



**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL Y DE ALIMENTOS.**

**PLAN PILOTO DE BIODIGESTORES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS HECES DE PORCINO OBTENIENDO BIOGÁS Y BIOFERTILIZANTE.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL Y DE ALIMENTOS.**

**PROFESOR GUÍA: ING. LUCIA I. TOLEDO R.**

**JUAN PABLO FLORES JARAMILLO**

**2010**

## RESUMEN

El presente trabajo pretende aprovechar los recursos inherentes en el estiércol porcino como son el biogás y el biofertilizante, con el propósito de contrarrestar la contaminación y generar energía mediante un recurso renovable.

El plan piloto es el diseño de un biodigestor para la hacienda Terranostra ubicada en la provincia de Napo, ciudad del Tena, en el anejo Cristal, vía a Yuralpa. Para una explotación porcina de 80 cerdos de 50 kg.

La construcción del prototipo se realizó en el Valle de los Chillos, Cantón Quito, provincia de Pichincha, donde se evaluó 4 cerdos de 50 kg. de 4 meses de edad, para la recolección del estiércol y su posterior utilización en el ciclo de biodigestión.

La duración total de la tesis ha sido aproximadamente de 10 meses. La cual se dividió en 6 capítulos enfocados en trabajos de investigación, análisis y evaluación, diseño y dimensionamiento, más un capítulo de introducción.

El capítulo 2, es la recopilación de información, legislación ambiental, la contaminación que producen las explotaciones porcinas y los distintos tipos de tratamientos de aguas.

El capítulo 3, describe las diferentes alternativas para el diseño del biodigestor y el método de selección de la mejor. Indica también los factores y volúmenes necesarios para el diseño.

El cuarto capítulo, explica el dimensionamiento de las distintas partes del biodigestor detallando cada operación.

El capítulo 5, se indican los resultados obtenidos teóricamente y en la práctica con la construcción del prototipo y su alimentación (ciclo de 30 días) utilizando el estiércol de 4 cerdos de 50 kg. Una posterior discusión finaliza éste capítulo.

El capítulo 6, indica en resumen los costos que se recurrió para esta investigación, detallando los costos del prototipo y los costos que significarían la construcción del biodigestor del proyecto, considerando un flujo de caja a 5 años.

Por último el capítulo 7, las conclusiones indican lo obtenido en la investigación; las recomendaciones están basadas en cómo mejorar o continuar con algunas dudas y posibles investigaciones que surgieron durante el desarrollo del trabajo.

## ABSTRACT

This thesis purposes is to change the contamination and generate energy using renewable resources, using the inherent resources in porcine's dung as are the biogas and the supernatant.

The pilot plan is the design of a bio digester for the Terranostra farm, located in Tena, which is in the Napo province, route to Yuralpa. It was designed for a porcine exploitation of 80 pigs weighing 50kg.

The construction of the prototype was realized in the Valles de los Chillos, in the province of Pinchincha, where 4 pigs weighing 50 kg, of 4 months of age, were used to recollect their dung for its future use in the biodigestion cycle.

The total duration if the thesis has been approximately 10 months, which were divided in 6 chapters focusing on investigation, analysis and evaluation, design and dimensioning, and a chapter of introduction.

The second is a compilation of information, ambient legislation, the contamination produced by porcine exploitations and the different types of water treatment.

The third chapter describes the different alternatives for the design of a bio digester and how to chose the best one. It also indicates the factors and necessary volumes for the design.

The fourth chapter explains the dimensioning for the different parts of the bio digester detailing each operation used.

The fifth chapter indicates the results obtained theoretically and in the construction of the prototype and its nutrition (which is a 30 days cycle) using 4 pig's dung. A discussion ends this chapter.

The sixth chapter indicates briefly the costs for this investigation, detailing the costs for the prototype and the costs that would signify the construction of the project's bio digester.

The last chapter contains the conclusions indicating what we obtained throughout the investigation. The recommendations are based upon how to improve or how to continue with possible investigations based upon some doubts that appeared during this project.

## INDICE

	Pág.
<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. IMPACTO AMBIENTAL DE LA EXPLOTACIÓN PORCINA...2</b>	
2.1.1 Legislación Ambiental.....2	2
2.1.1.1 Sistema de Gestión Medioambiental (SGMA).....2	2
2.1.1.2 Certificación ISO 14000 (Norma de Gestión Ambiental).....3	3
2.1.1.3 Protocolo de Kioto.....4	4
2.1.2 Contaminación en las Explotaciones Porcinas.....4	4
2.1.2.1 Generación y vertimiento de residuos al medioambiente.....5	5
2.1.2.2 Contaminación producida por las explotaciones porcinas.....5	5
2.1.2.2.1 Contaminación del agua.....6	6
2.1.2.2.1.1 Efectos de la contaminación.....7	7
2.1.2.2.1.2 La protección de las aguas.....7	7
2.1.2.2.1.3 Determinación de la calidad de las aguas residuales...8	8
2.1.2.2.1.3.1 Métodos físico-químicos y biológicos.....9	9
Indicadores fisicoquímicos.....9	9
Indicadores biológicos.....12	12
2.1.2.2.2 Contaminación del suelo.....19	19
2.1.2.2.3 Contaminación del aire.....20	20
<b>2.2 APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS.....21</b>	
2.2.1 Definición de excretas.....22	22
2.2.1.1 Las excretas de cerdo.....22	22
2.2.1.2 Composición de las excretas de los cerdos.....23	23
2.2.1.3 Volumen de excretas producidas por el cerdo.....24	24
2.2.2 Tratamientos de las aguas residuales.....24	24
2.2.2.1 Tratamiento físico.....25	25
2.2.2.2 Tratamiento químico.....27	27
2.2.2.3 Tratamientos fisicoquímicos.....28	28
2.2.2.4 Tratamiento biológico.....29	29

<b>CAPITULO III. SISTEMA DE PRODUCCIÓN.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 BIODIGESTOR.....</b>	<b>31</b>
3.1.1 Frecuencias de carga de un biodigestor.....	33
3.1.1.1 Intermitente.....	33
3.1.1.2 Semicontínuos.....	33
3.1.1.3 Continuos.....	33
3.1.2 Tipos de biodigestores.....	34
3.1.2.1 Biodigestor chino de cúpula fija.....	34
3.1.2.2 Biodigestor hindú de cúpula flotante.....	35
3.1.2.3 Biodigestor tipo tubular.....	35
3.1.3 Procesos de biodigestión.....	41
3.1.3.1 Proceso de tasa estándar de biodigestión.....	41
3.1.3.2 Proceso de tasa alta de biodigestión.....	42
3.1.3.3 Proceso de dos etapas.....	43
<b>3.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO.....</b>	<b>44</b>
3.2.1 Alternativa A: Biodigestor de cúpula flotante de tasa estándar de biodigestión.....	44
3.2.2 Alternativa B: Biodigestor de cúpula fija de tasa estándar de biodigestión.....	44
3.2.3 Alternativa C: Biodigestor tipo tubular de tasa estándar de biodigestión.....	44
<b>3.3 MODELO DE SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.....</b>	<b>45</b>
3.3.1 Ejemplo de cálculo.....	47
<b>3.4. FACTORES Y VOLUMENES PARA EL DISEÑO DEL BIODIGESTOR.....</b>	<b>48</b>
3.4.1 Flujo del tratamiento.....	48
3.4.2 Fuente de la materia orgánica.....	48
3.4.3 Sólidos totales (ST).....	49
3.4.4 Sólidos volátiles (SV).....	49
3.4.5 Relación Carbono/Nitrógeno (relación C/N).....	50
3.4.6 Sustrato afluente al 8 %.....	52
3.4.7 Tanque de premezclado.....	55
3.4.8 Temperatura de Reacción (TC).....	55
3.4.9 Tiempo de retención en el digestor.....	56
3.4.10 Tanque de biodigestión.....	59
3.4.11 Proceso de biodigestión.....	60
3.4.11.1 Productos de la biodigestión.....	63

3.4.11.1.1	Biogás y tanque de almacenamiento.....	64
3.4.11.1.2	Fertilizante líquido (biol).....	66
3.4.11.1.3	Lodo fertilizante.....	67
3.4.12	Entrada del sustrato afluyente y salida del biol.....	69
3.4.13	Nivel de pH.....	70
3.4.14	Nivelación de cargas del sustrato.....	71
3.4.14.1	Mezclado longitudinal.....	71
3.4.14.2	Recirculación del efluente al afluyente y tratamiento.....	71
3.4.15	Desulfurización del biogás.....	72
3.4.16	Filtros para el biogás.....	72
3.4.17	Promotores de la fermentación.....	73
3.4.18	Inhibidores de la fermentación.....	73

## **CAPITULO IV. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR.....78**

### **4.1 VOLUMEN TOTAL DEL BIODIGESTOR (VTB).....78**

### **4.2 DIMENSIONES DE LA TRINCHERA DONDE SE ASIENTA EL BIODIGESTOR.....79**

### **4.3 DIMENSIONES DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS.....80**

## **CAPITULO V. RESULTADOS DEL PROTOTIPO Y DISCUSIÓN.....83**

## **CAPITULO VI. ANÁLISIS ECONÓMICO.....85**

## **CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....94**

### **7.1 CONCLUSIONES.....94**

### **7.2 RECOMENDACIONES.....95**

## **REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....96**

<b>GLOSARIO.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2.1:</b> contaminación producida en explotaciones porcinas.....	18
<b>Tabla 2.2:</b> partículas causantes del mal olor en las heces del cerdo.....	20
<b>Tabla 2.3:</b> composición típica de los purines frescos y digeridos anaeróbicamente.....	23
<b>Tabla 2.4:</b> cantidades de heces y orina producidos por peso del cerdo por día.....	24
<b>Tabla 3.1:</b> partes del biodigestor.....	32
<b>Tabla 3.2:</b> tipos de biodigestores y algunos criterios comparativos.....	40
<b>Tabla 3.3:</b> asignación de jerarquía para cada atributo.....	45
<b>Tabla 3.4:</b> puntuaciones de atributos y valores de evaluación de las alternativas.....	46
<b>Tabla 3.5:</b> resultado del método de atributos ponderados.....	46
<b>Tabla 3.6:</b> composición de las excretas (incluido la orina), de algunos animales.....	50
<b>Tabla 3.7:</b> valores de $k$ y $k_c$ para distintos rangos de temperatura.....	57
<b>Tabla 3.8:</b> tiempo de retención en días dependiendo del residuo animal (temperatura mesofílica).....	59
<b>Tabla 3.9:</b> clasificación de las bacterias formadoras de metano.....	62
<b>Tabla 3.10:</b> concentración inhibidora de inhibidores comunes.....	74
<b>Tabla 3.11:</b> resumen del cálculo de volúmenes para el diseño del biodigestor.....	75

<b>Tabla 4.1:</b> volúmenes requeridos y producidos en el biodigestor.....	78
<b>Tabla 4.2:</b> resumen del dimensionamiento del biodigestor de 16 m <sup>3</sup> .....	82
<b>Tabla 5.1:</b> resultados obtenidos con el prototipo de biodigestor.....	83
<b>Tabla 5.2:</b> proceso de biodigestión del prototipo.....	84
<b>Tabla 6.1:</b> gastos efectuados en el desarrollo de la investigación.....	86
<b>Tabla 6.2:</b> gastos de la fabricación del biodigestor tubular de 16 m <sup>3</sup> .....	89
<b>Tabla 6.3:</b> gastos efectuados en la fabricación del prototipo del biodigestor.....	90
<b>Tabla 6.4:</b> flujo de caja para 5 años (vida útil del biodigestor).....	92

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 3.1:</b> partes del biodigestor.....	31
<b>Figura 3.2:</b> biodigestor cúpula fija.....	37
<b>Figura 3.3:</b> biodigestor cúpula flotante.....	38
<b>Figura 3.4:</b> biodigestor tubular.....	39
<b>Figura 3.5:</b> proceso de tasa estándar.....	41
<b>Figura 3.6:</b> proceso de tasa alta.....	42
<b>Figura 3.7:</b> proceso de dos etapas.....	43
<b>Figura 3.8:</b> carta de flujo del sistema de tratamiento.....	48
<b>Figura 3.9:</b> proceso de biodigestión.....	61
<b>Figura 3.10:</b> caminos de la formación de metano a partir de la materia orgánica compleja.....	63

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
<b>Ecuación 3.1:</b> método de atributo ponderado 1.....	45
<b>Ecuación 3.2:</b> método de atributo ponderado 2.....	45
<b>Ecuación 3.3:</b> peso de los sólidos totales en el material fresco.....	52
<b>Ecuación 3.4:</b> peso del nitrógeno.....	52
<b>Ecuación 3.5:</b> peso del carbono.....	52
<b>Ecuación 3.6:</b> relación carbono – nitrógeno.....	52
<b>Ecuación 3.7:</b> peso del agua presente en el material fresco.....	53
<b>Ecuación 3.8:</b> peso total del agua en un sustrato afluyente al 8%.....	53
<b>Ecuación 3.9:</b> peso del agua que se va a añadir para formar un sustrato afluyente al 8%.....	53
<b>Ecuación 3.10:</b> peso específico del agua.....	54
<b>Ecuación 3.11:</b> volumen de agua que se va a añadir para formar un sustrato afluyente al 8%.....	54
<b>Ecuación 3.12:</b> peso total del sustrato afluyente al 8%.....	54
<b>Ecuación 3.13:</b> volumen total del sustrato afluyente al 8%.....	54
<b>Ecuación 3.14:</b> peso total de los sólidos volátiles del material fresco.....	56
<b>Ecuación 3.15:</b> concentración de sólidos volátiles en el sustrato afluyente.....	56
<b>Ecuación 3.16:</b> concentración de la demanda química de oxígeno.....	57
<b>Ecuación 3.17:</b> tiempo de retención de sólidos mínimo del sustrato afluyente.....	58

<b>Ecuación 3.18:</b> tiempo total de retención del sustrato afluente en el biodigestor.....	58
<b>Ecuación 3.19:</b> volumen del tanque.....	60
<b>Ecuación 3.20:</b> cantidad de metano producido a temperatura de 32 °f y a presión de 14,7 psi (lbs / in <sup>2</sup> ).....	65
<b>Ecuación 3.21:</b> cantidad de metano producido a temperatura de 32 °f y a presión de 14,7 psi (lbs / in <sup>2</sup> ).....	65
<b>Ecuación 3.22:</b> cantidad de biogás producido a temperatura de 32 °f y a presión de 14,7 psi (lbs / in <sup>2</sup> ).....	65
<b>Ecuación 3.23:</b> cantidad de sólidos del lodo fertilizante producidos por los sólidos no biodegradables.....	67
<b>Ecuación 3.24:</b> peso de los sólidos del lodo fertilizante de origen bacteriano.....	68
<b>Ecuación 3.25:</b> peso total de los sólidos del lodo fertilizante.....	68
<b>Ecuación 3.26:</b> peso total del lodo fertilizante.....	68
<b>Ecuación 3.27:</b> volumen total del lodo fertilizante.....	68
<b>Ecuación 4.1:</b> volumen total del biodigestor.....	78
<b>Ecuación 4.2:</b> dimensiones de la trinchera donde se asienta el biodigestor. Lado lateral (Pitágoras).....	79
<b>Ecuación 4.3:</b> dimensiones de la trinchera donde se asienta el biodigestor. Perímetro.....	79
<b>Ecuación 4.4:</b> dimensiones de la trinchera donde se asienta el biodigestor. Área.....	79
<b>Ecuación 4.5:</b> dimensiones de la trinchera donde se asienta el biodigestor. Longitud.....	79

<b>Ecuación 4.6:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Ángulo.....	80
<b>Ecuación 4.7:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Radio.....	80
<b>Ecuación 4.8:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Altura.....	80
<b>Ecuación 4.9:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Área.....	80
<b>Ecuación 4.10:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Volumen.....	80
<b>Ecuación 4.11:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Perímetro del sector.....	80
<b>Ecuación 4.12:</b> dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás. Perímetro total de la geomembrana.....	81

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo n° 1:</b> fotos de la construcción del prototipo del biodigestor. Perforación del tanque metálico.....	106
<b>Anexo n° 2:</b> fotos de la construcción del prototipo del biodigestor. Instalación de tubería y válvulas al tanque metálico.....	110
<b>Anexo n° 3:</b> fotos de la construcción del prototipo del biodigestor. Medidor de presión.....	124
<b>Anexo n° 4:</b> fotos de la construcción del prototipo del biodigestor. Tanque de almacenamiento de biogás.....	125

<b>Anexo n° 5:</b> fotos de la construcción del prototipo del biodigestor. Biodigestor terminado.....	131
<b>Anexo n° 6:</b> fotos de los 4 cerdos utilizados en la investigación.....	134
<b>Anexo n° 7:</b> fotos del estiércol de los cerdos.....	137
<b>Anexo n° 8:</b> fotos de la alimentación del biodigestor.....	138
<b>Anexo n° 9:</b> fotos de la toma de muestras de las heces de cerdo.....	146
<b>Anexo n° 10:</b> fotos del examen realizado en laboratorio con las muestras de las heces de los cerdos.....	148
<b>Anexo n° 11:</b> fotos de la toma de muestra del biol del prototipo.....	150
<b>Anexo n° 12:</b> diseño de un biodigestor según el Dipl. Ing. Sanitario Ambiental – Ing. Civil Gabriel Moncayo Romero. 2008 (Barcelona – España).....	151
<b>Anexo n° 13:</b> diseño de un biodigestor según el Ing. eléctrico Santiago Sánchez Miño 2003 (quito – ecuador).....	152
<b>Anexo n° 14:</b> alimentación de los cerdos.....	153
<b>Anexo n° 15:</b> resultados de los exámenes de laboratorio de las heces de los cerdos.....	156
<b>Anexo n° 16:</b> resultados de los exámenes de laboratorio del biol obtenido en el prototipo.....	157
<b>Anexo n° 17:</b> plano de las porquerizas.....	158
<b>Anexo n° 18:</b> planos del biodigestor de 16 m <sup>3</sup> (proyecto).....	159
<b>Anexo n° 19:</b> planos del prototipo del biodigestor.....	160
<b>Anexo n° 20:</b> protocolo de Kioto.....	161
<b>Anexo n° 21:</b> ISO 14001.....	162

# **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

Como es el caso de la hacienda Terranostra, en el Ecuador las zonas rurales o agropecuarias no disponen de la suficiente energía, sea por falta de transporte como: líneas de transmisión, líneas de distribución para energía eléctrica, carreteras, poliductos para combustibles, lo que encarece el valor de éste recurso. Una solución sería la implementación de un biodigestor para aprovechar las excretas animales y residuos de cultivos.

A continuación se efectuará un estudio para la selección, diseño y construcción de un biodigestor que albergue diariamente las heces de 80 cerdos que empiezan pesando 154 lbs.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL.**

Proporcionar a la hacienda Terranostra ubicada en la provincia de Napo, ciudad del Tena, un plan piloto de un biodigestor anaeróbico para el estiércol de 80 cerdos para la producción de biogás y biofertilizante.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Seleccionar, diseñar y construir un prototipo de un biodigestor anaeróbico que permita la hidrólisis, acidificación y formación de biogás (50-80% CH<sub>4</sub> y 50-20% CO<sub>2</sub>).
- Estudiar el proceso de los microorganismos anaerobios necesarios para lograr una eficiente descomposición de las heces del ganado porcino.
- Planificar la utilización del biofertilizante y compost obtenido de la biodigestión anaeróbica.
- Evitar los efectos negativos que produce la contaminación sobre la vida vegetal y animal del cauce receptor por el vertido de materias orgánicas y minerales.

## **CAPITULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. IMPACTO AMBIENTAL DE LA EXPLOTACIÓN PORCINA.**

#### **2.1.1 Legislación Ambiental.**

Actualmente la mayoría de las empresas están orientadas a preparar y ejecutar un plan de calidad medioambiental aplicable a su gestión, con el objetivo de tener la capacidad de tramitar la certificación ISO 14001 que acreditará a las organizaciones como cumplidoras de las normas medioambientales y así obtener más ventajas competitivas.

##### **2.1.1.1 Sistema de Gestión Medioambiental (SGMA).**

La certificación ISO 14001 requiere, dentro de otros aspectos, la implantación de un Sistema de Gestión Medioambiental (SGMA) y su respectivo diagnóstico ambiental.

En el caso de la producción agroindustrial de exportación países como los EEUU controla la cadena de producción de los alimentos importados. Las empresas tienen que aportar a la Administración de Drogas y Alimentos (FDA), documentación suficiente de todas las actividades que la empresa exportadora desempeña y el cumplimiento de las regulaciones medioambientales.

La implantación de un SGMA detecta el despilfarro de materias primas, consumo de agua, energía y otros recursos además de la contaminación que se pueda producir. Estos recursos representan un costo económico considerable y por tanto su utilización eficiente produciría un significativo ahorro económico.

### 2.1.1.2 Certificación ISO 14000 (Norma de Gestión Ambiental).

La ISO 14000 es una serie de normas internacionales optativas de gestión medioambiental, exigiendo a las organizaciones de todo el mundo realizar esfuerzos medioambientales y medir su desempeño. La norma de Gestión Ambiental especifica los requisitos que debe cumplir éste sistema de gestión. La ISO 14000 es una norma voluntaria y fue desarrollada por la *International Organization for Standardization* (ISO) en Ginebra (1996), cuyo objetivo general es apoyar a la protección medioambiental y la prevención de la contaminación en armonía con las necesidades socioeconómicas, se puede aplicar a cualquier organización, industria o empresa que desee mejorar y demostrar su actuación medioambiental mediante un sistema de gestión medioambiental certificado.<sup>1</sup>

La Norma no prescribe requisitos de actuación medioambiental, salvo el compromiso de mejora continua y la obligación de cumplir la legislación y regulaciones relevantes. La norma no declara la cantidad máxima permisible de emisiones de gases de óxido nitroso en combustión, ni el nivel máximo de contenido bacteriológico en el efluente de aguas residuales, sino especifica los requisitos del propio sistema de gestión, que siendo efectuados adecuadamente, mejorarán la actuación medioambiental reduciendo los impactos.

La implementación de sistemas de gestión ambiental permitirá a la empresa anticiparse a las regulaciones ambientales más estrictas, consiguiendo que el ajuste a la nueva realidad legislativa, se realice de manera gradual y mediante cambios en los procesos de producción.

---

<sup>1</sup> **GRUPO AQUALIMPIA** Consultores, Certificación ISO 14000, publicado en: [http://www.aqualimpia.com/iso\\_1.htm](http://www.aqualimpia.com/iso_1.htm), 2007, fecha de consulta 24/04/2009, Barcelona, España.

### 2.1.1.3 Protocolo de Kioto.

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir en un 5% las emisiones de seis gases provocadores del calentamiento global: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones de 1990. Por ejemplo, si la contaminación de estos gases en el año 1990 alcanzaba el 100%, al término del año 2012 deberá ser del 95%. Es preciso señalar que ésto no significa que cada país deba reducir sus emisiones de gases regulados en un 5%, sino que éste es un porcentaje a nivel global y, por el contrario, cada país obligado por el protocolo de Kioto tiene sus propios porcentajes de emisión que debe disminuir.<sup>2</sup>

### 2.1.2 Contaminación en las Explotaciones Porcinas.

La explotación porcina es criticada por los negativos impactos ambientales que causa sobre los cuerpos de agua, razón por la cual de todas las actividades agropecuarias es la más vigilada.

En el Ecuador existe poco control por parte de las autoridades y ninguna preocupación por parte de los porcicultores para reducir las descargas residuales, requiriendo un mayor compromiso entre las autoridades, porcicultores e instituciones de educación superior e investigación.

El tratamiento de aguas residuales en una explotación porcina se convierte en una fuente de ingresos cuando se aprovechan los recursos presentes en las excretas.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> **NACIONES UNIDAS**, Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, FCCC/INFORMAL/83\*, 1998.

<sup>3</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 176, Barcelona-España.

### **2.1.2.1 Generación y vertimiento de residuos al medioambiente.**

Las características por las cuales la producción porcina estimula la generación y vertimiento de residuos al medioambiente son las siguientes:

Producción especializada con poca o nula integración: La producción de una sola especie animal hace que los insumos requeridos sean importados a la granja, mientras que los desechos sean exportados al medioambiente, es decir la entrada y salida de recursos con reciclaje nulo.

La no reutilización de las aguas residuales: Los residuos líquidos y sólidos (en especial las excretas) mezclados con las aguas para limpieza al no ser tratados no son utilizados en actividades de abonamiento ni de producción de energía.

Pérdida de energía y nutrientes: Los residuos poseen recursos como energía, materias orgánicas y nutrientes que no se utilizan en el proceso, recursos que son obtenidos en el mercado ocasionando costos económicos en su adquisición.

Se prioriza el rendimiento económico a corto plazo: Los réditos económicos positivos aparentemente, permite dejar de lado la preocupación por los efectos medioambientales negativos que en el mediano plazo causarán pérdidas irre recuperables generadas por explotación porcina.

Según estos puntos la contaminación aparece como resultado de un proceso ineficiente o incompleto que no maneja de manera adecuada los recursos que genera. Esto quiere decir que los desechos porcinos no son un problema, sino al contrario son una fuente de recursos útiles para la producción agropecuaria.

### **2.1.2.2 Contaminación producida por las explotaciones porcinas.**

La explotación porcina genera contaminación tanto de las aguas como del suelo y del aire. Contaminación que puede variar de acuerdo al estado fisiológico de los animales y al tipo de alimentación utilizada, cuyo nivel de

afectación dependerá de la cantidad de agua usada, de que si se hace o no separación de sólidos y del manejo dado a los residuos.<sup>4</sup>

#### **2.1.2.2.1 Contaminación del agua.**

A la contaminación del agua se la define como la pérdida de calidad provocada por la actividad humana o de manera natural, siendo las siguientes:

Por su modo de incidencia: la contaminación puede ser directa o indirecta.

Contaminación directa es la provocada por un vertido de aguas residuales domésticas o industriales sobre un río, lago o mar. Así como también el provocado al verter basura al cauce de un río o por rellenos sanitarios o inyección de vertidos en un acuífero.

Contaminación indirecta es la provocada por filtración o mezcla de aguas que en su recorrido anterior ha disuelto materias contaminantes orgánicas o minerales.

Por el tiempo de actuación del agente contaminante: puede clasificarse en continuas, intermitentes y accidentales.

La continua incide sobre la calidad de las aguas ininterrumpidamente, aun cuando su intensidad puede ser variable. Este es el caso más común, cuyo origen es doméstico, así como también en las contaminaciones industriales en cuyo proceso se produce un vertido sistemático.

Las intermitentes incide cada cierto tiempo en el agua y accidental es aquella que pasa rara vez.

Por su origen: se puede distinguir entre contaminación natural, contaminación doméstica y contaminación industrial.

---

<sup>4</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 174 – 179, Barcelona–España.

#### **2.1.2.2.1.1 Efectos de la contaminación.**

La contaminación surte efectos negativos sobre la vida vegetal y animal del cauce receptor. Un río constituye un ecosistema que tiene una tolerancia limitada para el vertido de materias orgánicas y minerales.

Las materias orgánicas biodegradables sirven de alimento a organismos tales como bacterias y hongos que consumen el oxígeno disuelto en el agua, Esta disminución se ve contrarrestada por la capacidad de autodepuración del cauce, debida a la absorción de oxígeno que realizan principalmente microorganismos en suspensión en el agua y que se conocen con el nombre de plancton. Aguas abajo en un vertido, se produce una disminución brusca del contenido en oxígeno que, en general, va seguido de una recuperación gradual debida al fenómeno de absorción. Pero al descender el mínimo de contenido de oxígeno por debajo de los 3 mg/ltr. se produce la muerte por asfixia de la mayoría de las especies piscícolas.

#### **2.1.2.2.1.2 La protección de las aguas.**

Hay un aumento importante de las aguas residuales, así como una disminución de las aguas que garantizan un papel auto depurador. Al revisar la agricultura y a todas las demás facetas de la vida humana se comprueba que el consumo de agua no cesa de aumentar.

En la actualidad las soluciones que se prevén para eliminar las aguas residuales, son:

- Volver a echarla al río o al lago: solución en general prohibida.
- Recogida de las aguas residuales de los alrededores y tratarlas antes de devolverlas al río: solución que plantea el problema de la recogida y de tratamiento.
- Las aguas residuales se tratan por separado de acuerdo con su origen, se puede pensar en un tratamiento preventivo antes de echarlas a los

desagües comunales o intercomunales o el tratamiento total antes de devolverlas al río.

- Tratamiento total y reutilización de agua depurada (reciclaje). Esta solución es perfecta, pero la depuración total resulta costosa.

El agua se contamina en forma mecánica, química y biológica.

El análisis de las aguas contaminadas por materias orgánicas se apoya sobre los fenómenos que se producen durante la autodepuración de las aguas. Esta autodepuración es un proceso complejo de transformaciones físicas, químicas y biológicas y el análisis biológico debe ser el complemento de todo análisis químico.<sup>5</sup>

En una explotación porcina el agua utilizada para el aseo de las porquerizas se mezcla con las excretas, mezcla que al ser evacuada produce la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, debido a la flora microbiana y a la lixiviación de los minerales contenidos en ella. El agua que se utiliza para la limpieza por cerdo varía entre 5 y 10 L. dependiendo del método de limpieza.

Los microorganismos como bacterias y hongos descomponen la materia orgánica biodegradable consumiendo el oxígeno disuelto en el agua, mientras más contaminada está el agua, más oxígeno se necesita para su depuración.<sup>6</sup>

#### **2.1.2.2.1.3 Determinación de la calidad de las aguas residuales.**

La calidad de las aguas residuales puede ser determinada con la utilización de métodos físico-químicos y biológicos:

---

<sup>5</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 174 – 179, Barcelona–España.

<sup>6</sup> **CHARA**, Julián y Centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria (CIPAV), El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y Los sistemas de descomposición productiva, Publicado en: <http://www.cipav.org.co/cipav/conf/chara1.htm>, 1999, fecha de consulta 25/04/2009, Bogotá - Colombia.

### **2.1.2.2.1.3.1 Métodos físico-químicos y biológicos.**

Los métodos físico-químicos se llevan a cabo mediante una toma de muestras de los sistemas acuáticos para la determinación de sus características físicas y análisis de sus componentes químicos. Estos métodos dan una información valiosa, pero se refieren únicamente al instante en que se obtuvo la muestra; por lo tanto, pueden dar resultados muy alarmantes o, al contrario, pasar desapercibidos ciertos factores que pueden ser decisivos para un uso determinado del agua. No indican el estado anterior al de la toma de muestras ni la capacidad de recuperación natural después de un aporte contaminante, tanto en el tiempo como en el espacio.

Los métodos biológicos se fundamentan en el estudio de las comunidades de animales y de plantas acuáticas. Dado que cada biocenosis o cada comunidad responden a las condiciones físico-químicas del medio en que vive, cualquier alteración en éstas induce cambios que se manifiestan en la sustitución de una especie por otras, o por la variación del número y proporción de cada una de ellas. Por lo tanto, la caracterización biológica del agua parte de la determinación del grado de alteración de la condición biológica de la misma cuando se introducen sustancias tóxicas, materia orgánica que pueda descomponerse, o cualquier forma de energía.

- **Indicadores físico-químicos.**

Los principales indicadores físico-químicos son:

Olor:

Las aguas residuales tienen olores característicos generados por los materiales volátiles que contienen y por los procesos de degradación de la materia orgánica presente.

Sólidos totales en suspensión (STS):

Las aguas residuales están cargadas casi siempre con materiales en suspensión, materiales que según su densidad y características del medio

receptor, son depositados en distintas zonas del sistema acuático, produciendo una contaminación mecánica.

Los materiales en suspensión en el agua se los determina por técnicas de filtración o centrifugación, aparece ampliamente descrita en numerosos tratados de análisis de aguas.

#### Color:

Algunos productos de desecho, según el proceso sufrido en la industria, alteran considerablemente el color de las aguas, teniendo como consecuencia una grave contaminación estética, que dificulta los procesos de fotosíntesis e intercambio de oxígeno.

La determinación del color se realiza, básicamente, por dos métodos: el método del platino-cobalto, y la comparación con discos coloreados.

#### Turbidez:

La turbidez del agua es debida a la presencia de materias en suspensión finamente divididas como: arcillas, limos, granos de sílice, materia orgánica, etc. cuya cuantificación mide el grado de turbidez.

A mayor turbidez mayor contaminación del agua, por lo que es un indicador de interés en el control de la eficacia de los procesos de depuración.

Las medidas de turbidez se realizan utilizando el efecto *Tyndall*, la opacidad (Ley de absorción de *Beer-Lambert*) o el índice de difusión.

#### Temperatura:

Influye en la solubilidad de las sales, sobre todo en la de los gases y en la disociación de sales disueltas, por lo tanto en la conductividad eléctrica y en el pH del agua.

Existe una estrecha relación entre la densidad del agua y su temperatura, por lo que cualquier alteración de éstas modifica los movimientos de mezcla de

diferentes masas de agua. La temperatura es un parámetro de gran utilidad para calcular los intercambios térmicos que tienen lugar en el medio.

#### pH:

Mide la concentración de iones hidrógeno en el agua. Un pH elevado indica una baja concentración de iones  $H^+$ , y por tanto una alcalinización del medio. Estas variaciones tienen una repercusión muy importante sobre las biocenosis existentes. Las determinaciones del pH del agua se realizan por métodos colorimétricos o electrométricos; estos últimos se utilizan para mediciones más precisas.<sup>7</sup>

Después de una depuración biológica bien efectuada los valores del pH se acercan a la neutralidad (6.5 – 7.5).<sup>8</sup>

#### Conductividad eléctrica:

La conductividad varía en función de la temperatura, está estrechamente ligada a la concentración de sustancias disueltas y a su naturaleza.

Las sales minerales son, en general, buenas conductoras; mientras que, las materias orgánicas y coloidales tienen escasa conductividad. Por lo tanto, para las aguas residuales, esta medida no da una idea precisa de la carga contaminante, aunque sí orienta en lo que se refiere a sus posibles usos en aplicaciones agrarias.<sup>9</sup>

#### Potencial de óxido-reducción (rH):

El potencial de oxidación-reducción (rH) de una solución, se define como la fuerza electromotriz que desarrolla un electrodo de platino sumergido en agua,

---

<sup>7</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Editorial Mundi - Prensa, 2005, p. 104 – 108, Barcelona - España.

<sup>8</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 177, Barcelona-España.

<sup>9</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Tratado de gestión del medio ambiente urbano, Mundi-Libros, 2001, p. 60 – 66, Barcelona - España.

comparándolo con el electrodo estándar de hidrógeno. Cada reacción de oxido-reducción implica un intercambio de electrones; la fuerza electromotriz (fem) necesaria para oponerse a este flujo de electrones, es lo que da la medida del potencial de oxido-reducción.

Es un parámetro o indicador que permite hacer observaciones en las estaciones de depuración, por ejemplo:

- Las aguas residuales urbanas y las procedentes de industrias agroalimentarias, recién recolectadas, tienen un rH aproximado a 100 mV.
- Un medio reductor (fosas sépticas, putrefacciones en las canalizaciones, etc.), presenta un rH inferior a 40 mV.
- Los valores de rH comprendidos entre 15 y 25 mV. caracterizan un medio aerobio que favorece la oxidación de los compuestos orgánicos.
- Los valores de rH de 13 a 15 mV. definen la zona de transición entre un medio aerobio y el anaerobio. En esta zona vira el azul de metileno, reactivo que se utiliza en el test de putrefacibilidad de las aguas.
- Valores de rH inferiores a 13 mV caracterizan medios reductores, aguas sépticas (rH = 13), aguas nauseabundas (rH = 10), etc.<sup>10</sup>

- **Indicadores biológicos.**

La diversa naturaleza de los compuestos orgánicos y de los estados de degradación en que se presentan, no aconseja el empleo de un solo indicador (método o test) para evaluar la contaminación orgánica del agua. Siendo necesario para su evaluación la comparación y yuxtaposición de los resultados obtenidos al medir los distintos constituyentes de la materia orgánica.

---

<sup>10</sup> **CORONA**, Hortensia, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1976, p. 225 y 226, México - México.

La oxidación de los compuestos orgánicos para dar dióxido de carbono y agua, implica un consumo de oxígeno del agua que es renovado a partir del O<sub>2</sub> del aire.

Los compuestos carbonados sirven de alimento a los microorganismos aerobios; el nitrógeno oxidado (nitritos, nitratos, amoníaco), es utilizado por las nitrobacterias y las nitrosomonas. Estas reacciones pueden desarrollarse en un medio pobre en O<sub>2</sub> a expensas no sólo de nitratos y nitritos, sino de los sulfatos, dando lugar a sulfuro de hidrógeno.

Estos fenómenos de oxidación que tienen lugar en la naturaleza son difíciles de reproducir en laboratorio, y sobre todo es muy difícil llegar a la degradación última de la materia orgánica. No obstante, algunos test como la DBO, el ensayo del olor, etc., permiten apreciar el fenómeno por vía biológica.

Sin embargo, para lograr la oxidación completa de los compuestos orgánicos, se han desarrollado métodos químicos que utilizan reactivos más o menos enérgicos, con una metodología precisa.

Los métodos basados en el carbono, denominador común de la materia orgánica, son los más desarrollados, aunque precisan de una instrumentación algo compleja. Las ventajas que presentan es la de ser aplicables a todos los compuestos orgánicos, por lo que permiten apreciar completamente la contaminación, sobre todo en presencia de compuestos difícilmente oxidables.

11

Carbono orgánico total (COT): es un indicador de los compuestos orgánicos, fijos o volátiles, naturales o sintéticos, presentes en las aguas residuales (celulosa, azúcares, aceites, lípidos, proteínas, etc.). Su medida facilita la estimación de la demanda de oxígeno ligada a los vertidos y establece una correlación con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). En presencia de sustancias nitrogenadas, la

---

<sup>11</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Tratado de gestión del medio ambiente urbano, Mundi-Libros, 2001, p. 60 – 66, Barcelona - España.

medida del COT está menos sujeta a interferencias por dichas sustancias que la medida de la demanda total de oxígeno (DTO).

#### Demanda total de oxígeno (DTO):

La demanda total de oxígeno mide el consumo de oxígeno según reacciones químicas que se desarrollan, por combustión catalítica de la materia orgánica.

En las mismas condiciones, los compuestos azufrados se oxidan, dando óxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), en una relación fija.<sup>12</sup>

#### Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):

Demanda Bioquímica de Oxígeno es la cantidad de oxígeno (mg./L.) necesario para asegurar la degradación biológica de la materia orgánica (biodegradable) contenida en un litro de agua a temperatura de 18 – 20 °C. en un tiempo determinado.<sup>13</sup>

Expresa la cantidad de  $\text{O}_2$  necesaria para biodegradar las materias orgánicas. Este parámetro ha sido objeto de continuas discusiones; sin embargo, mejorando y precisando las condiciones del pH, de la temperatura y de la salinidad, constituye un método válido de estudio de los fenómenos naturales de degradación de la materia orgánica. Las dificultades de aplicación e interpretación de los resultados y de su reproducción, son propios del carácter biológico del método.

Hay que considerar que la oxidación de las materias orgánicas no es el único fenómeno que tiene lugar en la biodegradación; debiendo añadirse la oxidación de los nitritos y de las sales amoniacales, así como el consumo de oxígeno por los procesos de asimilación y de formación de nuevas células. Por lo tanto, en la medida de este parámetro se producen variaciones según las especies de microorganismos según su concentración y edad, según la

---

<sup>12</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Editorial Mundi - Prensa, 2005, p. 104 – 108, Barcelona - España.

<sup>13</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 177, Barcelona–España.

presencia de bacterias nitrificantes y según la presencia de protozoos consumidores de oxígeno y que se alimentan de bacterias.

Además, a lo largo de los procesos catabólicos las reacciones de descarboxilación, hidrólisis e hidratación no consumen oxígeno, pero el elemento intermolecular sí puede emplearse con fines respiratorios, dando lugar a una disminución del oxígeno medido.

La DBO, en la práctica, permite apreciar la carga de agua en materias putrescibles y su poder auto depurador, y de ello se puede deducir la carga máxima aceptable. Este indicador se aplica principalmente en el control del tratamiento primario en las estaciones depuradoras y en evaluar el estado de degradación de los vertidos que tengan carga orgánica.<sup>14</sup>

DBO5 (en un tiempo determinado de 5 días): se utiliza en la práctica permitiendo comparar entre una contaminación determinada y la generada por la acción normal de la vida humana.

Por ejemplo:

Aproximadamente el consumo de oxígeno es de 360 gr. por cada 1000 L. de agua. El ser humano aproximadamente usa 150 L. de agua diariamente entonces

$$360 * 150 / 1000 = 54 \text{ gr. de O}_2 \text{ para depurar 150 L. de H}_2\text{O.}$$

Claro que esto varía según el consumo de agua, la carga contaminante y la dilución.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Editorial Mundi - Prensa, 2005, p. 104 – 108, Barcelona - España.

<sup>15</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 177, Barcelona–España.

### Autoconsumo de oxígeno en 48 horas:

El contenido de O<sub>2</sub> en el agua se mide inmediatamente después de la toma de la muestra y transcurrido un tiempo de incubación de 48 horas. La diferencia entre las dos medidas corresponde al consumo de oxígeno.

### Demanda química de oxígeno (DQO):

Es la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de las materias minerales y orgánicas reductoras en condiciones de ensayo.

Ciertas sustancias presentes en las aguas residuales, cuando se vierte el conjunto en un curso o a una masa de agua, captan parte del oxígeno existente debido a la presencia de sustancias químicas reductoras. Las necesidades de O<sub>2</sub>, al margen de todo proceso biológico, se denominan Demanda Química de Oxígeno o DQO.

La demanda puede ser muy rápida, como es el caso de los sulfitos en presencia de un catalizador, y entonces recibe el nombre de DIO, demanda inmediata de oxígeno, o más lenta, llamándosele demanda de oxígeno por auto oxidación DAO.

La medida de la DQO es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral (hierro ferroso, nitritos, amoníaco, sulfuros y cloruros). Es un test particularmente útil para apreciar el funcionamiento de las estaciones depuradoras, y muchos vertidos industriales.

La DQO es función de las características de los compuestos presentes, de sus proporciones respectivas, de las posibilidades de oxidación, etc., por lo que la interpretación y la reproducción de los resultados no son satisfactorias más que bajo unas condiciones metodológicas bien definidas y estrictas. Este indicador no es fiable en presencia de cloruros.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias, Editorial Mundi – Prensa, 2003, p. 91 – 97, Barcelona - España.

La relación DBO/DQO muestra las posibilidades del tratamiento de las aguas residuales. Si la relación es superior a 0,6 el agua residual se puede tratar biológicamente y será depurada. Si la relación está comprendida entre 0,2 y 0,5 los microorganismos no son suficientes para la depuración y es necesaria una siembra progresiva de cepas eficaces. Si la relación peor aún es inferior a 0,2 el agua usada no es tratable y es considerada tóxica.<sup>17</sup>

Nitrógeno total: El nitrógeno orgánico presente en el agua se encuentra formando parte de compuestos tales como proteínas, polipéptidos y aminoácidos.

El método *Kjeldahl* permite la transformación en amoníaco de los compuestos de origen biológico citados anteriormente, pero no la de los compuestos nitrogenados de origen industrial (oximas, hidracina y derivados, etc.), ni el nitrógeno procedente de los nitritos y nitratos. Para determinar estos últimos hay que practicar una reducción en medio alcalino.

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno presente en los compuestos orgánicos aminados y en el amoníaco.

El nitrógeno orgánico se calcula por la diferencia entre el nitrógeno total y el nitrógeno amoniacal:

$$N_2 \text{ orgánico} = N_2 \text{ total} - N_2 \text{ amoniacal.}$$

Nitrógeno amoniacal:

Se han desarrollado diversos métodos analíticos para determinar la concentración de iones amonio en el agua.

En general, para las aguas de superficie, aguas destinadas al uso doméstico y aguas residuales poco cargadas, se utiliza cualquiera de los siguientes métodos: Azul de indofenol, Ionométrico, Microdifusión y Flujo continuo.

---

<sup>17</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 179, Barcelona-España.

Para aguas muy cargadas se utilizan métodos volumétricos.

Determinación de nitritos:

Según el origen de las aguas, su contenido en nitritos varía, y el método utilizado para su determinación es distinto. Así, para aguas con contenido en NO<sub>2</sub> superior a 50 mg/ltr. se emplea el método del reactivo de *Zambelli*. Para contenidos inferiores a 50 mg/ltr. el método de la sulfanilamida presenta mayor sensibilidad.<sup>18</sup>

Determinación del contenido en materia orgánica por el método del permanganato potásico:

El método determina el contenido de materia orgánica de forma aproximada.

El principio se basa en que el permanganato potásico desprende oxígeno por adición de ácido sulfúrico, oxígeno que oxida la materia orgánica.<sup>19</sup>

**Tabla 2.1:** Contaminación producida en explotaciones porcinas.

Parámetro (Kg)	Por 100 Kg. de peso vivo	Por 100 cerdos en ceba / día	Por año
DBO	0,250	12,50	4562,0
DQO	0,750	37,50	13687,0
STS	0,600	30,00	10950,0
Sólidos totales	0,750	37,50	13687,0
Nitrógeno	0,045	2,25	821,3

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** CONCELLON, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 174 – 179, Barcelona–España.

<sup>18</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Tratado de gestión del medio ambiente urbano, Mundi-Libros, 2001, p. 60 – 66, Barcelona - España.

<sup>19</sup> **SEOÁNEZ**, Mariano, Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias, Editorial Mundi – Prensa, 2003, p. 91 – 97, Barcelona - España.

La tabla 2.1 muestra la contaminación promedio producida por día en una explotación porcina de 100 animales de 50 Kg. de peso promedio.

Cuando se examina esta tabla dos cerdos producen un DBO de 250 gr. que si se compara con los 54 gr. que demanda un ser humano, es un indicador de la magnitud de contaminación de las heces porcinas.

Si se utiliza la relación DBO/DQO sería 250/750 que daría un resultado de 0.33, lo que indica que las aguas residuales van a tener problemas para su depuración biológica y es necesario su tratamiento.<sup>20</sup>

#### **2.1.2.2 Contaminación del suelo.**

En general los porcicultores reciclan las excretas sólidas en terrenos de cultivo; la mayor porción se lo hace en fresco. Las excretas son recogidas manualmente y son depositadas directo al suelo en donde, en ciertos casos, se mantienen frescas evitando el proceso de descomposición y contaminando la zona. Otras explotaciones acumulan las heces en un estercolero, en donde se apilan por meses y se deshidratan. Las corrientes de agua de lluvia arrastran los nutrientes de las excretas a terrenos más bajos, o por lixiviación, a cuerpos de agua superficiales o subterráneos, dejando el cultivo mal abonado y la zona contaminada. También podría contaminar el alimento del ganado con excretas frescas que pueden producir enfermedades en los animales y posteriormente en los humanos.<sup>21</sup>

Las deyecciones de 25 cerdos son suficientes para abonar 1 ha. por un año, pero si se repiten los esparcimientos de las excretas en un cultivo, se aprecia una progresiva concentración de heces en el suelo. Las consecuencias se ven sobre la flora (desaparición del trébol en provecho de las gramíneas), y en el

---

<sup>20</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 179, Barcelona-España.

<sup>21</sup> **FAO**, Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales, Producción de gas y saneamiento de efluentes, CEPIS, 1986, p. 12, 13, 14, Lima – Perú.

suelo (aumento del contenido en elementos como el cobre y cloro que pueden llegar a ser tóxicos). La mala utilización de las heces puede llegar a destruir la textura del suelo y asfixiar los microorganismos y plantas.<sup>22</sup>

### 2.1.2.2.3 Contaminación del aire.

Los malos olores que desprende el estiércol porcino a causa de una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles (ver tabla 2.2), representan riesgos para la salud de los trabajadores y de los cerdos de la explotación. El amoniaco es un irritante por lo que tiende a producir un malestar en los cerdos decreciendo en la ganancia diaria de peso, en exposiciones de amonio de 50 a 150 ppm.

**Tabla 2.2:** Partículas causantes del mal olor en las heces del cerdo.

Compuesto	Mínimo (mg. / m <sup>3</sup> .)	Máximo (mg. /m <sup>3</sup> .)
Acido Acético	25,0	1000,0
Acido Propanoico	3,0	890,0
Acido Butanoico	4,0	3000,0
Acido 3 Metil Butanoico (isovalérico)	5,0	5,0
Acido Pentanoico (Valérico)	0,8	70,0
Fenol	22,0	4000,0
Indol	0,6	0,6
4 Metil Fenol	0,2	35,0
3 Metil Indol	0,4	0,8
Metanetiol	0,5	0,5
Dimetil Sulfito	2,0	30,0
Dimetil Disulfito	3,0	14,0
Dimetil Trisulfito	7,3	7,3

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** CONCELLON, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 182, Barcelona–España.

<sup>22</sup> CONCELLON, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 174 – 179, Barcelona–España.

En la tabla 2.2 se cuantifican los principales contaminantes de las excretas porcinas pueden dividirse a su vez en: físicos como la materia orgánica y los sólidos en suspensión; químicos como el nitrógeno, el fósforo y el potasio excretados y el olor el cual es ocasionado por una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles.<sup>23</sup>

Se deben tomar medidas preventivas con respecto a la recolección y conservación de las heces, estableciendo períodos y horas de esparcimiento, además de prohibir ciertos períodos y perímetros.

Las explotaciones porcinas situadas en perímetros habitados o poco alejados de las poblaciones, en un futuro corren el riesgo de ser limitados en su volumen al no establecer estaciones de depuración.<sup>24</sup>

## **2.2 APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS.**

En los últimos años la producción porcina se ha concentrado e intensificado trayendo consigo el incremento de la producción de excretas, por esta razón es necesario desarrollar nuevas prácticas y procedimientos para la mejor utilización de los nutrientes para incrementar la producción mientras se reducen las emisiones contaminantes al medioambiente.

Un buen manejo de excretas consiste en hacer su uso de acuerdo a las necesidades de la zona, aprovechándolas como fuente de nutrientes para el suelo y las plantas, como fuente de energía y evitando la contaminación del suelo, agua, aire, plantas, animales y personas.

---

<sup>23</sup> **MARISCAL**, Gerardo, FAO, CENID Fisiología, Publicado en: [http://www.produccionbovina.com/produccion\\_porcina/63-excretas\\_cerdos.pdf](http://www.produccionbovina.com/produccion_porcina/63-excretas_cerdos.pdf), 2007, fecha de consulta 25/04/2009.

<sup>24</sup> **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, p. 176, Barcelona–España.

### **2.2.1 Definición de excretas.**

Para intentar una mejora en el manejo y utilización de las excretas es necesario saber su definición. Existen dos formas de considerar las excretas:

#### Como desecho de los animales.

Su origen está en los alimentos que se proporcionan a los animales, de los cuales el organismo toma los nutrientes necesarios para su mantenimiento, producción y reproducción, a los que se les agrega elementos de la digestión no utilizados por el metabolismo, los cuales ya mezclados se expulsan fuera del mismo y dan como resultado las heces y orina.

#### Como materia prima para procesos de reciclaje.

Tiene como origen las heces y orines recién expulsados, los cuales están constituidos por el sobrante del alimento ya digerido pero no utilizado por el organismo, aparte se le suman desperdicios como camas, agua, residuos de comida o material añadido de forma deliberada para aumentar la materia seca y así asegurar satisfactoriamente su manejo durante el almacenamiento y transporte viéndose afectado por el tipo de alimento y por el organismo en el cual se ha formado.

#### **2.2.1.1 Las excretas de cerdo.**

La generación de excretas por unidad de cerdo, depende del sistema de manejo y del estado fisiológico del animal. Los residuos que se generan en los planteles porcinos dependen del tipo de explotación, ya sea por crianza estabulada confinada, o por crianza estabulada abierta (*Deep Bedding*).

En la crianza estabulada confinada, los animales son mantenidos en corrales sobre piso falso, los cuales son lavados diariamente, los residuos generados corresponden a una suspensión acuosa, que contiene las excretas animales líquidas y sólidas, el agua de lavado de pisos y la cama animal (paja, viruta u otro material) compuesta mayoritariamente por residuos vegetales fibrosos.

En cuanto a la crianza estabulada abierta, todas las excretas se descargan en una cama vegetal, la que es retirada como residuo sólido una vez que la camada pasa a otra fase de crianza, o llega a su peso final de sacrificio.<sup>25</sup>

### 2.2.1.2 Composición de las excretas de los cerdos.

Las excretas de cerdo es un desecho del todo heterogéneo, posee gran variedad de materiales de tipo orgánico principalmente, así como su estado de agregación. Desde líquidos (en su mayoría), procedentes de aguas de lavado, hasta sólidos, en su mayoría orgánicos. Su consistencia es ideal para su aprovechamiento en biodigestores.

**Tabla 2.3:** Composición típica de los purines frescos y digeridos anaeróbicamente.

Parámetros	Unidades	Excretas Frescas	Excretas digeridas anaeróbicamente
pH		7,5	8,40
Sólidos totales	g/Kg	52,97	31,72
Sólidos volátiles	g/Kg	35,18	17,17
Demanda química de oxígeno	(DQO) g/Kg	70,59	41,23
Nitrógeno amoniacal	g/Kg	3,39	3,68
Nitrógeno orgánico	g/Kg	2,24	1,05
Alcalinidad total	gCaCO <sub>3</sub> /Kg	13,42	14,51
Ácidos volátiles totales	gAcetato/Kg	10,84	0,24

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** MONCAYO, Gabriel, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás, Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008, p. 143, Barcelona - España.

En la tabla 2.3 se muestra la composición de los purines antes y después de un tratamiento anaeróbico.

<sup>25</sup> MONCAYO, Gabriel, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás, Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008, p. 141 - 142, Barcelona - España.

### 2.2.1.3 Volumen de excretas producidas por el cerdo.

En promedio un cerdo según la edad excreta de 2.7 a 8.5 lbs. de heces sólidas al día, y dependiendo del régimen alimenticio de 2.9 a 9.1 lbs. de orina. Las cantidades de heces y orina producidos por el animal / día, son aproximadamente las que se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4:** Cantidades de heces y orina producidos por peso del cerdo por día.

Peso del Cerdo (lbs)	Heces (lbs/día)	Orina (lbs/día)	Total excretas (lbs/día)
40-80	2.7	2.9	5.6
80-120	5.4	6.1	11.5
120-160	6.5	8.1	14.6
160-200	8.5	9.1	17.6

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 195, San Francisco – California.

Los cerdos con los que trabajamos en esta investigación son cerdos de engorde que cada uno pesa aproximadamente 154 lbs, es decir aproximadamente producen diariamente 6.5 lbs de heces y 8.1 lbs de orina.

### 2.2.2 Tratamientos de las aguas residuales.

La purificación del agua puede ser muy compleja o relativamente simple, dependiendo de las propiedades del agua y el grado de pureza requerido. Se emplean muchos métodos y combinaciones de ellos, pero todos abarcan tres procesos básicos: Tratamiento físico, químico y fisicoquímico.

Existe un cuarto proceso básico, el tratamiento biológico, que se emplea a menudo para purificar agua de desecho antes de descargarla. Este proceso aprovecha la acción de algunos microorganismos para inducir diversas reacciones químicas y fisicoquímicas. Generalmente el tratamiento del agua de

desecho es mucho más complicado que el que se aplica al agua que intervendrá en un proceso.

Los métodos de tratamiento de aguas, estudian algunos de los problemas técnicos que se presentan y los principios en que se basan.<sup>26</sup>

### **2.2.2.1 Tratamiento físico.**

El tratamiento físico abarca los procesos mediante los cuales las impurezas se separan del agua sin producirse cambios en la composición de las sustancias. Los métodos más comunes son sedimentación, colado y filtrado, separación de fases líquidas múltiples, desgasificación, dilución, eliminación de arrastres, destilación y descarga subterránea.

#### Sedimentación:

En la sedimentación se aprovecha la acción que ejerce la fuerza de gravedad sobre las partículas más pesadas que el agua, que descienden depositándose sobre el fondo. Las aguas superficiales contienen diferentes cantidades de materia en suspensión y este método se utiliza para clarificar el agua cruda, ya sea por sedimentación simple o mediante la adición de coagulantes químicos.

#### Colado y filtrado:

Los coladores y filtros pueden utilizarse cuando sea necesario eliminar sólidos suspendidos o flotantes en el agua, ya sea como paso adicional, después de la sedimentación, o cuando el espacio disponible no permite la instalación de depósitos de sedimentación.

---

<sup>26</sup> **POWELL**, Sheppard, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1988, p. 57 – 96, México D.F.

### Separación de fases líquidas múltiples:

A menudo, por medios físicos, pueden separarse del agua uno o más líquidos que, como resultado de la diferencia en su gravedad específica no son miscibles con ella.

### Desgasificación:

Las operaciones de extracción, tales como la desaereación y aereación físicas, son procesos que sirven para eliminar los gases indeseables disueltos en el agua.

### Dilución:

La eliminación de altas concentraciones salinas del agua de desecho proveniente de las industrias de los álcalis y del petróleo, presenta un problema especial. Existen problemas similares en otras plantas químicas en donde los efluentes contienen sulfatos de sodio y sólidos orgánicos presentes en altas concentraciones.

### Eliminación del arrastre de líquido y sólidos:

Se utiliza en el funcionamiento de las calderas para la separación del líquido y de los sólidos presentes en el vapor. Este proceso consiste en permitir que dentro del domo de vapor, sobre el nivel del agua, quede un espacio libre suficiente para que las gotas arrastradas se separen.

### Destilación:

La destilación es el método más antiguo para obtener agua pura de alta calidad. Mediante este proceso puramente físico de evaporación y condensación pueden eliminarse casi totalmente tanto los sólidos disueltos como los suspendidos.

### Descarga subterránea:

La descarga subterránea es un método para la eliminación de desechos líquidos dentro de los estratos permeables de la tierra. Sólo constituye un

método satisfactorio en zonas donde otros sistemas son muy costosos o se carece de cualquier otra solución.<sup>27</sup>

#### **2.2.2.2 Tratamiento químico.**

El tratamiento químico es uno de los procesos en los que la separación de las impurezas del agua implica la alteración de la composición del material contaminante. Puede incluir operaciones de precipitación, intercambio de iones, reacción, reacciones de oxidación y reducción, neutralización, desgasificación, control químico de desarrollos biológicos y esterilización.

##### Precipitación:

Cuando se añaden a una solución acuosa algunas sales solubles, parte de los iones libres pueden reaccionar para formar compuestos comparativamente insolubles. El precipitado puede separarse por filtración o decantación del líquido luego de que se ha asentado el precipitado. La precipitación se produce de acuerdo con leyes definidas, que rigen los pesos de combinación de los reactivos y sus productos de solubilidad.

##### Ruptura de emulsiones:

Las emulsiones orgánicas que forman los aceites con las aguas de desecho presentan un problema de eliminación porque contienen una cantidad considerable de materia orgánica con una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y al romperse la emulsión libera aceite que no puede descargarse a las corrientes superficiales.

##### Intercambio iónico:

Para que el suministro de agua sea satisfactorio y pueda utilizarse en procesos o en alimentación de calderas, es necesario eliminar cationes o aniones o bien ambos.

---

<sup>27</sup> **POWELL**, Sheppard, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1988, p. 57 – 96, México D.F.

### Reacciones con agentes secuestrantes:

Consiste en el secuestro de impurezas mediante la formación de complejos solubles. En este método, ciertos iones normalmente positivos reaccionan con un ion complejo negativo, quedando firmemente sujetos.

### Reacciones de oxidación y reducción:

Las aguas superficiales y subterráneas pueden contener sustancias que producen olores y sabores que impiden su uso como agua potable o en otros procesos. Estas sustancias son casi siempre orgánicas y a menudo se pueden eliminar por oxidación.

Con el uso de boquillas el agua se atomiza en el aire en forma de finas gotitas que caen sobre el estanque de aspersión. El contacto íntimo que se establece entre el agua y el aire permite la oxidación deseada y por lo general, se liberan al mismo tiempo los gases disueltos.

### Neutralización:

En algunos casos, para que el agua que se utiliza en un proceso sea de calidad satisfactoria o para el tratamiento de aguas de desecho, se requiere la neutralización de la acidez o la basicidad.<sup>28</sup>

### **2.2.2.3 Tratamientos fisicoquímicos.**

Varios procesos importantes de tratamiento de agua dependen de la acción química y física combinadas. Entre ellos están la coagulación, la adsorción y la absorción, los desactivadores de crecimiento de cristales, los aditivos para cambiar la tensión superficial y la inhibición de corrosión.

---

<sup>28</sup> POWELL, Sheppard, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1988, p. 57 – 96, México D.F.

### Coagulación:

Las aguas superficiales contienen materia en suspensión, la luz que absorben tanto las sustancias orgánicas como las minerales origina el color. Un coagulante químico puede hacer que los materiales suspendidos se reúnan en partículas mayores denominadas coágulos o grumos. Por medio de una acción física como la agitación, se ayuda a que las partículas se aglutinen de mejor manera y se sedimenten por gravedad.

### Adsorción y absorción:

A menudo para eliminar el color, el sabor y los olores del agua, se utilizan los procesos de adsorción y absorción de materias orgánicas y coloidales, formándose precipitados floculentos de sedimentación más rápida.

### Desactivadores de crecimiento de cristales:

En diversos procesos de tratamiento se emplean las propiedades de desactivación superficial de numerosos compuestos químicos, con la finalidad de retrasar o inhibir el crecimiento de cristales.<sup>29</sup>

#### **2.2.2.4 Tratamiento biológico.**

El tratamiento biológico se utiliza comúnmente para tratar aguas de desecho que contienen materia orgánica disuelta. Las bacterias desdoblan los compuestos complejos en otros más sencillos y estables; los productos finales normales son dióxido de carbono, agua, nitratos y sulfatos. Este cambio se realiza mediante el metabolismo y síntesis celular de los microorganismos presentes. Por lo general, los procesos se llevan a cabo en presencia de un exceso de oxígeno disuelto y la operación se conoce como descomposición aeróbica. Existe otro grupo de microorganismos que pueden desarrollarse en

---

<sup>29</sup> **POWELL**, Sheppard, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1988, p. 57 – 96, México D.F.

un ambiente carente de oxígeno disuelto y, en estas condiciones, se tratará de descomposición anaeróbica.

Los tratamientos físicos, químicos y físico-químicos antes mencionados no permiten ser utilizados para cumplir con el objetivo de éste proyecto, el mismo que se sustenta en evitar las descargas directas en cuerpos de agua y en la eliminación de los malos olores de la excretas. Por ésta razón el tratamiento biológico utilizando bacterias anaeróbicas es el más recomendado para reciclar el estiércol del ganado porcino, utilizando un biodigestor bajo condiciones controladas de temperatura, calidad de materia orgánica y pH. Obteniéndose como resultado gas combustible conocido como biogás en volúmenes suficientes para ser quemado en máquinas de combustión interna y el efluente orgánico llamado biofertilizante, que tiene concentraciones de nitrógeno, fosforo y potasio que puede ser utilizado directamente en el suelo al igual que los lodos húmedos obtenidos como producto de la descomposición bacteriana.<sup>30</sup>

---

<sup>30</sup> **POWELL**, Sheppard, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1988, p. 57 – 96, México D.F.

## CAPITULO III. SISTEMA DE PRODUCCIÓN

### 3.1 BIODIGESTOR.

En el Ecuador las zonas rurales o agropecuarias no disponen de la suficiente energía, sea por falta de transporte como: líneas de transmisión, líneas de distribución para energía eléctrica, carreteras, poliductos para combustibles, lo que encarece el valor de éste recurso. Una solución sería la implementación de un biodigestor para aprovechar las excretas animales y residuos de cultivos.

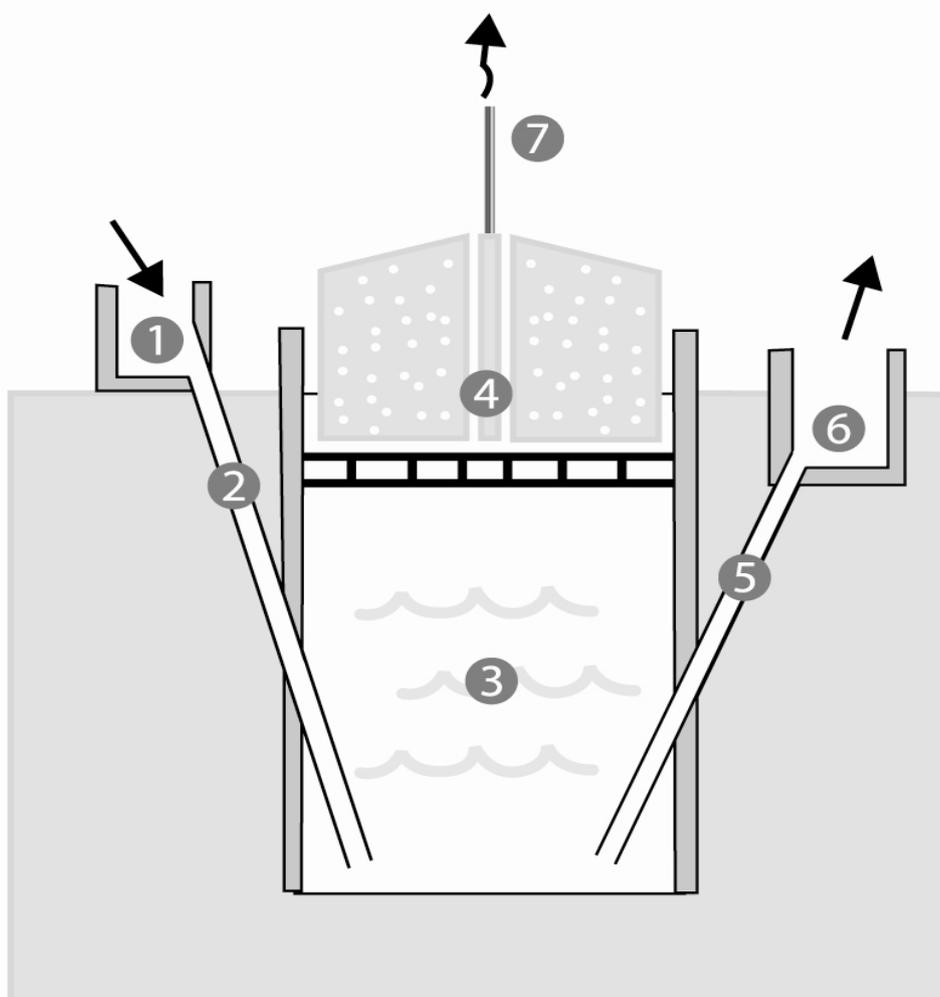


Figura 3.1. Partes del biodigestor.

Elaboración: Jaramillo, A. 2009.

En la figura 3.1 se encuentra un esquema de un biodigestor en el que constan las diferentes partes que lo componen:

**Tabla 3.1:** Partes del biodigestor.

	<b>Partes.</b>
<b>1</b>	Tanque de entrada (afluente).
<b>2</b>	Tubería de entrada.
<b>3</b>	Tanque de biodigestión.
<b>4</b>	Tanque de colección de gas.
<b>5</b>	Tubería de salida.
<b>6</b>	Tanque de salida (efluente).
<b>7</b>	Tubería de salida del gas.

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

Para una buena operación de un biodigestor es necesario que reúna las siguientes características:

- Hermético, para evitar fugas del biogás o entradas de aire.
- Térmicamente aislado, para evitar cambios bruscos de temperatura.
- Contar con una válvula de seguridad en el contenedor primario.
- Tener libre acceso para mantenimiento.
- Tener un sistema para romper las natas que se forman.

Los biodigestores pueden ser construidos bajo tierra o sobre la superficie. En zonas frías es mejor hacerlo bajo la tierra porque la temperatura es más alta que en la superficie. También pueden ser construidos bajo un invernadero o utilizar algún sistema de calentamiento. El hacerlo bajo tierra evita daños por el ambiente o accidentes.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> **PROAGRO**, Cooperación Técnica Alemana, Taller Práctico sobre Biodigestores Familiares de Bajo Costo, 2007, La Paz – Bolivia.

Un biodigestor puede prácticamente eliminar el olor una vez procesado el residuo, al tiempo que el biogás producido puede ser aprovechado para la generación de electricidad y calor, siendo indudablemente la mejor solución técnica y económica en estos casos.<sup>32</sup>

### **3.1.1 Frecuencias de carga de un biodigestor**

Según la necesidad y el uso que se vaya a dar a un biodigestor, existen distintas frecuencias de carga:

#### **3.1.1.1 Intermitente.**

Se carga de forma total una sola vez y la descarga se realiza cuando ha dejado de producir el gas combustible.

#### **3.1.1.2 Semicontínuos.**

Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás, siempre que se mantengan las condiciones de operación iniciales.

#### **3.1.1.3 Continuos.**

Este tipo de digestor se desarrolla principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción, agitación, así como para su control.<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> **SÁNCHEZ**, Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. WWF – Fundación Natura, 2003, Capítulo 9, p. 104, Quito – Ecuador.

<sup>33</sup> **PROAGRO**, Cooperación Técnica Alemana, Taller Práctico sobre Biodigestores Familiares de Bajo Costo, 2007, La Paz – Bolivia.

### 3.1.2 Tipos de biodigestores.

Existen varios tipos de biodigestores, de los cuales los más importantes son:

#### 3.1.2.1 Biodigestor tipo chino de cúpula fija (figura 3.2):

Biodigestor de cúpula fija generalmente metálica, su principal característica es que trabaja con presión variable. Y consiste en un digestor cerrado en forma de bóveda esférica, con el gasómetro fijo e inmóvil. El gas se almacena en un volumen libre de la parte superior del digestor, cuando éste se llena, la presión desplaza el material de fermentación hacia el tanque de compensación. Si el consumo excede a la producción, el volumen ocupado por el biogás disminuye, y por lo tanto, el sustrato desplazado regresa al digestor. En consecuencia, la presión oscila dependiendo de la cantidad de gas almacenado en la parte superior del digestor.

#### Ventajas:

- Se emplean materiales convencionales como ladrillo, bloque, cemento, etc.
- No hay partes metálicas sujetas a corrosión.
- Con un buen mantenimiento puede tener una vida útil de hasta 20 años.

#### Desventajas:

- La presión de gas no es constante, esto afecta a la eficiencia de los equipos y en ciertas ocasiones puede ser la causa de fugas en el biodigestor debido a los esfuerzos cíclicos que se presentan en las paredes del biodigestor.
- Debido a su principio de funcionamiento, la cúpula debe ser hermética, lo que requiere una construcción compleja.
- Los costos de impermeabilización son altos.

### 3.1.2.2 Biodigestor tipo hindú de cúpula flotante (figura 3.3):

Biodigestor construido generalmente de ladrillos, cemento y acero. Estos biodigestores poseen una campana donde se almacena el biogás y que a su vez flota sobre el residual. La campana sube a medida que se produce gas y baja a medida que es consumido, lo que produce que la presión dentro del reactor sea baja y constante. En el caso de que se desee una mayor presión se puede colocar peso sobre la campana, la cual se desliza sobre una guía lo que proporciona cierta facilidad de movimiento. Esto produce el rompimiento de la nata que se suele formar en la superficie de la mezcla y que puede llegar a impedir que el gas escape.

#### Ventajas:

- Trabaja a una presión constante.
- Se puede determinar con facilidad la cantidad de gas observando el nivel de la cúpula.

#### Desventajas:

- La cúpula si no es de acero inoxidable, está expuesta a corrosión.
- Los costos de construcción y mantenimiento de la campana son altos, si ésta es mecánica.

### 3.1.2.3 Biodigestor tubular (figura 3.4).

Consiste en una bolsa o balón completamente sellado. El gas se almacena en la parte superior, aproximadamente un 25% del volumen total. Los tubos de entrada y salida están directamente sujetos a la pared de la bolsa. Esta planta funciona como una cúpula fija, cuando la cámara de gas está llena. El costo en relación con el digestor de cúpula fija se puede reducir en un 50% o más. Este tipo de planta es recomendado donde el peligro de que se dañe la bolsa es mínimo, y donde hay temperaturas altas y constantes. Su instalación es rápida

y sencilla pero debido a su baja presión cerca de 15 cm de columna de agua es necesario colocarle sobrepesos al balón para aumentarla.

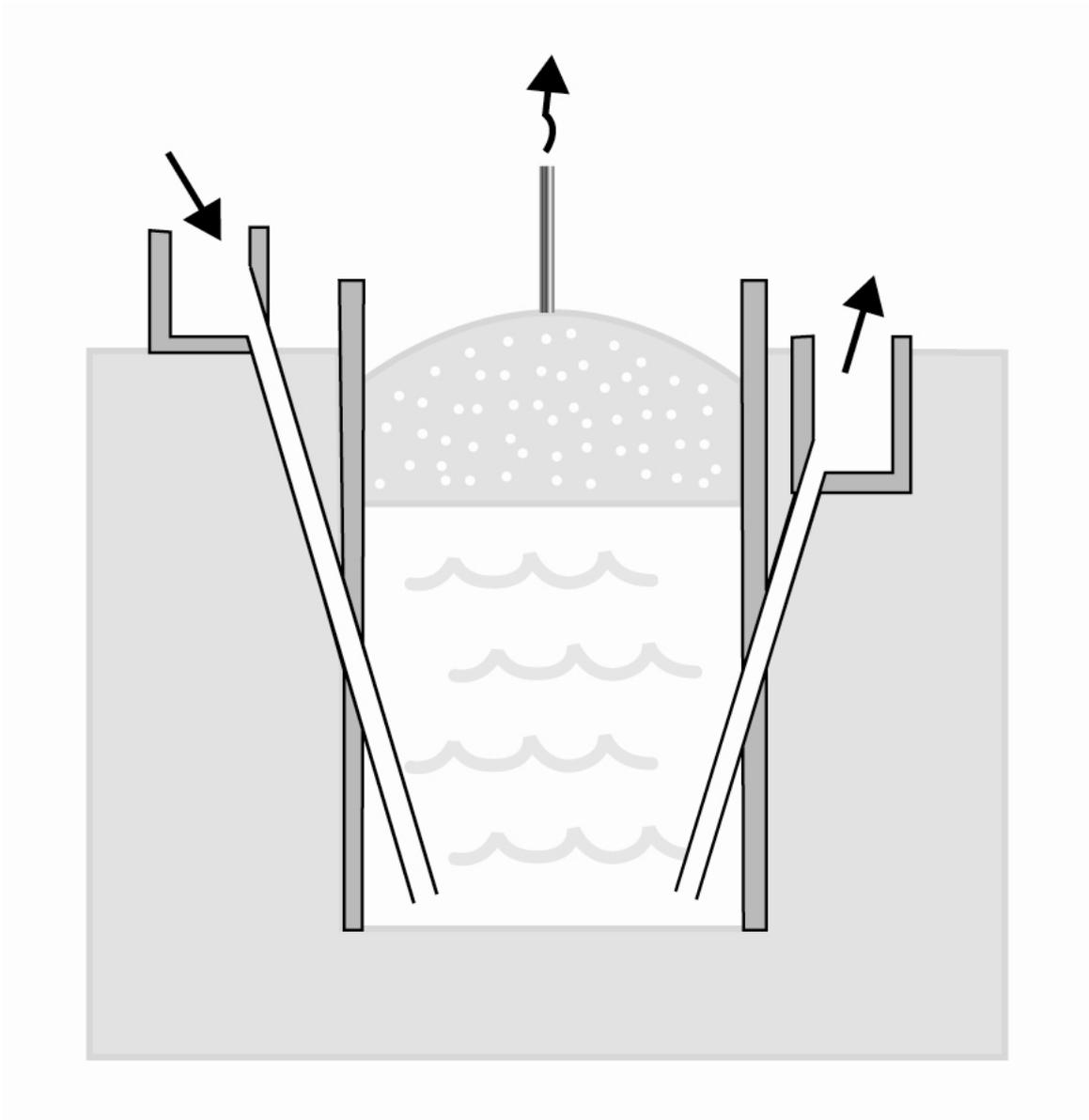
El material plástico debe ser resistente a la intemperie, así como a los rayos ultravioletas.

Ventajas:

- Son de bajo costo.
- Tienen facilidad de transporte y construcción.
- Soporta altas temperaturas del digestor.
- Fácil limpieza, vaciado y mantenimiento.

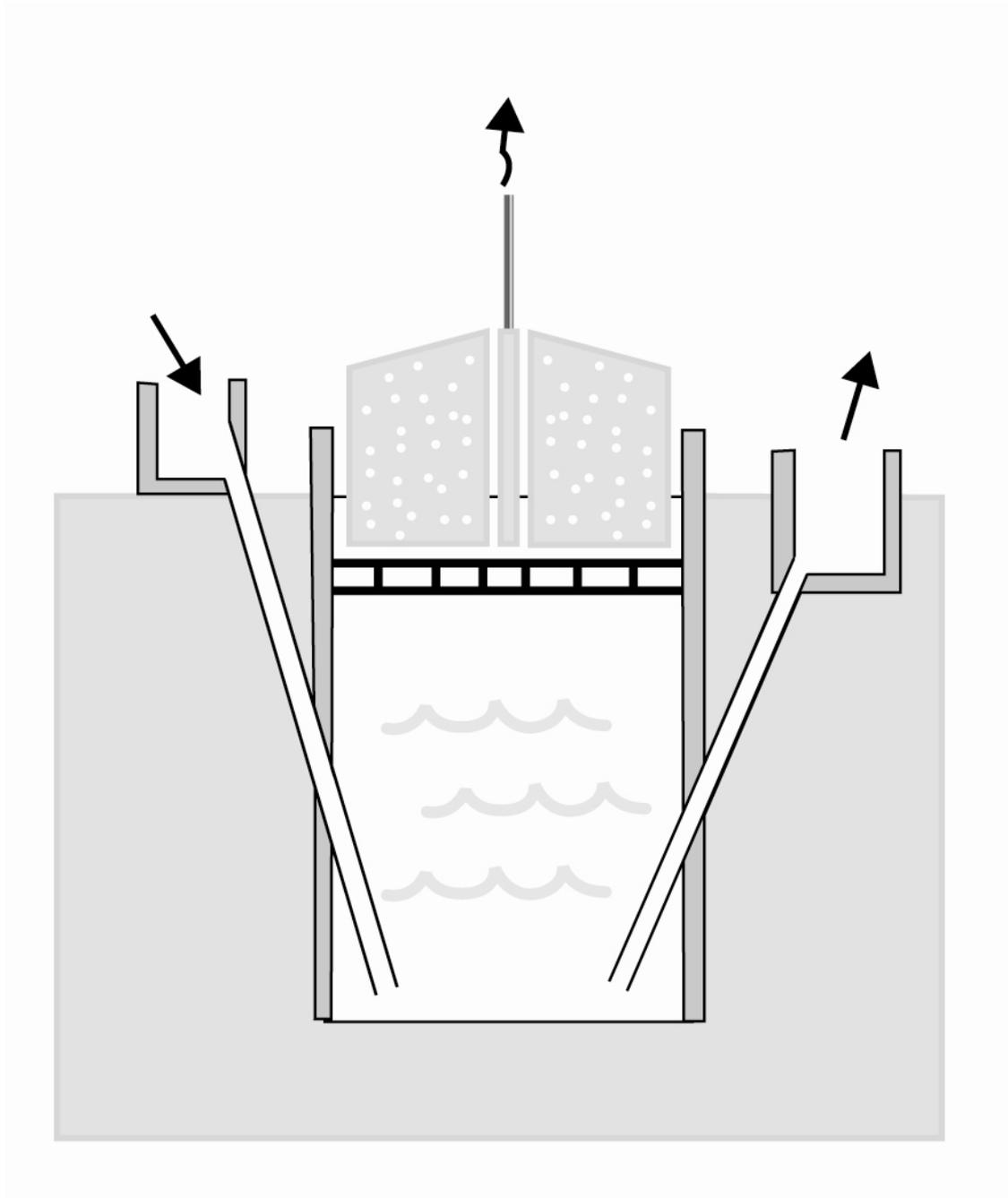
Desventajas:

- Tienen corto período de vida (de 2 a 5 años).
- Son susceptibles a daño.
- No fomenta el empleo local.



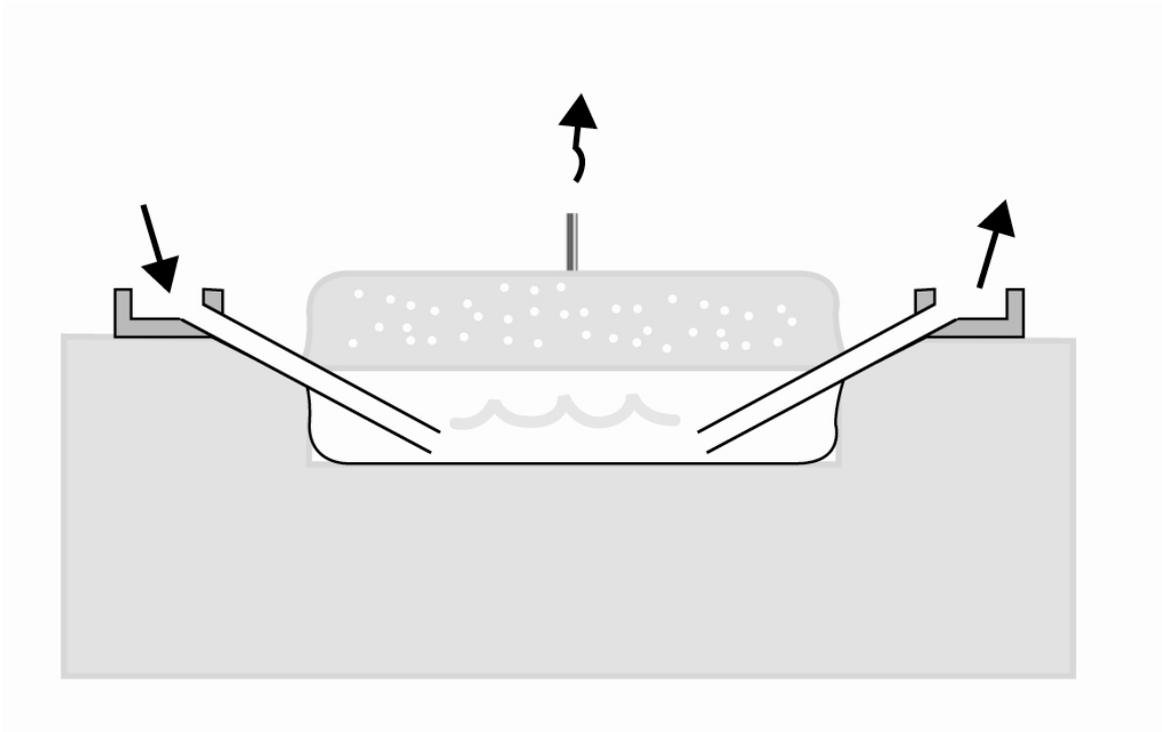
**Figura 3.2:** Biodigestor cúpula fija.

**Elaboración:** Jaramillo, A. 2009.



**Figura 3.3:** Biodigestor cúpula flotante.

**Elaboración:** Jaramillo, A. 2009.



**Figura 3.4:** Biodigestor tubular.

**Elaboración:** Jaramillo, A. 2009.

En la tabla 3.2 se presentan los tres tipos de digestores anteriormente mencionados, así como también los criterios que permiten comparar ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

**Tabla 3.2:** Tipos de biodigestores y algunos criterios comparativos.

	<b>Digestor cúpula flotante</b>	<b>Digestor cúpula fija</b>	<b>Digestor tubular</b>
<b>Principio de diseño</b>	Alimentación continua, intermitente	Alimentación continua, intermitente	Alimentación intermitente
<b>digestor/almacén de gas</b>	Digestor construido, almacenaje de gas en tambor flotante	Digestor construido, con cúpula fija	sistema integrado, de material plástico
<b>Sustratos más adecuados</b>	Estiércol animal, con o sin residuos vegetales	Estiércol animal más residuos vegetales	Estiércol animal solamente
<b>Vida útil</b>	8 – 12 años	12 – 20 años	2 – 5 años
<b>Volumen del digestor</b>	6 – 100 m <sup>3</sup>	6 – 20 m <sup>3</sup>	4 – 100 m <sup>3</sup>
<b>Ventajas</b>	Fácil construcción y operación, presión uniforme de gas, tecnología madura	Costo de construcción bajo, larga vida útil, buen aislamiento	Bajo costo, construcción prefabricada, fácil operación
<b>Desventajas</b>	La cúpula de metal puede oxidarse, alto costo, mayor mantenimiento	Aislamiento de la parte superior de almacenaje de gas, fluctuación de la presión de gas	No se construye in-situ, vida útil corta, susceptibles a daño
<b>Operación y mantenimiento</b>	Simple y sencillo, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas	Fácil después de una cuidadosa familiarización con la planta	Fácil, control regular de presión de gas
<b>Producción diaria de gas.*</b>	0,3 – 0,6	0,2 – 0,5	0,3 – 0,8
<b>Elementos costosos</b>	La cúpula metálica de gas, construcción digestor	La combinación de digestor y acumulador de gas; la excavación	La lona de plástico (geomembrana)
<b>Usos recomendados</b>	Fiable en grandes tamaños	Bueno para residuos agrícolas	Soluciones rápidas

**Elaboración:** Flores, J. 2009. **Fuente:** CHAVEZ R, CARTOLIN E y otros, Biodigestores y el protocolo de Kioto, 2007, Capítulo 3, p. 29 – 30, Lima – Perú.

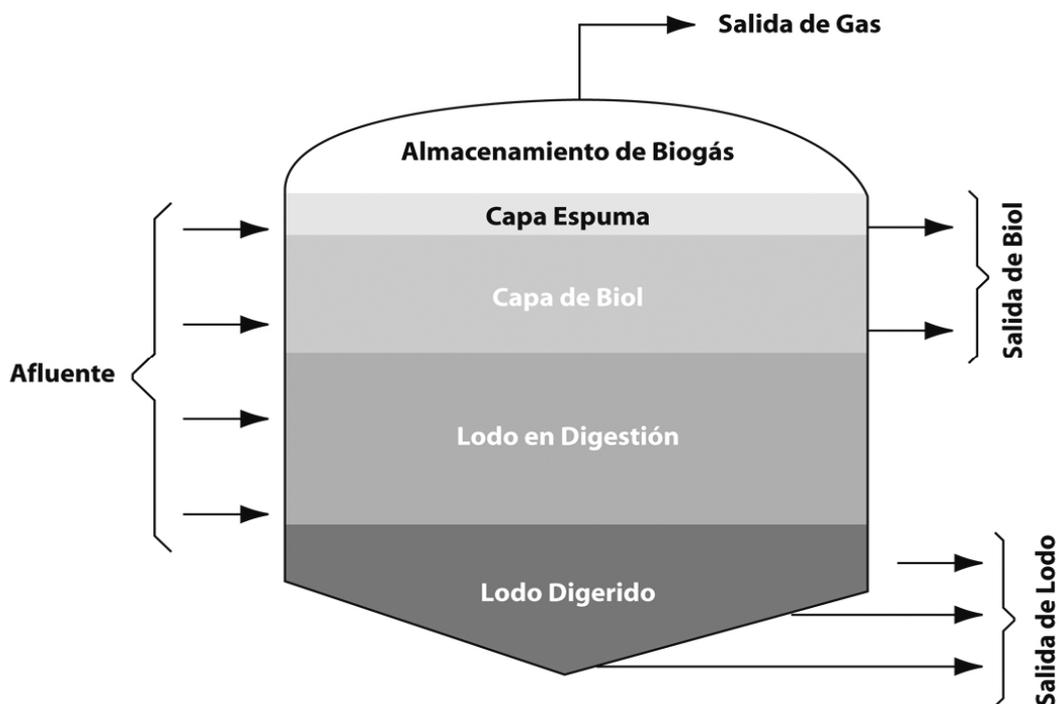
\* En m<sup>3</sup> de gas por m<sup>3</sup> de volumen de digestión (depende del sustrato).

### 3.1.3 Procesos de biodigestión.

Los biodigestores anaerobios pueden ser de tasa estándar, tasa alta o de dos etapas:

#### 3.1.3.1 Proceso de tasa estándar de biodigestión.

Es un proceso de biodigestión en el cual el contenido del biodigestor por lo general no se calienta ni se mezcla (figura 3.5).

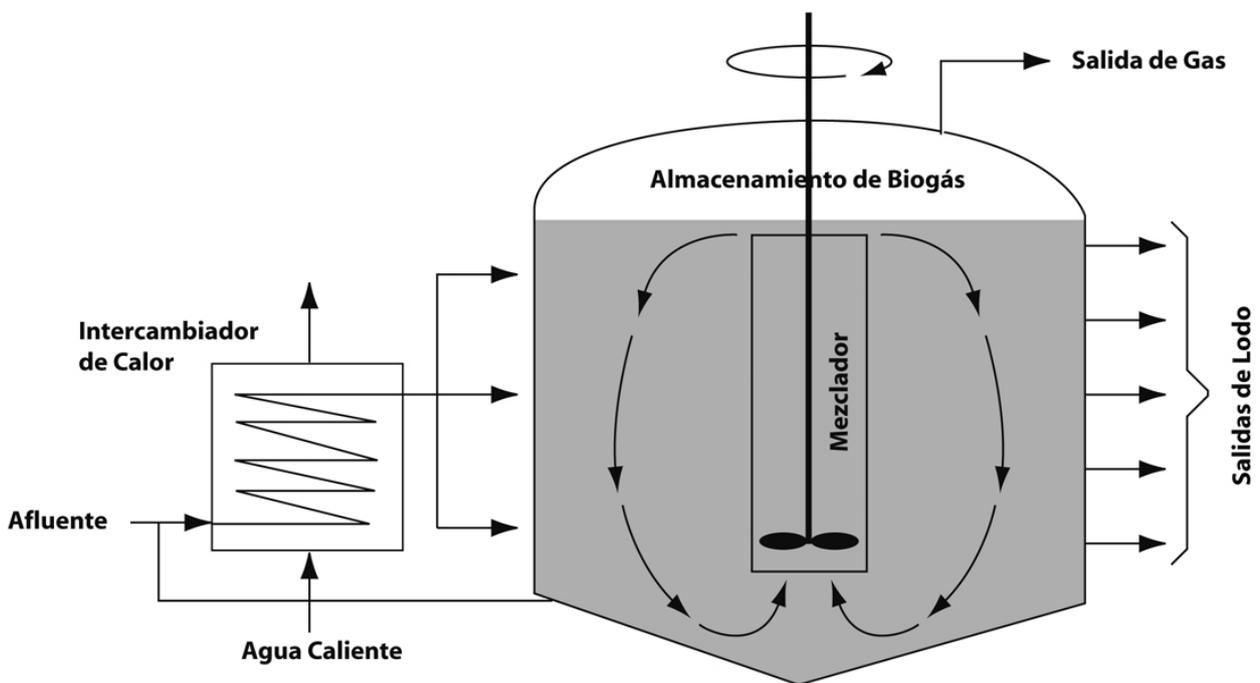


**Figura 3.5:** Proceso de tasa estándar.

**Elaboración:** Jaramillo, A. 2010.

### 3.1.3.2 Proceso de tasa alta de biodigestión.

Se caracteriza por calentar y mezclar por completo el contenido del biodigestor, con el fin de apresurar el proceso (figura 3.6).

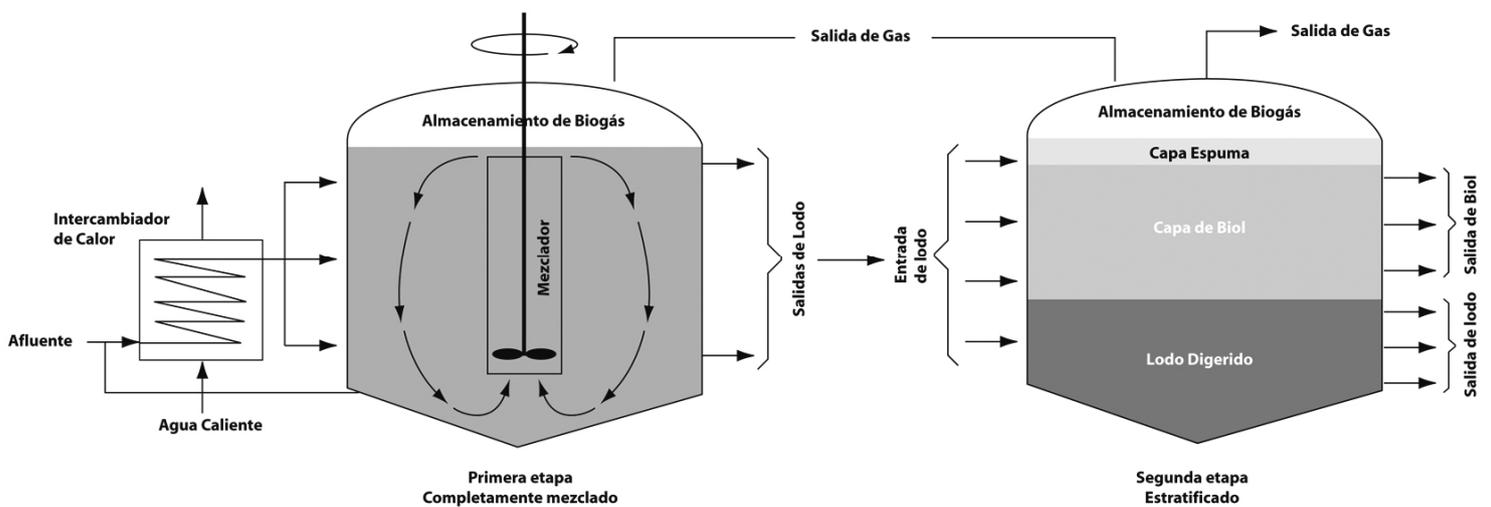


**Figura 3.6:** Proceso de tasa alta.

**Elaboración:** Jaramillo, A. 2010.

### 3.1.3.3 Proceso de dos etapas.

Proceso en el que se combinan los dos procesos anteriores. La función principal de la segunda etapa es separar los sólidos digeridos del biol (figura 3.7).<sup>34</sup>



**Figura 3.7:** Proceso de dos etapas.

**Elaboración:** Jaramillo, A. 2010.

<sup>34</sup> **RIGOLA**, Miguel, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, Mc. Graw Hill, 2004, p. 450 y 452, Barcelona – España.

## **3.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO.**

Se han propuesto tres alternativas diferentes de diseño que cumplen con los objetivos de este proyecto, las cuales se detallan a continuación.

### **3.2.1 Alternativa A: Biodigestor de cúpula flotante de tasa estándar de biodigestión.**

Biodigestor de cúpula flotante elaborado de ladrillo, cemento y acero, en el cual no se va a calentar el contenido del biodigestor, pero sin embargo si se lo va mezclar para asegurar la movilidad de los microorganismos y una buena biodigestión.

### **3.2.2 Alternativa B: Biodigestor de cúpula fija de tasa estándar de biodigestión.**

Biodigestor de cúpula fija elaborado de ladrillo, cemento y acero, en el cual no se va a calentar el contenido del biodigestor, pero sin embargo si se lo va mezclar para asegurar la movilidad de los microorganismos y una buena biodigestión.

### **3.2.3 Alternativa C: Biodigestor tipo tubular de tasa estándar de biodigestión.**

Biodigestor tubular elaborado de geomembrana (material plástico resistente a la intemperie y a los rayos ultravioletas) en forma tubular completamente sellado. En la entrada y salida de la bolsa, tubos PVC sujetos directamente a la pared de la bolsa.

### 3.3 MODELO DE SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.

El modelo que se usará para seleccionar la alternativa es el método de atributo ponderado. La medida de evaluación, simbolizada por  $R_j$  para cada alternativa  $j$  se define como:

$$R_j = \sum_{i=1}^n W_i * V_{ij} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Los números  $W_i$  son los pesos importantes del atributo, y  $V_{ij}$  es la evaluación del valor del atributo  $i$  para cada alternativa  $j$ . Si los atributos son del mismo peso (también llamados no ponderados),  $W_i = 1/m$ , según se determina de acuerdo con la ecuación 3.2.

$$W_i = \frac{\text{puntuación } i \text{ de importancia}}{\sum_{i=1}^m \text{puntuación } i \text{ de importancia}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Lo anterior significa que  $W_i$  puede sacarse de la sumatoria en la fórmula  $R_j$ .

La directriz de elección es la siguiente:

Se elige la alternativa con mayor valor  $R_j$ . Esta medida supone que pesos altos  $W_i$  implican atributos de mayor importancia, y puntuaciones altas  $V_{ij}$  indican un mejor desempeño de una alternativa. Se aplica un análisis de sensibilidad para cualquier puntuación, peso y valor de evaluación con el objetivo de determinar la sensibilidad de la decisión de éste.

**Tabla 3.3:** Asignación de jerarquía para cada atributo.

Evaluación de atributo	Jerarquización entre número
Muy malo	0 – 2
Malo	3 – 5
Bueno	6 – 8
Muy bueno	9 – 10

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Tabla 3.4:** Puntuaciones de atributos y valores de evaluación de las alternativas. (Valores de evaluación de 0 a 10)

Atributo <i>i</i>	Puntuación de importancia	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Costo	10	6	7	8
Seguridad de sellado	8	6	9	10
Facilidad de conseguir materiales	6	6	7	8
Mantenimiento	6	6	7	8
Adquisición y cambio de piezas	6	5	7	9
Consumo energético	3	4	5	8
<b>Total</b>	<b>39</b>			

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

La puntuación de importancia se la obtiene después de hacer un análisis de los atributos para cada alternativa, y de acuerdo con eso se da una valoración usando el mismo concepto de la tabla 3.3.

**Tabla 3.5:** Resultado del método de atributos ponderados.

Atributo <i>i</i>	Puntuación de importancia	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Costo	0,26	1,56	1,82	2,08
Seguridad de sellado	0,21	1,26	1,89	2,10
Facilidad de conseguir materiales	0,15	0,9	1,05	1,20
Mantenimiento	0,15	0,9	1,05	1,20
Adquisición y cambio de piezas	0,15	0,75	1,05	1,35
Consumo energético	0,08	0,32	0,40	0,64
<b>Totales ( <math>R_j</math> )</b>	<b>1,00</b>	<b>5,69</b>	<b>7,26</b>	<b>8,57</b>

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

### 3.3.1 Ejemplo de cálculo.

El valor del peso normalizado, para el caso del costo, se obtiene aplicando la ecuación 3.1, así:

$$W_i = \frac{\text{puntuación } i \text{ de importancia}}{\sum_{i=1}^m \text{puntuación } i \text{ de importancia}} = \frac{10}{39} = 0,26 \text{ (Ecuación 3.2)}$$

Luego se procede a calcular el valor de  $R_j$  para la alternativa A, mediante la ecuación 3.2; entonces:

$$R_j = \sum_{j=1}^n W_i * V_{ij} \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

$$R_j = (0,26 \times 6) + (0,21 \times 6) + (0,15 \times 6) + (0,15 \times 6) + (0,15 \times 5) + (0,08 \times 4)$$

$$R_j = 5,69$$

La tabla 3.3 incluye los pesos normalizados de cada atributo con la ayuda de la ecuación 3.2, el total es de 1,0 como se requería. La medida de evaluación  $R_j$  se obtiene aplicando la ecuación 3.1 a cada columna.

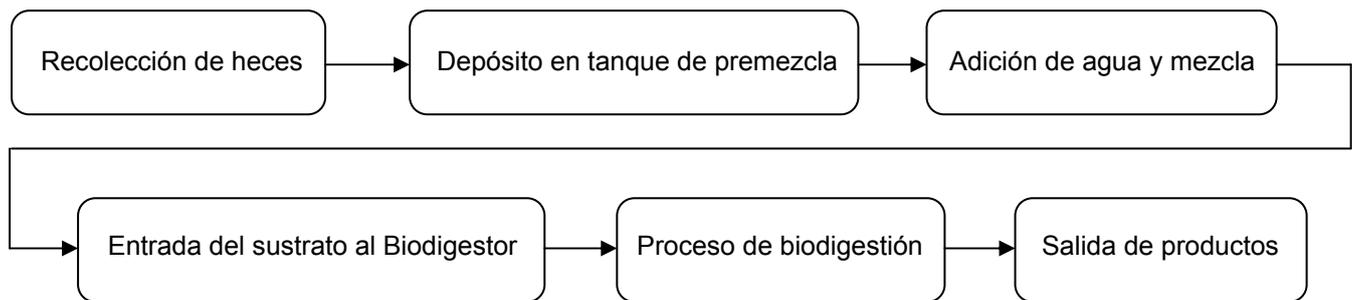
Cuando los totales se revisan en el caso de la máxima medida, la alternativa C es la mejor elección con  $R_3 = 8,57$ .

### 3.4. FACTORES Y VOLUMENES PARA EL DISEÑO DEL BIODIGESTOR.

Para diseñar un biodigestor que albergue diariamente las heces de 80 cerdos que empiezan pesando 154 lbs., es necesario considerar los siguientes factores y volúmenes:

#### 3.4.1 Sistema de tratamiento.

Es necesario tener claro cómo va a ser el sistema de tratamiento de las heces, el cual es descrito en la carta de flujo de la figura 3.8.



**Figura 3.8:** Carta de flujo del sistema de tratamiento.

**Elaboración:** Flores, J. 2010.

#### 3.4.2 Fuente de la materia orgánica.

Es el animal o cultivo de donde viene el residuo. Se utiliza estiércol de vacas, cerdos, ovejas, caballos, gallinas, etc., solo o mezclado. Se puede combinar el sustrato con componentes de fibra vegetal o cultivos como papa, maíz, soya, fréjol o yuca, prefiriendo aquellos de alto contenido de carbohidratos y lípidos.

### 3.4.3 Sólidos totales (ST).

Es la cantidad total de sólidos que contiene la biomasa. Este parámetro se calcula como los sólidos totales que se cargan diariamente al digestor. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir en el digestor debe ser de 8 a 15 %. Se logra esta dilución mezclando la biomasa con agua o recirculando biol. Esta dilución es importante para establecer un mejor contacto de las bacterias con el sustrato. Mezclas de biomasa con porcentajes de sólidos totales mayor al 15% son difíciles de bombear por las tuberías de alimentación al digestor. También son difíciles de agitar en el digestor o se requiere de grandes cantidades de energía para la agitación.

### 3.4.4 Sólidos volátiles (SV).

Los sólidos volátiles son la cantidad de masa orgánica que contiene la biomasa. Se determina los SV estimando el contenido de cenizas que se obtiene de la incineración de los sólidos totales durante 6 horas a 550 grados centígrados.

El conocimiento de la SV es importante ya que solo este porcentaje es el contenido real de masa orgánica en la biomasa. El resto es humedad, trazas inorgánicas y otras materias que no producen biogás. Solo este contenido de SV es el que produce el biogás durante la digestión anaeróbica en el biodigestor. El contenido de humedad (agua) no produce biogás, pero facilita el proceso de digestión.<sup>35</sup>

En la tabla 3.6 se ve la composición de las excretas en los distintos animales.

---

<sup>35</sup> **MONCAYO**, Gabriel, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008, p. 73, Barcelona – España.

**Tabla 3.6:** Composición de las excretas (incluido la orina), de algunos animales.

Animal	% Humedad (%M)	% Sólidos Totales (%ST)	% Sólidos Volátiles(%SV) (del %ST)	% Carbono (%C)(del %ST)	%Nitrógeno (%N) (del %ST)	Relación C/N
Vaca	86 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	80 <sup>a</sup>	30.6 <sup>a</sup>	1.7 <sup>a</sup>	18 <sup>a</sup>
Cerdo	87 <sup>b</sup>	13 <sup>b</sup>	77 <sup>b</sup>	76 <sup>c</sup>	3.8 <sup>b</sup>	25 <sup>c</sup>
Gallina	9.8 <sup>a</sup>	90.2 <sup>a</sup>	56.2 <sup>a</sup>	22.4 <sup>a</sup>	3.2 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>
Caballo	84 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	80 <sup>a</sup>	57.5 <sup>a</sup>	2.3 <sup>a</sup>	25 <sup>a</sup>

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** a. **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, *Other homes and garbage designs for self – sufficient living*, Sierra club books, 1975, p. 196, San Francisco – California.

b. **SÁNCHEZ**, Santiago, *Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones*, WWF – Fundación Natura, 2003, Capítulo 9, p. 111, Quito – Ecuador.

c. **MONCAYO**, Gabriel, *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*, Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008, p. 241, Barcelona - España.

### 3.4.5 Relación Carbono/Nitrógeno (relación C/N).

Las bacterias metanogénicas usan el carbono y el nitrógeno para multiplicarse y producir metano. Algunos autores como *Leckie* están de acuerdo con que las células usan una relación C/N de 30:1, por esto la relación óptima de nuestro afluyente debe acercarse a 30:1. En una relación cercana a 10:1 hay pérdidas de nitrógeno asimilables, en una relación mayor a 40:1 se inhibe el crecimiento de las bacterias por falta de oxígeno.

El nitrógeno está presente en los desperdicios en dos formas químicas, el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico, el primero tiene mayor disponibilidad para las bacterias anaeróbicas que el segundo. Las excretas de cerdo tienen aproximadamente 75% de nitrógeno amoniacal y 25% de nitrógeno orgánico.

Por la orina se elimina en mayor cantidad el exceso de nitrógeno del animal, por esto en explotaciones estabuladas las excretas van a tener mayor cantidad

de nitrógeno, la cantidad de orina presente en las excretas del animal afecta fuertemente la relación C/N.<sup>36</sup>

### **Cálculo de la relación C/N.**

Para los cálculos que vienen a continuación se necesita primero entender la siguiente nomenclatura:

C/N = relación carbono nitrógeno = 25 (tabla 3.6).

$W_r$  = peso total del material fresco (heces de cerdo).

%M = porcentaje de humedad del material fresco = 87% (tabla 3.6)

M = fracción decimal de humedad del material fresco.

%ST = porcentaje de sólidos totales del material fresco = 13% (tabla 3.6).

ST = fracción decimal del peso de los sólidos totales del material fresco.

$W_{ST}$  = peso de los sólidos totales en el material fresco.

%N = porcentaje de nitrógeno en el material fresco = 3,8% (tabla 3.6).

N = fracción decimal de nitrógeno del material fresco.

$W_N$  = peso del nitrógeno.

$W_C$  = peso de carbono.

- **Cálculo.**

En el proyecto se tiene 80 cerdos en etapa de engorde de 154 lbs. cada uno. Cada cerdo excreta 6,5 lbs/día (tabla 2.4) de heces.

$$W_r = 80 * 6,5 \text{ lbs/día}$$

$$W_r = \underline{520 \text{ lbs/día. de material fresco (heces de cerdo).}$$

---

<sup>36</sup> LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 198, San Francisco – California.

Entonces:

$$W_{ST} = W_r * ST \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

$$W_{ST} = 520 \text{ lbs/día} * 0,13$$

$$W_{ST} = \underline{67,6 \text{ lbs/día. de sólidos totales en el material fresco.}}$$

$$W_N = W_{ST} * N \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

$$W_N = 67,6 \text{ lbs} * 0,038$$

$$W_N = \underline{2,569 \text{ lbs/día. de nitrógeno.}}$$

$$W_C = W_N * C/N \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

$$W_C = 2,569 \text{ lbs/día} * 25$$

$$W_C = \underline{64,225 \text{ lbs/día. de carbono.}}$$

$$\text{Relación C/N} = W_C / W_N \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

$$\text{Relación C/N} = 64,225 \text{ lbs/día} / 2,569 \text{ lbs/día.}$$

$$\text{Relación C/N} = \underline{25:1}$$

Lo cual significa que hay 25 partes de carbono por cada parte de nitrógeno, lo que muestra que el material fresco (heces de cerdo) está muy cerca de una relación C/N óptima (30:1).

#### 3.4.6 Sustrato afluente al 8 %.

El sustrato afluente es la mezcla de agua y material fresco (heces de cerdo) que va a entrar en el biodigestor. Los porcentajes óptimos que debe contener éste sustrato son 8% de sólidos y 92% de líquidos (incluyendo claro el agua presente en el material fresco).<sup>37</sup>

---

<sup>37</sup> LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 200, San Francisco – California.

La cantidad de agua que se debe añadir para conseguir un sustrato afluyente al 8%, es:

### **Cálculo del volumen de agua a añadir.**

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

$W_w^I$  = peso del agua presente en el material fresco (heces de cerdo).

$W_w^{II}$  = peso total del agua en un sustrato afluyente al 8%.

$W_w$  = peso del agua que se va a añadir para formar un sustrato afluyente al 8%.

$V_w$  = volumen de agua que se va a añadir para formar un sustrato afluyente al 8%.

$V_r$  = volumen del material fresco.

$\rho_r$  = peso específico del material fresco.

$\rho$  = peso específico del agua.

- **Cálculo.**

$$W_{ST} = W_r * ST \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

$$W_w^I = W_r * M \quad \text{(Ecuación 3.7)}$$

$$W_w^{II} = 92/8 W_{ST} \quad \text{(Ecuación 3.8)}$$

$$W_w^{II} = 11,5 W_{ST}$$

$$W_w = W_w^{II} - W_w^I \quad \text{(Ecuación 3.9)}$$

$$W_w = 11,5 W_{ST} - W_r M$$

$$W_w = 11,5 W_r * (1 - M) - W_r M$$

$$W_w = 11,5 W_r - 11,5 W_r M - W_r M$$

$$W_w = 11,5 W_r - 12,5 W_r M$$

$$\rho = W / V \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

$$V = W / \rho$$

$$\rho = 1 \text{ Kg} / \text{L} = 62,3 \text{ lbs} / \text{ft}^3.$$

$$V_w = W_w / 62,3 \text{ lbs} / \text{ft}^3 \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

$$V_w = (11,5 W_r - 12,5 W_r M) / 62,3 \text{ lbs} / \text{ft}^3$$

$$V_w = 0,1845 W_r - 0,2 W_r M$$

$$V_w = (0,1845 * 520\text{lbs}) - (0,2 * 520\text{lbs} * 0,87)$$

$V_w = 5,46 \text{ ft}^3$ . de agua que se va a añadir para formar un sustrato afluyente al 8%.

$V_w = 154,57 \text{ L. de agua que se va a añadir para formar un sustrato afluyente al 8\%.$

$$W_w = V_w * 62,3 \text{ lbs} / \text{ft}^3$$

$$W_w = 5,46 \text{ ft}^3 * 62,3 \text{ lbs} / \text{ft}^3$$

$$W_w = 340,16 \text{ lbs.}$$

### **Cálculo del volumen del sustrato afluyente al 8 %.**

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

$W_{SL}$  = peso total del sustrato afluyente al 8%.

$V_{SL}$  = volumen total del sustrato afluyente al 8%.

$\rho_{SL}$  = peso específico del sustrato afluyente al 8%.

- **Cálculo.**

$$W_{SL} = W_w + W_r \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

$$W_{SL} = 340,16 \text{ lbs} + 520 \text{ lbs.}$$

$$W_{SL} = 860,16 \text{ lbs.}$$

$$V_{SL} = W_{SL} / \rho_{SL} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

$$\rho_{SL} = 65 \text{ lbs} / \text{ft}^3.$$

$$V_{SL} = 860,16 \text{ lbs.} / 65 \text{ lbs} / \text{ft}^3.$$

$$V_{SL} = 13,233 \text{ ft}^3. \text{ diarios de sustrato afluyente al 8\%}$$

$$V_{SL} = \underline{374,63 \text{ L. diarios de sustrato afluyente al 8\%}}$$

$$V_{SL} = \underline{374,63 \text{ L.} * 30 \text{ (días de retención)} = 11238,96 \text{ L. totales de sustrato afluyente durante el ciclo completo.}}$$

### 3.4.7 Tanque de premezclado.

En este tanque se efectúa la mezcla de agua con material fresco (heces de cerdo) para formar el sustrato afluyente al 8% antes de ingresar al biodigestor. Se van a producir 374,63 L. de sustrato afluyente al 8% diariamente, se va a considerar un 25% adicional para evitar el desbordamiento, es decir la mezcla se va a efectuar en un tanque de 500 L. que puede ser metálico, plástico o de hormigón.

### 3.4.8 Temperatura de Reacción (TC).

Se encuentra entre 3 y 70 grados centígrados, diferenciando tres rangos de temperatura.

- Sicrofílica: menor a 20 grados centígrados.
- Mesofílica: entre 20 y 40 grados centígrados.
- Termofílica: alrededor de 40 grados centígrados.

La producción de metano se incrementa con la temperatura y es óptima a 35 grados centígrados.<sup>38</sup>

Para este proyecto no se utilizara un sistema de calentamiento, así que la temperatura será de 25 °C (mesofílica, más o menos temperatura ambiente).

---

<sup>38</sup> **SÁNCHEZ**, Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones, WWF – Fundación Natura, 2003, Capítulo 9, p. 105, Quito – Ecuador.

### 3.4.9 Tiempo de retención en el digestor.

Una vez calculados los componentes de nuestro sustrato afluente, se debe encontrar cuanto tiempo el sustrato debe permanecer dentro del digestor. Para esto se debe calcular primero la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO).

La concentración DQO de la mayoría de los materiales se aproxima a 1,5 veces la concentración de sólidos volátiles, pero solo alrededor del 50% de los sólidos volátiles son biodegradables, y para poder expresarlos en ppm se multiplica por 16000 (ecuación 3.16).<sup>39</sup>

#### Cálculo de la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO).

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

VS = peso total de los sólidos volátiles del material fresco.

%VS = porcentaje de sólidos volátiles = 77% (tabla 3.6).

VS<sub>CON</sub> = concentración de los sólidos volátiles en el sustrato afluente.

DQO = concentración de la demanda química de oxígeno.

- **Cálculo.**

$$VS = W_r * (1 - M) * (\%VS / 100) \quad \text{(Ecuación 3.14)}$$

$$VS = 520\text{lbs/día} * (1 - 0,87) * 0,77$$

$$VS = \underline{52,052 \text{ lbs/día. de sólidos volátiles del material fresco.}}$$

$$VS_{CON} = VS / V_{SL} \quad \text{(Ecuación 3.15)}$$

$$VS_{CON} = 52,052 \text{ lbs/día} / 13,233 \text{ ft}^3$$

---

<sup>39</sup> LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 203, 204, San Francisco – California.

$VS_{CON} = 3,933 \text{ lbs/ft}^3$ . de concentración de los sólidos volátiles en el sustrato afluente por día.

$$DQO = 0,5 * 1,5 * 16000 * VS_{CON} \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

$$DQO = 12000 * VS_{CON}$$

$$DQO = 12000 * 3,933 \text{ lbs/ft}^3$$

$$DQO = 47196 \text{ ppm. de concentración de DQO.}$$

### **Cálculo del tiempo de retención de sólidos mínimo en el digestor ( $TRS_m$ ).**

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

$TRS_m$  = tiempo de retención de sólidos mínimo del sustrato afluente (días).

a = constante, cuantas bacterias se producen por cantidad de comida (0,04).

b = constante, cuán rápido muere la bacteria (0,015).

k = factor de cuán rápido la bacteria va a consumir la comida (depende de la temperatura de digestión).

$K_c$  = mínima cantidad de comida requerida después que la bacteria pueda empezar a multiplicarse (depende de la temperatura de digestión).

Para calcular el tiempo de retención de sólidos mínimo en el digestor es necesario definir los valores de k y  $K_c$ , los cuales los podemos observar en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Valores de k y  $K_c$  para distintos rangos de temperatura.

Temperatura (°F)	k	$K_c$
59	3.37	18500
68	3.97	10400
77	4.73	6450
86	5.60	3800
95	6.67	2235

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 204, San Francisco – California.

La temperatura que vamos a tener en nuestro proyecto es de 25 °C (mesofílica) que es igual a 77 °F, y los valores para k y K<sub>c</sub> son 4,73 y 6450 respectivamente.

- **Cálculo.**

$$\frac{1}{TR_m} = \left[ a * k * \left[ 1 - \left( \frac{K_c}{K_c + DQO} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] - b \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

$$\frac{1}{TR_m} = \left[ 0,04 * 4,73 * \left[ 1 - \left( \frac{6450}{6450 + 47196} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] - 0,015$$

$$\frac{1}{TR_m} = 0,1086$$

$$TR_{m} = 1 / 0,1086$$

$TR_m = \underline{9,21 \text{ días de retención de sólidos mínimo del sustrato afluente.}}$

### **Calculo del tiempo total de retención del sustrato afluente en el digestor (TR).**

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

TR = tiempo total de retención del sustrato afluente en el biodigestor.

SF = factor de seguridad.

- **Cálculo.**

$$TR = SF * TR_{m} \quad (\text{Ecuación 3.18})$$

En la tabla 3.8 se muestra los TR según la FAO de diferentes tipos de estiércol.

**Tabla 3.8:** Tiempo de retención en días dependiendo del residuo animal (Temperatura Mesofílica).

Sustrato	Tiempo de Retención en días (TR)
Estiércol Vacuno Líquido	20-30
Estiércol Porcino Líquido	15-30
Estiércol Animal Mezclado con Plantas	50-80

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** FAO, Fundamentos Básicos Para El Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales, Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes, CEPIS, 1986, p. 20 – 21, Lima – Perú.

$$SF = TR / TRS_m$$

$$SF = 30 \text{ días} / 9,21 \text{ días}$$

$$SF = \underline{3,25}$$

El factor de seguridad obtenido establece un margen de seguridad entre el TR recomendado en la tabla 3.6 y el  $TRS_m$  calculado por la ecuación 3.17.

Este factor es usado para prevenir sobre recargas accidentales en el digestor.

#### 3.4.10 Tanque de biodigestión.

Una vez que el TR de nuestro sustrato afluente es calculado, el volumen del tanque de biodigestión puede ser calculado. Estos cálculos no incluyen el volumen de metano producido, es decir, que se calcula el volumen que va a ocupar el sustrato afluente durante el proceso.<sup>40</sup>

<sup>40</sup> **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 206, San Francisco – California.

### Calculo del volumen del tanque de biodigestión.

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

$V_t$  = volumen del tanque.

$V_{SL}$  = volumen total del sustrato afluente.

- **Cálculo.**

$$V_t = V_{SL} * TR$$

(Ecuación 3.19)

$$V_t = 13,233 \text{ ft}^3 * 30$$

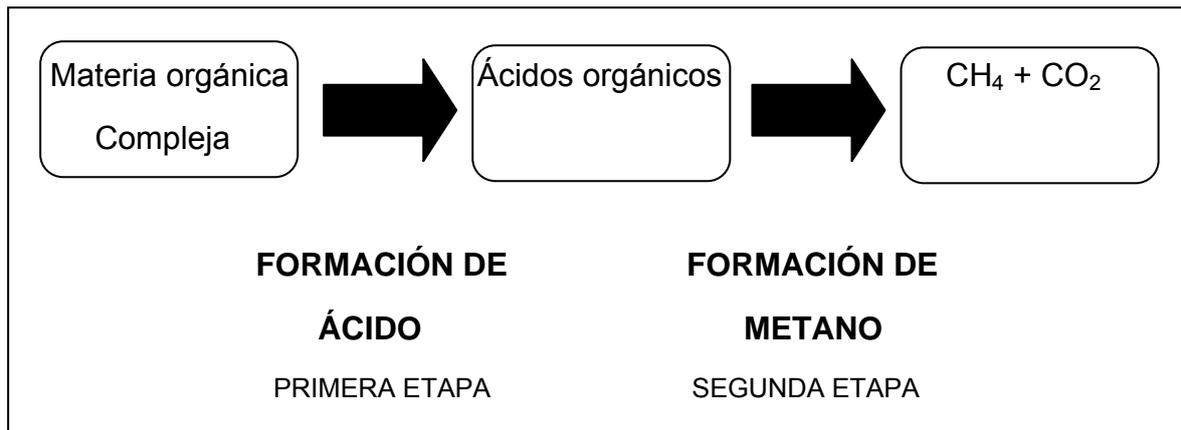
$$V_t = 396,99 \text{ ft}^3 / 35,31 \text{ ft}^3/\text{m}^3$$

$$V_t = 11,243 \text{ m}^3 = \underline{11,5 \text{ m}^3 \text{ de tanque.}}$$

#### 3.4.11 Proceso de biodigestión.

El proceso de digestión para la obtención de metano es anaeróbico, es decir en ausencia total de oxígeno. Bajo las condiciones óptimas las bacterias crecen convirtiendo los desperdicios orgánicos en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y gas metano ( $\text{CH}_4$ ). La velocidad de crecimiento de las bacterias es lenta y solo una pequeña porción del desperdicio degradado es convertido en nuevos microorganismos, la mayor parte es convertida en gas metano (en las excretas animales, alrededor del 50 % se convierte en metano).

El proceso de digestión anaeróbica de los materiales orgánicos complejos es considerado normalmente en dos etapas como se indica en la figura 3.9:



**Figura 3.9:** Proceso de biodigestión.

**Fuente:** LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 192, San Francisco – California.

La primera etapa no produce metano, en su lugar los materiales orgánicos complejos son alterados por bacterias comúnmente llamadas “formadoras de ácido”, transformando biológicamente las grasas, proteínas y carbohidratos en compuestos más simples (en su mayoría grasas orgánicas ácidas). Las bacterias formadoras de ácido obtienen de estas transformaciones pequeñas cantidades de energía para crecer y reproducirse. Ésta etapa convierte la materia orgánica a una forma más conveniente para la segunda etapa.

En la segunda etapa se produce el metano. Los ácidos orgánicos son convertidos por un especial grupo de bacterias llamadas “formadoras de metano” en biogás. Las bacterias formadoras de metano son estrictamente anaeróbicas y una pequeña cantidad de oxígeno las puede perjudicar, en la tabla 3.9 se muestra los distintos tipos de bacterias formadoras de metano y su clasificación.<sup>41</sup>

<sup>41</sup> LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 192, San Francisco – California.

**Tabla 3.9:** Clasificación de las bacterias formadoras de metano.

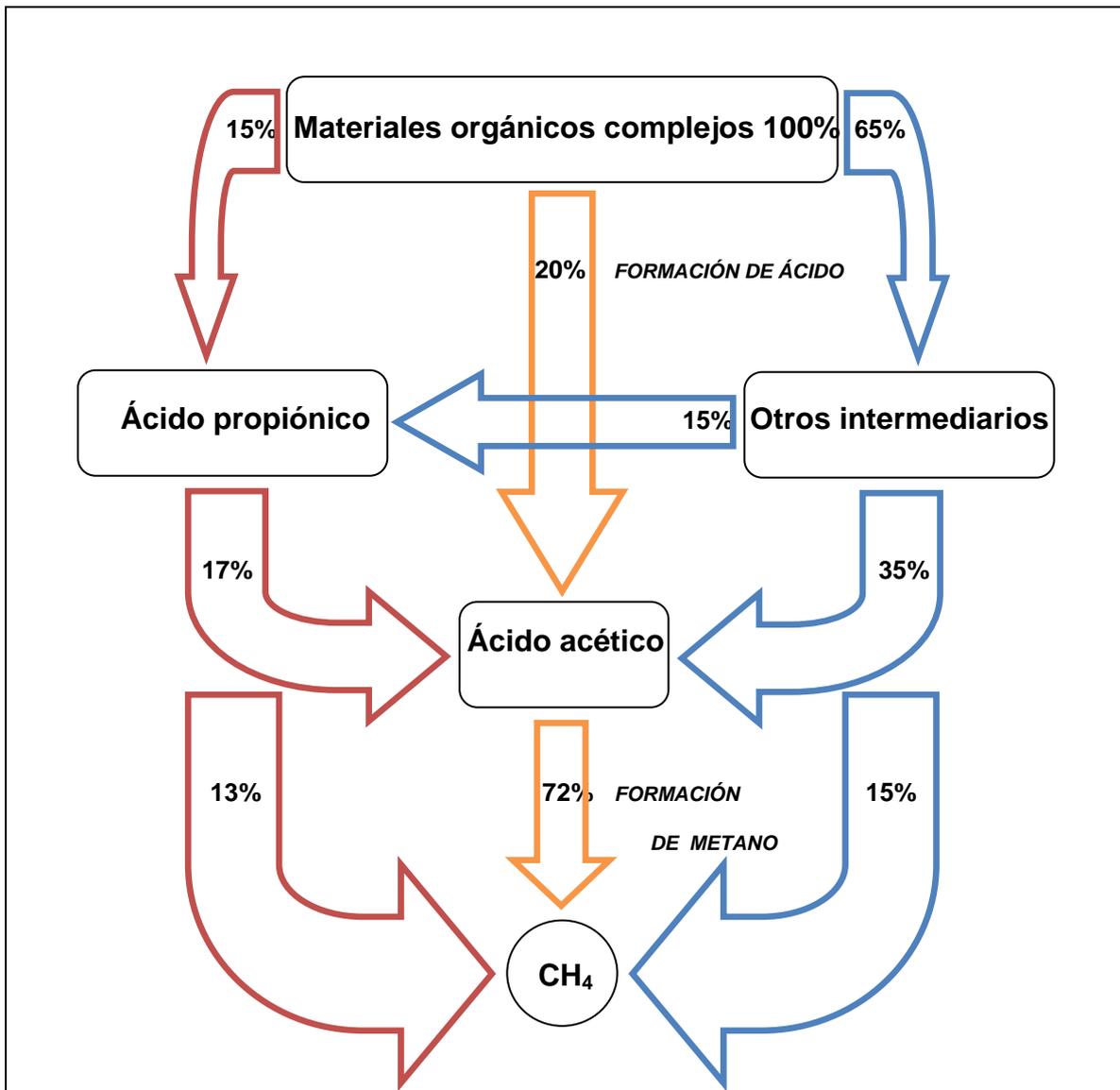
Orden	Familia	Genero	Especies
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	<i>Methanobacterium</i>	<i>methanofomicicum</i>
			<i>methanobryantil</i>
			<i>methano thermoautotrophic</i>
		<i>Methanobrevibacter</i>	<i>methanoruminantium</i>
			<i>methanoarboriphilus</i>
			<i>methanosmithil</i>
Methanococcales	Methanococcaceae	<i>Methanocoecus</i>	<i>methanovannielii</i>
			<i>methanovoltae</i>
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium</i>	<i>methanocaraci</i>
			<i>methanomarispiri</i>
		<i>Methanospillum</i>	<i>methanohongatei</i>
		<i>Methanomicrobium</i>	<i>methanomobile</i>
	Methamisarcinaceae	<i>Methanosarcina</i>	<i>methanobarkerie</i>

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** FAO, Fundamentos Básicos Para El Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales, Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes, CEPIS, 1986, p. 12, Lima – Perú.

Durante el tratamiento anaeróbico se forman en mayor proporción dos ácidos volátiles, el ácido acético y el ácido propiónico. La importancia de éstos ácidos se muestra en la figura 3.10 donde se muestra los distintos caminos de producción del gas metano.<sup>42</sup>

<sup>42</sup> LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 192, San Francisco – California.



**Figura 3.10:** Caminos de la formación de metano a partir de la materia orgánica compleja.  
**Fuente:** LECKIE, Jim, MASTERS, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 193, San Francisco – California.

#### 3.4.11.1 Productos de la biodigestión.

Los productos de la biodigestión que pueden ser utilizados como recursos son el biogás, fertilizante líquido (biol) y el lodo fertilizante.

### 3.4.11.1.1 Biogás y tanque de almacenamiento.

El biogás es la mezcla gaseosa entre gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se puede utilizar para la producción de energía y calor. Sus porcentajes varían dependiendo de la calidad del sustrato en función de los porcentajes de carbohidratos, grasas y proteína variando el  $\text{CH}_4$  entre el 60 y 70 %, mientras que el  $\text{CO}_2$  varía entre el 30 y 40 %. Existen diferentes alternativas de utilización de un metro cúbico de biogás:

- Puede funcionar una heladera de 14 pies cúbicos durante 10 horas.
- Puede funcionar una lámpara durante 12 horas.
- Puede funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas.
- Puede generar 6,25 Kw-h de electricidad.
- Puede funcionar una pantalla infrarroja de 3000 calorías durante 3 horas.
- Se pueden cocinar tres comidas para una familia de 4 personas.
- Se puede mantener en funcionamiento un termo tanque de 110 ltr. durante 3 horas.<sup>43</sup>

Teniendo la DQO y asumiendo que los valores del pH, temperatura y relación C/N están dentro de los parámetros recomendados, podemos estimar la producción de biogás.

### Calculo del volumen de biogás.

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

C = cantidad de metano producido a temperatura de 32 °F y a presión de 14,7 psi (lbs / in<sup>2</sup>).

---

<sup>43</sup> **HILBERT**, Jorge, Manual para la producción de biogás, Instituto de ingeniería rural, 2003, Argentina.

B = cantidad de biogás producido a temperatura de 32 °F y a presión de 14,7 psi (lbs / in<sup>2</sup>).

e = eficiencia de las bacterias en convertir el material fresco en metano. Valor recomendado 0,6.

W<sub>2</sub> = peso de los sólidos producidos por las bacterias (lbs). Para la digestión anaeróbica este término es muy pequeño comparado con los demás utilizados, por lo que no se le toma en cuenta en la fórmula.

- **Cálculo.**

$$C = 5,62 * [ ( e * DQO ) - 1,42 W_2 ] \quad \text{(Ecuación 3.20)}$$

$$C = 5,62 * e * DQO \quad \text{(Ecuación 3.21)}$$

$$DQO = 0,5 * 1,5 * VS \quad \text{(Ecuación 3.16)}$$

$$C = 5,62 * 0,6 * 0,75 VS$$

$$C = 5,26 * 0,6 * 0,75 * 52,05 \text{ lbs.}$$

$$C = 123,21 \text{ ft}^3 / 35,32 \text{ ft}^3/\text{m}^3.$$

$$C = \underline{3,49 \text{ m}^3} \text{ de metano producido a temperatura } 32 \text{ °F y a presión de } 14,7 \text{ psi (lbs / in}^2\text{)}.$$

La producción total de biogás tiene dos terceras partes de metano por lo que:

$$B = C * 1,5 \quad \text{(Ecuación 3.22)}$$

$$B = 123,21 \text{ ft}^3 * 1,5$$

$$B = 184,815 \text{ ft}^3 / 35 \text{ ft}^3/\text{m}^3.$$

B = 5,23 m<sup>3</sup> de biogás que se empieza a producir diariamente después de terminado el ciclo completo a temperatura de 32 °F y a presión de 14,7 psi (lbs / in<sup>2</sup>).

Lo que da un volumen de 5234 L. de biogás que se empiezan a producir diariamente después de terminado el ciclo completo.

### 3.4.11.1.2 Fertilizante líquido (biol).

La cantidad de fertilizante líquido producido por el digestor es aproximadamente igual a la cantidad de agua añadida para formar el sustrato afluyente al 8 %, es decir en este proyecto vendría a ser aproximado a 5,46 ft<sup>3</sup>. de biol diario, que es lo mismo que 154,57 L. de biol diario.

Esto quiere decir que después del ciclo completo (30 días) habrá una producción de 4637,18 L. de biol totales.

Un biol operado correctamente en un biodigestor tiene un color claro con algunos sólidos suspendidos y sin olor. Éste fertilizante se lo puede usar para fertilizar los campos agrícolas o como material para una pila de compost.<sup>44</sup>

El biol se lo puede usar durante el arado del terreno para regar cada surco, un día antes de la siembra se pueden introducir las semillas en una mezcla de 1 a 1 de biol con agua por un tiempo de 4 a 5 horas. Una vez en crecimiento la planta se puede filtrar el fertilizante en agua en una relación de 1:4 utilizándolo de forma foliar en cultivos cuyo fruto sea subterráneo (papas, cebolla, zanahoria, etc.), siempre considerando no regar el biol sobre el fruto ya que del 5 al 20% de coliformes sobreviven a la biodigestión.<sup>45</sup>

Si se tiene un exceso de cantidad de biol, es necesario saber que se va a hacer con él, en algunos biodigestores éste exceso es retornado como afluyente nuevamente. Según A. J. Fischer este método puede causar problemas en el digestor si el contenido total de sólidos excede el 0.30 – 0.50 %, pero aún así este método es el más práctico en biodigestores de pequeña escala cargados manualmente. El biol puede ser reciclado en el digestor como un solvente con el desperdicio seco para formar un sustrato afluyente.<sup>46</sup>

---

<sup>44</sup> **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 210, San Francisco – California.

<sup>45</sup> **HERRERO**, Jaime, Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación, Cooperación Boliviana-Alemana, 2008, p. 32 y 33, Bolivia.

<sup>46</sup> **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 210, San Francisco – California.

### 3.4.11.1.3 Lodo fertilizante.

El lodo fertilizante producido en el digestor es una combinación de la porción no biodegradable de sólidos introducidos al digestor y la cantidad de bacterias producidas durante el proceso.<sup>47</sup>

#### Calculo del volumen del lodo fertilizante.

Para los siguientes cálculos se utiliza la siguiente nomenclatura:

$W_1$  = cantidad de sólidos del lodo fertilizante producidos por los sólidos no biodegradables.

$W_s$  = peso de los sólidos del lodo fertilizante producidos debido a los sólidos iniciales (lbs).

$W_r$  = peso total del material fresco (heces de cerdo).

$M$  = fracción decimal de humedad del material fresco.

$W_2$  = peso de los sólidos del lodo fertilizante de origen bacteriano.

$W_{ss}$  = peso total de los sólidos del lodo fertilizante.

$W_{if}$  = peso total del lodo fertilizante.

$V_{if}$  = volumen total del lodo fertilizante.

- **Cálculo.**

$$W_1 = W_r * (1 - M) * [ 1 - (0,5) * (\%VS / 100) ] \quad \text{(Ecuación 3.23)}$$

$$W_1 = 520 \text{ lbs} * ( 1 - 0,87 ) * [ 1 - (0,5) * (77 / 100) ]$$

$$W_1 = 41,574 \text{ lbs.}$$

$$DQO = 0,75 * VS \quad \text{(Ecuación 3.16)}$$

$$DQO = 0,75 * 52,052 \text{ lbs.}$$

$$DQO = 39,039 \text{ lbs.}$$

---

<sup>47</sup> **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 210, San Francisco – California.

$$W_2 = (0,04 * \text{COD}) / [ 1 + (0,015 * \text{TR}) ] \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

$$W_2 = (0,04 * 39,039 \text{ lbs}) / [ 1 + (0,015 * 25) ]$$

$$W_2 = 1,1357 \text{ lbs.}$$

$$W_{\text{SS}} = W_1 + W_2 \quad (\text{Ecuación 3.25})$$

$$W_{\text{SS}} = 26,026 \text{ lbs} + 1,1357 \text{ lbs}$$

$$W_{\text{SS}} = 42,710 \text{ lbs.}$$

$$W_{\text{lf}} = 10 * W_{\text{SS}} \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

$$W_{\text{lf}} = 10 * 27,1617 \text{ lbs}$$

$$W_{\text{lf}} = 427,097 \text{ lbs}$$

$$V_{\text{lf}} = W_{\text{lf}} / 65 \quad (\text{Ecuación 3.27})$$

$$V_{\text{lf}} = 271,617 \text{ lbs} / 65 \text{ lbs/ft}^3.$$

$$V_{\text{lf}} = 6,56 \text{ ft}^3 \text{ de lodo fertilizante diario producido en el biodigestor.}$$

$$V_{\text{lf}} = \underline{185,76 \text{ L. de lodo fertilizante diario producido en el biodigestor.}}$$

Lo que nos daría un volumen total después del ciclo completo (30 días) de 5572,84 L.

Los cálculos anteriores son diarios de una sola carga del biodigestor.

El lodo fertilizante contiene nitrógeno (principalmente como ión amonio  $\text{NH}_4$ ), fósforo, potasio y rastros de otros elementos, por lo que es un buen acondicionador de suelo y un excelente fertilizante. El amonio se lo considera superior al nitrato (una forma oxidada de nitrógeno y fertilizante estándar) porque es absorbido mejor por las partículas del suelo y no permite la lixiviación de minerales, un serio problema de los nitratos. Cuando se expone al aire al lodo fertilizante se pierde por evaporación del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). La absorción por parte de las partículas del suelo previenen ésta pérdida por evaporación, por lo que es conveniente mezclar el lodo fertilizante fresco con tierra y almacenarlo por algún tiempo en un contenedor cubierto, o depositarlo en un hueco en la tierra y cubrirlo con una capa de trigo. La capacidad de los suelos para mezclarse con el lodo fertilizante varía considerablemente. Por

ejemplo, el lodo fertilizante se tiene que esparcir de forma más delgada en suelos arcillosos que en suelos arenosos, pero de cualquier forma mejorará la estructura del suelo. En cualquiera de los casos, no se debe permitir que la mezcla se sature de agua, la saturación evita los microorganismos aeróbicos y procesos para eliminar cualquier enfermedad producida por organismos que no fueron destruidos en el digestor (muy común para las heces humanas).

#### **3.4.12 Entrada del sustrato afluyente y salida del biol y del lodo fertilizante.**

Los biodigestores deben estar ubicados de tal manera que minimicen las distancias de transporte de los afluentes y efluentes y faciliten el uso o transporte del biogás.

El proceso de biodigestión solo funciona bajo condiciones anaeróbicas por esto es importante que no entre aire al biodigestor con el sustrato afluyente, es decir que la mezcla está expuesta a la atmosfera solo en los periodos de adición del sustrato afluyente. El tanque de entrada debe estar por encima del nivel máximo posible de líquido, y la tubería de entrada que va al tanque de digestión debe llegar a lo más bajo del nivel del líquido.

Algunos investigadores hindús han encontrado que el sustrato afluyente al 8 % es más denso que el lodo fertilizante. Si el sustrato afluyente es añadido hasta el fondo del tanque la densidad empujaría hacia arriba al lodo fertilizante ya digerido, por lo que las nuevas adiciones sacarían las viejas adiciones.

Una tubería de 3 pulgadas de diámetro es suficiente para la entrada del sustrato afluyente, ésta tubería debe ser recta sin curvas para evitar taponamientos.

En el caso del digestor chino se requiere que el biol y el lodo fertilizante sean removidos para la introducción del sustrato afluyente fresco. Si son removidos por simple desborde por la tubería de salida, la velocidad de salida es igual a la velocidad de entrada del sustrato afluyente. La velocidad de entrada del sustrato afluyente debe ser lenta y constante para obtener productos fertilizantes de alta

calidad. El biol y el lodo fertilizante preferiblemente deben ser removidos usando una válvula para un tiempo más conveniente y ventajoso, la velocidad de traslado del fluido tiene que ser alta para prevenir el estancamiento.

Para el caso de los digestores hindús el biol y el lodo fertilizante no necesitan ser removidos cada vez que el sustrato fertilizante es introducido al digestor.<sup>48</sup>

Una sobrecarga del digestor puede causar un serio deterioro de la separación del biol y del lodo fertilizante. Rudolfs y Fontenelli encontraron que la velocidad óptima de carga del digestor a temperatura de 82 – 84 ° F es de solo 0,042 lb. de sólidos volátiles por ft<sup>3</sup> por día, y para digestores de dos etapas (segundo tanque para separación de sólidos de la mezcla) es de 0,1 lb. de sólidos volátiles por ft<sup>3</sup> por día.<sup>49</sup>

La capacidad efectiva del biodigestor se manifiesta en una buena separación del biol y el lodo fertilizante. Si la separación es pobre, es más probable que los sólidos frescos no digeridos escapen por desbordamiento en el efluente dando productos líquidos de baja calidad y una baja producción de biogás, esto también debe ser tomado en cuenta para seleccionar el factor de seguridad.

El biol debe ser bombeado por una tubería de 2 – 4 pulgadas de diámetro, y debe entrar lo mas al fondo posible del digestor.

### **3.4.13 Nivel de pH.**

Es un indicador de la acidez o basicidad del sustrato. Las bacterias metanogénicas se reproducen en un ambiente neutro entre 7.0 y 7.2. A medida que las bacterias acidogénicas producen ácido, las bacterias metanogénicas consumen ese ácido para mantener la neutralidad en el sustrato, pero si no hay suficientes bacterias metanogénicas la solución se vuelve ácida y no se

---

<sup>48</sup> **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 206 - 207, San Francisco – California.

<sup>49</sup> **RUDOLFS**, Willem, **FONTENELLI**, Louis. Relation Between Loading and Supernatant Liquor in Digestion Tanks, Sewage Works Journal, 1945, San Francisco – California.

produce metano. Para mantener un equilibrio el ingreso del sustrato debe ser lento para que las bacterias metanogénicas se reproduzcan y alimenten, y en ciertos casos es recomendable mezclar el sustrato afluente con bicarbonato en una proporción de 0.003 – 0.006 lbs. por cada ft<sup>3</sup> de sustrato.<sup>50</sup>

#### **3.4.14 Nivelación de cargas del sustrato.**

Durante la biodigestión puede generarse dentro del biodigestor una nata de material duro y sólido que puede impedir la salida del metano para su recolección, para mantener una temperatura y una distribución de las bacterias uniforme en todo el volumen a digerir es necesaria una nivelación de cargas.<sup>51</sup>

La carga de nutrientes en el sustrato, las bacterias y el trabajo que desempeñan pueden ser equilibrados en cierto grado de las siguientes formas:

##### **3.4.14.1 Mezclado longitudinal.**

Este mezclado puede realizarse manualmente o mecánicamente a través de todo el sustrato del tanque de biodigestión.

##### **3.4.14.2 Recirculación del efluente al afluente y tratamiento.**

El biol y el lodo que obtenemos como efluente por medio de una bomba se lo puede recircular de manera que mezcle el sustrato en todo el tanque de biodigestión.<sup>52</sup>

\*En este proyecto se utilizara el método de mezclado longitudinal de manera manual.

---

<sup>50</sup> **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 202, San Francisco – California.

<sup>51</sup> **SÁNCHEZ** Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones, WWF – Fundación Natura, 2003, Capítulo 9, p. 93 - 94, Quito – Ecuador.

<sup>52</sup> **MASKEW**, Gordon, Ingeniería Sanitaria y de aguas residuales, Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, Editorial Limusa, 2002, p. 542 y 543, México DF.

### 3.4.15 Desulfurización del biogás.

Las heces del cerdo producen un biogás con alto contenido de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) lo cual produce problemas de corrosión en equipos y moto generadores además de producir emisiones al ambiente de óxido de azufre ( $SO_2$ ) al quemar el biogás. Por ésta razón es imprescindible su extracción.

Por lo general el biogás puede tener una concentración de ácido sulfhídrico entre 1000 y 6000 ppm, siendo 200 ppm el límite máximo de admisión por la mayoría de fabricantes de motores.

Existen distintos métodos de eliminación de  $H_2S$  como los lavados químicos a base de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) y cloruro férrico ( $FeCl_3$ ), adición de óxidos metálicos y tratamientos biológicos.

### 3.4.16 Filtros para el biogás.

La diferencia de temperatura entre el biogás y el ambiente, así como variaciones en los diámetros de tubería, provocan que la saturación de agua contenida en el biogás se condense, para evitar que este condensado entre en equipos o genere problemas de circulación en la línea de gas se utilizan los siguientes filtros:

Filtro de grava: filtro de acero inoxidable que es instalado a la salida de la etapa de digestión anaerobia. Este filtro permite eliminar los condensados, filtrar las partículas sólidas procedentes del digestor sin permitir los flujos de retorno.

Filtro de cartuchos cerámicos: filtro de acero inoxidable que se utiliza en casos donde se precise el uso del biogás en equipos de aprovechamiento energético (motores, micro-turbinas, calderas, etc.)<sup>53</sup>

---

<sup>53</sup> **MSP**, Environment Systems and Proyects, Publicado en: <http://www.mspsp.com/filtros.html>, 2009, Barcelona-España, fecha de consulta 06/04/2010.

#### **3.4.17 Promotores de la fermentación.**

Son materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de gas. Entre los promotores se tiene bacterias, enzimas, sales inorgánicas, se puede emplear urea, carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

#### **3.4.18 Inhibidores de la fermentación.**

La alta concentración de ácidos volátiles (más de 2000 ppm. en la fermentación Mesofílica y de 3600 ppm. para la Termofílica) afectan la actividad de los microorganismos. La excesiva concentración de amoníaco y nitrógeno, destruyen las bacterias, todo tipo de productos químicos agrícolas, en especial los tóxicos fuertes aún en ínfimas proporciones podrían destruir totalmente la digestión normal. Muchas sales como los iones metálicos son fuertes inhibidores, en la tabla 3.10 se enlistan los principales inhibidores en la producción de gas metano así como también las concentraciones inhibitorias.<sup>54</sup>

En la tabla 3.11 tenemos un resumen del cálculo de volúmenes para el diseño del biodigestor.

---

<sup>54</sup> **BOTERO** Raúl, **PRESTON** Thomas, Biodigestor de Bajo Costo Para la Producción de Combustible y Fertilizante a Partir de Excretas, p.17 – 18, 1987.

**Tabla 3.10:** Concentración inhibidora de inhibidores comunes.

Inhibidores	Concentración inhibitoria	Unidades
SO <sub>4</sub>	5000	ppm.
NaCl	40000	ppm.
Nitrato (según el contenido de Nitrógeno)	0.05	mg. / ml.
Cu	100	mg. / ltr.
Cr	200	mg. / ltr.
Ni	200 - 500	mg. / ltr.
CN	25	mg. / ltr.
Detergente Sintético	20 - 40	mg. / ltr.
Na	3500 - 5500	mg. / ltr.
K	2500 - 4500	mg. / ltr.
Ca	2500 - 4500	mg. / ltr.

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

**Fuente:** FAO, Fundamentos Básicos Para El Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales, Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes, CEPIS, 1986, p. 13, Lima – Perú.

En la tabla 3.11 tenemos un resumen del cálculo de volúmenes para el diseño del biodigestor.

**Tabla 3.11:** Resumen del cálculo de volúmenes para el diseño del biodigestor.

	Símbolo	Unidades	Fórmula	Valor asumido	Valor calculado	Referencia
Número de Animales	N°	un.		80		
Carga animal específica	W	lbs / día		6,5		Tabla 2.4
Producción de estiércol	Wr	lbs / día	$N^{\circ} * W$		520,000	

<b>Relación Carbono Nitrógeno</b>						
Porcentaje Sólidos Totales	%ST	%		13		Tabla 3.6
Peso de Sólidos Totales	WST	lbs / día	$Wr * \%ST / 100$		67,600	
Porcentaje de Nitrógeno	%N	%		3,8		Tabla 3.6
Peso del Nitrógeno	WN	lbs / día	$WST * \%N / 100$		2,569	
Relación Carbono Nitrógeno	C/N			25		Tabla 3.6
Peso del Carbono	WC	lbs / día	$WN * C/N$		64,220	
Relación Carbono Nitrógeno	C/N		$WC / WN$		25,000	

<b>Volumen del Sustrato afluente al 8%</b>						
Porcentaje de Humedad en el material fresco	%M	%		87		Tabla 3.6
Volumen de agua a añadir	Vw	ft <sup>3</sup> / día	$(0,1845 * Wr) - (0,2 * Wr * \%M / 100)$		5,460	
Peso específico del agua a añadir	pagua	lbs / ft <sup>3</sup>		62,3		
Peso del agua a añadir	Ww	lbs / día	$Vw * pagua$		340,158	
Peso específico del sustrato afluente al 8%	ρSL	lbs / ft <sup>3</sup>		65		
Peso del Sustrato afluente al 8%	WSL	lbs / día	$Ww + Wr$		860,158	
Volumen del Sustrato afluente al 8%	VSL	ft <sup>3</sup> / día	$WSL / \rho SL$		13,233	

Tiempo de retención en el digestor	Símbolo	Unidades	Fórmula	Valor asumido	Valor calculado	Referencia
Porcentaje de sólidos volátiles	%VS	%		77		Tabla 3.6
Peso total de sólidos volátiles del material fresco	VS	lbs / día	$W_r * (1 - \%M/100) * \%VS/100$		52,052	
Concentración de los sólidos volátiles del sustrato afluente	VScon	lbs / ft <sup>3</sup>	VS / VSL		3,933	
Concentración de la demanda química de oxígeno	DQO	ppm	$12000 * VScon$		47201,282	
Constante, cuantas bacterias se producen por cant. De comida	a			0,04		
Constante, cuán rápido muere la bacteria	b			0,015		
Factor, cuán rápido la bacteria va a consumir la comida	k			4,73		Tabla 3.7
Cantidad mínima de comida requerida para que la bacteria empiece a multiplicarse	Kc			6450		Tabla 3.7
Tiempo de retención de sólidos mínimo del sustrato afluente	TRSm	días	$1 / [ [ a * k * [ 1 - (Kc / (Kc + DQO)) ] ] - b ]$		9,208	
Tiempo de retención en el biodigestor	TR	días		30		Tabla 3.8
Factor de seguridad	SF		TR/TRSm		3,258	

Tanque de Biodigestión						
Volumen del tanque de biodigestión	Vt	m <sup>3</sup>	VSL * TR/35,31		11,243	

Volumen de biogás						
Eficiencia de las bacterias en convertir el material fresco en metano	e			0,6		
Cantidad de metano producido a 32°F y presión de 14,7 psi	C	m <sup>3</sup>	$5,26 * e * 0,75 * VS/35,31$		3,489	
Cantidad de biogás producido a 32°F y presión de 14,7 psi	B	m <sup>3</sup>	C*1,5		5,234	

Volumen de biol	Símbolo	Unidades	Fórmula	Valor asumido	Valor calculado	Referencia
Volumen de biol (el mismo volumen que el agua añadida aproximadamente)	Vbiol	ft <sup>3</sup>	$(0,1845 * W_r) - (0,2 * W_r * \%M / 100)$		5,46	

Volumen de lodo fertilizante						
Cantidad de sólidos del lodo fertilizante producidos por los sólidos biodegradables	W1	lbs	$W_r * (1-M) * (1 - (0,5) * (77/100))$		41,574	
Concentración de la demanda química de oxígeno	DQO	lbs	$0,75 * V_S$		39,039	
Peso de los sólidos del lodo fertilizante de origen bacteriano	W2	lbs	$(0,04 * DQO) / (1 + (0,015 * TR))$		1,077	
Peso total de los sólidos del lodo fertilizante	Wss	lbs	$W_1 + W_2$		42,651	
Peso total del lodo fertilizante	Wlf	lbs	$10 * W_{ss}$		426,509	
Volumen total del lodo fertilizante	Vlf	ft <sup>3</sup>	$W_{lf} / 65$		6,562	

Elaboración: Flores, J. 2009.

## CAPITULO IV. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR.

Para el dimensionamiento de un biodigestor que albergue diariamente las heces de 80 cerdos que empiezan pesando 154 lbs., se utilizan los valores calculados anteriormente de sustrato afluente, cantidad de biogás, de biol y de lodo fertilizante, estos se aprecian en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Volúmenes requeridos y producidos en el biodigestor.

	S./ Afluente (Vsl)	Biol (Vbiol)	Lodo Fertilizante (Vlf)	Sólidos inertes (Vsi)	Tanque (Vt)	Biogás (B)
	(L)	(L)	(L)	(L)	(L)	(L)
<b>Diario</b>	374,63	154,57	185,76	34,30		5233,95*
<b>Ciclo completo</b>	11238,96	4637,18	5572,84	1028,94	11238,96	

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

\*Producción diaria de biogás, después de los 30 días del ciclo completo.

### 4.1 Volumen Total del Biodigestor (VTB).

Es el volumen total que va a poder almacenar el biodigestor, incluyendo el volumen de biogás y el volumen de biol y lodo fertilizante.

$$VTB = Vt + B$$

(Ecuación 4.1)

$$VTB = 11238,96 + 5233,95$$

$$VTB = \underline{16472,90 \text{ L.}}$$

## 4.2 Dimensiones de la trinchera donde se asienta el biodigestor.

La trinchera es la excavación donde vamos a asentar todo el biodigestor y que tiene un volumen parecido al volumen total de sustrato afluente y al volumen del tanque de biodigestión.

Volumen del tanque de biodigestión

Lado inferior (a) (valor asumido) = 0,80 m.

Lado superior (b) (valor asumido) = 1,40 m.

Altura (h) (valor asumido) = 1,00 m

$$\begin{aligned} \text{Lado lateral (c)} &= \text{RAIZ} ( ( b/2 - a/2 )^2 + h^2 ) \quad (\text{Pitágoras}) && (\text{Ecuación 4.2}) \\ &= \text{RAIZ} ( ( 1,40\text{m}/2 - 0,80\text{m}/2 )^2 + 1,00^2 ) \\ &= \underline{1,04 \text{ m.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Perímetro (p)} &= a + 2 * c && (\text{Ecuación 4.3}) \\ &= 0,80\text{m} + 2 * 1,04\text{m} \\ &= \underline{2,89 \text{ m.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Área (A)} &= h * ( a + b ) / 2 && (\text{Ecuación 4.4}) \\ &= 1,00\text{m} * ( 0,80\text{m} + 1,40\text{m} ) / 2 \\ &= \underline{1,10 \text{ m}^2}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud (L)} &= Vt/A && (\text{Ecuación 4.5}) \\ &= 11238,96 \text{ L.} / 1,10 \text{ m}^2. \\ &= \underline{10,22 \text{ m.}} \end{aligned}$$

### 4.3 Dimensiones del tanque de almacenamiento del biogás.

Éste tanque es donde se va a almacenar el biogás y tiene el mismo volumen que la cantidad de biogás producida en el proyecto.

$$\text{Angulo } (\alpha) = 140,00 [^\circ] \text{ (valor asumido).} \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

$$= 3,14 * \alpha / 180$$

$$= \underline{2,44 \text{ [rad]}}$$

$$\text{Radio (r)} = b/2 * ( 1 / \text{sen}(\alpha/2) ) \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

$$= 1,40\text{m} / 2 * ( 1 / \text{sen}(2,44 / 2) )$$

$$= \underline{0,75 \text{ m.}}$$

$$\text{Altura (h)} = ( b/2 ) * \tan( \alpha / 4 ) \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

$$= (1,40\text{m} / 2) * \tan( 2,44 / 4 )$$

$$= \underline{0,49 \text{ m.}}$$

$$\text{Área (A)} = ( h / 6 * b ) * ( 3 * h^2 + 4 * b^2 ) \quad (\text{Ecuación 4.9})$$

$$= (0,49 / 6 * 1,40) * (3 * 0,98 + 4 * 2,80)$$

$$= \underline{0,50 \text{ m}^2}.$$

$$\text{Volumen (V)} = A * L \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

$$= 0,50\text{m}^2 * 10,22\text{m}$$

$$= \underline{5,24 \text{ L.}}$$

$$\text{Perímetro del sector (s)} = \alpha * r \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

$$= 2,44 * 0,75\text{m}$$

$$= \underline{1,82 \text{ m.}}$$

$$\begin{aligned}\text{Perímetro total de la geomembrana (peri)} &= p + s && \text{(Ecuación 4.12)} \\ &= 2,89\text{m} + 1,82\text{m} \\ &= \underline{4,71 \text{ m.}}\end{aligned}$$

En la tabla 4.2 se muestra un resumen del dimensionamiento del biodigestor de un volumen de 16 m<sup>3</sup>.

**Tabla 4.2:** Resumen del dimensionamiento del biodigestor de 16 m<sup>3</sup>.

	Símbolo	Unidades	Fórmula	Valor asumido	Valor calculado	Referencia
Volumen del tanque de biodigestión	Vt	L		11238,96		
Volumen de Gas	B	L		5233,95		
Volumen Total del Biodigestor	VTB	L		16472,90		
Porcentaje del área del lodo fertilizante y biol	%LFB		$Vt/VTB*100$		68,23	Aproximadamente 70%
Porcentaje del área de gas	%Gas		$B/VTB*100$		31,77	Aproximadamente 30%
Longitud del biodigestor asumido	L	m		10,50		Aproximadamente
<b>Trinchera para almacenamiento de lodo fertilizante y biol</b>						
Lado inferior	a	m		0,80		
Lado superior	b	m		1,40		
Altura	h	m		1,00		
Lado lateral	c	m	$RAIZ((b/2-a/2)^2+h^2)$		1,04	Pitágoras
Área	A	m <sup>2</sup>	$h*(a+b)/2$		1,10	
Longitud del biodigestor calculado	L	m	$Vt/A$		10,22	
Perímetro	p	m	$a+2*c$		2,89	
<b>Tanque de almacenamiento de gas</b>						
Angulo	$\alpha$	[°]		140,00		
Angulo	$\alpha$	[rad]	$3,14*\alpha/180$		2,44	
Radio	r	m	$b/2*(1/\text{sen}(\alpha/2))$		0,75	
Altura	h	m	$(b/2)*\text{tan}(\alpha/4)$		0,49	
Área	A	m <sup>2</sup>	$(h/6*b)*(3*h^2+4*b^2)$		0,50	
Volumen	V	L	$A*L$		5,24	
Perímetro del sector	s	m	$\alpha*r$		1,82	
<b>Perímetro Total de la Geomembrana</b>	peri	m	p+s		4,71	

Elaboración: Flores, J. 2009.

## CAPITULO V. RESULTADOS DEL PROTOTIPO Y DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos en el prototipo del biodigestor son los que se pueden ver en la tabla 5.1:

**Tabla 5.1:** Resultados en el prototipo del biodigestor.

	S./ Afluente (VSL)	Biol	Lodo Fertilizante	Sólidos inertes	Biogás
	(L)	(L)	(L)	(L)	(L)
<b>Diario</b>	5,04	2,08	2,50	0,46	70,46*
<b>Ciclo completo</b>	151,29	62,42	75,02	13,85	

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

\*Producción diaria de biogás luego de terminado el ciclo completo de biodigestión.

Los valores de la tabla 5.1 se los obtiene teóricamente, que comparados con los valores obtenidos en la práctica difieren entre un 10 y 15%, los que serán afinados en la construcción del proyecto.

La cantidad diaria de biol obtenido es de 2 L/día con cierto grado de turbiedad

El receptáculo del biogás que tiene una capacidad de 1,8 m<sup>3</sup> se lleno muy paulatinamente, puesto que la producción de biogás es de aproximadamente 70 L/día, luego de concluido el ciclo.

En la tabla 5.2 se detalla cronológicamente los días que duró el experimento, cargándose el biodigestor diariamente con una mezcla de 7 lbs. de estiércol de cerdo y 2 L. de agua debidamente mezclados, procediendo posteriormente a realizar la carga por el ducto para tal efecto.

En el anexo número 15 en el cual consta el informe de resultados de análisis realizado por el departamento de ciencia de los alimentos y biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional, de la muestra obtenida en el prototipo del

biodigestor se desprende que por litro de fertilizante líquido, se obtienen 4900 mg. de nitrógeno, 260 mg. de fósforo y 1374 mg de potasio.

**Tabla 5.2:** Proceso de biodigestión del Prototipo.

<b>Proceso de biodigestión</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Días de retención</b>	<b>Observaciones</b>
Mie 23/12/2009	1	
Jue 24/12/2009	2	
Vie 25/12/2009	3	
Sab 26/12/2009	4	
Dom 27/12/2009	5	
Lun 28/12/2009	6	
Mar 29/12/2009	7	
Mie 30/12/2009	8	Instalación del medidor de presión
Jue 31/12/2009	9	
Vie 01/01/2010	10	
Sab 02/01/2010	11	
Dom 03/01/2010	12	
Lun 04/01/2010	13	
Mar 05/01/2010	14	
Mie 06/01/2010	15	
Jue 07/01/2010	16	
Vie 08/01/2010	17	
Sab 09/01/2010	18	
Dom 10/01/2010	19	
Lun 11/01/2010	20	
Mar 12/01/2010	21	
Mie 13/01/2010	22	
Jue 14/01/2010	23	
Vie 15/01/2010	24	
Sab 16/01/2010	25	Presencia de biogás
Dom 17/01/2010	26	
Lun 18/01/2010	27	
Mar 19/01/2010	28	
Mie 20/01/2010	29	
Jue 21/01/2010	30	Extracción de muestra de biol

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

## **CAPITULO VI. ANÁLISIS ECONÓMICO.**

El siguiente análisis consta de cuatro partes la primera, el gasto en el desarrollo de la investigación (tabla 6.1) que incluye gastos de movilización, obtención de materias primas, mano de obra, equipos y herramientas, etc.

La siguiente parte de este análisis es la descripción del gasto de construcción del biodigestor de 16 m<sup>3</sup> (tabla 6.2); en estos gastos se incluyó movilización, materiales, entre otros rubros que competen en su análisis.

La tercera parte es un análisis al gasto de construcción del prototipo del biodigestor (tabla 6.3); y la última parte es una proyección a cinco años analizada económicamente (tabla 6.4).

El rubro de materia prima de la tabla 6,1 será descontado del costo de investigación, el precio de chancho en pie según la información obtenida de la asociación de ganaderos de Santo Domingo de los Tsachilas es de 1,98 US / kg, lo que corresponde al valor obtenido por los 4 cerdos de 95 kg de 752 US, que serán descontados del costo total de la investigación dando como resultado final 2216,25US.

**Tabla 6.1:** Gastos efectuados en el desarrollo de la investigación.

<b>GASTOS EFECTUADOS EN EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
<b>A. MOVILIZACIÓN</b>		3,64%		<b>112,50</b>
TRANSPORTE (VEHICULO)	Carreras	20	3,00	60,00
ALIMENTACIÓN	Comidas	5	4,50	22,50
OTROS				30,00
<b>B. MATERIAS PRIMAS</b>		24,60%		<b>759,70</b>
CERDOS 50 kg	Unidades	4	126,50	506,00
CONCENTRADO PROTEICO	Kilogramos	160	0,62	99,20
MOROCHILLO	Kilogramos	370	0,35	129,50
ESTIERCOL DE CERDO	Kilogramos	355	0,00	0,00
AGUA	Litros			25,00
<b>C. MANO DE OBRA</b>		54,40%		<b>1680,00</b>
INVESTIGADOR	Meses	2	600	1200,00
AYUDANTE	Meses	2	240	480,00
<b>D. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS</b>		5,51%		<b>170,05</b>
VALVULA DE BOLA 1"	Unidades	2	10,97	21,94
VALVULA DE BOLA PARA GAS 1/2"	Unidades	2	5,75	11,5
BALANZA	Unidades	1	5,50	5,50
TANQUE METÁLICO	Unidades	1	20,00	20,00
TANQUES PLÁSTICOS	Unidades	2	1,50	3,00
ADAPTADOR P/TANQUE POLIPROPILENO 1/2"	Unidades	3	1,48	4,44
ADAPTADORES FLEX 1/2"	Unidades	5	0,14	0,7
ADAPTADORES P/TANQUE PVC 1"	Unidades	2	2,28	4,56
BUSHING H.G. 1/2" A 1/4"	Unidades	1	0,28	0,28
NEPLO POLIPROPILENO 1/2" x 6cm R/R	Unidades	5	0,17	0,85
NEPLO POLIPROPILENO 1" x 6cm	Unidades	6	0,22	1,32
NEPLO H.G 1/2" x 3"	Unidades	1	0,71	0,71
NEPLO H.G 1/2" x 6"	Unidades	1	0,39	0,39
REDUCTOR PVC DESAGUE 110 A 50mm	Unidades	1	2,21	2,21
TAPON PVC H DESAGUE 110mm	Unidades	1	1,24	1,24
TAPON ROSCABLE H 1"	Unidades	2	0,38	0,76
TAPON H.G. MACHO 1/2"	Unidades	1	0,37	0,37
TAPON H.G. HEMBRA 1/2"	Unidades	1	0,33	0,33
TAPON PVC DESAGUE 160mm	Unidades	2	5,07	10,14

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TEE POLIPROPILENO R/R 1/2"	Unidades	3	0,40	1,20
TEE H.G. 1/2"	Unidades	1	0,77	0,77
UNION POLIPROPILENO 1/2"	Unidades	2	0,33	0,66
UNION H.G. 1/2"	Unidades	1	0,45	0,45
PEGA TUBOS PVC 125 cc.	Unidades	1	1,65	1,65
CINTA TEFLON 1/2" 10m	Unidades	4	0,55	2,20
PITON GAS MACHO 1/4"	Unidades	1	2,47	2,47
MASILLA RALLY 50gr	Unidades	2	1,46	2,92
BROCA TITANIUM 1/4"	Unidades	3	0,41	1,23
BROCA TITANIUM 1/2"	Unidades	1	1,79	1,79
MANGUERA VINIL 5/8"	Metros	9	1,63	14,67
MANGUERA VINIL 5/16"	Metros	3	3,56	10,68
CLAVO MAD	Unidades	2	0,44	0,88
ABRAZADERA INOXIDABLE 3/4-1 1/8	Unidades	4	0,88	3,52
ABRAZADERA A.C. 5/8 TITAN 1/2"	Unidades	1	0,20	0,20
PERMATEX 1.1/2 oz. 1A	Unidades	1	1,98	1,98
SELLANTE POLIPROPILENO 50 cc	Unidades	1	3,60	3,60
CINCEL CORTE FRIO 1/4" x 5"	Unidades	1	1,27	1,27
CINCEL CORTE FRIO 3/8" x 6"	Unidades	1	1,27	1,27
CINCEL CORTE FRIO 3/4" x 10"	Unidades	1	4,52	4,52
LIMA MEDIA CAÑA 8" GRUESA	Unidades	1	3,53	3,53
LIMA REDONDA 10" GRUESA	Unidades	1	3,31	3,31
LLAVE P/TUBO 10"	Unidades	1	5,21	5,21
LLAVE P/TUBO 12"	Unidades	1	6,70	6,70
ALAMBRE GALVANIZADO N16	Unidades	1	1,70	1,70
SIKAFLEX 221 GRIS CARTUCHO	Unidades	1	6,54	6,54
CINTA DUCTO PLASTIFICADA	Unidades	1	2,56	2,56
CODO PVC DESAGUE 50mm x 90 E/C	Unidades	1	0,81	0,81
CODO PVC ACROS 1x90	Unidades	2	0,83	1,66
CODO POLIPROPILENO 1/2"	Unidades	1	0,30	0,30
GEOMEMBRANA PVC 1000 MICRAS	MetrosCuadrados	9	4,85	43,65
GEOBON (soldadura líquida)	Unidades	1	7,00	7,00
BROCHA PRETUL PLASTICO	Unidades	1	1,08	1,08
PLASTICO TRANSPARENTE	Metros	6	1,64	9,84
GUANTES	Unidades	1	14,41	14,41

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
<b>E. CONSTRUCCIONES E INMUEBLE</b>		1,30%		<b>40,00</b>
COSTO ARRIENDO CHANCHERAS	\$/m <sup>2</sup>	12	2,00	24,00
OTROS				16,00
<b>F. PRUEBAS DE VERIFICACIÓN</b>		5,83%		<b>60,00</b>
COSTO DE PRUEBAS DE LABORATORIO	Unidades	1	60	60,00
<b><i>SUBTOTAL (A+B+C+D+E+F)</i></b>				<b>2942,25</b>
<b>G. VARIOS</b>		4,72%		<b>146,00</b>
VARIOS GASTOS				146,00
<b><i>GASTO TOTAL (A+B+C+D+E+F+G)</i></b>				<b>2968,25</b>

Elaboración: Flores, J. 2009.

**Tabla 6.2:** Gastos de la fabricación del biodigestor tubular de 16 m<sup>3</sup>.

<b>GASTOS EN LA FABRICACIÓN DEL BIODIGESTOR TUBULAR DE 16 m<sup>3</sup> (PROYECTO)</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (\$)</b>	<b>EGRESOS</b>
		14,18%		<b>180,00</b>
<b>MOVILIZACIÓN</b>	\$	1	180,00	180,00
		2,36%		<b>30,00</b>
<b>FORMULACIÓN</b>				
Agua	Litros			30,00
Estiércol de Cerdo	lbs / día	520	0,00	0,00
		47,91%		<b>610,00</b>
<b>MANO DE OBRA</b>				
Soldadura a presión y calor de geomembrana	Unidades	4	25,00	100,00
Excavación trinchera	Metros cúbicos	22	5,00	110,00
Construcción trinchera (peón 1)	Jornales	10	10,00	100,00
Construcción trinchera (peón 2)	Jornales	10	10,00	100,00
Construcción trinchera (albañil)	Jornales	10	20,00	200,00
		27,74%		<b>353,22</b>
<b>MATERIALES</b>				
GEOMEMBRANA PVC 1000 MICRAS	Metros cuadrados	16	4,85	77,60
BLOQUES DE CEMENTO	Unidades	390	0,35	136,50
ARENA	Metros Cúbicos	2	10,00	20,00
CEMENTO	Sacos	8	7,50	60,00
VALVULA DE BOLA PARA GAS 1/2"	Unidades	2	5,75	11,50
TUBOS PVC 6"	Metros	6	4,30	25,80
TUBOS DE LLANTA USADA	Unidades	2	1,00	2,00
MANGUERA VINIL 5/8"	Metros	10	1,63	16,30
ABRAZADERA INOXIDABLE 3/4-1 1/8	Unidades	4	0,88	3,52
		7,85%		<b>100,00</b>
<b>VARIOS</b>				
<b>TOTAL</b>		<b>100%</b>		<b>1273,22</b>

Elaboración: Flores, J. 2009.

**Tabla 6.3:** Gastos efectuados en la fabricación del prototipo del biodigestor.

<b>GASTOS EN LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (\$)</b>	<b>EGRESOS</b>
		6,50%		<b>15</b>
<b>MOVILIZACIÓN</b>	\$	3	5	15
<b>MATERIALES</b>		66,49%		<b>152,82</b>
TANQUE METÁLICO	Unidades	1	20,00	20,00
NEPLO POLIPROPILENO 1/2" x 6cm R/R	Unidades	5	0,17	0,85
NEPLO POLIPROPILENO 1" x 6cm	Unidades	6	0,22	1,32
NEPLO H.G 1/2" x 3"	Unidades	1	0,71	0,71
NEPLO H.G 1/2" x 6"	Unidades	1	0,39	0,39
REDUCTOR PVC DESAGUE 110 A 50mm	Unidades	1	2,21	2,21
TAPON PVC H DESAGUE 110mm	Unidades	1	1,24	1,24
TAPON ROSCABLE H 1"	Unidades	2	0,38	0,76
TAPON H.G. MACHO 1/2"	Unidades	1	0,37	0,37
TAPON H.G. HEMBRA 1/2"	Unidades	1	0,33	0,33
TAPON PVC DESAGUE 160mm	Unidades	2	5,07	10,14
TEE POLIPROPILENO R/R 1/2"	Unidades	3	0,40	1,20
TEE H.G. 1/2"	Unidades	1	0,77	0,77
UNION POLIPROPILENO 1/2"	Unidades	2	0,33	0,66
UNION H.G. 1/2"	Unidades	1	0,45	0,45
PEGA TUBOS PVC 125 cc.	Unidades	1	1,65	1,65
CINTA TEFLON 1/2" 10m	Unidades	4	0,55	2,20
PITON GAS MACHO 1/4"	Unidades	1	2,47	2,47
BROCA TITANIUM 1/4"	Unidades	3	0,41	1,23
BROCA TITANIUM 1/2"	Unidades	1	1,79	1,79
MANGUERA VINIL 5/8"	Metros	9	1,63	14,67
MANGUERA VINIL 5/16"	Metros	3	3,56	10,68
CLAVO MAD	Unidades	2	0,44	0,88
ABRAZADERA INOXIDABLE 3/4-1 1/8	Unidades	4	0,88	3,52
ABRAZADERA A.C. 5/8 TITAN 1/2"	Unidades	1	0,20	0,20
PERMATEX 1.1/2 oz. 1A	Unidades	1	1,98	1,98
SELLANTE POLIPROPILENO 50 cc	Unidades	1	3,60	3,60
ADAPTADORES FLEX 1/2"	Unidades	5	0,14	0,7
ADAPTADOR P/TANQUE POLIPROPILENO 1/2"	Unidades	3	1,48	4,44
ADAPTADOR P/TANQUE PVC 1"	Unidades	2	2,28	4,56
VALVULA DE BOLA PARA GAS 1/2"	Unidades	2	5,75	11,5
VALVULA DE BOLA 1"	Unidades	2	10,97	21,94

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	EGRESOS
ALAMBRE GALVANIZADO N16	Unidades	1	1,70	1,70
SIKAFLEX 221 GRIS CARTUCHO	Unidades	1	6,54	6,54
CINTA DUCTO PLASTIFICADA	Unidades	1	2,56	2,56
CODO PVC DESAGUE 50mm x 90 E/C	Unidades	1	0,81	0,81
CODO PVC ACROS 1x90	Unidades	2	0,83	1,66
CODO POLIPROPILENO 1/2"	Unidades	1	0,30	0,30
PLASTICO TRANSPARENTE	Metros	6	1,64	9,84
<b>HERRAMIENTAS</b>				<b>42,00</b>
		18,28%		
CINCEL CORTE FRIO 1/4" x 5"	Unidades	1	1,27	1,27
CINCEL CORTE FRIO 3/8" x 6"	Unidades	1	1,27	1,27
CINCEL CORTE FRIO 3/4" x 10"	Unidades	1	4,52	4,52
LIMA MEDIA CAÑA 8" GRUESA	Unidades	1	3,53	3,53
LIMA REDONDA 10" GRUESA	Unidades	1	3,31	3,31
ADAPTADORES FLEX 1/2"	Unidades	5	0,14	0,7
LLAVE P/TUBO 10"	Unidades	1	5,21	5,21
LLAVE P/TUBO 12"	Unidades	1	6,70	6,70
BROCHA PRETUL PLASTICO	Unidades	1	1,08	1,08
GUANTES	Unidades	1	14,41	14,41
<b>VARIOS</b>				<b>20</b>
		8,72%		
<b>TOTAL</b>		<b>100%</b>		<b>229,82</b>

Elaboración: Flores, J. 2009.

En la tabla 6.4 del flujo de caja realizado para 5 años que consideramos la vida útil del biodigestor.

La producción anual de biol será de 56,6 m<sup>3</sup> con un valor de \$50 el m<sup>3</sup>, sin considerar la producción de lodos fertilizantes que serán evacuados posterior a los 5 años.

La producción de biogás se estima en 1913 m<sup>3</sup> por año, si consideramos un 30% de pérdidas significa que el gas aprovechable será de 1388 m<sup>3</sup>, cada m<sup>3</sup> de biogás produce 38 MJ de energía calórica lo que significaría tener 50875 MJ

por año. Además cada kilogramo de biogás equivale a 50 MJ lo que significaría que de la energía total anual corresponde a la de 1017 kg de biogás es decir 1,017 T de biogás al año. Siendo el precio del biogás por tonelada de \$ 540.

**Tabla 6.4:** Flujo de caja para 5 años (vida útil del biodigestor).

FLUJO DE CAJA								
			Años					
			0	1	2	3	4	5
<b>Inversión</b>			<b>1500</b>					
<b>Ingresos</b>				<b>3379,55</b>	<b>3379,55</b>	<b>3379,55</b>	<b>3379,55</b>	<b>3379,55</b>
Biol (N,P,K)	155 l/día	0,05 US/L		2828,75	2828,75	2828,75	2828,75	2828,75
Biogás	1020 Kg/año	540 US/T		550,8	550,8	550,8	550,8	550,8
<b>Egresos</b>				<b>1362,5</b>	<b>1362,5</b>	<b>1362,5</b>	<b>1362,5</b>	<b>1362,5</b>
Mano de Obra	Medio Jornal	5 US		912,5	912,5	912,5	912,5	912,5
Depreciación	20% de la inversión			300	300	300	300	300
Mantenimiento	10% de la inversión			150	150	150	150	150
<b>Utilidades</b>			<b>-1500</b>	<b>2017,05</b>	<b>2017,05</b>	<b>2017,05</b>	<b>2017,05</b>	<b>2017,05</b>
<b>TIR</b>			<b>132%</b>					

**Elaboración:** Flores, J. 2009.

El rubro de mano de obra se considera en 1/2 de jornal puesto que en la mañana su actividad es recoger el estiércol mezclarlo con el agua necesaria y luego verterlo en el digestor.

La evacuación del biol se realizara por gravedad hacia los pastizales que son objeto del abonamiento.

La depreciación es de tipo lineal se la realiza en 5 años lo que corresponde al 20% de la inversión inicial.

En el rubro mantenimiento se ha considerado el 10% anual de la inversión inicial.

Con la ayuda del Excel se obtuvo la Tasa Interna de Retorno (TIR) cuyo valor es de 132% lo que significa que el proyecto se paga por sí solo y arroja beneficios económicos a más de los beneficios ecológicos y medioambientales muy necesarios para este tipo de instalaciones.

## **CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **7.1 Conclusiones.**

- La selección diseño y construcción del biodigestor anaeróbico se fundamento en el estiércol obtenido diariamente de 4 cerdos que fueron adquiridos para este proyecto, por lo tanto las dimensiones se redujeron a las que se presentan en el prototipo usándose para tal efecto materiales de fácil consecución en el mercado, lo que permitió realizar la investigación en menor escala.

En teoría existen algunos métodos de cálculo para dimensionar un biodigestor como se muestra en los anexos 9 y 10. En el presente proyecto se uso la metodología de cálculo de Jim Leckie.

- No es necesario la adición de microorganismos al proceso de biodigestión, puesto que el ciclo de autogeneración de bacterias anaeróbicas se presenta en forma espontanea. La posibilidad de adicionar microorganismos servirá para acelerar el proceso de biodigestión cuando las condiciones de temperatura no son las óptimas.
- Como el transporte de los productos de la biodigestión son rubros no deseables por el encarecimiento, es necesario el distribuirlos en terrenos aledaños a la instalación utilizando la gravedad como mecanismo de distribución.
- Los biofertilizantes obtenidos no tienen mal olor y contienen por litro de fertilizante líquido 4900mg. de nitrógeno, 260mg. de fosforo y 1374mg. de potasio, lo cual evita la contaminación ambiental y se convierte en un abono que puede ser utilizado directamente al suelo o usado como abono foliar, disueltos en 3 litros de agua.

## 7.2 Recomendaciones.

- Establecer programas de investigación como el presente para los diferentes tipos de estiércol de diferentes animales, como también de sus mezclas en diferentes porcentajes, con la finalidad de optimizar los procesos de biodigestión.
- Es recomendable un control de la temperatura para lograr mejores resultados en el proceso de biodigestión, puesto que las bacterias son muy sensibles a los cambios de temperatura, lo cual retrasa el proceso.
- La dilución del estiércol en el agua (afluente) debe ser realizado antes de ser cargado al biodigestor de manera de obtener un afluente homogéneo.
- Es necesario incorporar un agitador en el interior del biodigestor que evite la formación de natas en la superficie libre del sustrato, lo que permitirá un mejor desempeño en la generación de biogás y biol.
- La ley de gestión ambiental establece la obligación de protección del medioambiente y manejo racional de los recursos naturales por lo tanto siendo el estiércol animal un agente contaminante, este proyecto es una herramienta que facilitará el manejo intensivo de explotaciones ganaderas.
- Es recomendable antes del diseño del biodigestor un previo examen de las heces para saber las porcentajes reales de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, carbono, nitrógeno y de relación carbono/nitrógeno.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) **GRUPO AQUALIMPIA** Consultores, Certificación ISO 14000, publicado en: [http://www.aqualimpia.com/iso\\_1.htm](http://www.aqualimpia.com/iso_1.htm), 2007, fecha de consulta 24/04/2009, Barcelona, España.
- 2) **NACIONES UNIDAS**, Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, FCCC/INFORMAL/83\*, 1998.
- 3) **CONCELLON**, Antonio, Construcciones Prácticas Porcinas. Editorial Aedos, 1974, Barcelona–España, p. 174 – 179, 182.
- 4) **CHARA**, Julián y Centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria (CIPAV), El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y Los sistemas de descomposición productiva, Publicado en: <http://www.cipav.org.co/cipav/conf/chara1.htm>, 1999, fecha de consulta 25/04/2009, Bogotá - Colombia.
- 5) **SEOÁNEZ**, Mariano, Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Editorial Mundi - Prensa, 2005, p. 104 – 108, Barcelona - España.
- 6) **SEOÁNEZ**, Mariano, Tratado de gestión del medio ambiente urbano, Mundi-Libros, 2001, p. 60 – 66, Barcelona - España.
- 7) **SEOÁNEZ**, Mariano, Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias, Editorial Mundi – Prensa, 2003, p. 91 – 97, Barcelona - España.
- 8) **CORONA**, Hortensia, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1976, p. 225 y 226, México - México.
- 9) **FAO**, Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales, Producción de gas y saneamiento de efluentes, CEPIS, 1986, p. 12, 13, 14, 20, 21, Lima – Perú.

- 10) **MARISCAL**, Gerardo, FAO, CENID Fisiología, Publicado en: [http://www.produccionbovina.com/produccion\\_porcina/63-excretas\\_cerdos.pdf](http://www.produccionbovina.com/produccion_porcina/63-excretas_cerdos.pdf), 2007, fecha de consulta 25/04/2009.
- 11) **MONCAYO**, Gabriel, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás, Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008, p. 73, 141, 142, 143, 241, Barcelona - España.
- 12) **LECKIE**, Jim, **MASTERS**, Gil, y otros, Other homes and garbage designs for self – sufficient living, Sierra club books, 1975, p. 192 - 211, San Francisco – California.
- 13) **POWELL**, Sheppard, Manual de aguas para usos industriales, Editorial Limusa, 1988, p. 57 – 96, México D.F.
- 14) **PROAGRO**, Cooperación Técnica Alemana, Taller Práctico sobre Biodigestores Familiares de Bajo Costo, 2007, La Paz – Bolivia.
- 15) **SÁNCHEZ**, Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. WWF – Fundación Natura, 2003, Capítulo 9, p. 93, 94, 104, 105, 111, Quito – Ecuador.
- 16) **HILBERT**, Jorge, Manual para la producción de biogás, Instituto de ingeniería rural, 2003, Argentina.
- 17) **RUDOLFS**, Willem, **FONTENELLI**, Louis. Relation Between Loading and Supernatant Liquor in Digestion Tanks, Sewage Works Journal, 1945, San Francisco – California.
- 18) **BOTERO** Raúl, **PRESTON** Thomas, Biodigestor de Bajo Costo Para la Producción de Combustible y Fertilizante a Partir de Excretas, p.17 – 18, 1987.
- 19) **CHAVEZ R**, **CARTOLIN E** y otros, Biodigestores y el protocolo de Kioto, 2007, Capítulo 3, p. 29 – 30, Lima – Perú.
- 20) **HERRERO**, Jaime, Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación, Cooperación Boliviana-Alemana, 2008, p. 32 y 33, Bolivia.

21) **MSP**, Environment Systems and Proyects, Publicado en: <http://www.msresp.com/filtros.html>, 2009, Barcelona-España, fecha de consulta 06/04/2010.

22) **RIGOLA**, Miguel, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, Mc. Graw Hill, 2004, p. 450 y 452, Barcelona – España.

23) **MASKEW**, Gordon, Ingeniería Sanitaria y de aguas residuales, Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, Editorial Limusa, 2002, p. 542 y 543, México DF.

## GLOSARIO

**Abonamiento:** aplicación de cualquier sustancia orgánica o inorgánica que mejora la calidad del sustrato a nivel nutricional para las plantas arraigadas en éste.

**Absorción:** es un proceso en el cual un número de partículas se incorporan a una estructura líquida o sólida.

**Adsorción:** es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material.

**Aeróbica:** en presencia de oxígeno.

**Agente oxidante:** Un oxidante es un compuesto químico que oxida a otra sustancia en reacciones redox. En estas reacciones, el compuesto oxidante se reduce.

**Agente reductor:** es aquel que reduce a un agente oxidante traspasándole electrones a este último.

**Aguas residuales:** tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales. Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación.

**Aminoácidos:** es una molécula orgánica con un grupo amino ( $-NH_2$ ) y un grupo carboxilo ( $-COOH$ ; ácido). Los aminoácidos más frecuentes y de mayor interés son aquellos que forman parte de las proteínas.

**Anaeróbico:** en ausencia de oxígeno.

**Autodepuración:** se refiere a la descontaminación del agua por acción natural.

**Bacterias metanogénicas:** Bacterias productoras de metano.

**Biocenosis:** es el conjunto de organismos de cualquier especie sea vegetal o animal coexistentes en un espacio definido llamado biotopo que ofrece las condiciones exteriores necesarias para su supervivencia. La biocenosis y el biotopo constituyen el ecosistema.

**Biodigestor:** un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

**Biogás:** es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de aire.

**Biol:** fertilizante líquido que sale después de la biodigestión.

**Caldera:** máquina industrial que sirve para producir calor.

**Centrifugación:** método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una centrifugadora, la cual imprime a la mezcla un movimiento rotatorio con una fuerza mayor que la de la gravedad, provocando la sedimentación de los sólidos o de las partículas de mayor densidad.

**Coagulación:** es el proceso en el que una proteína soluble sufre un cambio químico que la convierte en insoluble y con la capacidad de entrelazarse con otras moléculas iguales, para formar enormes agregados macromoleculares en forma de una red tridimensional.

**Combustión catalítica:** es una reacción química activada a través de un catalizador cuyas características no van a ser alteradas en el tiempo.

**Contaminación:** es cualquier, sustancia o forma de energía que puede provocar algún daño o desequilibrio, irreversible o no, en el medio inicial.

**Colador:** Es un utensilio que se emplea como criba o filtro de partículas en el agua.

**Decantación:** método físico de separación de mezclas heterogéneas.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno (mg / L.) necesario para asegurar la degradación biológica de la materia orgánica (biodegradable) contenida en un litro de agua a temperatura de 18 – 20 °C. en un tiempo determinado.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de las materias minerales y orgánicas reductoras en condiciones de ensayo.

**Depuración:** Tratamiento de aguas.

**Descarboxilación:** es una reacción química en la cual un grupo carboxilo es eliminado de un compuesto en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

**Destilación:** es la operación de separar, comúnmente mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla, aprovechando los diferentes puntos de ebullición.

**Efecto Tyndall:** es el fenómeno que ayuda por medio de la dispersión de la luz a determinar si una mezcla homogénea es realmente una solución o un sistema coloidal, como suspensiones o emulsiones.

**Emulsión:** Una emulsión es una mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea.

**Electrón:** representado por el símbolo (e<sup>-</sup>), es una partícula subatómica. En un átomo los electrones rodean el núcleo, compuesto únicamente de protones y neutrones.

**Estercolero:** lugar donde se apila el estiércol.

**Excretas:** conjunto de los desperdicios generalmente sólidos o líquidos que generan los animales como producto final del proceso de la digestión.

**Filtración:** operación por la cual se hace pasar una mezcla de sólidos y fluidos, gas o líquido, a través de un medio poroso o medio filtrante que puede formar parte de un dispositivo denominado filtro, donde se retiene de la mayor parte de él o de los componentes sólidos de la mezcla.

**Hidrólisis:** es una reacción química entre agua y otra sustancia, como sales. Al ser disueltas en agua, sus iones constituyentes se combinan con los iones hidronio u oxonio,  $\text{H}_3\text{O}^+$  o bien con los iones hidroxilo,  $\text{OH}^-$ , o ambos. Dichos iones proceden de la disociación o autoprotólisis del agua. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH.

**Ión:** átomo o una molécula cargada eléctricamente.

**Material Fresco:** tipo de material sin ningún proceso que se va a emplear en la biodigestión.

**Medioambiente:** es el entorno que afecta y condiciona especialmente las circunstancias de vida de las personas o la sociedad en su conjunto. Comprende el conjunto de valores naturales, sociales y culturales existentes en un lugar y un momento determinado, que influyen en la vida del ser humano y en las generaciones venideras.

**Metabolismo:** conjunto de reacciones y procesos físico-químicos que ocurren en una célula u organismo.

**Método Kjeldahl:** es un proceso de análisis químico para determinar el contenido en nitrógeno de una sustancia química.

**Método platino-cobalto:** patrón que mide la coloración del agua, siendo la unidad de color el producido por 1mg / L. de platino en forma de ión cloroplatinato.

**Nitrobacterias:** Son bacterias que oxidan a los nitritos convirtiéndolos en Nitratos ( $\text{NO}_3$ ).

**Nitrosomonas:** Son microorganismos unicelulares, que pertenecen a la familia de las Nitrobacteriaceas, se alimentan de compuestos inorgánicos (autotróficas), tienen un metabolismo aeróbico, son móviles y consumen amoníaco como su principal fuente de energía, estas bacterias a su vez producen Nitritos ( $\text{NO}_2$ ).

**Norma ISO 14000:** Norma de gestión ambiental publicada en 1996.

**Nutriente:** es un producto químico procedente del exterior de la célula y que ésta necesita para realizar sus funciones vitales. Éste es tomado por la célula y transformado en constituyente celular a través de un proceso metabólico de biosíntesis llamado anabolismo o bien es degradado para la obtención de otras moléculas y de energía.

**Ley de Beer-Lambert:** también conocida como ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado.

**Lixiviación:** es el proceso de lavado del suelo por la filtración del agua.

**Lodo Fertilizante:** lodo producido en el digestor que es una combinación de la porción no biodegradable de sólidos introducidos al digestor y la cantidad de bacterias producidas durante el proceso.

**Partícula:** un grano, una cantidad muy pequeña o insignificante de algo.

**Plancton:** conjunto de organismos, principalmente microscópicos, que flotan en aguas saladas o dulces, más abundantes hasta los 200 metros de profundidad aproximadamente.

**Polipéptidos:** son un tipo de moléculas formadas por la unión de más de 10 aminoácidos mediante enlaces peptídicos.

**Precipitación:** la reacción química en la cual se produce un sólido a partir de líquidos.

**Proteínas:** son un tipo de moléculas formadas por la unión de más de 100 aminoácidos mediante enlaces peptídicos.

**Protozoos:** también llamados protozoarios, son organismos microscópicos, unicelulares eucarióticos; heterótrofos, fagótrofos, depredadores o detritívoros; que viven en ambientes húmedos o directamente en medios acuáticos, ya sean aguas saladas o aguas dulces.

**Purín:** nombre de los excrementos líquidos del cerdo.

**Reacción oxido-reducción:** (reacciones redox) son las reacciones de transferencia de electrones. Esta transferencia se produce entre un conjunto de elementos químicos, uno oxidante y uno reductor.

**Residuo:** es todo material considerado como desecho y que se necesita eliminar. Los residuos son productos de las actividades humanas.

**Sedimentación:** es el proceso por el cual el material sólido del agua, se deposita en el fondo.

**Sólidos Volátiles:** sustancia que tiene la capacidad de evaporarse a una temperatura determinada y con una presión determinada.

**Suelo:** es el sistema estructurado, biológicamente activo, que tiende a desarrollarse en la superficie de las tierras emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos.

**Sustrato afluyente al 8 %:** de agua y material fresco que va a entrar en el biodigestor.

**Tiempo de retención (TR):** tiempo que el sustrato afluyente al 8% va a permanecer dentro del biodigestor.

**Turbidez:** es la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión.

## ANEXOS

**Anexo N° 1: FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR. Perforación del tanque metálico.**









**Anexo N° 2:** FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR. Instalación de tubería y válvulas al tanque metálico.





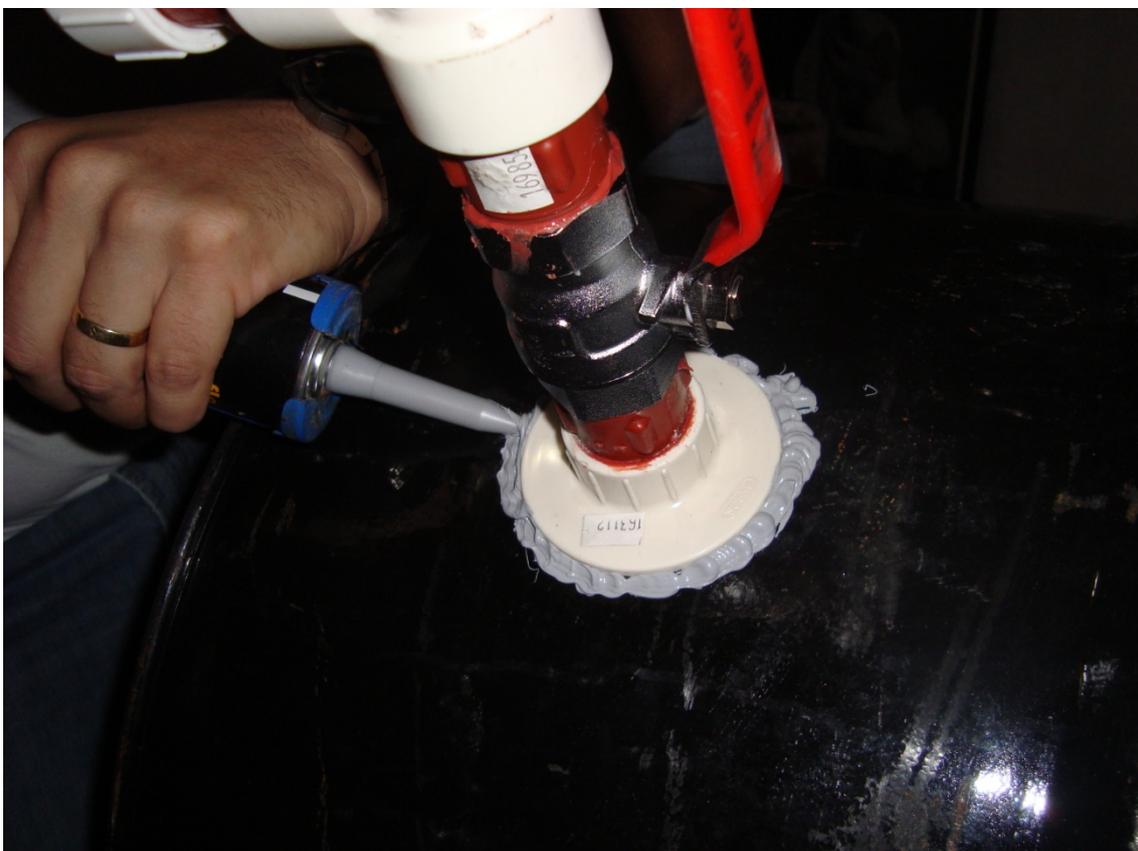
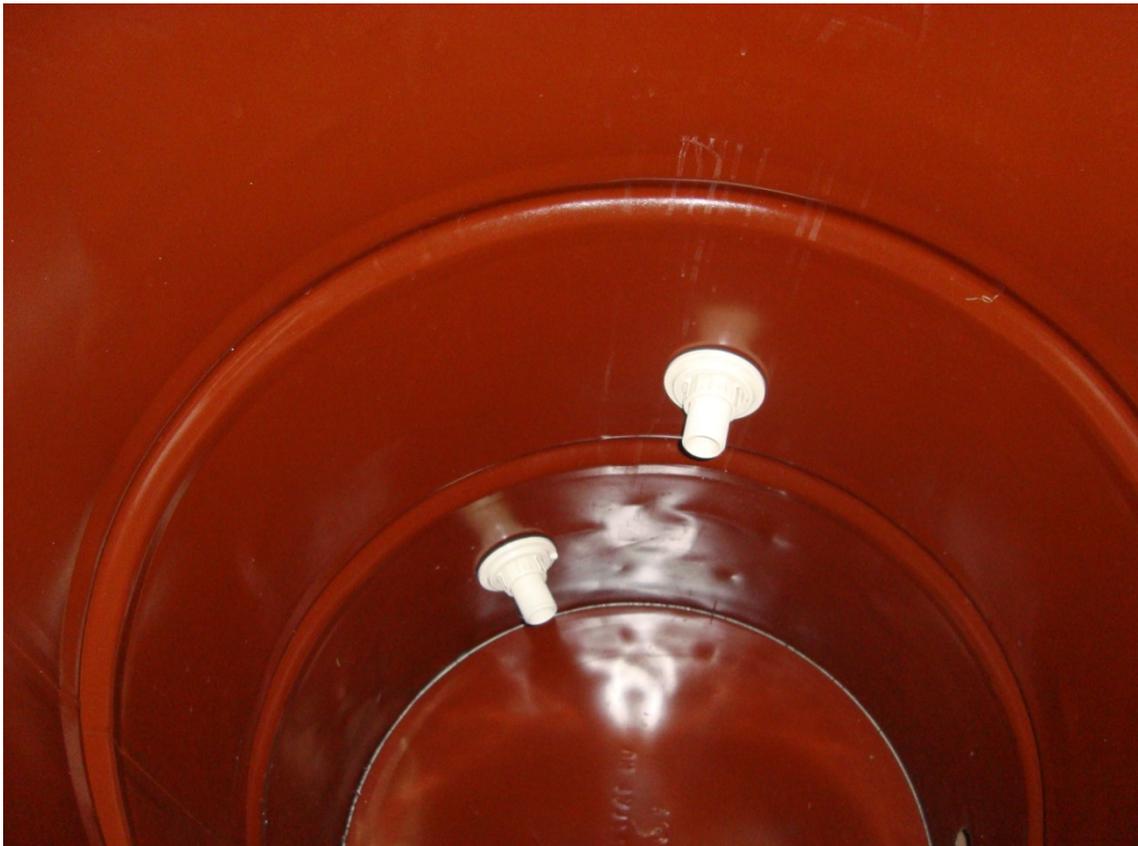






















**Anexo N° 3: FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR. Medidor de presión.**



**Anexo N° 4:** FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR. Tanque de almacenamiento de biogás.











**Anexo N° 5:** FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR. Biodigestor terminado.





**Anexo N° 6: FOTOS DE LOS 4 CERDOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN**





**Anexo N° 7: FOTOS DEL ESTIERCOL DE LOS CERDOS.**



**Anexo N° 8: FOTOS DE LA ALIMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR.**

















**Anexo N° 9: TOMA DE MUESTRAS DE HECES DE CERDOS PARA ANALISIS DE LABORATORIO.**





**Anexo N° 10:** FOTOS DEL EXAMEN REALIZADO EN LABORATORIO CON LAS MUESTRAS DE LAS HECES DE LOS CERDOS.



**Anexo N° 11: FOTOS DE LA TOMA DE MUESTRAS DE BIOL PARA EL EXAMEN DE LABORATORIO.**



**Anexo N° 12: DISEÑO DE UN BIODIGESTOR SEGÚN EL DIPL. ING. SANITARIO AMBIENTAL – ING. CIVIL GABRIEL MONCAYO ROMERO. 2008 (BARCELONA – ESPAÑA).**

<b>Tanque de Alimentación</b>						
	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Valor asumido</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>Referencia</b>
Número de Animales	N°	Un		80		
Peso Promedio	W	Kg		70,00		
Excretas por día	Ex	lts / día		4,30		Tabla 29.
Materia Seca	ms	Kg / día		0,41		Tabla 29.
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	Kg / día		0,33		Tabla 29.
Materia Volátil	mv	Kg / día		0,33		Tabla 29.
Nitrógeno	N	Kg / día		0,02		Tabla 29.
Fósforo	P	Kg / día		0,02		Tabla 29.
Potasio	K	Kg / día		0,02		Tabla 29.
C./ de Biomasa Disponible	CBD	Kg / día	$N^{\circ} * Ex$		344	
Materia Seca Total	MS	Kg / día	$CBD * ms$		141,04	
Volumen de Materia Seca	VMS	m <sup>3</sup> / día	$MS / 1000$		0,14	
Factor de Dilución	D	%	$1 : 9$	10		Página 144
Volumen del Afluente	VA	m <sup>3</sup> / día	$MS * D / 1000$		1,41	
Volumen de H <sub>2</sub> O para la Mezcla	VM	m <sup>3</sup> / día	$VA - VMS$		1,27	
Volumen Tanque de Alimentación	VTA	m <sup>3</sup>		1,41		
<b>Dimensionamiento del Biodigestor</b>						
Tiempo de Retención	TR	día		25		
Volumen Útil del Biodigestor	VB	m <sup>3</sup>	$VTA * TR$		35,25	
Eficiencia	$\eta$	%		90		
Masa Volatil	MV	Kg / día	$CBD * mv * \eta$		102,17	
Carga Orgánica Volumétrica	COV	Kg / m <sup>3</sup> día	$MV / VB$		2,90	Página 377
Porcentaje de Seguridad	Ps	%		20		Página 384
Volumen de Seguridad	VS	m <sup>3</sup>	$Ps * VB$		7,05	
Factor de producción de Biogás	FBiogás	litr / kg MV		450		Página 245 fig 36
Volumen de Biogas	VG	m <sup>3</sup>	$MV * F_{biogás} / 1000$		45,98	
Volumen Total del Biodigestor	VTB	m <sup>3</sup>	$VB + VS + VG$		88,28	

**Elaboración:** Flores, J. 2009. **Fuente:** MONCAYO, G., 2008, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás, Aqualimpia Beratende Ingenieure, Barcelona - España.

**Anexo N° 13: DISEÑO DE UN BIODIGESTOR SEGÚN EL ING. ELÉCTRICO SANTIAGO SÁNCHEZ MIÑO 2003 (QUITO – ECUADOR).**

	<b>Peso</b>	<b>Estiércol</b>	<b>Sólidos Totales</b>	<b>Sólidos Volátiles</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Potasio</b>		
<b>Símbolo</b>	<b>W [Kg]</b>	<b>T [Kg / 1000 Kg]</b>	<b>TS [Kg / 1000 Kg]</b>	<b>VS [Kg / 1000 Kg]</b>	<b>N [gr / Kg T]</b>	<b>F [gr / Kg T]</b>	<b>K [gr / Kg T]</b>	<b>TS/T [%]</b>	<b>VS/TS [%]</b>
	70	84	11	8,5	0,52	0,18	0,29	13	77

	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Valor asumido</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>Referencia</b>
Número de Animales	N°	un.		80		
Carga animal específica	Ca	Kg	$N^{\circ} * W / 1000$		5,6	
Producción de estiércol	P. est	Kg / día	$Ca * T$		470,4	
Sólidos Totales por día	TS	Kg / día	$Ca * TS$		61,6	
Sólidos Volátiles por día	VS	Kg / día	$Ca * VS$		47,6	
Cantidad de Nitrógeno	N	gr / Kg de T	$Ca * T * N$		244,608	
Cantidad de Fósforo	F	gr / Kg de T	$Ca * T * F$		84,672	
Cantidad de Potasio	K	gr / Kg de T	$Ca * T * K$		136,416	
Potencial de producción de Metano	BO	$m^3 CH_4 / Kg VS$		0,45		Tabla 2.13
Descomposición de los sólidos en el tiempo	k	Adimensional	$0,6 + 0,0006 * \exp(0,1185 * VS)$		0,769	Fórmula 2.4
Temperatura	TC	°C		25		
Crecimiento de producción de Metano	u	Adimensional	$0,013 * TC - 0,129$		0,196	Fórmula 2.5
Tiempo de retención	RT	días		25		Tabla 2.11
Volumen de Metano	V. CH <sub>4</sub>	$m^3 CH_4 / día$	$BO * VS * (1 - k / (u * RT - 1 + k))$		17,892	Fórmula 2.3
Relación Dióxido de carbono / Metano	r	Adimensional	$\% CO_2 / \% CH_4$	0,667		Tabla 2.8
Volumen de Dióxido de carbono	V. CO <sub>2</sub>	$m^3 CO_2 / día$	$CH_4 * r$		11,934	
Cantidad de Biogás	C. biogás	$m^3 Biogás / día$	$V. CH_4 + V. CO_2$		29,826	
Factor de dilución	FD	Adimensional	1 : 3	4		
Volumen de la fase líquida	V. fase líquida	$m^3$	$TS * FD * RT / 1000$		6,16	
Relación fase líquida fase gaseosa	q	Adimensional		0,25		
Volumen de la fase gaseosa	V. fase gaseosa	$m^3$	V. fase líquida * q		1,54	
Volumen del biodigestor	V. biodigestor	$m^3$	V. fase líquida + V. fase gaseosa		7,7	

Elaboración: Flores, J. 2009.

Fuente: SÁNCHEZ, S., 2003, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. WWF – Fundación Natura, Quito – Ecuador.

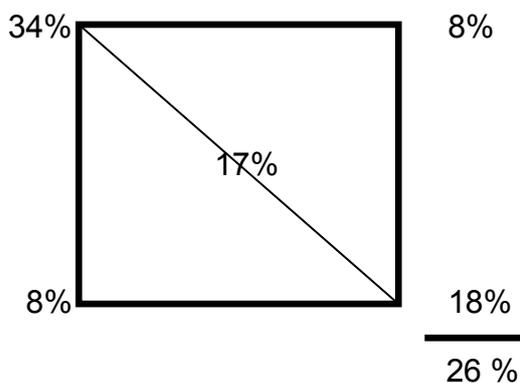
#### Anexo N° 14: ALIMENTACIÓN DE LOS CERDOS.

La alimentación de los 4 cerdos se realizó en base a una mezcla de un concentrado proteínico con morochillo (maíz partido). Ésta formulación se hizo tomando en cuenta el 17 % de proteína (manual de porcicultura PRONACA) necesario para la buena alimentación de los cerdos en etapa de engorde. A continuación la formulación del alimento:

Datos:

Porcentaje de proteína del concentrado: 34%.

Porcentaje de proteína del maíz: 8%.



- $8 / 26 * 100 = 31\%$  (aproximadamente 30%) de concentrado proteínico.
- $18/26 * 100 = 69\%$  (aproximadamente 70%) de morochillo.

Entonces si se alimentaba los 4 cerdos con 11 kg de alimento diarios, éste tenía 3,40 kg de concentrado proteínico y 7,60 kg de morochillo.

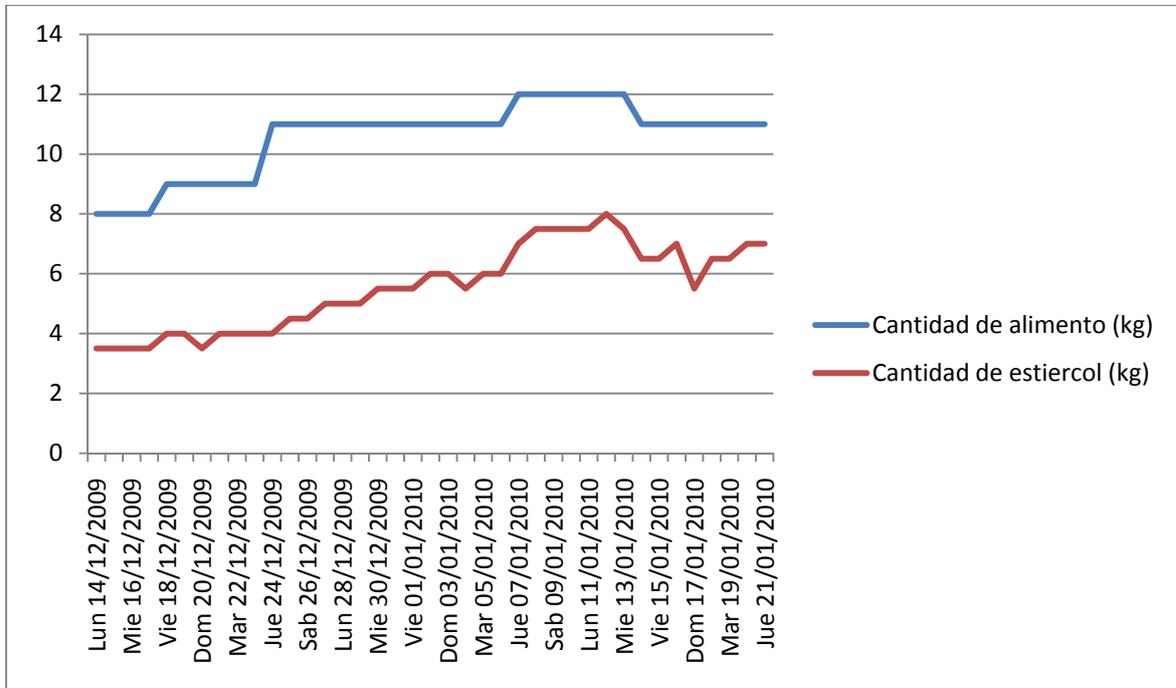
En la siguiente tabla se describe la cantidad de alimento ingerido diariamente durante toda la investigación por los 4 animales, y también la cantidad de excretas diarias.

**Tabla:** Relación alimento - estiércol.

Fecha	Cantidad de alimento (kg)	Cantidad de estiércol (kg)	Observaciones
Lun 14/12/2009	8	3,5	
Mar 15/12/2009	8	3,5	
Mie 16/12/2009	8	3,5	
Jue 17/12/2009	8	3,5	
Vie 18/12/2009	9	4	
Sab 19/12/2009	9	4	
Dom 20/12/2009	9	3,5	
Lun 21/12/2009	9	4	
Mar 22/12/2009	9	4	
Mie 23/12/2009	9	4	
Jue 24/12/2009	11	4	
Vie 25/12/2009	11	4,5	
Sab 26/12/2009	11	4,5	
Dom 27/12/2009	11	5	
Lun 28/12/2009	11	5	
Mar 29/12/2009	11	5	
Mie 30/12/2009	11	5,5	
Jue 31/12/2009	11	5,5	
Vie 01/01/2010	11	5,5	
Sab 02/01/2010	11	6	
Dom 03/01/2010	11	6	
Lun 04/01/2010	11	5,5	
Mar 05/01/2010	11	6	
Mie 06/01/2010	11	6	
Jue 07/01/2010	12	7	
Vie 08/01/2010	12	7,5	
Sab 09/01/2010	12	7,5	
Dom 10/01/2010	12	7,5	
Lun 11/01/2010	12	7,5	Sobra de alimento
Mar 12/01/2010	12	8	Sobra de alimento
Mie 13/01/2010	12	7,5	Sobra de alimento
Jue 14/01/2010	11	6,5	
Vie 15/01/2010	11	6,5	
Sab 16/01/2010	11	7	
Dom 17/01/2010	11	5,5	
Lun 18/01/2010	11	6,5	
Mar 19/01/2010	11	6,5	
Mie 20/01/2010	11	7	
Jue 21/01/2010	11	7	

Elaboración: Flores, J. 2009.

El siguiente gráfico representa la relación alimento – estiércol antes descrita en la tabla, pero esta vez de manera lineal.



Elaboración: Flores, J. 2009.

Éste gráfico indica que a mayor tasa de alimentación mayor cantidad de excretas.

**Anexo N° 15: RESULTADOS DE LOS EXAMENES DE LABORATORIO DE LAS HECES DE LOS CERDOS.**

**Anexo N° 16:** RESULTADOS DE LOS EXAMENES DE LABORATORIO DEL BIOL OBTENIDO EN EL PROTOTIPO.

**Anexo N° 17: PLANO DE LAS PORQUERIZAS.**

**Anexo N° 18: PLANOS DEL BIODIGESTOR DE 16 m<sup>3</sup> (PROYECTO).**

**Anexo N° 19: PLANOS DEL PROTOTIPO DEL BIODIGESTOR.**

**Anexo N° 20: PROTOCOLO DE KIOTO.**

**Anexo N° 21: ISO 14001.**