. ....	93
<b>Anexo 4.</b> Valores y características del estiércol de algunos animales .....	94
<b>Anexo 5.</b> Potencial de producción de biogás de algunos residuos comunes. ....	95

## GLOSARIO

**Abono orgánico.** Sustancia de origen natural procedente de los seres vivos, que aporta al suelo y las plantas nutrientes para su buen desarrollo.

**Aerobio.** Organismo que requiere la presencia de oxígeno para sobrevivir.

**Anaerobio.** Organismo que para su desarrollo requiere la ausencia de oxígeno.

**Basura.** Residuo que no tiene valor ni para el que lo genera, ni para otra persona.

**Biodegradable.** Materia que se descompone o desintegra en compuestos simples por alguna forma de vida como: bacterias, hongos e insectos.

**Biogás.** El conjunto de gases generados por la descomposición microbológica de la materia orgánica.

**Compostaje.** Descomposición de la materia orgánica como resultado de la actividad de microorganismos como bacterias, hongos, e insectos. Se obtiene un producto denominado compost que sirve como acondicionador de suelos.

**Fermentación.** Transformación de compuestos orgánicos en compuestos más simples y/o inorgánicos por la acción de microorganismos anaerobios.

**Humus.** Sustancia de orgánica de composición compleja, muy estable, resultante de la acción final de los microorganismos sobre los restos orgánicos.

**Lixiviado.** Líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas o

anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación.

**Metabolismo.** Conjunto de reacciones químicas producidas en el interior de las células de un organismo, mediante las cuales se transforman los nutrientes con la finalidad de: Obtener energía química utilizable por la célula, (se almacena en forma de ATP), y fabricar sus propios compuestos a partir de los nutrientes, (utilizados para crear sus estructuras).

**Metano (CH<sub>4</sub>).** Componente del gas natural y del biogás, se forma en procesos de degradación anaeróbica, (en pantanos, en los rumiantes y en procesos de tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales).

**Reactor anaerobio.** Sistema aislado en el cual un conjunto de microorganismos anaeróbicos degrada la materia orgánica produciendo biogás y compost.

**Residuo sólido:** Cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales o comerciales que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final.

**Residuos orgánicos:** Residuos que se descomponen gracias a la acción de los descomponedores (residuos de comida y restos del jardín, excrementos, etc.).

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROPUESTA PARA LA GENERACION DE ENERGIA ALTERNATIVA A PARTIR DE LOS RESIDUOS SOLIDOS GENERADOS EN VIVIENDA RURAL EN SANTANDER\*.

**AUTOR:** Diana Cristina Parada Agudelo\*\*

**PALABRAS CLAVES:** BIODIGESTOR, BIOGÁS, COMPOST, DIGESTIÓN ANAEROBIA, EXCRETAS, RESIDUOS ORGÁNICOS.

### CONTENIDO:

Este trabajo presenta un recorrido por la temática de los residuos sólidos orgánicos, vistos desde la óptica de una materia prima en potencia, de la cual se puede generar desarrollos tendientes a resolver los actuales problemas del abastecimiento de energía y subproductos altamente nutritivos para el acondicionamiento de suelos.

El trabajo se desarrolla a lo largo de cinco capítulos, los capítulos 5 y 6 están dedicados al tema de los residuos sólidos, las principales fuentes de generación de residuos, las opciones para su adecuado manejo y disposición, y una revisión de la normatividad nacional vigente. El capítulo 7 se dedica al estudio de las bases fundamentales de la microbiología aplicada al tratamiento de residuos orgánicos y el capítulo 8 aborda el tema de la digestión anaerobia como un mecanismo para la producción de biogás; en el capítulo 9 se establecen las bases conceptuales para el diseño de biodigestores y por último, el capítulo 10 presenta un ejemplo de aplicación de todos los conceptos tratados a lo largo del trabajo, mediante la elaboración de una propuesta de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en una vivienda rural para la producción de biogás como opción energética y de manejo ambiental.

La alternativa para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos presentada en esta monografía, fue elaborada pensando en las familias campesinas de bajos recursos económicos y no en las grandes haciendas productoras ganaderas o agrícolas, cuyos recursos económicos y la caracterización de sus residuos demanda diseños sofisticados de alta eficiencia.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Especialización en Química Ambiental. Director: Ing. Julio Cesar Calvo Corredor.

## ABSTRACT

**TITLE:** MOTION FOR ALTERNATIVE ENERGY GENERATION FROM SOLID WASTE GENERATED IN RURAL HOUSING IN SANTANDER.\*

**AUTHOR:** Diana Cristina Parada Agudelo\*\*

**Keywords:** BIODIGESTOR, BIOGÁS, COMPOST, ANAEROBIC DIGESTION, EXCRETA, ORGANIC WASTE.

### CONTENT:

This paper presents an overview of the subject of organic solid waste, as seen from the perspective of a potential raw material, which can generate developments aimed at resolving the current problems of energy supply and highly nutritious products for packaging soils.

The work was developed over five chapters; chapters 5 and 6 are devoted to the issue of solid waste, the main sources of waste generation, the options for proper management and disposal, and a review of existing national legislation. Chapter 7 is devoted to the study of the fundamentals of microbiology applied to the treatment of organic waste and Chapter 8 addresses the issue of anaerobic digestion as a mechanism for the production of biogas, in Chapter 9 lays down the conceptual basis for biodigestores design and finally Chapter 10 presents an example of implementation of all the concepts discussed throughout the work, by drawing up a proposal for utilization of organic solid waste generated in rural housing for the production of biogas as an alternative energy and environmental management.

The alternative to the use of solid organic waste presented in this monograph was developed with families in mind low-income farmers and not large livestock farms and agricultural producers, whose economic resources and waste characterization of sophisticated designs demand high efficiency.

---

\* Monograph

\*\* Science Faculty, School of Chemistry. Environmental Chemical Specialization. Director: Ing. Julio Cesar Calvo Corredor.

## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional de las últimas décadas y por ende el aumento de la sociedad de consumo, genera una mayor cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que deben ser recolectados selectivamente, tratados y dispuestos de manera adecuada.

Ante el aumento del volumen de residuos, las ciudades se han visto obligadas a crear proyectos y técnicas que beneficien procesos de reutilización y aprovechamiento de los mismos, tales como: Creación y fortalecimiento de cooperativas recicladoras, producción de compost o abono orgánico y campañas de separación adecuada en la fuente. La necesidad de satisfacer los requerimientos alimenticios de una población creciente y mejorar su calidad de vida, ha obligado a industriales e investigadores a crear nuevas tecnologías para la generación de combustibles y energías alternas, tales como los biocombustibles y el biogás.

Junto a la producción de bioetanol y biodiesel, la producción de biogás a partir de los residuos sólidos urbanos y agrícolas es una de las técnicas con mayor auge, esto debido a que su materia prima inicial no tiene valor económico y de hecho se disminuyen costos en los procesos productivos del sector agrícola al generar energía que puede ser utilizada; y a su vez contribuye a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) como es el caso del metano.

Históricamente Santander es un departamento cuya actividad económica se basa principalmente en el sector agrícola y pecuario, pero gracias a los avances del proceso de industrialización también se cuenta con sectores como el energético, el petroquímico y el de exploración y explotación minera<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Gobernación de Santander, 2010

Para interés de este estudio sólo se tendrán en cuenta los residuos orgánicos generados por la actividad agrícola y los desechos domiciliarios. De acuerdo a esto y según lo reportado en diciembre de 2007 por la CAS, en Santander se generan 4.65 toneladas mensuales de residuos sólidos de carácter orgánico rápidamente biodegradable<sup>2</sup>.

En algunos países del mundo como por ejemplo en la India, utilizan residuos domésticos, excrementos de animales y otros residuos orgánicos para producir el biogás que alimenta pequeñas instalaciones para cocinar. Estas funcionan con el fin de tratar residuos, evitando posibles enfermedades por la mala gestión de residuos y excrementos, aprovechando el producto digerido para abonar los cultivos y para facilitar la cocción de alimentos y evitar la tala de bosques, además del beneficio económico que representa el comercializar el abono producido<sup>3</sup>.

Según lo reportado por la literatura los procesos de producción de Biogás tradicionales que funcionan sobre el uso de excrementos humanos o animales o con el sistema de fermentación bifásico producen aproximadamente 10 kg de metano por tonelada de materia prima, y el proceso tiene lugar en un periodo aproximado de 40 días. Sin embargo Biogás ARTI (India) desarrollo en 2003 una nueva tecnología que utiliza materia prima alta en calorías, como almidón o material azucarado, el cual permite producir 250 kg de metano por tonelada de materia prima y el proceso se lleva a cabo en solo 24 horas.<sup>4</sup>

Este es solo un ejemplo de los avances obtenidos en otros países en materia de Biogás, por lo cual se hace necesario estudiar cómo estas nuevas tecnologías afectan a los procesos de producción de abono orgánico, cuáles serían las nuevas condiciones del proceso y que resultados se obtendrían, con el fin de beneficiar a los pequeños y grandes productores Santandereanos.

---

<sup>2</sup> CAS, 2007

<sup>3</sup> Orozco, 2005

<sup>4</sup> <http://www.arti-india.org/>

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación de residuos es uno de los problemas de la actualidad, pues a medida que las poblaciones crecen, aumenta de una manera directamente proporcional a la cantidad de residuos generados; sin embargo, visto desde otra óptica, esta creciente generación de residuos no se debe considerar un problema, sino por el contrario, se debe considerar como una opción para suplir parte de las necesidades energéticas que demanda la sociedad, generar puestos de trabajo y a la vez contribuir al mejoramiento de cultivos agrícolas sin el empleo de fertilizantes químicos.

Para ver la otra cara de la moneda en relación con el tema de la generación de residuos, se requiere del estudio y la investigación multidisciplinaria, diseñando e implementando sistemas de gestión robustos que traten el tema desde la reducción en la fuente, hasta el desarrollo de mecanismos seguros para una disposición final, pasando por todas las opciones de aprovechamiento.

Este trabajo presenta una las muchas opciones de aprovechamiento de los residuos sólidos, centrado la atención exclusivamente en los residuos sólidos orgánicos y en el potencial energético que estos representan; se estudia por tanto las diversas opciones de aprovechamiento de estos residuos, mediante el concurso de una gran variedad de microorganismos en procesos como el compostaje y la digestión anaerobia.

Para aportar un granito de arena tanto en el manejo de los residuos sólidos, como en la problemática energética que se vive en el sector rural, se plantea el diseño de un biodigestor para la producción y aprovechamiento de biogás, aplicado a una vivienda rural de escasos recursos económicos del departamento de Santander.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Pese a los grandes adelantos tecnológicos y al surgimiento de legislación relacionada con el manejo de los residuos sólidos, en la práctica no se observa una verdadera solución al problema.

En el sector urbano, casi la totalidad de los municipios del país cuenta con un PGIRS, que se ha quedado solo en la etapa de diseño, pero no ha alcanzado la etapa de implementación. Observando el sector rural, se encuentra que el tema de los residuos no es tan grave, ya que la mayoría los residuos generados, son aprovechados para el alimento animal y para el acondicionamiento del suelo, aunque de una manera totalmente empírica y casi intuitiva, mientras que los residuos no aprovechables por lo general son enterrados o incinerados a cielo abierto.

Visto el panorama de los residuos tanto a nivel urbano como rural, se encuentra que existe un distanciamiento entre los sectores tecnológicos y académicos, con los gobiernos municipales y con los campesinos del país, pues mientras los desarrollos tecnológicos están avanzados, los municipios siguen sumidos en la problemática del manejo inadecuado de sus residuos, y los campesinos siguen desconociendo el potencial de sus residuos orgánico para su autoabastecimiento de energía térmica y la producción de acondicionadores de suelo para el mejoramiento de su calidad.

Este trabajo no pretende generar un adelanto tecnológico en el tema del manejo de los residuos sólidos, sino dar un ejemplo de aplicación de los conocimientos desarrollados en la academia, para plantear una propuesta de aprovechamiento de los residuos generados en una vivienda rural de escasos recursos económicos, tomada como prototipo de las familias campesinas del país.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL.**

Proponer una alternativa de aprovechamiento de residuos de fincas de la zona de Santander que impliquen la producción de biogás y abono orgánico y obtener así un proceso de producción más limpia.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- 1.** Compilar la información acerca de procesos de producción de biogás y abono orgánico existentes.
- 2.** Estudiar los parámetros físico-químicos del proceso y reportar cuales generan procesos más eficientes.
- 3.** Estudiar el diseño físico de los biorreactores existentes y reportar con cual se brindan las mejores condiciones al proceso.
- 4.** Realizar un acercamiento a algunas fincas de la zona y establecer las condiciones que tendría el proceso de producción de biogás y abono orgánico.
- 5.** Proponer una mejora a los procesos o la integración de procesos existentes con el fin de adecuarlos a las condiciones de la zona de interés.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 LOS RESÍDUOS SÓLIDOS.

Históricamente, las sociedades han luchado por alcanzar su desarrollo, lo que las ha llevado a generar presiones ambientales sobre su entorno, tales como el uso indiscriminado de los recursos naturales y la inadecuada disposición de los residuos generados.

Las pautas de consumo y las actividades económicas de una sociedad tienen una relación directa sobre la generación de residuos, lo cual exige por parte de las autoridades políticas y ambientales una gestión de residuos altamente eficiente, a fin de contrarrestar los efectos adversos sobre el ambiente y el deterioro de las condiciones adecuadas de vida para las actuales y futuras generaciones.

**5.1.1 Definición.** El Artículo 1 del Decreto 838 de 2005 del Ministerio De Desarrollo Económico<sup>5</sup>, da la definición de residuo así: “Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final.”

**5.1.2 Clasificación de los residuos<sup>6</sup>.** Usualmente se clasifican los residuos según su estado de agregación, su origen o por el tipo de manejo que se les debe dar.

---

<sup>5</sup> Decreto 838 de 2005. Artículo 1: Definiciones.

<sup>6</sup> FORTUNECITYS. Los residuos sólidos. Ingeniería ambiental y medio ambiente.  
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

**5.1.2.1 Clasificación por estado de agregación.** Bajo esta clasificación se identifican tres clases de residuos (sólidos, líquidos y gaseosos) es una clasificación netamente descriptiva la cual carece de importancia técnica.

**5.1.2.2 Clasificación por origen.** Se puede definir el residuo por la actividad que lo origine, esencialmente es una clasificación sectorial. Según esta clasificación, los tipos de residuos más importantes son:

- **Residuos sólidos urbanos.** La generación de residuos varía en función de factores culturales asociados a los niveles de ingreso, hábitos de consumo, desarrollo tecnológico y estándares de calidad de vida de la población.
- **Residuos industriales.** Su composición y cantidad es muy diversa dependiendo de la actividad, la tecnología empleada, la calidad de las materias primas, etc.
- **Residuos rurales.** Son residuos fundamentalmente orgánicos, (vegetales, excrementos de animales y basura doméstica).
- **Residuos aprovechables<sup>7</sup>.** Son aquellos que a través de un manejo integral de los residuos sólidos, se recuperan y se reincorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio de la reutilización, el reciclaje, la incineración (con fines de generación de energía), el compostaje o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales, sociales y/o económicos.
- **Residuos no aprovechables.** Son aquellos que ya terminaron su vida útil y que se les debe hacer un tratamiento o disposición final adecuada debido a que por sus condiciones de origen pueden afectar o alterar ostensiblemente el medio ambiente; en este grupo encontramos los residuos inertes, radioactivos, tóxicos y peligrosos

---

<sup>7</sup> DECRETO 1713 DE 2002. Artículo 1. Definiciones.

**5.1.2.3 Clasificación por tipo de manejo.** Clasificación basada en características determinantes del cuidado en la manipulación de los mismos.

- **Residuo peligroso.** Residuos que por su naturaleza son peligrosos de manejar y/o disponer; pueden causar muerte, enfermedad contaminación ambiental si se manejan de manera inadecuada.
- **Residuo inerte:** Residuo estable en el tiempo, el cual no producirá efectos ambientales apreciables, no representan peligro para su manipulación.

## **5.2 RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.**

**5.2.1 Definición.** Son aquellos residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables (se descomponen naturalmente). Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. (Ejemplo: los restos de comida, frutas y verduras).

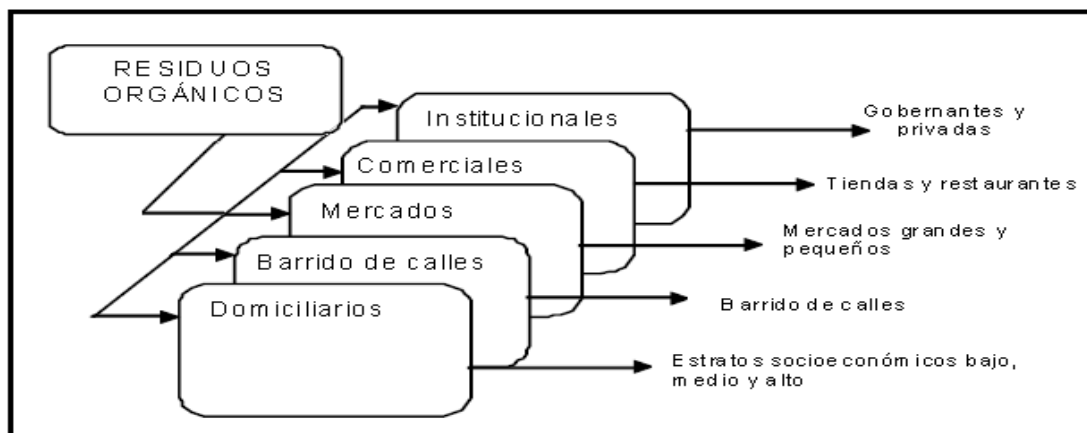
**5.2.2 Clasificación.** Las formas de clasificación más aceptadas están relacionadas con su fuente de generación y con su naturaleza y/o características físicas.

**5.2.2.1 Según su fuente de generación.** Los residuos sólidos orgánicos según su procedencia se clasifican en:

- **Residuos sólidos orgánicos domiciliarios.** Residuos provenientes de hogares, mayormente contienen restos de verduras, frutas, residuos de alimentos, podas de jardín y papeles. Representa un gran potencial para su aprovechamiento tanto en compostaje como en generación de biogás.

- **Residuos sólidos orgánicos provenientes de la limpieza de calles.** Su contenido es muy variado, pueden encontrarse restos de comida, papeles, plásticos, etc. Las posibilidades de aprovechamiento son limitadas por la dificultad que para su separación física.
- **Residuos sólidos orgánicos de mercados.** Son los residuos provenientes de mercados de abastos y plazas de mercado. Son una buena fuente para el aprovechamiento en especial para la elaboración de compost y la producción de biogás.
- **Residuos sólidos orgánicos de origen comercial.** Son residuos provenientes de los establecimientos comerciales, como tiendas y restaurantes. Estos últimos son una rica fuente para la producción de biogás o para la alimentación de porcinos.
- **Residuos sólidos orgánicos institucionales.** Residuos provenientes de instituciones públicas y privadas. Se caracterizan por contener papeles, cartones y residuos alimenticios. Su potencial de aprovechamiento es mayoritariamente para el reciclado de papel. La *Figura 1* muestra esta clasificación.

**Figura 1. Clasificación de los Residuos Orgánicos según su fuente.**

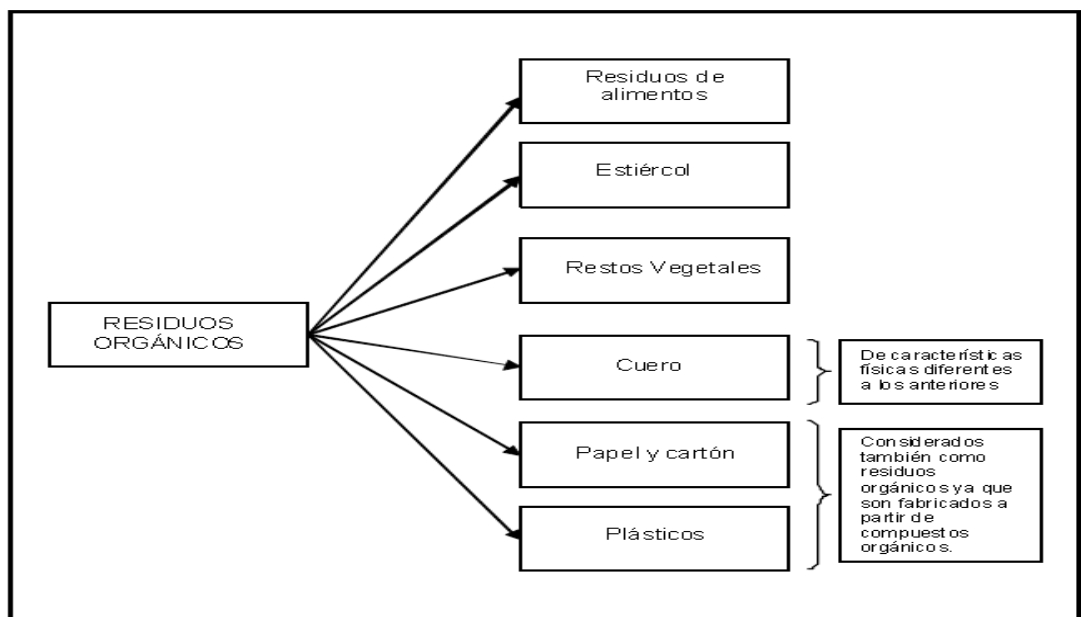


FUENTE. DANTE, Flores: Guía No. 2. para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos.

**5.2.2.2 Según su naturaleza.** Los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza se clasifican en:

- **Residuos de alimentos.** Restos de alimentos provenientes de: hogares, restaurantes y establecimientos de venta de alimentos.
- **Estiércol.** Residuos fecales de animales (ganado) que se aprovechan para su transformación en compost y para la generación de biogás.
- **Restos vegetales.** Residuos provenientes de podas y deshierbe de jardines, parques y zonas verdes, o residuos de cocina que no han sido sometidos a procesos de cocción como cortezas de legumbres y frutas. La *Figura 2* muestra esta clasificación.

**Figura 2. Clasificación generalizada de los residuos sólidos orgánicos**



Fuente. DANTE, Flores: Guía No. 2. para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos.

- **Papel y cartón.** Residuos con un gran potencial para su reciclaje pero de baja utilidad para la transformación mediante microorganismos.

- **Cuero.** Residuos provenientes de artículos de cuero como zapatos, y marroquinería. Su degradación biológica es muy lenta.
- **Plásticos.** Residuos de origen orgánico provenientes de derivados del petróleo. Al igual el papel y el cartón, su importancia radica en las posibilidades de reciclaje y no en su biotransformación.

**5.2.3 Propiedades biológicas de los residuos sólidos orgánicos.** La fracción orgánica de la mayoría de los residuos se puede clasificar de la forma siguiente:

- **Constituyentes solubles en agua.** Azúcares, féculas, aminoácidos y diversos ácidos orgánicos.
- **Hemicelulosa.** Producto de condensación de azúcares con cinco y seis átomos de carbono.
- **Celulosa.** Producto de condensación de glucosa de azúcar con seis átomos de carbono.
- **Grasas, aceites y ceras.** Son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
- **Lignina.** Material polímero presente en algunos productos de papel.
- **Lignocelulosa.** una combinación de lignina y celulosa.
- **Proteínas.** Formadas por cadenas de aminoácidos.

Casi todos los componentes orgánicos provenientes de los residuos sólidos urbanos pueden ser transformados biológicamente en gases y sólidos orgánicos relativamente inertes, tanto por vía aerobia, como por vía anaerobia. Lo que los convierte en materia prima para la generación de biogás y compost.

En este trabajo, se hará énfasis en los residuos sólidos orgánicos rurales provenientes de una finca promedio de Santander, cuyos residuos se componen de restos de alimentos, estiércoles y restos vegetales en diferentes proporciones dependiendo de la actividad principal desarrollada en la finca.

### **5.3 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.**

Se entiende por aprovechamiento de residuos al conjunto de etapas de un proceso, en el cual su materia prima es un residuo y se espera obtener un producto o subproducto con algún grado de valor comercial, que le permita reincorporarse al ciclo económico.<sup>8</sup>

El aprovechamiento de los residuos contribuye a la conservación de los recursos naturales y a reducir la demanda sobre los ellos, disminuir el consumo los consumos de energía proveniente de fuentes no renovables, aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios y atenuar la contaminación ambiental.

**5.3.1 Alimentación animal.** Es usual en las viviendas rurales la separación de los restos de alimentos y corteza de frutas y legumbres para ser usados como complemento en la dieta de animales, principalmente de ganado vacuno, y cerdos. Dado el alto contenido de humedad de estos residuos, no resisten un almacenamiento prolongado, por lo que deben ser consumidos casi de inmediato.

Cuando la generación de residuos es considerable, como en el caso de granjas avícolas, se ha implementado técnicas sofisticadas para elaborar alimento a partir de los excrementos producidos por los mismos animales.

**5.3.2 Compostaje.** Es un proceso de degradación de residuos orgánicos en el que intervienen numerosos microorganismos aerobios que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, generando como productos: dióxido de carbono, agua y minerales, como también una materia orgánica estable, libre de patógenos y disponible para ser utilizada en la agricultura como abono acondicionador de suelos denominado compost.

---

<sup>8</sup> Política para la Gestión de Residuos, Ministerio del Medio Ambiente.

**5.3.3 Bocashi.** Receta japonesa para aprovechar los residuos orgánicos de manera similar al compostaje, se diferencia de este en la frecuencia de los volteos y en la temperatura de trabajo; es considerado un proceso de compostaje incompleto y a pesar de ser un proceso netamente aerobio, algunos autores lo denominan abono fermentado<sup>9</sup>. *El Cuadro 1* muestra un paralelo entre compost y bocashi.

**Cuadro 1. Comparación entre el proceso del compostaje y el bocashi**

CARÁCTERÍSTICAS	COMPOST	BOCASHI
Producto final	Sustancias húmicas	Materia orgánica en descomposición
Temp. máximas	65 – 70 °C	45 – 50 °C
Humedad	60 % durante todo el proceso	Inicial 60% desciende rápidamente
Frecuencia de volteo	Regida por Temp. y CO <sub>2</sub>	Una o dos veces al día
Duración del proceso	De 1 a 2 meses	De 1 a 2 semanas

Fuente. SOTO, Gabriela, Centro de investigaciones agronómicas de la Unidad de Costa Rica de insumos agropecuarios no sintéticos.

**5.3.4 Lombricultura.** Es una actividad zootécnica que utiliza una especie doméstica de lombriz, la cual recicla la materia orgánica produciendo humus, un importante abono orgánico muy eficiente en la recuperación de suelos, también denominado lombricompost. También se produce una gran cantidad de lombrices, fuente importante de proteínas (60% de proteínas en peso seco Aprox.), recurso valioso ya que se puede utilizar como complemento nutricional para los animales.

Las heces de la lombriz (humus) son ricas en nutrientes, ya que contienen cinco veces más nitratos que el suelo, 11 veces más potasio y, lo que es más importante, 7 veces más fósforo intercambiable y 3 veces más magnesio

<sup>9</sup> RESTREPO, J. Abonos orgánicos fermentados. Experiencias de agricultores en Centro América y Brasil. OIT-CEDECO. Brasil, 1996.

intercambiable, lo que favorece notablemente la asimilación de los nutrientes por las plantas.<sup>10</sup>

**5.3.5 Biocombustibles.** Cualquier tipo de combustible líquido, sólido o gaseoso, proveniente de la biomasa, tales como: bioetanol, biodiesel, biogás, entre otros.

**5.3.5.1 Bioetanol.** La norma colombiana NTC 5308 lo define como etanol anhidro obtenido a partir de la biomasa, con un contenido de agua inferior a 0.7% en volumen. El bioetanol se puede obtener a partir de los siguientes procesos.

- **Fermentación de los compuestos orgánicos, seguida de destilación y secado.** En este proceso se emplean materias primas como la caña de azúcar o remolacha azucarera.
- **Segregación molecular.** Proceso en el que se fragmenta la biomasa para separar el almidón, éste convertido en azúcar fermentable puede producir alcohol. Se emplean como materias primas: yuca, papa, maíz, entre otros.
- **Hidrólisis de la celulosa.** Este proceso en etapa de estudio en el cual se puede obtener bioetanol a partir de cualquier materia que contenga celulosa, como los desechos o residuos agrícolas.

**5.3.5.2 Biodiesel.** Combustible para motores diesel, que se puede obtener a partir de materias primas agrícolas, aceites o grasa de fritura usados y metanol o etanol. La producción de aceites vegetales puede realizarse a partir de más de 300 especies diferentes; sin embargo, por razones de eficiencia, actualmente solo se explotan especies como: la palma africana, el girasol y la soya.

La producción de biodiesel se basa en la transesterificación, en la cual al agregar al aceite un alcohol (metanol o etanol) y un catalizador (KOH), se obtiene

---

<sup>10</sup> RODRIGUEZ, Teresa. Biología de las lombrices de tierra. En: Técnicas de manejo para la producción de humus. España, 2003.

biodiesel, glicerina, agua y un residuo que puede ser aprovechado como fertilizante.

**5.3.5.3 Biogás.** Producido de forma natural en los rellenos sanitarios, o de manera industrial en biodigestores mediante un proceso de fermentación anaeróbica, debido a la descomposición de la materia orgánica.

Este gas, compuesto por metano (50%-60%), CO<sub>2</sub> (35%-45%) y trazas de otros gases como el H<sub>2</sub>S, se debe extraer depurar, para ser utilizado como combustible de hornos y estufas, en generación de energía eléctrica (generadores), mecánica (motores de combustión interna), celdas de combustible, etc.

#### **5.4 LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS (GIRS).**

Termino aplicado a todas las actividades asociadas con el manejo de los diversos flujos de residuos dentro de la sociedad, cuya meta sea administrarlos de manera compatible con el medio ambiente y la salud pública. Contempla las siguientes etapas:

**5.4.1 Reducción en la fuente.** Es la forma más eficaz de reducir la cantidad y toxicidad de residuos, el costo asociado a su manipulación y los impactos ambientales.

**5.4.2 Aprovechamiento y valorización.** Proceso que implica la separación en la fuente de residuos, la preparación de estos materiales para la reutilización, el reprocesamiento, la transformación en nuevos productos, y la recuperación de productos de conversión (por ejemplo, compost) y energía en forma de calor y biogás combustible. El aprovechamiento tiene gran potencial económico, ya que los materiales recuperados son materias primas a comercializar.

**5.4.3 Tratamiento y transformación.** Proceso que implica la alteración física, química o biológica de los residuos normalmente aplicados para aumentar la eficacia de los procesos de aprovechamiento y valoración. Para residuos no aprovechables, se utilizan sistemas de tratamiento para disminuir su peligrosidad y/o cantidad.

**5.4.4 Disposición final controlada.** Actividad final aplicada a los residuos que ya pasaron por las etapas de aprovechamiento y transformación, y que ya no representan ningún valor económico.

## 6. MARCO LEGAL

En este capítulo se hace una breve mención de la normatividad relacionada con el manejo de los residuos y con la generación de biocombustibles. Se incluye la normatividad sobre abonos y acondicionadores de suelos por su estrecha relación con la disposición final de los residuos sólidos orgánicos.

### 6.1 RESÍDOS SÓLIDOS.

- **Ley 99 de diciembre 22 de 1993.** Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
- **Ley 142 de 1994.** Elaborada por el Congreso de la República de Colombia. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios donde se incluye el servicio público de aseo y se dictan otras disposiciones.
- **Decreto 605 de 1996 del Ministerio de Desarrollo Económico.** Establece los lineamientos para la adecuada prestación del servicio de aseo desde su generación, almacenamiento, recolección, transporte, y transferencia hasta su disposición final.
- **Resolución 1096 de 2000 del Ministerio de Desarrollo Económico.** Por la cual se adopta el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- *RAS 2000*.
- **Decreto 1713 de 2002 de la Presidencia de la República.** Por el cual se reglamenta la *Ley 142 de 1994*, la *Ley 632 de 2000* y la *Ley 689 de 2001*, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el *Decreto Ley 2811 de 1974* y la *Ley 99 de 1993* en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.

- **Decreto 1505 de 2003 de la Presidencia de la República.** Por el cual se modifica parcialmente *Decreto 1713 de 2002* en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
- **Decreto 838 de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.** Por el cual se modifica el *Decreto 1713 de 2002* sobre disposición final de residuos sólidos, consideraciones ambientales sobre rellenos sanitarios, fomento a la regionalización de los rellenos sanitarios y se dictan otras disposiciones.

## 6.2 RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.

Esta normatividad se relaciona con los criterios de calidad que deben cumplir los acondicionadores de suelos.

- **Decreto 2202 de 1968 de la Presidencia de la República.** Por el cual se reglamenta la industria y comercio de los abonos o fertilizantes químicos simples, químicos compuestos, orgánicos naturales, orgánicos reforzados, enmiendas y acondicionadores del suelo, y se derogan unas disposiciones.
- **Resolución 074 de 2002 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.** Por la cual se establece el reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaçado, etiquetado, Almacenamiento, certificación, importación y comercialización de productos agropecuarios ecológicos.
- **Resolución ICA No. 00150 de 2003.** Por la cual se adopta el reglamento técnico de fertilización y acondicionadores de suelos para Colombia.
- **NTC 5167. 2004-05-31.** Establece requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como fertilizantes o como acondicionadores del suelo.

### 6.3 BIOCOMBUSTIBLES.

La normatividad relacionada con la producción de biocombustibles trata en su mayoría sobre la producción de bioetanol y biodiesel; no se encuentra normatividad referente al biogás diferente a lo contemplado en el manejo de los rellenos sanitarios, contemplado en los *Decretos 1713 de 2002 y 1503 de 2003* de la Presidencia de la República.

- **Ley 693 de 2001.** Por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo.
- **Ley 788 de 2002.** Reforma tributaria donde se introdujeron las exenciones de IVA, Impuesto Global y Sobretasa al componente de alcohol de los combustibles oxigenados.
- **Resolución 0447 de 2003 del Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Minas y Energía.** Regula los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas y en motores de combustión interna.
- **Resolución 180687 de 2003 del Ministerio de Minas y Energía.** Por la cual se expide la regulación técnica prevista en la Ley 693 de 2001, en relación con la producción, acopio, distribución y puntos de mezcla de los alcoholes carburantes.
- **Ley 939 de 2004.** Por medio de la cual se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en Motores diesel y se dictan otras disposiciones.
- **Resolución 1289 de 2005 del Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Minas y Energía.** Determina los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diesel.

## 7. BASES DE MICROBIOLOGÍA APLICADA AL TRATAMIENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Se denomina Biósfera a la región del planeta donde se desarrolla la vida, esto incluye a las superficies de los continentes con una franja de profundidad de aproximadamente 1 metro, los océanos, mares, ríos, lagos y la parte inferior de la atmósfera. Dos factores son determinantes para el sostenimiento de la vida en esta delgada capa: el recambio cíclico de los elementos indispensables para la vida (C, N, O<sub>2</sub>, P y S), y el aporte constante de la energía solar.

Los productores primarios, mediante un proceso fotosintético y energía solar, toman los elementos del medio ambiente y los biosintetizan para incorporarlos en las células como compuestos orgánicos, los cuales representan directa o indirectamente la fuente de energía que sostiene las cadenas tróficas. Finalmente, mediante la acción de microorganismos, estos elementos son devueltos a su forma inicial y sirven de nuevo como alimento de los organismos fotosintéticos.

Se conoce como mineralización a la conversión del estado orgánico al estado inorgánico de los compuestos; esta conversión se debe a la acción de un grupo de microorganismos denominados descomponedores (bacterias y hongos), los cuales para obtener su alimento, descomponen la biomasa. Como producto de este proceso, se obtienen de nuevo los elementos tomados inicialmente por los productores primarios, y CO<sub>2</sub> (Se estima que Aprox. el 90% del CO<sub>2</sub> producido en la biosfera se debe a la actividad metabólica de los descomponedores).

Todas las sustancias orgánicas naturales, son descompuestas por algún microorganismo. Cualquier especie bacteriana en sí misma, es un agente limitado de mineralización, la gran versatilidad metabólica es consecuencia de la acción conjunta de una gran diversidad de grupos fisiológicos. *El Anexo 1* presenta algunos de los principales procesos y productos de la biomasa húmeda.

No todos los restos orgánicos se mineralizan a la misma velocidad. Se estima que aproximadamente el 75% de la materia orgánica es mineralizada por completo; el 25% restante, que no se mineraliza, se transforma en humus<sup>11</sup>.

## **7.1 CICLOS DE LA MATERIA.**

**7.1.1 Ciclos del Carbono y del Oxígeno.** La fuerza motora para el recambio cíclico de los bioelementos es la fotosíntesis, proceso mediante el cual las formas oxidadas del carbono ( $\text{CO}_2$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) se reducen para producir compuestos orgánicos y liberar  $\text{O}_2$ .

La oxidación de los compuestos orgánicos es llevada a cabo por los consumidores, aunque son los descomponedores (bacteria y hongos) quienes oxidan la mayor parte de la materia orgánica, generando de nuevo elementos inorgánicos y liberando  $\text{CO}_2$ , con lo que se inicia un nuevo ciclo.

**7.1.2 Ciclo del Nitrógeno.** El nitrógeno molecular  $\text{N}_2$  es uno de los componentes mayoritarios en la atmósfera; sin embargo, su molécula es muy inerte químicamente por lo que no es una fuente adecuada de este elemento para la gran mayoría de los seres vivos. Las formas combinadas de este elemento, amoníaco, nitrato y compuestos orgánicos son escasas, y su disponibilidad es un factor limitante para la vida.

**7.1.2.1 Asimilación Fotosintética.** Las algas y plantas asimilan el nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) o de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Si se asimila en forma de nitrato debe ser reducido en la célula a amoníaco. El nitrato y el amoníaco pasan a formar parte de la materia viva como nitrógeno orgánico, por ejemplo, como grupos  $\text{NH}_2$  de los aminoácidos.

---

<sup>11</sup> Kononova y Aliev (1975 y 1980).

Los compuestos orgánicos del nitrógeno sintetizados por los productores primarios son utilizados como fuente de nitrógeno por todos consumidores.

**7.1.2.2 Amonificación.** Cuando muere una planta o un animal, el nitrógeno orgánico almacenado en sus tejidos como compuestos orgánicos, es atacado por los microorganismos. La descomposición de estos compuestos orgánicos genera liberación de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y parte del N pasa a formar parte de los microorganismos; cuando estos microorganismos mueren, el nitrógeno orgánico se libera como amoníaco.

**7.1.2.3 Nitrificación.** Es el proceso de conversión del  $\text{NH}_3$  a  $\text{NO}_3^-$ , llevado a cabo por las bacterias aerobias quimioautótrofas obligadas, denominadas bacterias nitrificantes. Se dividen en dos grupos: Las que oxidan amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) entre las que se distinguen las nitrosomonas, nitrosocystis, y nitrosouva; y las que oxidan nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), como las nitrobacter, y los nitrococcus.

**7.1.2.4 Denitrificación.** Es el proceso de conversión de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), a nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ), llevado a cabo por microorganismos anaeróbicos (pseudomonas y bacillus) que utilizan el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) como aceptor de electrones reduciéndolo hasta nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ).

**7.1.2.5 Fijación de Nitrógeno.** Algunos microorganismos pueden fijar el nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ), con lo que logra compensar las pérdidas por producidas por la denitrificación. Existen dos mecanismos de fijación del nitrógeno.

- **La fijación simbiótica.** Mediante la asociación entre una bacteria y una planta, donde aisladamente ninguno de los participantes de esta simbiosis es capaz de fijar nitrógeno molecular. El ejemplo más conocido es de las leguminosas con el género Rhizobium.

- **La fijación no simbiótica.** Realizada por las algas verdeazuladas de los géneros *Anabaena* y *Nostoc* y las bacterias aerobias estrictas de los géneros *azotobacter* y *beijerinckia*.

**7.1.3 Ciclo del Azufre.** El azufre (S), es un componente esencial para la vida. En la biosfera es asequible en forma de sulfato soluble, ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y en su forma reducida como ácido sulfhídrico, ( $\text{H}_2\text{S}$ ) producto de la actividad microbológica, actividades volcánicas y actividades industriales.

**7.1.3.1 Asimilación del Sulfato.** El sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) es utilizado como nutriente por los productores primarios y microorganismos. En la materia orgánica viva se presenta en estado reducido como grupos  $\text{HS}^-$  o  $\text{S}_2^{2-}$ .

**7.1.3.2 Reducción de Sulfatos.** Al morir un organismo, se mineralizan los compuestos orgánicos del azufre y éste se libera en su forma inorgánica reducida  $\text{H}_2\text{S}$ , generado como consecuencia de procesos de respiración anaeróbica de un pequeño grupo de microorganismos denominados: bacterias reductoras de sulfatos.

**7.1.4 Ciclo del Fósforo.** Los organismos vivos asimilan el fósforo en forma inorgánica como fosfato ( $\text{PO}_4^-$ ). Cuando una planta o un animal muere, el fósforo, (P) se libera por hidrólisis como fosfato inorgánico. El fósforo en muchos medios, es un factor limitante del crecimiento, debido a su escasez relativa en la biosfera.

## **7.2 EL UNIVERSO MICROBIOLÓGICO.**

El descubrimiento del universo microbiano se debe a la invención del microscopio por el holandés Antony Van Leeuwenhoek (1632-1723). Los primeros estudios microscópicos estuvieron distribuidos entre los reinos animal y vegetal, con el desarrollo de los conocimientos, se puso de manifiesto que esta sencilla

clasificación era insuficiente, ya que muchos microorganismos no compartían totalmente los atributos de animales y vegetales. En 1866 E. H. Haeckel propuso la creación de un tercer reino denominado: reino de los protistas que incluía, algas, protozoarios, hongos y bacterias.

Con el perfeccionamiento de la microscopía electrónica, se determinó que entre estos organismos se presentan dos tipos de organización celular, con lo que se subdividió este reino en protistas eucarióticos y protistas procarióticos.

**7.2.1 Protistas Eucarióticos.** Entre los protistas eucarióticos, se distinguen tres grupos principales: algas, protozoarios y hongos. De estos grupos, el que mayor relación tiene con la descomposición de la materia es el de los hongos.

**7.2.1.1 Los Hongos.** Son organismos inmóviles no fotosintéticos, que existen formas microscópicas y macroscópicas, acuáticas y terrestres. Se clasifican en:

- **Saprobios obligados.** Viven exclusivamente sobre la materia orgánica en descomposición y son incapaces de infectar otros organismos vivos.
- **Parásitos o saprobios facultativos.** Pueden vivir sobre la materia orgánica en descomposición o bien ser parásitos.
- **Parásitos obligados.** Sólo pueden vivir a expensas de otro ser vivo.

Algunos hongos mantienen relaciones de simbiosis como en el caso de los líquenes (alga-hongo).

La mayoría de los hongos, viven libres en el suelo o en el agua y obtienen energía por respiración o fermentación de materiales orgánicos solubles, se pueden desarrollar en un rango de temperatura entre los 0°C a 35°C y en ambientes ligeramente ácidos, con pH cercano a 6.

**7.2.2 Protistas Procarióticos.** Los protistas procarióticos comprenden bacterias y algas verdeazuladas.

**7.2.2.1 Algas verdeazuladas.** Son microorganismos fotosintéticos, capaces de suplir los requerimientos de nitrógeno fijando nitrógeno molecular. Las formas unicelulares en los ecosistemas acuáticos, constituyen el fitoplancton. Se ha estimado que la fijación de CO<sub>2</sub> en los océanos es del orden de 1,2x10<sup>10</sup> toneladas por año.

**7.2.2.2 Las bacterias.** Son el grupo más importante de los organismos procariotas, por su número, distribución natural y diversidad fisiológica. Es el grupo de mayor interés para los objetivos de este trabajo.

La gran mayoría son unicelulares, básicamente con tres tipos de formas celulares, cocos (esféricos u ovals), bacilos (cilíndricas o en forma de bastón) y espirilos (en forma de espiral). La taxonomía de las bacterias es muy compleja. A manera de simplificación se presenta la siguiente clasificación.

- Bacterias deslizantes.
- Bacterias fotosintéticas.
- Bacterias del grupo entérico.
- Bacterias gram negativas no fotosintéticas.
- Bacterias formadoras de endosporas.
- Bacterias gram positivas no formadoras de endosporas.

### **7.3 EL METABOLISMO MICROBIANO.**

El metabolismo puede definirse como el conjunto de procesos que posibilitan la vida. Se puede hacer una división en dos tipos de procesos principales.

- **Procesos Anabólicos.** Los consumen la energía por medio de rutas biosintéticas.
- **Procesos Catabólicos.** Los que generan energía por medio de la rutas degradativas.

Se diferencian tres tipos de metabolismos productores de energía: fotosíntesis, fermentación y respiración, a continuación se describirán los dos últimos por estar directamente relacionados con la degradación de la materia.

**7.3.1 La fermentación.** Louis Pasteur (1822-1895), definió la naturaleza microbiológica de la fermentación y su significado fisiológico como una ruta generadora de energía. Es un proceso en el que los compuestos orgánicos actúan como donadores y receptores de electrones. La consecuencia final de la fermentación es una mezcla de productos más oxidados que el substrato y otros más reducidos.

Los carbohidratos son los principales substratos fermentables y son los compuestos orgánicos predominantes en los tejidos vegetales. Las rutas fermentativas de los carbohidratos y derivados varían mucho de acuerdo a los grupos microbianos. Los principales productos finales de las fermentaciones son ácidos orgánicos y/o alcoholes, por lo que normalmente se produce una acidificación del medio.

**7.3.2 La respiración.** Se puede definir como un proceso productor de energía en que los donadores de electrones son compuestos orgánicos o inorgánicos reducidos. Si el agente oxidante es el oxígeno se denomina respiración aeróbica y si el agente reductor es un compuesto inorgánico diferente del oxígeno se denomina respiración anaeróbica.

**7.3.2.1 Respiración aeróbica.** Este metabolismo se cumple en presencia de oxígeno. Los microorganismos pueden obtener energía por la vía de la respiración aeróbica tanto a partir de compuestos orgánicos como de compuestos inorgánicos reducidos.

- **Oxidación de compuestos orgánicos.** Gran parte del carbono de los compuestos orgánicos son por lo general oxidados completamente a  $\text{CO}_2$ , otra fracción de este elemento es asimilado en la síntesis de los materiales celulares. No existe ningún compuesto orgánico que no pueda ser utilizado como sustrato para la respiración de algún microorganismo.
- **Oxidación de compuestos inorgánicos.** La propiedad de oxidar compuestos inorgánicos reducidos es exclusiva de las bacterias y de gran importancia en el ciclo de la materia. Los grupos fisiológicos que realizan este tipo de respiración se les denomina quimioautótrofos. Entre los compuestos inorgánicos reducidos que pueden ser oxidados citamos:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{S}$ .

**7.3.2.2 Respiración anaeróbica.** En ausencia de oxígeno, muchas bacterias son capaces de realizar el metabolismo respiratorio, que denominado respiración anaeróbica. Los oxidantes en lugar del oxígeno son nitrato, sulfato o carbonato.

La oxidación anaeróbica del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), a nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ), se conoce como denitrificación, proceso en el que intervienen microorganismos de los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*. Si hay presencia de oxígeno aunque el nitrato este presente, no ocurre proceso de denitrificación, ya que la denitrificación es una ruta alternativa.

La utilización del sulfato como agente oxidante, es propia de un pequeño grupo de microorganismos (*Desulfovibrio* y *Clostridium*), la reducción de sulfatos no es una ruta alternativa y se da en condiciones de anaerobiosis.

Las bacterias productoras de metano o metanogénicas utilizan el carbonato como agente oxidante. Son estrictamente anaerobias y además del carbonato para la producción de metano, pueden utilizar compuestos orgánicos.

Las respiraciones anaeróbicas, son metabolismos frecuentes en procesos de descomposición de residuos sólidos orgánicos en rellenos sanitarios y en procesos de compostaje inadecuados; sin embargo, son una alternativa para la producción de biogás en reactores anaeróbicos debidamente diseñados y controlados.

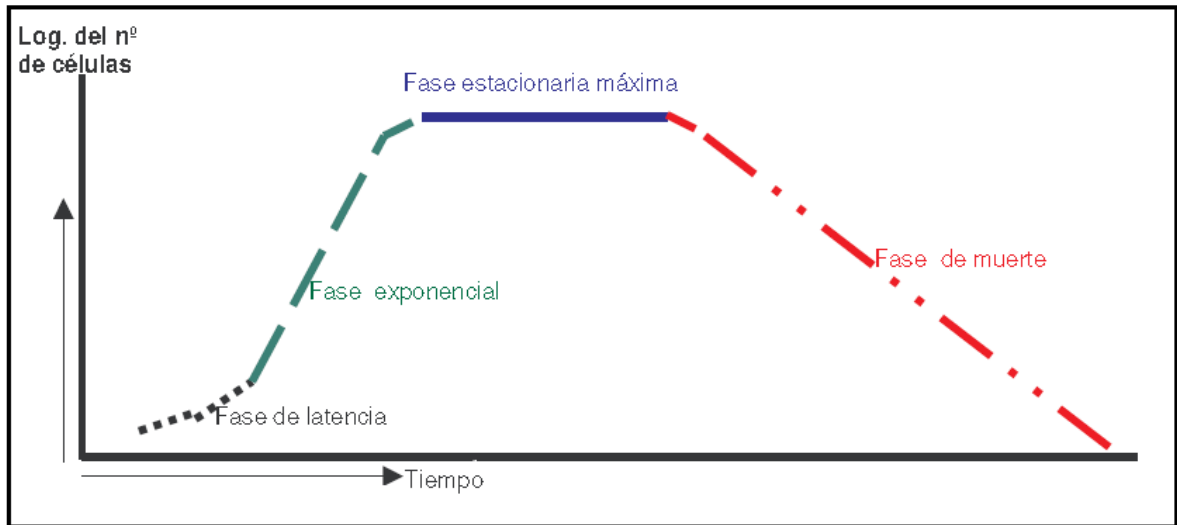
#### **7.4 EL CRECIMIENTO MICROBIANO.**

Para todo ser vivo, el crecimiento se puede definir como un incremento ordenado de todos los constituyentes químicos de su organismo, lo que se refleja como una multiplicación a nivel celular. En organismos pluricelulares, el crecimiento tiene como consecuencia un aumento en el tamaño del individuo y en los organismos unicelulares, el crecimiento conduce a un incremento en el número de individuos. Bajo condiciones favorables, una población de bacterias, se duplica a intervalos de tiempo regulares.

Cada célula hija, proveniente de una misma división, tiene el mismo potencial de crecimiento que la célula madre lo que implica el número de células crezca en forma continua doblándose la población a intervalos fijos. Este tipo de crecimiento se denomina crecimiento exponencial.

El crecimiento exponencial no se mantiene durante mucho tiempo, pues está limitado por factores como el agotamiento de nutrientes y la acumulación de productos metabólicos tóxicos. En un cultivo donde no se aportan nuevos nutrientes, estos factores determinan una curva característica de crecimiento. *La Figura 3* muestra una curva característica de crecimiento bacteriano.

**Figura 3. Curva característica del crecimiento bacteriano**



Fuente. El ABC de la microbiología: una herramienta para compostar.

- **Fase de latencia.** Es un retraso en el crecimiento producido por diversos factores desfavorables para el crecimiento como: humedad, temperatura, falta de nutrientes, sustancias inhibidoras del crecimiento.
- **Fase de crecimiento exponencial.** Se inicia cuando la velocidad de crecimiento alcanza su valor máximo y el número de células aumenta. La concentración y naturaleza de los nutrientes, la temperatura y el pH, son factores que determinan la velocidad de crecimiento.
- **Fase estacionaria máxima.** Descenso de la velocidad de crecimiento por el agotamiento de nutrientes o por la concentración de metabolitos tóxicos.
- **Fase de muerte.** Disminución de la población viable, la cinética de la muerte de las poblaciones bacterianas es exponencial.

**7.4.1 Velocidad de crecimiento como función de la temperatura.** Las bacterias presentan diferencias muy marcadas respecto a la zona de temperatura donde pueden crecer, siendo este un factor limitante para su crecimiento. En función a su relación con la temperatura se clasifican en termófilos, mesófilos y psicrófilos.

**7.4.2 Velocidad de crecimiento como función de la concentración de nutrientes.** Se presentan dos tipos de comportamientos; para altas concentraciones de nutrientes, la velocidad de crecimiento alcanza rápidamente su valor máximo y se mantiene hasta que algún factor determine el inicio de la fase de muerte.

**Cuadro 2. Clasificación de las bacterias según la temperatura de crecimiento**

<b>Grupo</b>	<b>Mínimo °C</b>	<b>Óptimo °C</b>	<b>Máximo °C</b>
<b>Termófilo</b>	40-45	55-75	60-80
<b>Mesófilo</b>	10-15	30-45	35-47
<b>Psicrófilo obligado</b>	-5, +5	15 - 18	19 - 22
<b>Psicrófilo facultativo</b>	-5, +5	25 - 30	30 - 35

Fuente. El ABC de la microbiología: una herramienta para compostar.

## 8. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

El biogás es una mezcla gaseosa formada, principalmente, por metano  $\text{CH}_4$  y dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y pequeñas proporciones de otros gases, como  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc., cuya generación se debe a la acción de los microorganismos anaerobios mediante el proceso metabólico de fermentación.

### 8.1 DIGESTIÓN ANAERÓBIA.

La degradación anaerobia es un proceso en el que participan diferentes grupos de microorganismos de manera coordinada, para transformar la biomasa en productos como el biogás y lodos ricos en nutrientes.<sup>12</sup> El estiércol es el material de mayor empleo industrial para la generación de biogás; sin embargo, cualquier biomasa con alto contenido de humedad, azúcares, celulosa, hemicelulosa, y proteínas puede ser degradada por vía anaerobia y para producir biogás. *El Anexo 2* se muestra un modelo del ciclo de la materia con la generación de biogás.

**8.1.1 Etapas de la digestión anaeróbica.** La digestión anaerobia es un proceso complejo en el cual participa una gran variedad de bacterias y se desencadena un buen número de reacciones químicas. Se pueden distinguir las siguientes etapas:

**8.1.1.1 Hidrólisis de polímeros complejos.** Etapa en la cual un grupo de bacterias hidrolíticas anaeróbicas transforma las sustancias orgánicas de alto peso molecular (carbohidratos, lípidos y proteínas), en sustancias de menor complejidad así: los carbohidratos se convierten en azúcares simples; los lípidos en ácidos grasos y glicerol; y las proteínas en polipéptidos y aminoácidos.

---

<sup>12</sup> GARCÍA MORALES, José L., ROMERO, Luis I., SALES, Diego. "Valorización energética de la biomasa: aplicación en industrias del sector agroalimentario". Boletín del CIDEU, 2008

La eficiencia y velocidad de estas transformaciones, depende de factores, como: la temperatura y el pH del medio, el tipo y tamaño de materia orgánica, y el grado de humedad de la mezcla.

**8.1.1.2 Fermentación acidogénica.** Es la fermentación de las sustancias producidas en la etapa de hidrólisis, se genera a partir de una sucesión de reacciones, cuyos productos son: ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, y en menores cantidades ácido láctico y etanol.

**8.1.1.3 Acetogénesis.** Los componentes más reducidos de la fermentación acidogénica se oxidan en condiciones anaerobias para producir ácido acético,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ , que a su vez sirven de sustrato a las bacterias metanogénicas.

**8.1.1.4 Metanogénesis.** La cuarta etapa comprende la formación de metano en condiciones estrictamente anaeróbicas, producida por microorganismos metanogénicos selectivos entre los que se distinguen los grupos de tipo  $\text{CO}_2$ , los de tipo metílicos y los de tipo acetato, de manera que no para degradar un sustrato dado, se requiere un grupo específico. En esta etapa final se distinguen dos grupos de reacciones: las que producen metano y agua a partir del dióxido de carbono y el hidrógeno, mediante la acción de microorganismos denominados (utilizadores de hidrógeno), y las que transforman el acetato en metano y dióxido de carbono mediante la acción de microorganismos denominados (acetoclásticos).

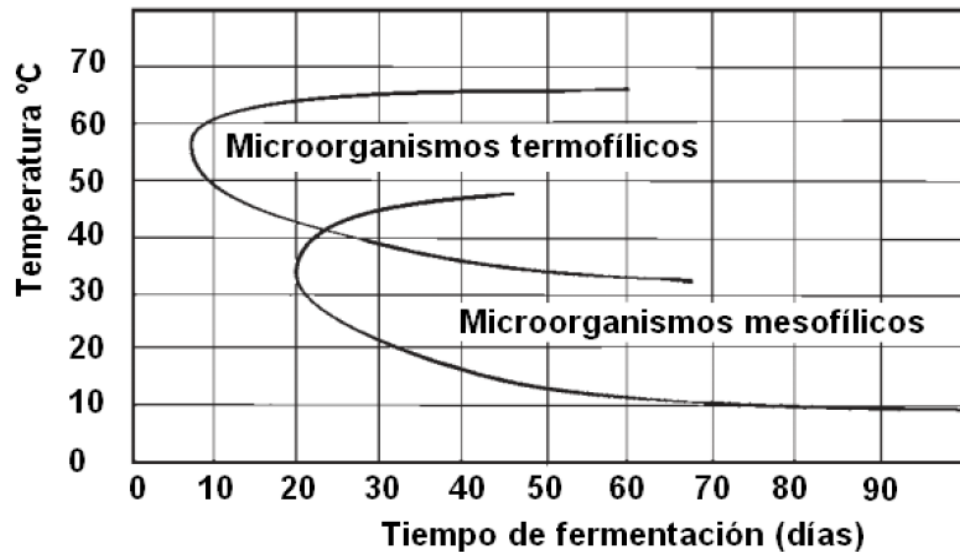
**8.1.2 Variables relacionadas con la digestión anaerobia<sup>13</sup>.** Las principales variables que afectan la digestión anaerobia son: la temperatura y el pH de operación, la presencia de inhibidores y las características de la biomasa. La influencia de estas variables en la producción de biogás, se detalla a continuación.

---

<sup>13</sup> Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

**8.1.2.1 Temperatura de operación.** Como se expuso en el capítulo 6, la temperatura es un factor determinante en el crecimiento de las bacterias, y por tanto de la generación de biogás. En *la Figura 4* se muestra la influencia de la temperatura en los tiempos de residencia de un digestor anaerobio.

**Figura 4. Relación temperatura-tiempo de residencia en un reactor anaerobio**



Fuente. PEREZ, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Chile, 2010.

- **Digestión Psicrófilica.** Digestión anaerobia realizada a temperaturas entre 10°C y 20°C, se estima que un reactor que opere en este rango de temperatura, debe manejar un tiempo de residencia superior a los 100 días.
- **Digestión Mesofílica.** Digestión anaerobia realizada a temperaturas entre 30°C y 35°C. Se requiere un tiempo de residencia entre 15 a 30 días, la producción de biogás es menor y se requieren digestores de gran volumen.
- **Digestión Termofílica.** Digestión anaerobia a temperaturas mayores de 55°C. Se requiere tiempos de residencia entre 12 a 14 días. Son sistemas de mayor producción de metano más alta y mejor eliminación de patógenos, pero requieren una alta inversión económica.

**8.1.2.2 El pH de la fase líquida<sup>14</sup>.** Las bacterias responsables de la producción de biogás son altamente sensibles a cambios en el pH, estas trabajan en un rango óptimo de 7,0 a 7,5 y presentan inhibición a pH menores de 6,7 y mayores de 7,5. Un biodigestor se puede acidificar por algunas de las siguientes causas:

- Cambio excesivo de la carga.
- Presencia de productos tóxicos en la carga.
- Cambio amplio y repentino de la temperatura interna.
- Permanecer por largo tiempo sin recibir carga.

**8.1.2.3 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N).** La relación carbono/nitrógeno está ligada directamente a la producción de biogás, a mayor sea esta relación C/N, mayor producción de biogás. Cuando la relación C/N es alta, el nitrógeno es rápidamente consumido por las bacterias metanogénicas para formar proteínas no alcanzando a reaccionar con el material restante, pero si la relación C/N es baja, habrá nitrógeno en exceso, el cual será liberado y acumulado en forma de amoníaco, con lo que se incrementa el pH de la carga del digestor, llegando a causar la inhibición de las bacterias.

**8.1.2.4 Inhibidores.** Algunos materiales o residuos actúan como tóxicos para las bacterias anaeróbicas, por lo tanto debe evitarse alimentar a digestor materiales como: residuos de pesticidas o de medicamentos, residuos con contenidos de arena o material sólido inerte, etc. En *el Cuadro 3* se muestran algunos inhibidores con su respectiva concentración de inhibición.

**8.1.2.5 Niveles de amoníaco.** Es un parámetro de gran importancia, ya que una concentración de amoníaco superior a 2000 mg/L genera acidificación de la carga del digestor, con lo cual decrece la producción de biogás.

---

<sup>14</sup> CARRILLO, Leonor. Microbiología agrícola. 2003

**8.1.2.6 Porcentaje de sólidos.** Las bacterias anaeróbicas necesitan un medio fluido para su desarrollo, pero con una concentración adecuada de nutrientes, lo que implica un medio con alta humedad, cuyo contenido de sólidos oscile entre un 10% y un 12%.

**Cuadro 3. Inhibidores y concentración inhibidora de la digestión anaerobia**

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA
<b>Sulfato</b>	5000 ppm
<b>Nitrato</b>	0.05 mg/ml
<b>Cromo</b>	200 mg/ml
<b>Cianuro</b>	25 mg/ml
<b>Sodio</b>	3500 - 5500 mg/ml
<b>Calcio</b>	2500 - 4500 mg/ml
<b>Cloruro de sodio</b>	40000 ppm
<b>Cobre</b>	100 mg/ml
<b>Níquel</b>	200 - 500 mg/ml
<b>Detergente sintético</b>	20 - 40 mg/ml
<b>Potasio</b>	2500 - 4500 mg/ml
<b>Magnesio</b>	1000 - 1500 mg/m

Fuente. <http://emison.es/medio-ambiente/AGUAS/biogas/biogas.pdf>

**8.1.2.7 Potencial Redox.** Para la óptima operación de un digestor, se requiere un potencial redox dentro del rango de -300 mV a -330 mV, lo cual se puede lograr mediante la adición de agentes oxidantes como: sulfatos, nitritos y nitratos.

## **8.2 EL BIOGÁS.**

El resultado final de la descomposición anaerobia de la materia orgánica es un efluente pastoso rico en nutrientes primarios y una mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono y trazas de otros gases, denominado biogás.

El biogás es una mezcla compleja, compuesta por metano y dióxido de carbono principalmente, pero con contenidos menores de otros gases como: nitrógeno, ácido sulfhídrico, hidrógeno, agua en forma de vapor, amoníaco, entre otros. La concentración de estas sustancias en la mezcla de biogás es muy variable y depende de múltiples variables, como se explicó en el *apartado 7.1 2* de este trabajo. En *el Cuadro 4* se muestra la composición del biogás obtenido en diversas fuentes o sustratos.

**Cuadro 4. Caracterización del biogás en función del sustrato**

Gases	Rellenos sanitarios	Lodos cloacales	Desechos agrícolas	Desechos industriales
CH <sub>4</sub>	45 - 65 %	50 - 80 %	50 - 80 %	50 - 70 %
CO <sub>2</sub>	34 - 55 %	20 - 50 %	30 - 50 %	30 - 50 %
N <sub>2</sub>	0 - 20 %	0 - 3 %	0 - 1 %	0 - 1 %
O <sub>2</sub>	0 - 5 %	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %
H <sub>2</sub>	0 - 1 %	0 - 5 %	0 - 2 %	0 - 2 %
CO	Trazas	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %
H <sub>2</sub> S	0,5-100 ppm	0 - 1 %	100 - 7000 ppm	0 - 8 %
NH <sub>3</sub>	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación
Orgánicos	5 ppm	Trazas	Trazas	Trazas

Fuente. CARRILLO, Leonor. Microbiología agrícola, 2003

**8.2.1 Reacciones involucradas en la generación de biogás<sup>15</sup>.** La producción de biogás obedece a la siguiente reacción química general.



$$x = 1/8(4c - h - 2o - 3n - 2s)$$

$$y = 1/4(4c - h - 2o + 3n + 3s)$$

<sup>15</sup> PEREZ, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Chile, 2010.

En *el Cuadro 5* se muestran las tres reacciones más comunes de producción de biogás, en función del sustrato.

**Cuadro 5. Productos en la generación de biogás**

<b>Carbohidratos</b>	$C_6 H_{12}O_6 \longrightarrow 3 \cdot CO_2 + 3 \cdot CH_4$
<b>Grasas</b>	$C_{12}H_{24}O_6 + 3 \cdot H_2O \longrightarrow 4,5 \cdot CO_2 + 7,5 \cdot CH_4$
<b>Proteínas</b>	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6 \cdot H_2O \longrightarrow 6,5 \cdot CO_2 + 6,5 \cdot CH_4 + 3 \cdot NH_3 + H_2S$

Fuente. PEREZ, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Chile, 2010.

**8.2.2 Propiedades del biogás.** El componente mayoritario del biogás es el metano, compuesto de alto poder calorífico muy empleado como combustible tanto en aplicaciones industriales como domésticas. Las principales propiedades de metano se muestran en *el Cuadro 6*.

**Cuadro 6. Propiedades del metano**

<b>CARACTERÍSTICAS DEL METANO</b>	
<b>Densidad</b>	1,09 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Solubilidad en agua</b>	Baja
<b>Presión crítica</b>	673,1 psia
<b>Temperatura crítica</b>	82,5 °C
<b>Poder calorífico</b>	4500 a 6500 Kcal/m <sup>3</sup>

Fuente. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

Como me mostró en *el Cuadro 4*, la composición del biogás y por ende sus principales propiedades fisicoquímicas dependen del tipo de sustrato, así como del conjunto de variables relacionadas con la digestión anaerobia. Las principales propiedades fisicoquímicas para un biogás de composición estándar se muestran

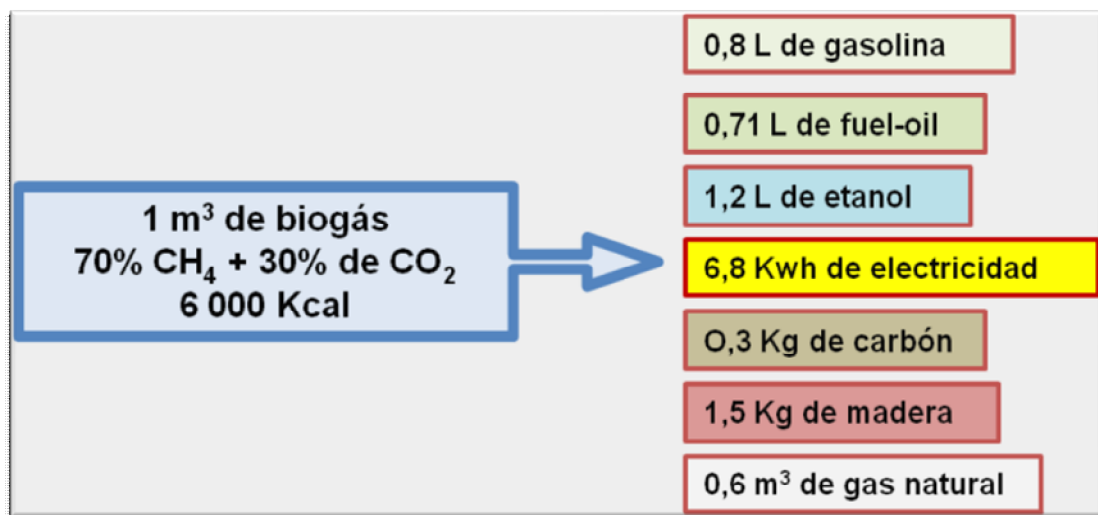
en el Cuadro 7. En la Figura 5 se muestra el equivalente energético del biogás, en relación las fuentes de energía más comunes.

**Cuadro 7. Propiedades de una composición estándar de biogás**

<b>Composición estándar del biogás</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>55 - 70%</b>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>30 - 45%</b>
	<b>Otros elementos</b>	Trazas
<b>Energía contenida</b>	6,0 - 6,5 kWh/m <sup>3</sup>	
<b>Equivalente en petróleo</b>	0,6-0,65 Lpetróleo/m <sup>3</sup> biogás	
<b>Límite de explosión</b>	6 - 12% biogás en el aire	
<b>Temperatura de ignición</b>	650 - 750 °C	
<b>Presión crítica</b>	7589 bar	
<b>Temperatura crítica</b>	-82,5 °C	
<b>Densidad normal</b>	1,2 Kg/m <sup>3</sup>	
<b>Olor</b>	Huevo podrido	
<b>Masa molar</b>	16,043 Kg/kmol	

Fuente. LOPEZ, Erik y RUIZ, Mario. Celdas de combustible a partir de biogás. Tesis UIS, 2008

**Figura. 5. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía**



Fuente. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. El sector del biogás agroindustrial en España. Madrid, 2010

**8.2.3 Efectos de los principales componentes del biogás.** Dependiendo de la composición de los respectivos componentes del biogás, se presentan determinadas consecuencias al ser empleado, en *el Cuadro 8* se presentan las principales consecuencias de los componentes del biogás.

**Cuadro 8. Componentes del biogás y sus principales efectos**

Componente	Concentración	Efectos
<b>CO<sub>2</sub></b>	25 - 50 % vol.	Causa corrosión
		Incrementa el número de metano
		Deteriora las celdas de combustible alcalinas
		Disminuye el poder calorífico
<b>H<sub>2</sub>S</b>	0 - 0,5 % vol.	Inhibición de la catálisis
		Emisión de H <sub>2</sub> S en combustión incompleta
		Emisión de SO <sub>2</sub> a la salida de los quemadores
		Corrosión en equipos y tuberías
<b>NH<sub>3</sub></b>	0 - 0,05 % vol.	Emisión de NO <sub>x</sub>
		Daño de celdas de combustible
<b>Vapor de agua</b>	1 - 5 % vol.	Riesgo de congelar y bloquear tuberías y válvulas
		Daños de instrumentación por condensado
		Corrosión en equipos y tuberías
<b>Polvo</b>	> 5 µm	Bloquea las boquillas y celdas de combustibles
<b>N<sub>2</sub></b>	0 - 5 % vol.	Disminuye el poder calorífico
<b>Siloxanos</b>	0 - 50 mg/m <sup>3</sup>	Actúan como abrasivos, daño en motores

Fuente. DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelica. Biogas from waste and renewable. 2008.

**8.2.3.1 Efectos del CO<sub>2</sub>.** Como se muestra en *el Cuadro 5*, todas las reacciones en las que se produce CH<sub>4</sub>, producen simultáneamente CO<sub>2</sub>, por lo que sólo puede ser controlada su producción de manera parcial, algunos factores relacionados con la concentración del CO<sub>2</sub> en el biogás son:

- La presencia de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos mejoran la calidad del biogás, la cantidad de átomos de carbono presentes en el substrato se relaciona directamente con la concentración de CH<sub>4</sub> en el biogás.
- Altas temperaturas de fermentación implican una menor concentración de CO<sub>2</sub> en el agua y por tanto, una mayor concentración en la fase gaseosa.
- Altas presiones durante el proceso lleva a una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en el agua y por tanto una menor concentración en la mezcla gaseosa.
- La descomposición anaeróbica mejora con el tiempo; el contenido de CH<sub>4</sub> se incrementa cuando el tiempo de residencia se acerca al final, tiempo en el cual el contenido de CO<sub>2</sub> desactiva el proceso de hidrólisis.
- Altos contenidos de líquido en el reactor, implican una alta concentración de CO<sub>2</sub> en el agua y baja concentración del mismo en la fase gaseosa.

**8.2.3.2 Efectos del ácido sulfhídrico, H<sub>2</sub>S.** La concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás depende tanto del proceso de producción como del sustrato utilizado, la concentración de este gas normalmente es baja, pero en algunos casos superar el 0.2% vol. El H<sub>2</sub>S presente en el biogás, reacciona con el agua para producir ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), altamente corrosivo para equipos y tuberías.

Para disminuir la concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás se emplean sistemas de filtro con sustancias como cal viva o apagada, limadura de hierro o ciertos tipos de tierras como: hematites parda (2Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O) o limonita (FeO(OH).nH<sub>2</sub>O).

**8.2.3.3 Efectos de Amoniac, NH<sub>3</sub>.** La concentración del amoniaco en el biogás normalmente es baja (<0,1 mg/m<sup>3</sup>), cuando el sustrato provienen de excrementos avícolas, la concentración de NH<sub>3</sub> puede incrementarse hasta unos 1.5 mg/m<sup>3</sup>. Concentraciones superiores resultan riesgosas para la vida útil de los quemadores o motores en los que se emplee.

**8.2.3.4 Efectos del N<sub>2</sub> y del O<sub>2</sub>.** El nitrógeno y oxígeno en el biogás generalmente se debe a su incorporación en las etapas de ventilación cuyo objetivo es la eliminación del H<sub>2</sub>S presente en el reactor. La consecuencia de estos gases en el biogás es la disminución del poder calorífico de la mezcla; sin embargo, una alta concentración de O<sub>2</sub> contribuye a mejorar la combustión de biogás, mientras que el N<sub>2</sub> se comporta como un gas inerte.

**8.2.3.5 Efectos de los compuestos de sílice.** En los residuos sólidos se encuentran compuestos como las siliconas presentes en sellos, tuberías, etc., los cuales durante la fermentación se transforman en siloxanos. Cuando estos compuestos alcanzan altas temperaturas, se produce su ruptura generando compuestos más estables como SiO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

En la combustión dentro de un motor, los siloxanos se convierten en silicatos y cuarzo microcristalino, que se acumulan haciendo disminuir el volumen de la cámara de combustión y aumentar la relación de compresión y la tendencia a la detonación; además de generar abrasión en el interior del motor.

**8.2.4 Aplicaciones del biogás.** El alto contenido de CH<sub>4</sub> en el biogás, determina que las aplicaciones del mismo sean en el campo energético, tanto en aplicaciones térmicas como eléctricas.

**8.2.4.1 Aplicaciones a nivel industrial.** El biogás de menor pureza es empleado como combustible en equipos comerciales diseñados el gas natural, como estufas, calentadores, lámparas, etc., mientras que el biogás de mayor pureza es empleado en motores de combustión interna, turbinas de gas y celdas de combustible. En *el Cuadro 9* se presenta el consumo de gas para los usos más comunes.

**Cuadro 9. Usos y consumo de biogás**

<b>EQUIPO</b>	<b>CONSUMO m<sup>3</sup>/hora</b>
Estufa de cocina de un quemador	0,15 - 0,20
Fogón para cocinar alimentos	0,30
Lámpara de gas equivalente a una bombilla de 60 W	0,10
Calentadores para cerdos de levante	0,25
Calentadores para cría de pollos	0,15
Motor biogás - diesel	0,42
Producción de 1 kWh de corriente eléctrica con una mezcla biogás diesel	0,70

Fuente. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

**8.2.4.2 Aplicación a nivel rural.**<sup>16</sup> En el sector rural, la aplicación del biogás de gran importancia, se ha avanzado bastante en el diseño de biodigestores de bajo costo de instalación y mantenimiento, así como de fácil utilización, con el fin de proveer energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores.

### **8.3 BIODIGESTORES.**

Los biodigestores son reactores en los que se lleva a cabo de una manera controlada la fermentación o digestión anaerobia de los diferentes sustratos orgánicos, con el fin de generar biogás, biofertilizantes, al tiempo que representan una opción ambiental para el tratamiento de residuos. *El Capítulo 9* está dedicado al estudio de los principales diseños de estos reactores.

---

<sup>16</sup> <http://emison.es/medio-ambiente/AGUAS/biogas/biogas.pdf>

## 9. DISEÑO DE BIODIGESTORES

Básicamente, un biodigestor, es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua; producto de la descomposición se obtiene biogás y un fertilizante orgánico rico en N, P, K, entre otros.

### 9.1 TIPOS DE BIODIGESTORES.

La gama de las tecnologías de biodigestores es muy amplia y abarca desde sistemas rudimentarios hasta sistemas altamente sofisticados, las variables determinantes para la adopción de un sistema particular son: la inversión inicial, el tipo de residuos a tratar y el destino final del biogás. En *el Anexo 3* se puede observar las principales características de los tipos de digestores más comunes.

**9.1.1 Biodigestores tipo continuo.** Este tipo de biodigestores son instalaciones industriales en las que se genera grandes volúmenes de biogás; se diseñan principalmente para el tratamiento de aguas residuales y por lo general son plantas muy grandes, en las se requiere instrumentación para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control.

**9.1.2 Biodigestores tipo batch.**<sup>17</sup> Este tipo de biodigestores son alimentados una sola vez, y se mantienen cerrados durante el tiempo de residencia establecido, la carga inicial del biodigestor involucra, además de los residuos orgánicos a tratar, la presencia de un inculante y en algunos casos, una base para mantener el pH casi neutro.

---

<sup>17</sup> Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

El tiempo de residencia de estos biorreactores varía entre 30 a 180 días, dependiendo del sustrato y de la temperatura del ambiente. Durante este tiempo, la generación de biogás aumenta paulatinamente hasta alcanzar un máximo y finalmente declina, siguiendo la curva de característica del crecimiento bacteriano, mostrada en *la Figura 3*.

Este tipo de digestores es empleado cuando disponibilidad de la materia a procesar es intermitente. Con el fin de garantizar una producción constante de gas, se usa una batería de digestores alimentados a diferentes tiempos. Es el tipo de digestor ideal a nivel de laboratorio para evaluar los parámetros del proceso fermentativo. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> digestor.

**9.1.3 Biodigestores tipo semi batch.** Este tipo de biodigestores son cargados y descargados en forma periódica, generalmente de forma diaria. Es el tipo de biorreactores mas difundidos a nivel mundial, y de mayor variedad; entre los múltiples diseños, se destacan:

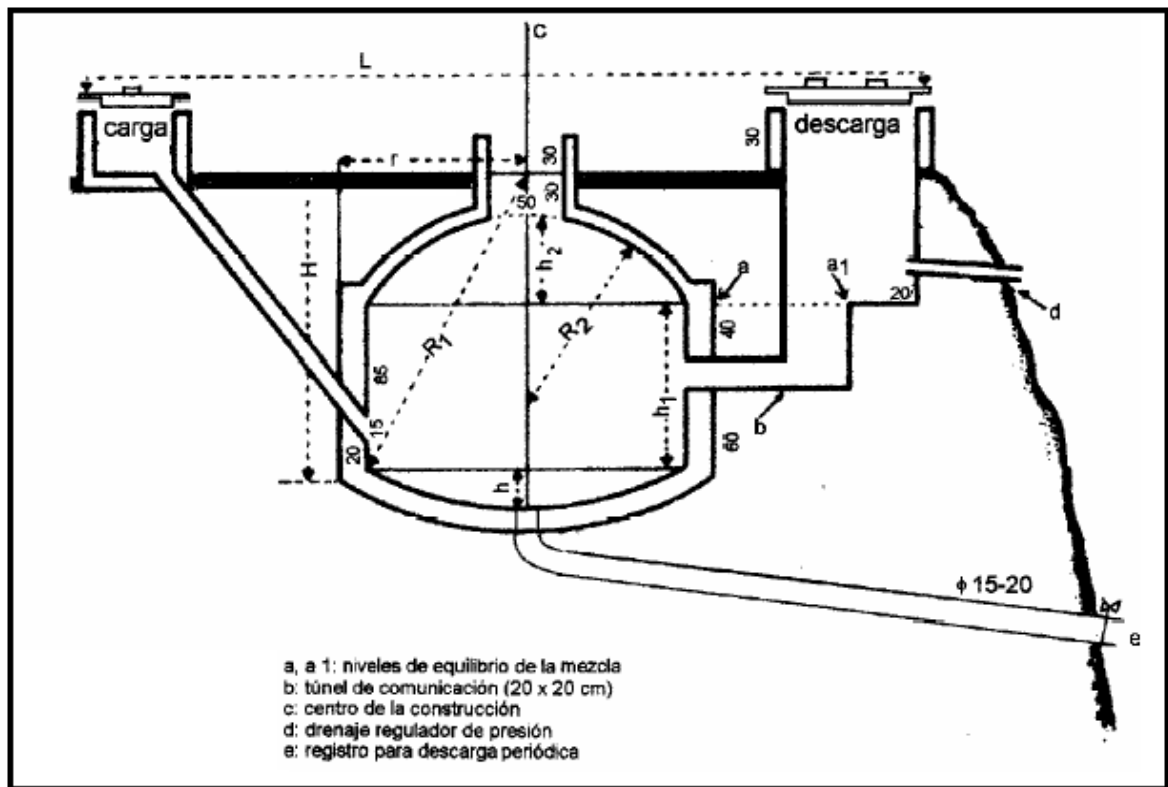
**9.1.3.1 Biodigestor de domo fijo (tipo Chino).** Tienen un diseño básico en cual el biogás es colectado en una campana fija. Se compone de un biodigestor construido en mampostería u hormigón, y un domo fijo e inmóvil, completamente cerrado donde se almacena el biogás. Estos digestores son de una vida útil larga (15 – 20 años), y tiene las siguientes características de diseño:

- No posee partes móviles.
- Sección circular, eje vertical: paredes cilíndricas.
- Achatado: relación altura/ diámetro pequeña.
- Techo y fondo semiesféricos.
- Construcción bajo el nivel del suelo.
- Cámaras de entrada y salida laterales, diametralmente opuestas.

- Tapa removible en la parte superior del domo, perforada con el tubo de salida de gas.

Pueden ser contruidos con capacidades diversas, que depende de la demanda del biogás y fertilizante requerido, así como de los desechos orgánicos disponibles. Es particularmente adaptado a tamaños familiares (6 - 12 m<sup>3</sup> de volumen interno), aunque se encuentran tamaños hasta de (50 - 200 m<sup>3</sup> de volumen interno). *La Figura 6* muestra un esquema general de este tipo de biodigestores.

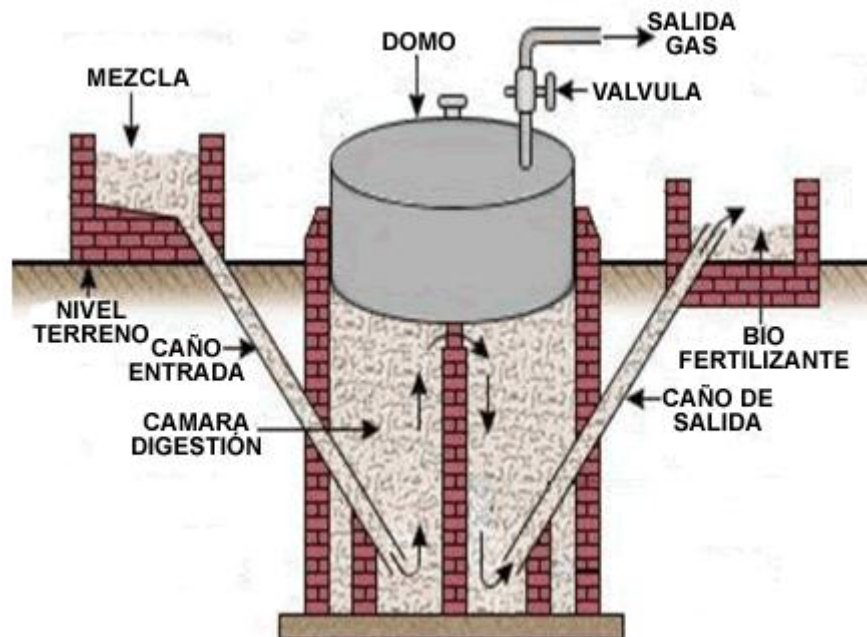
**Figura 6. Biodigestor de domo fijo.**



Fuente. LÓPEZ M, Claudia; LÓPEZ S, Omar. Tesis: Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la universidad veracruzana. México, 2009

**9.1.3.2 Biodigestor de domo Flotante (tipo Hindú).** Se compone de un biodigestor sostenido en mampostería y una campana flotante de acero o polietileno de alta densidad, la cual debe ser resistente contra los rayos UV y la corrosión. El depósito de gas puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, suministrando una presión constante de gas. Su manejo es fácil pero la campana además de tener un costo alto, está expuesta a la intemperie y por lo tanto sujeta a la corrosión requiriendo de un mantenimiento periódico. *La Figura 7 muestra un esquema de este biodigestor.*

**Figura 7. Biodigestor de domo Flotante.**



Fuente. [http://www.oni.esuelas.edu.ar/2004/SAN\\_JUAN/676/otras\\_energias/biogas/biog\\_c3.htm](http://www.oni.esuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/676/otras_energias/biogas/biog_c3.htm)

Estos digestores también son de una vida útil larga (>15 años), y tiene las siguientes características de diseño:

- De fácil funcionamiento y operabilidad.
- Generación de biogás a presión constante.
- Impermeables a fugas de biogás siempre que se realicen las mantenciones adecuadas al dispositivo de almacenamiento
- La cúpula de acero es relativamente costosa y requiere de mantención intensiva.
- La vida útil de la cúpula de acero es relativamente corta y requiere constante mantenimiento, sobretodo en regiones costeras en la que el aire es más corrosivo.

**9.1.3.3 Biodigestores de flujo inducido.** Son digestores similares a los anteriormente descritos, pero difieren en que se les agrega agitación mecánica para generar una mayor área específica de contacto entre el sustrato y las bacterias activas, logrando de esta manera una mayor digestión de la materia orgánica con tiempos de retención cortos (alrededor de 15 días). Las principales características de este tipo de reactor son:

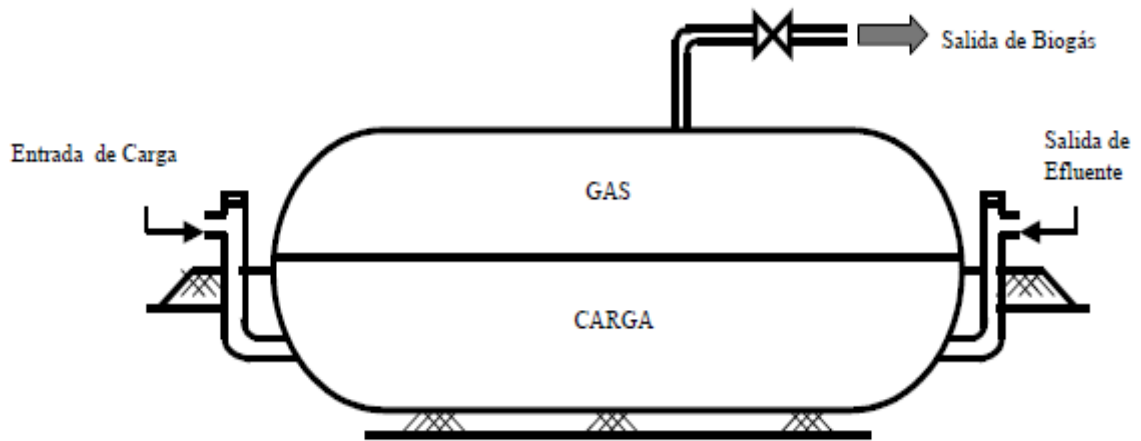
- Se reduce el tiempo de operación.
- Los agitadores demandan un mantenimiento periódico y aumentan los costos de instalación y operación.
- Se evita formación de costras dentro del digestor.
- Se logra la dispersión de materiales inhibitorios.
- Los costos energéticos para la operación de los agitadores pueden ser muy altos.

**9.1.3.4 Biodigestor de estructura flexible.** Está compuesto de una bolsa completamente sellada de plástico, caucho o polietileno.

La parte inferior de la bolsa (Aprox. 75% del volumen) se alimenta con la carga, mientras en la parte superior de la bolsa (Aprox. 25% del volumen) se almacena el

gas. Los tubos de entrada y de salida están sujetos directamente a la pared de la bolsa. La Figura 8 muestra el esquema para este tipo de biodigestor.

**Figura 8. Biodigestor de balón de plástico.**



Fuente. PEREZ, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Chile, 2010.

Estos digestores también son de corta vida útil (Aprox. 5 años), sus principales características de diseño son:

- Bajo costo de instalación y mantenimiento.
- Vida útil corta, es susceptible a daños físicos.
- Fácil de limpiar, mantener y su vaciado.
- Posibilidad de instalación tanto a nivel superficial, como a nivel subterráneo.
- Por la alta impermeabilidad, es factible en lugares con presencia de aguas subterráneas.
- Se obtienen altas temperaturas de digestión en áreas cálidas.
- Baja presión de gas por lo que se requieren bombas de gas.

**9.1.3.5 Biodigestor de tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.** Es un tipo de diseño que ha logrado disminuir hasta un 30 % los costos de instalación con respecto a los prototipos tradicionales.

Se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno en sustitución de la campana móvil o la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales. En *la Figura 9* se muestra un esquema de este tipo de biodigestor; cuyas características principales son:

- Bajo costo de instalación.
- Fácil de reparar.
- Corta vida útil.

**Figura 9. Biodigestor tradicional y cúpula de polietileno.**



Fuente. Biodigestores. Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes. Fundación Hábitat Colombia, 2005.

## **9.2 VARIABLES OPERACIONALES DE UN BIODIGESTOR.**

Entre los factores más importantes para el correcto funcionamiento de un biodigestor, se destacan:

**9.2.1 Método de carga.** La periodicidad con la que se carga el digestor tiene gran incidencia sobre la eficiencia del mismo; cargar un biodigestor a intervalos irregulares puede interrumpir el proceso fermentativo haciendo que el sistema opere de manera ineficiente o se detenga completamente. Muchos digestores son diseñados para ser cargados diariamente, pues con cargas continuas y descargas de material del sistema, las bacterias trabajan eficientemente y se procesan grandes cantidades de residuos.

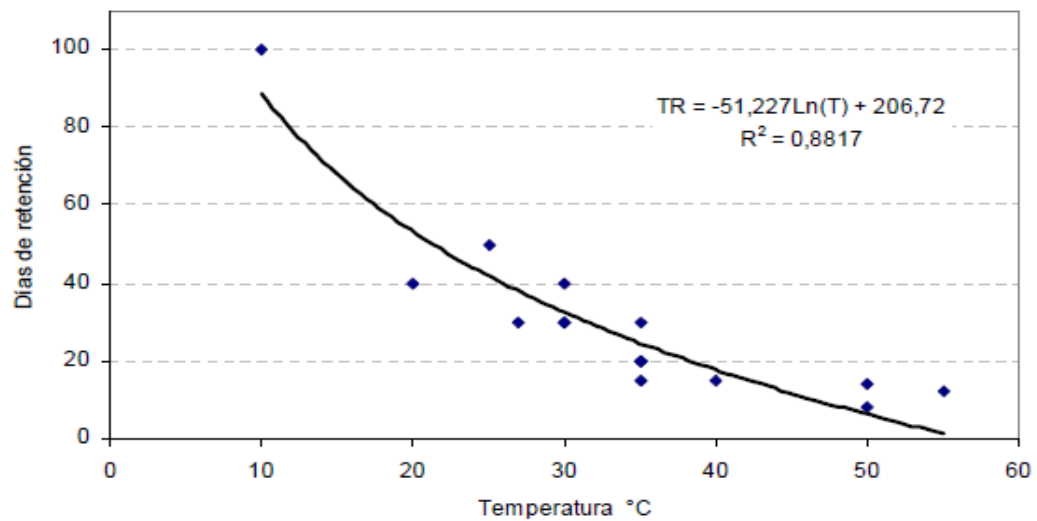
**9.2.2 Proporción excretas/agua.** El digestor se debe cargar con una mezcla estiércol/agua que garantice un porcentaje de sólidos totales inferior al 10%, lo cual normalmente se logra con una mezcla en relación 1:3, aunque en algunos casos se emplean mezclas mas diluidas incluso con relaciones 1:10. La relación estiércol/agua finalmente depende de la cantidad de materia orgánica seca y/o el porcentaje de sólidos totales.

**9.2.3 Temperatura.** La mayoría de los digestores funcionan en rangos de temperaturas mesófilas con una digestión óptima obtenida cerca a los 35°C, ya que estas temperaturas son fácilmente obtenidas de manera libre como una concurrencia entre la temperatura ambiental y la temperatura generada dentro del digestor como producto de la fermentación (proceso exotérmico).

La velocidad de digestión se eleva a temperaturas mayores a 45°C, sin embargo, lograr estas temperaturas requiere la instalación de sistemas de calefacción e instrumentación para el adecuado control de la temperatura, ya que las bacterias son altamente sensibles a pequeñas disminuciones repentinas.

**9.2.4 Tiempo de retención.** Es la duración del proceso de digestión anaerobia, entendido como el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, está relacionado con la temperatura interna del digester, aunque también depende de otros factores la caracterización del sustrato, la relación excretas/agua y la periodicidad de carga. Una aproximación matemática para la relación temperatura-tiempo de retención se muestra en la *Figura 10*.

**Figura 10. Tiempo de retención en función de la temperatura.**



Fuente. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

## 10. PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE UNA VIVIENDA RURAL DE SANTANDER PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

En este capítulo se hace la formulación de una propuesta para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en una vivienda rural promedio del departamento de Santander. El objetivo es generar una solución energética y ambiental para una vivienda rural de recursos económicos limitados. Por facilidades para el acceso, se plantea la propuesta para una vivienda rural ubicada en el municipio de Aratoca, Santander.

### 10.1 CARACTERIZACIÓN DE LA VIVIENDA RURAL.

La vivienda rural sobre la cual se basa esta propuesta, corresponde a una finca de 4 Ha Aprox, cuya unidad familiar está compuesta por 6 personas. La finca se denomina “la arenosa” y está ubicada en la vereda Cantabada del municipio de Aratoca, (Santander), la distancia al casco urbano es de 4 Km Aprox., y la distancia a la capital del departamento es de 73 Km Aprox.

**10.1.1 El Clima<sup>18</sup>.** Los factores climáticos del municipio, de interés para la propuesta a desarrollar son:

- **Temperatura.** La temperatura promedio es de 19° C, presentándose mínimos de 16° C y máximos de 26°.
- **Altura.** La altura sobre el nivel del mar del municipio oscila entre los 500 y los 1200 msnm, se estima que la finca se encuentra a 700 msnm Aprox.
- **Precipitación.** 170 mm promedio mensuales.
- **Humedad relativa.** Entre 60% y 70%

---

<sup>18</sup>[http://aratoca-santander.gov.co/apc-aa-files/38636462386465373638343166383861/PLAN\\_DE\\_DESARROLLO\\_2008\\_2011.pdf](http://aratoca-santander.gov.co/apc-aa-files/38636462386465373638343166383861/PLAN_DE_DESARROLLO_2008_2011.pdf)

**10.1.2 Estructura familiar.** La unidad familiar de la finca objeto de estudio está conformada por 6 personas, (2 niños, 1 adolescente, 2 adultos y 1 adulto mayor). Esta familia deriva su sustento de actividades agrícolas como el cultivo de café, plátano, yuca, fique y caña de azúcar; y la ganadería a pequeña escala, pues cuenta con 3 reses, 10 cerdos, 4 cabros, un lote de conejos que no supera los 20 individuos y un lote de gallinas cercano también a los 20 individuos. Esta breve descripción sirve para hacer un primer acercamiento al tipo de residuos orgánicos que se generan en esta unidad familiar. En la *Figura 11* se presentan algunas fotos representativas de la finca.

**Figura 11. Fotos representativas de la finca objeto de estudio.**



Fuente. La Autora.

La energía eléctrica es suministrada por la Electrificadora de Santander, ESSA a bajo costo, mientras que el combustible para la cocción de alimentos es suministrado en cilindros por parte de la empresa Gases de Santander, Gasan.

**10.1.3 Manejo de los residuos.** El manejo de los residuos generados en la finca se puede dividir así:

- **Residuos alimenticios.** Los provenientes de la corteza de frutas y verduras, son aprovechados como complemento alimenticio para las reses; los provenientes de alimentos ya preparados se emplean como complemento alimenticio para los cerdos.
- **Excretas humanas.** La unidad familiar cuenta con un pozo séptico al cual está conectado únicamente el sanitario, de manera que al mismo solo se alimentan las excretas producidas por la familia. Este pozo séptico fue construido de manera artesanal hace más de 20 años, y desde la fecha no ha recibido ningún tipo de mantenimiento.
- **Excretas de cerdos y cabros.** Este tipo de excretas enterradas junto con capas sucesivas de tierra durante periodos de tiempo que oscilan entre 3 a 6 meses; pasado este tiempo, son desenterrados y mezclados con mas tierra, para ser utilizados como abono en el cultivo de café y caña.
- **Excretas de gallinas y conejos.** Reciben un proceso similar al de las excretas de los cerdos, pero por periodos de tiempo de 1 a 2 meses; después de desenterrados, son utilizados como abono para el jardín.
- **Excretas de reses.** Al igual que los cabros, las reses pasan la mayor parte del tiempo en el potrero, dejando sus excretas allá. Solo cuando están en el corral se les recoge sus excretas, las cuales tiene igual destino que las de los cerdos.
- **Otros residuos.** Cuando se presentan las cosechas de café, los residuos generados en la decerezadora son recolectados y esparcidos sobre el cultivo de café. La caña es empleada normalmente para alimentar a los cerdos, por lo tanto, los residuos de bagazo tienen igual destino que los excrementos del cerdo. Residuos como empaques plásticos, papel y toallas higiénicas, son enterradas lejos de la casa.

Se observa que la producción de residuos es mayoritariamente de origen orgánico, siendo la mayoría excrementos de animales, también se puede ver que de manera empírica se está haciendo un aprovechamiento de la mayoría de los residuos generados; sin embargo, podrían ser aprovechados de mejor manera mediante la implementación de un digestor anaerobio.

## 10.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESÍDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LA VIVIENDA OBJETO DE ESTUDIO.

La observación de los residuos generados en la finca, muestran un gran potencial para la generación de biogás, sin embargo, hasta el momento se adolece de registros que muestren las cantidades promedio de estos residuos, por esta razón, se hará uso de datos teóricos para hacer las respectivas estimaciones. En *el Cuadro 10* se muestra la estimación teórica de la producción de estiércol por especie animal. Ver *Anexo 4*.

**Cuadro 10. Producción diaria de estiércol.**

Productor	Peso Kg	Producción diaria Kg
Cerdo	50	6
Vaca	500	34
Caballo	500	10
Oveja	15	1,5
Ave	1,5	0,1
Humano	50	0,5

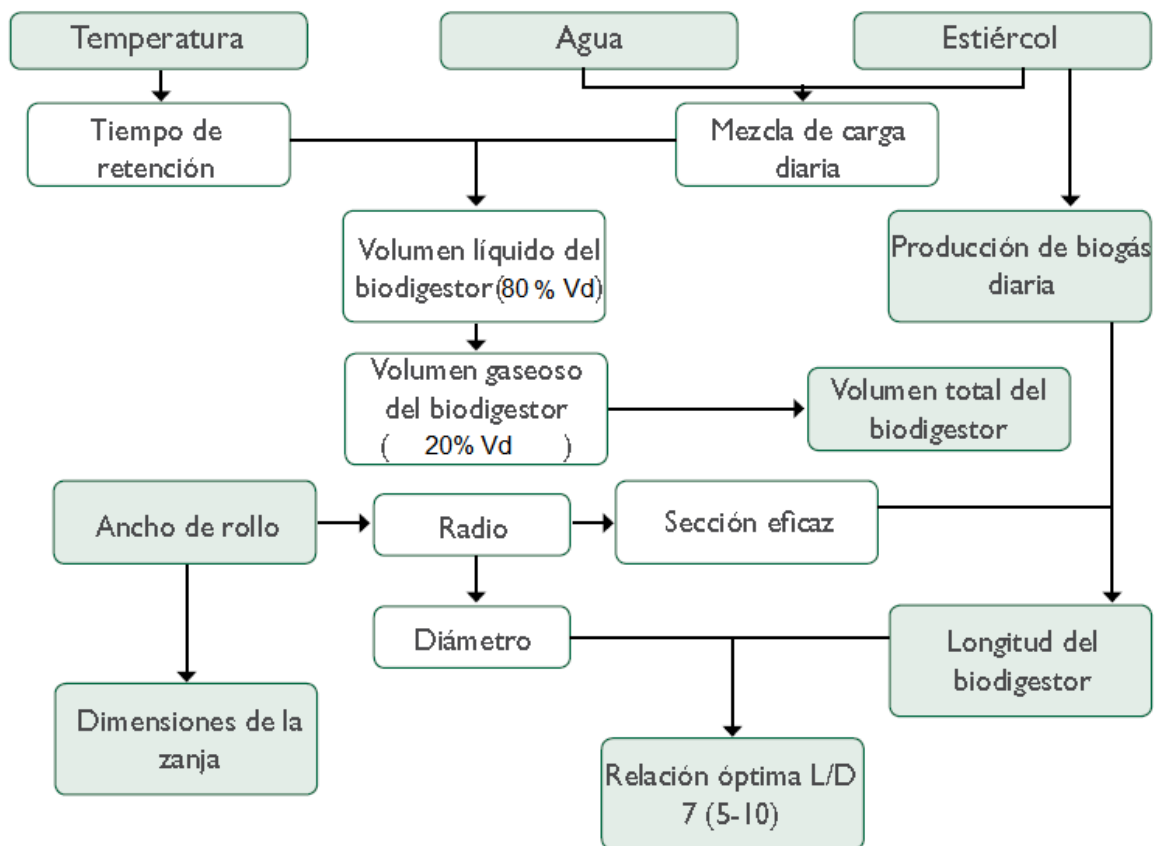
Fuente. El biogás, 1986

Del análisis al manejo de los residuos por parte del personal de la finca, se ve que a los residuos alimenticios se les está dando un mejor aprovechamiento que el que se obtendría en un digestor, por lo tanto, para el diseño del digestor propuesto solo será tenido en cuenta el estiércol producido.

### 10.3 DISEÑO DEL BIODIGESTOR.

Con base en lo expuesto en el *Capítulo 9*, El diseño que mejor se adapta a esta vivienda rural es un biodigestor de estructura flexible, dado que la cara generada de estiércol es bastante baja, y que los requerimientos de biogás para esta finca sería exclusivamente para la cocción de alimentos, pues el suministro de electricidad es bueno y a bajos costos; adicionalmente, este tipo de digestores es de los más económicos y fácil de operar. En *la Figura 12* se presenta el esquema metodológico para obtener el diseño del digestor.

**Figura 12. Esquema metodológico de diseño.**



Fuente. MARTÍ, Jaime. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación, Bolivia, 2008.

Los datos de entrada para el diseño del biodigestor son:

- Cantidad de estiércol diario a procesar: 87, 6 Kg.
- Sólidos totales presentes en el estiércol a procesar: 15,57 Kg.
- Masa total del sustrato: 155,7 Kg.
- Volumen de agua que se debe adicionar al estiércol: 68 L.
- Temperatura promedio del ambiente: 19 °C.

**10.3.1 Estimación de la carga diaria.** La carga diaria se establece como el producto el número de individuos de cada especie, por la producción diaria de estiércol de esa especie. En el *Cuadro 11* muestra la estimación de la cantidad de estiércol generada en la finca, expresada en Kg de estiércol/día.

Para facilitar la estimación, se asumió la producción de estiércol de los cabros, como si fueran ovejas, y la producción de estiércol de conejos, como si fueran gallinas.

**Cuadro 11. Producción de estiércol**

Productor	Producción diaria Kg	# de individuos	Estiércol diario Kg	Corrección	
				%	Kg
Cerdo	6	10	60	90	54
Vaca	34	3	102	25	25,5
Caballo	10	0	0	--	0
Oveja*	1,5	4	6	25	1,5
Ave**	0,1	40	4	90	3,6
Humano	0,5	6	3	100	3
<b>Total Estiércol diario (Kg)</b>			<b>175</b>		<b>87,6</b>

Fuente. La Autora.

\* Equivalente a 4 cabros.

\*\* Equivalente a 20 gallinas y 20 conejos

La corrección aplicada en la columna 4 obedece a la imposibilidad de recolectar todos los estiércoles; se estima que solo se recolecta un 25% del estiércol de las vacas y las ovejas (puesto que pastean libres durante el día), mientras que en el caso de las gallinas, cerdos y conejos se puede recolectar más del 90% (son de corral), en el caso de los humanos, la recolección sería del 100%.

**10.3.1.1 Estimación de la cantidad de sólidos.** La determinación de la cantidad de sólidos disponibles en el estiércol a alimentar es de vital importancia, ya que parte del éxito de la fermentación está en mantener una proporción adecuada de sólidos en el sustrato. El porcentaje de sólidos en los estiércoles, es diferente para cada especie, en el *Cuadro 12* se presenta el porcentaje de sólidos de los sustratos más comunes.

**Cuadro 12. Contenido de sólidos totales en los principales sustratos.**

<b>Material</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>% de Humedad</b>
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina humana	0,4	99,6
Orina de cerdo	0,4	99,6
Orina de vaca	0,6	99,4

Fuente. El biogás, 1986.

En el *Cuadro 13* se presenta la estimación de los sólidos totales disponibles según la cantidad de excretas producidas diariamente; con base en este dato se determina el requerimiento diario de agua.

**Cuadro 13. Sólidos totales diarios.**

<b>Productor</b>	<b>Estiércol diario Kg</b>	<b>Sólidos %</b>	<b>Sólidos Kg</b>
Cerdo	54	18	9,72
Vaca	25,5	17	4,335
Caballo	0	25	0
Oveja*	1,5	25	0,375
Ave**	3,6	15	0,54
Humano	3	20	0,6
<b>Total</b>	<b>87,6</b>	<b>----</b>	<b>15,57</b>

Fuente. La Autora

**10.3.1.2 Estimación de la cantidad de agua que se debe adicionar.** Como criterio para determinar la cantidad de agua a adicionar, se asume que el porcentaje de sólidos no debe superar el 10%.

- Masa total de estiércol = 87,6 Kg.
- Sólidos totales disponibles es en el estiércol = 15,57 Kg (10% de la mezcla).
- Masa total del sustrato= (15,57 Kg/10%)\*100% = 155,7 Kg.
- Masa total de agua requerida = 155,7 Kg – 87,6 Kg = 68,1 Kg (Aprox. 68 litros de agua diarios, equivalentes a 0,068 m<sup>3</sup>).

**10.3.1.3 Carga de mezcla diaria en litros por día (M).** La mezcla diaria es la suma de la masa de agua mas estiércol que se debe adicionar al digestor; es decir: 68,1 Kg agua + 87,6 Kg de estiércol = 155,7 Kg de sustrato a fermentar.

Como este sustrato está compuesto en su mayor parte por agua (90%), se puede asumir que la densidad de la mezcla es la misma del agua, con lo cual se tendría un volumen diario de sustrato de 155,7 Litros; es decir, 0,156 m<sup>3</sup>.

$$M = 87,6 \text{ Kg estiércol} + 68,1 \text{ Kg agua} = 155,7 \text{ Kg}, \approx \mathbf{155,7 \text{ Litros}} \approx 0,156 \text{ m}^3$$

**10.3.2 Tiempo de retención en días (TR).** El tiempo de retención es depende principalmente de la temperatura ambiental promedio y del tipo de sustrato, una correlación empleada para el cálculo de este parámetro es la presentada en *la Figura 10*. Teniendo en cuenta que la temperatura ambiental promedio de la finca objeto de estudio es de 19 °C, se obtiene un tiempo de retención igual a:

$$TR = - 51,227 * \ln (T^{\circ}C) + 206,72$$

$$TR = - 51,227 * \ln (19) + 206,72 = 55,88 \text{ días} \approx \mathbf{56 \text{ días}}$$

**10.3.3 Volumen del digestor (V<sub>T</sub>).** Es igual al producto de la mezcla diaria por el tiempo de retención, se aplica un factor de seguridad del 20% para proporcionar el volumen del gas a contener.

$$V_T = M * TR * 1,2 = (0,156 \text{ m}^3/\text{día} * 56 \text{ días}) * 1,2 = 10,48 \text{ m}^3 \approx 10,5 \text{ m}^3$$

Este volumen corresponde al volumen de la fase líquida (80%) más el volumen para la fase gaseosa (20%).

$$\text{Volumen fase líquida} = V_L = V_d * 0,8 = 10,5 \text{ m}^3 * 0,8 = 8,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen fase gaseosa} = V_G = V_d * 0,2 = 10,5 \text{ m}^3 * 0,2 = 2,1 \text{ m}^3$$

**10.3.4 Estimación del volumen de biogás a producir.** El volumen de biogás producido por el estiércol, varía de acuerdo con la especie. En *el Anexo 5* se presenta una estimación de potencial de biogás a producir por el estiércol de cada especie. En *el Cuadro 14* se presenta la estimación del biogás a producir en la finca objeto de estudio.

**Cuadro 14. Potencial de generación de biogás a partir de los estiércoles disponibles**

Productor	Estiércol diario Kg	Sólidos %	Sólidos Kg	Biogás (m <sup>3</sup> /Kg sólidos)	Biogás (m <sup>3</sup> /día)
Cerdo	54	18	9,72	0,35	3,402
Vaca	25,5	17	4,335	0,25	1,08375
Caballo	0	25	0	0,25	0
Oveja*	1,5	25	0,375	0,2	0,075
Ave**	3,6	15	0,54	0,4	0,216
Humano	3	20	0,6	0,3	0,18
<b>Total</b>	<b>87,6</b>	<b>---</b>	<b>15,57</b>	<b>---</b>	<b>4,96</b>

Fuente. La Autora

**10.3.5 Dimensionamiento de biodigestor.** Como se estableció con anterioridad, el modelo de digestor que más se ajusta a las necesidades de la finca objeto de estudio y al presupuesto de la misma es el modelo de estructura flexible o balón de plástico, el cual geométricamente es un cilindro, con una relación de entre radio y longitud entre 10 y 20 (óptimo 14).<sup>19</sup>

$$\text{Volumen del cilindro } V_c = \pi * L * R^2 = 10,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Área del cilindro } A_c = \pi * R^2$$

$$\text{Relación } L/R = 14$$

Aplicando la relación  $L/r = 14$ , se transforma, la expresión del volumen quedando solo en función del radio, las dimensiones son: ( $L = 8,7$  m y  $R = 0,62$  m).

<sup>19</sup> MARTÍ, Jaime. Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación. GTZ – Energía. Bolivia, 2008.

$$\begin{aligned} \text{Volumen del cilindro } V_c &= 14 \cdot \pi \cdot R^3 = 10,5 \text{ m}^3 \\ R &= (10,5/14 \cdot \pi)^{1/3} = 0,62 \text{ m} \\ L &= 14 \cdot R = 8,68 \text{ m} \approx 8,7 \text{ m} \end{aligned}$$

Estos dos parámetros permiten obtener un biodigestor con un volumen de 10,5 m<sup>3</sup> y un área transversal de 1,21 m<sup>2</sup>.

- **Tanque de mezcla.** El tanque de mezcla, puede ser también de forma cilíndrica, y debe tener una capacidad mínima equivalente al volumen de la mezcla de un día, más un margen mínimo de un 25% para facilitar la agitación y proporcionar una buena mezcla. El tanque puede ser plástico o metálico y la relación L/r puede ser de 2.

$$\begin{aligned} \text{Volumen diario} &= 0,156 \text{ m}^3 \\ \text{Volumen requerido del tanque de mezcla} &= 0,156 \text{ m}^3 \cdot 1,25 = 0,195 \text{ m}^3 \approx 200 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen del cilindro } V_m &= 2 \cdot \pi \cdot r^3 = 0,195 \text{ m}^3 \\ r &= (0,195/2 \cdot \pi)^{1/3} = 0,31 \text{ m} \approx 30 \text{ cm} \\ l &= 2 \cdot r = 0,62 \text{ m} \approx 60 \text{ cm} \end{aligned}$$

- **Reservorio de biogás.** Es el tanque para el almacenaje de biogás y sirve para aumentar la presión en caso de que ésta descienda; debe estar ubicado cerca del cuarto de la cocina, pero aislado del fuego. Se construye con el mismo material del digestor, con un volumen aproximado de 1 m<sup>3</sup>, y una relación L/2 igual a 2,5. Las dimensiones son: (L=1,26 m y R= 0,5 m).

$$\begin{aligned} \text{Volumen reservorio } V_r &= 2,5 \cdot \pi \cdot r^3 = 1 \text{ m}^3 \\ r &= (1/2,5 \cdot \pi)^{1/3} = 0,503 \text{ m} \approx 50 \text{ cm} \\ l &= 2,5 \cdot r = 1,257 \text{ m} \approx 126 \text{ cm} \end{aligned}$$

**10.3.6 Ubicación del digestor.** Conocidas las dimensiones, del cuerpo del digestor, se debe establecer la ubicación dentro de la finca, la cual debe ser lo suficientemente alejada de la vivienda para evitar accidentes y malos olores en la preparación de la mezcla, pero lo suficientemente cerca para evitar largos tramos de tubería, que además de incrementar los costos, significan una disminución de la presión del biogás.

Se debe decidir si el biodigestor va a estar sobre la superficie del terreno o enterrado, para este caso particular, se establece que debe estar enterrado, básicamente por dos razones: la primera es por la seguridad, dado que en la familia objeto de estudio hay dos niños que podrían entrar en peligro al interactuar con el digestor; la segunda razón es de tipo técnico, pues dado que la temperatura promedio es relativamente baja ( $19^{\circ}\text{C}$ ), con mínimos hasta de  $16^{\circ}\text{C}$ , se requiere mantener el digestor aislado térmicamente, y mantenerlo enterrado es la forma más fácil y económica de lograr este propósito.

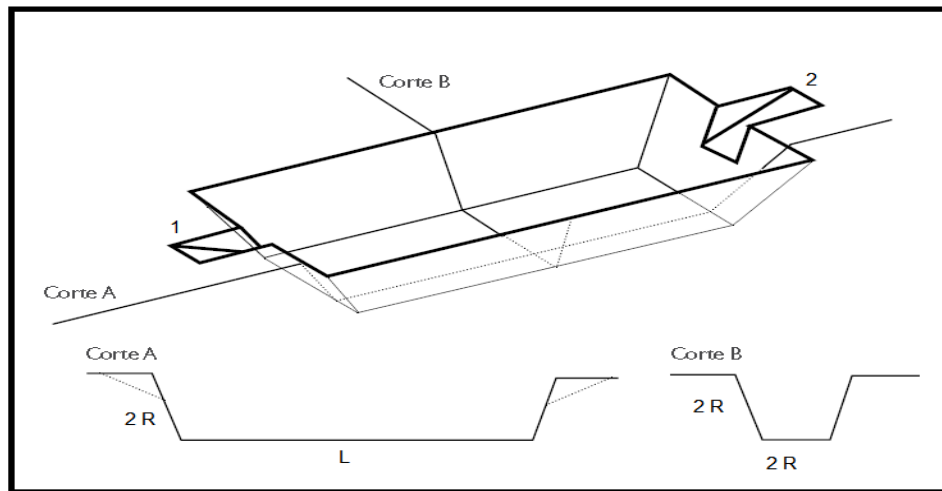
Como ya se conocen las dimensiones del digestor y se decidió que se va a mantener enterrado, se debe proceder a construir la zanja en la cual se va a mantener el digestor; para esto se debe tener en cuenta que la zanja sea totalmente horizontal, sin ningún tipo de pendiente, debe tener una profundidad y una longitud suficiente para albergar el digestor; esto es:

- Profundidad mínima =  $2 \cdot R = 2 \cdot 0,62 \text{ m} = 1,24 \text{ m}$
- Longitud mínima =  $L = 8,7 \text{ m}$

La zanja debe ser escavada en forma de V, para evitar derrumbamiento de las paredes, también se debe contar con dos canales de  $45^{\circ}$  a cada extremo, para hacer la conexión de entrada de sustrato y de salida del efluente. *La Figura 13* muestra el esquema de una zanja para instalación de un biodigestor. Para evitar interferencias tanto con las lluvias como con la incidencia de los rayos solares, es

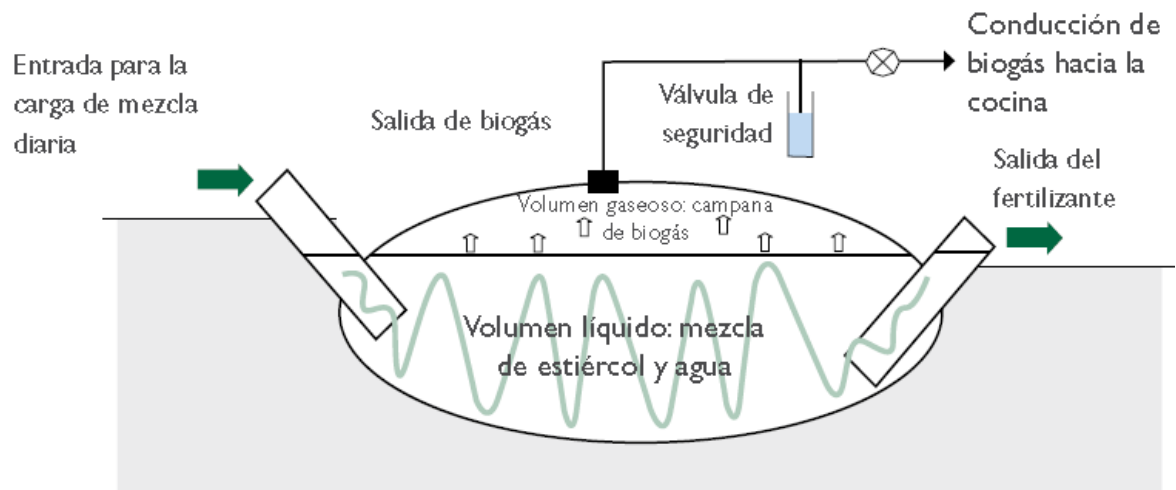
recomendable techar la zanja del digestor, esto se puede lograr de manera fácil mediante la instalación de láminas de eternit. En la *Figura 14* se presenta un esquema del biodigestor propuesto.

**Figura 13. Esquema de la zanja.**



Fuente. MARTÍ, Jaime. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación, Bolivia, 2008.

**Figura 14. Esquema básico del biodigestor.**



Fuente. MARTÍ, Jaime. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación, Bolivia, 2008.

**10.3.7 Consideraciones adicionales.** Se debe tener en cuenta dos temas directamente relacionados con la producción de biogás a partir de la fermentación de estiércoles, la primera es la aplicación de un valioso subproducto denominado biol (biofertilizante líquido), y la segunda es el cuidado especial que implica emplear los excrementos humanos como materia prima para el digestor.

**10.3.7.1 Producción de fertilizante.** Una vez digerida la carga de estiércol y agua queda como subproducto un líquido ya digerido denominado biol, biosol o simplemente biofertilizante. Este fertilizante presenta un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio entorno al 1% y cerca de un 85% de materia orgánica, con un pH cercano a 7.5. Lo cual lo hace valioso para el mejoramiento de los cultivos. Una vez estabilizado el proceso de fermentación, la producción tanto de biogás, como de biol se hacen relativamente constantes, por tanto, se debe contar con un tanque de almacenamiento de estos efluentes para su posterior uso.

Entre los principales usos que se le pueden dar a estos biofertilizantes, se destacan.

- Para riego de los surcos recién arados, previo a realizarse la siembra.
- Acondicionamiento de las semillas o granos previo a la siembra; se puede preparar una mezcla agua/biol en relación 1:1, e introducir las semillas durante 4 a 5 horas previo a la siembra.
- Para plantas en etapa de crecimiento, se puede emplear el biol como fertilizante foliar, rociándolas con una mezcla agua/biol en proporción 4:1.
- Si el digestor está conectado a una letrina, se debe evitar su aplicación sobre los frutos o sobre la raíz en el caso de los tubérculos, ya que existe un alto riesgo de contaminarlos con coliformes fecales provenientes del excremento humano.

**10.3.7.2 Consideraciones adicionales en el caso de trabajar con heces humanas.** El trabajo con heces humanas demanda un cuidado especial, ya que éstas contienen coliformes, que de ser ingeridos pueden desencadenar graves problemas para la salud humana. Adicionalmente a las razones higiénicas, se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Es importante garantizar que al biodigestor sólo llegue el desagüe del sanitario y no el del lavamanos y la ducha, ya que éstos contienen jabones y detergentes que pueden causar la muerte de las bacterias metanogénicas del interior del biodigestor. La higiene de los baños debe ser con agua, cuando por fuerza mayor se deba usar detergentes o desinfectantes, se debe garantizar el desvío de estas aguas.
- La mayoría de sanitarios emplean un volumen de 5 L para arrastrar 400 g de heces generando una mezcla muy diluida para ser alimentada al digestor (1,5% sólidos Aprox.); por tanto, se debe disminuir el volumen de agua en la descarga, lo cual se logra introduciendo una botella de agua de 2 L en el tanque del sanitario (2,5% sólidos Aprox.).

**10.3.8 Estimación de los costos.** Una vez estimadas las dimensiones tanto del digestor, como de la zanja y del tanque de mezcla, se debe efectuar el digestor, para lo cual se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El polietileno tubular se consigue en rollos de 50 metros, con un ancho de rollo que varía normalmente entre (1, 1.25, 1.50, 1.75 y 2) metros. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico. Por tanto, para el caso de estudio, se debe conseguir  $\frac{1}{4}$  de rollo de polietileno tubular de 2 m de ancho (radio aproximado de 0,64 m; se requiere 0,62 m).
- A cada uno de los extremos de digestor, se debe adaptar un tubo de PVC de 6" de diámetro, para alimentar la mezcla, y para retirar el efluente final; la longitud de estos tubos puede ser entre 0,5 y 1 m

- Aproximadamente a la mitad de la longitud del digestor, se debe adaptar una manguera o tubo de PVC de ½" de diámetro, por el cual se recoge el biogás generado; esta tubería debe contar con una válvula de seguridad para controlar el flujo del gas y la presión del mismo dentro del digestor.
- Es importante adicionar una trampa de agua para el biogás a la salida del digestor, cuyo objetivo es proveer una salida segura del biogás para los casos en que no se esté consumiendo el gas y así evitar sobrepresión en el digestor.
- Es posible que se requiera hacer una adaptación a la estufa que actualmente funciona con gas propano, esta adaptación tiene un costo mínimo. El *Cuadro 15* resume la estimación de los costos de instalación.

**Cuadro 15. Estimación de costos para el digestor propuesto.**

	<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio<sup>20</sup> \$</b>
<b>Conducción de gas</b>	Tubería de PVC 1/2"	± 25 m	25.000
	Llaves de bola de plástico 1/2"	4	20.000
	Adaptador de borde plástico	2	4.000
	Codos PVC 1/2"	4	10.000
	Niple PVC 1/2"	2	6.000
	Te PVC 1/2"	4	4.000
	Teflón	2	4.000
<b>Cocina</b>	Codo metálico 1/2"	2	6.000
	Tubos metálicos 1/2", 12 cm	2	5.000
	Tubos metálicos 1/2", 7 cm	2	5.000
<b>Biodigestor</b>	Tubería PVC 6"	2	20.000
	Liga de neumático	60 m	20.000
	Polietileno tubular de 300 µm y 2 m de ancho	12,5 m	100.000
	Carpa solar de 1,25 m de ancho	10 m	50.000
Mano de obra			300.000
Imprevistos		20%	115.800
<b>Total</b>			<b>694.800</b>

Fuente. La Autora

<sup>20</sup> Cotización verbal con ferretería local

Los precios fueron obtenidos mediante cotización verbal en una ferretería local, el ítem de mano de obra podría reducirse a \$0,0 si el mismo habitante de la finca efectúa el trabajo, por lo que la estimación de costos se podría reducir aproximadamente a unos \$400.000.

Considerando que el consumo de gas actual en la finca es de 2 cilindros de 40 libras cada 3 meses y que el precio por cilindro es de \$44.000 fuera de transporte, se puede aproximar un costo mensual de \$30.000 por concepto de gas; es decir, el costo del proyecto se recupera con el ahorro producido al dejar de comprar el gas de cilindro durante 24 meses. Dado que la vida útil de este tipo de digestores es de aproximadamente 5 años (60 meses), se lograría un ahorro total de \$1'080.000 solo por la utilización del biogás para la cocción de alimentos.

- No se consideró el empleo del biogás para la generación de electricidad, dado que este servicio no presenta ninguna restricción y el costo es bastante bajo, lo cual hace que no se justifique una inversión grande en la compra de un generador a gas.
- Para establecer el ahorro producido durante la vida útil del proyecto no se cuantificaron los beneficios producidos por la producción de biol, ya que los habitantes de la finca manifestaron que no acostumbran a comprar fertilizantes, luego no hay un patrón de comparación.

## 11. CONCLUSIONES

- Existe una amplia variedad de desarrollos tecnológicos relacionados con el aprovechamiento de los residuos sólidos para la producción de biogás y biofertilizantes; sin embargo, en la práctica se evidencia un distanciamiento entre estos desarrollos y las comunidades a las cuales deberían estar dirigidos.
- Las principales variables relacionadas con la eficiencia de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos son: el contenido de sólidos totales del sustrato, el pH y la temperatura del medio; estos factores determinan el tiempo de retención del sustrato en el biodigestor y el volumen de biogás a obtener.
- Se estableció que de la gran variedad de digestores disponibles, el más adecuado para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en viviendas rurales de escasos recursos, es el biodigestor de estructura flexible o balón de polietileno, principalmente por la facilidad de su diseño, instalación y mantenimiento.
- Del acercamiento a la vivienda rural objeto de este estudio, se generó el diseño de un digestor de estructura flexible, de 10,5 m<sup>3</sup>; se estimó que el costo de fabricación e instalación es aproximadamente \$700.000. Dinero que equivale al costo de adquisición de gas propano para 24 meses. Se estimó un ahorro de \$1'080.000, como consecuencia de no tener la necesidad de adquirir el cilindro de gas mensual durante la vida útil del digestor (5 años Aprox.).
- La propuesta presentada para esta vivienda rural, podría ser extendida a numerosas familias rurales de país, pero se requiere la integración del conocimiento representado en la academia, de voluntad política representada en los gobernantes municipales y cultura medio ambiental de parte de la comunidad.

## 12. RECOMENDACIONES

- Impulsar campañas educativas a los campesinos de la región, con el fin de mostrarles el enorme potencial energético representado en la mayoría de los residuos generados y las técnicas desarrolladas para su aprovechamiento.
- Fortalecer los nexos entre la academia y la comunidad, con el fin de desarrollar o adaptar tecnologías para la solución de problemas cotidianos, como lo son el manejo de los residuos sólidos, la escasez de fuentes convencionales de energía, el cambio climático, entre muchos otros.
- Implementar el biodigestor a escala de planta piloto, con el fin de medir las variables de operación tendientes a lograr la optimización del proceso de biodigestión.
- Elaborar y distribuir un material didáctico a los habitantes de viviendas rurales, con el fin de explicar la forma de aprovechar sus residuos y excretas para la producción de biogás y biofertilizante.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

ABT RENEWABLES, Plantas de Biogás para el reciclaje de Residuos, España, 2010.

ARTI (APPROPRIATE RURAL TECHNOLOGY INSTITUTE), ARTI Biogas Plant: A compact digester for producing biogas from food waste, Maharashtra (India), 2010.

CESTA, Manual para hacer composta aerobia. El salvador, 2006, 21p.

CAS (CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER), En: [www.cas.gov.co](http://www.cas.gov.co), Bucaramanga, 2010.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelica. Biogas from waste and renewable. 2008.

ECOSALVIA, El compost y los abonos orgánicos, Comunidad Ecosalvia, 2010.

ESCUADERO, A. Metano en residuos domésticos, II simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Universidad del Norte, Barranquilla, 2009, 22p.

GUEVARA, Antonio. Fundamentos Básicos para el diseño de Biodigestores anaeróbicos rurales. Lima, 1996, 80p.

GOBERNACIÓN DE SANTANDER, En: [www.santander.gov.co](http://www.santander.gov.co),

ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 5167 de 2004. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Bogotá, D.C., 2004.

INFOJARDIN, ¿Cómo obtener gas metano con estiércol de vaca?, Ciudad de México, 2010.

INIA (INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGRARIA). Preparación y uso del compost, 1ra edición, Lima, 2008, 11p.

JARAMILLO, Gladys; ZAPATA, Liliana. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Monografía de especialización en gestión ambiental, Universidad de Antioquia, 2008.

LÓPEZ M, Claudia; LÓPEZ S, Omar. Tesis: Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la universidad veracruzana. México, 2009, 75p.

MINISTERIO DE AGRUCULTURA, políticas y programas misionales, Biocombustibles, 2008.

<http://www.minagricultura.gov.co/02componentes/05biocombustible.aspx>

OROZCO, Oscar. ¿Cómo realizar una pequeña cocina de biogás?, Barcelona, 2005, 6p.

RESTREPO, J. Abonos orgánicos fermentados. Experiencias de agricultores en Centro América y Brasil. OIT-CEDECO. Brasil, 1996.

RODRIGUEZ, Teresa. Biología de las lombrices de tierra. En: Técnicas de manejo para la producción de humus. España, 2003.

RUIZ, H A. Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido, En: Revista mexicana de Ingeniería Química, vol. 6, N°1, (2007), 33-40 p.

SZTERN, Daniel y PRAVIA, Miguel. Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos. Uruguay, 1999.

TECNOCENCIA. Especial residuos - Disposición y manejo, 2002.  
<http://www.tecnociencia.es/especiales/residuos/>.

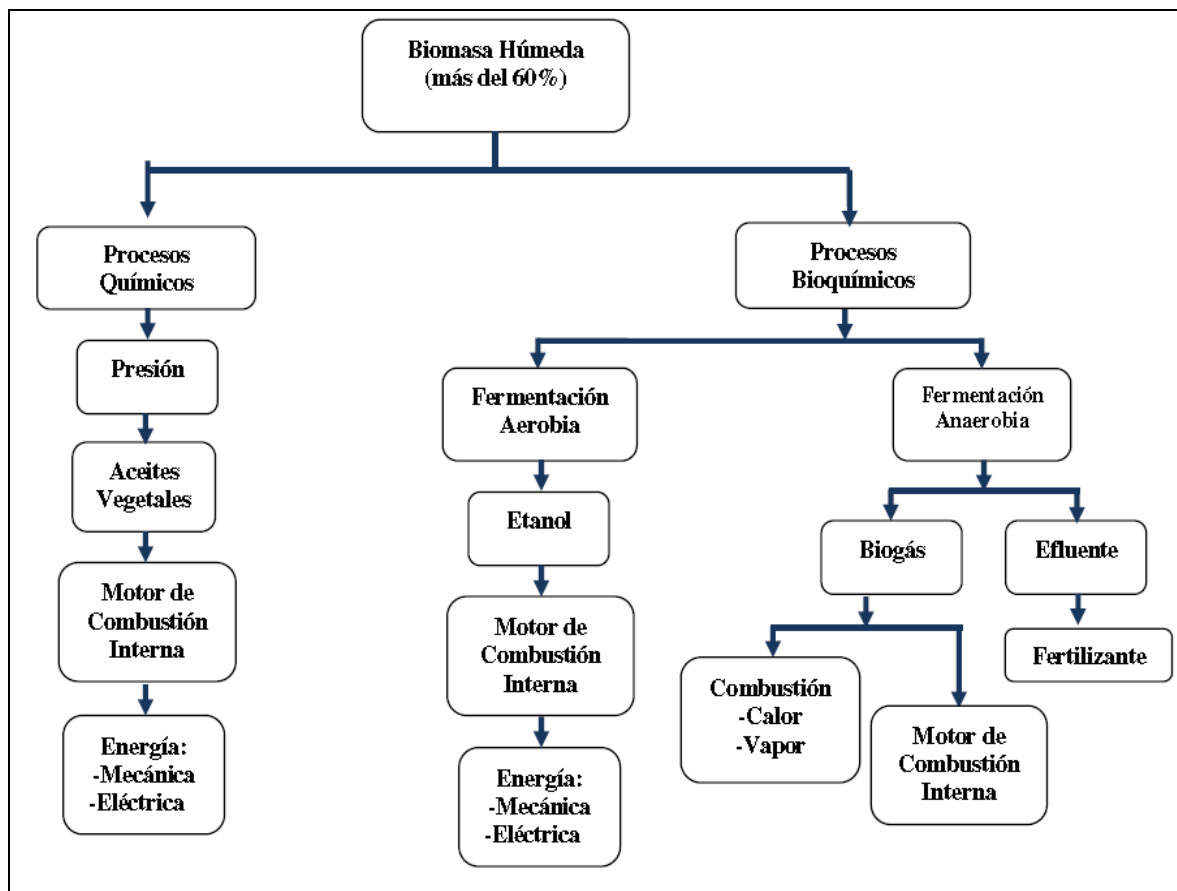
TODOPRODUCTIVIDAD, Cómo construir una planta de biogás compacta para uso doméstico, 2010.

TORRES, Pedro. Biorreactor estricto Anaerobio para producción de biogás y abono biológico genérico y formulado. Parte 1. Cundinamarca, Colombia, 2006.

UPME. Documento ANC-0603-19-01: Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. Versión 01. ICONTEC–AENE. Bogotá, Marzo de 2003.

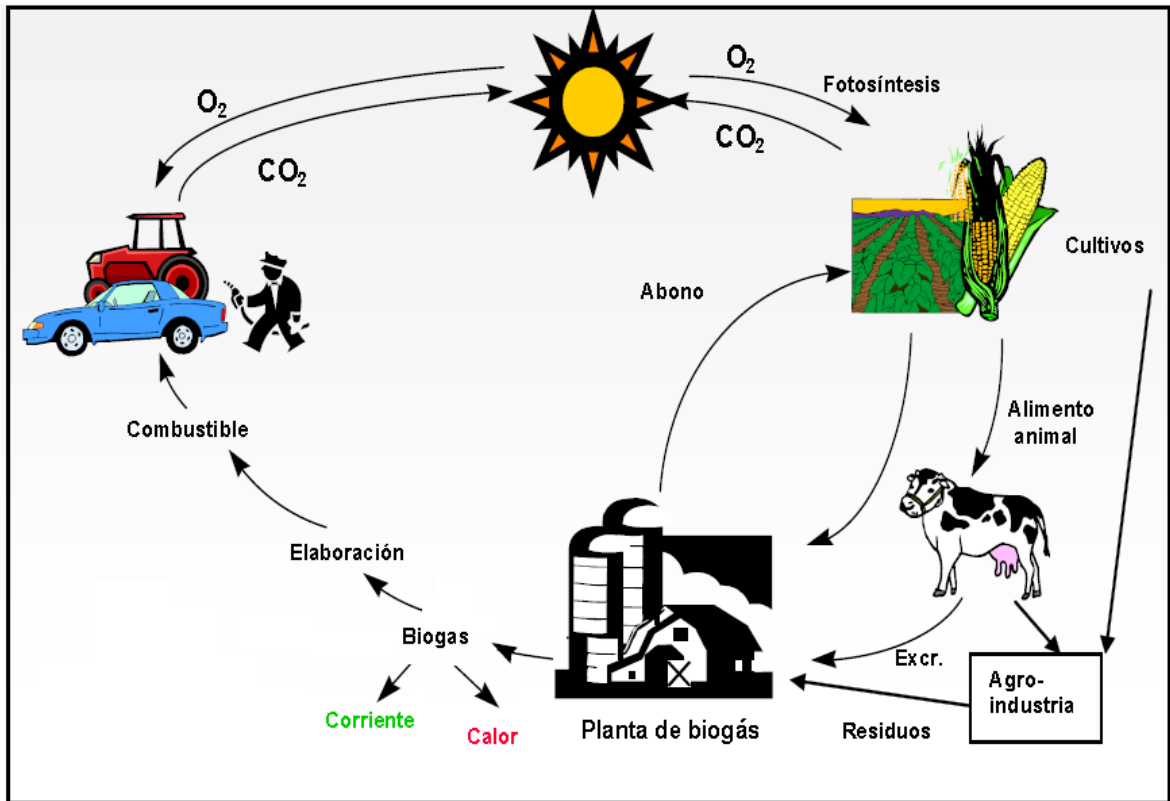
## ANEXOS

### Anexo 1. Procesos y productos con biomasa húmeda.



Fuente. LÓPEZ M, Claudia; LÓPEZ S, Omar. Tesis: Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la universidad

Anexo 2. Esquema del ciclo de la materia, con la generación de energía a partir del biogás



Fuente. <http://ebookbrowse.com/info-plantas-biogas-esp-pdf-d45214257>

### Anexo 3. Resumen de características de algunos tipos de biodigestores.

	TIPOS DE BIODIGESTORES						
	Chino	Indio	Estructura flexible	Flotante	Tradicional con cúpula de PE	Alta velocidad	Instalaciones Industriales
<b>Aislamiento térmico</b>	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Medio - Alto	Según planta
<b>Requerimiento de espacio</b>	Bajo	Bajo	Alto	Alto, y requiere cuerpo de agua	Bajo	Bajo	Según planta
<b>Costo de inversión</b>	Bajo - Medio	Mayor que digestor tipo Chino (por cúpula flotante)	Bajo	Bajo	30% menor que el chino	Según tipo de planta y equipo de agitación. Bajo - Medio	Alto
<b>Vida útil (años)</b>	≥ 20	≥ 15 (5 en zonas costeras tropicales)	2 a 5	2 a 5	Digestor ≥ 20 Cúpula ≈ 5	Digestor ≥ 20 Agitador ≈ 10	≥ 20 (excepto equipos auxiliares)
<b>Mantenimiento</b>	Bajo	Alta (cúpula móvil)	Bajo	Bajo	Bajo	Baja - Media Según tipo de planta	Alta (equipos auxiliares)

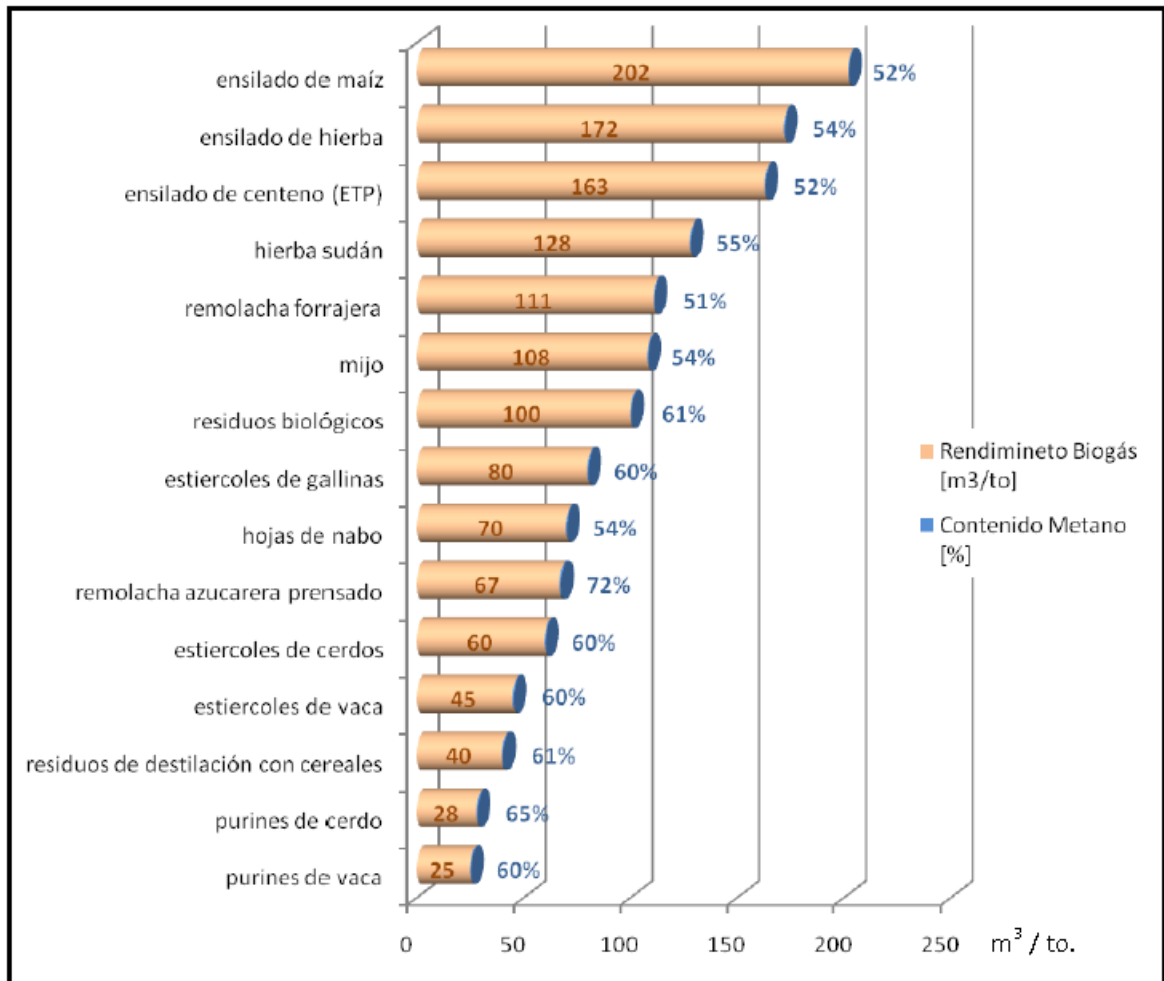
Fuente. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

#### Anexo 4. Valores y características del estiércol de algunos animales

Clase de animal	% por peso vivo:		% del material de digestión		Relación C/N	P - Producción de biogás (m <sup>3</sup> de gas/1 kg SO)
	PE - Estiércol	PO - Orina	% EST Sólidos	% SO Sólidos orgánicos		
Vacunos	5	4	15 - 16	13	20	0,25
Cerdos	2	3	16	12	13	0,35
Caprinos, ovejas	3	1,5	30	20	30	0,2
Caballos	5	4	25	15	20	0,25
Avícolas, gallinas	4,5	4,5	25	17	5 - 8	0,4
Humanos	1	2	20	15	8	0,3

Fuente. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. ICONTEC–AENE. Bogotá, 2003.

**Anexo 5. Potencial de producción de biogás de algunos residuos comunes.**



Fuente. <http://ebookbrowse.com/info-plantas-biogas-esp-pdf-d45214257>

