

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

**DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA  
DISPOSICIÓN DEL EXCREMENTO  
PRODUCIDO POR RUMIANTES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

PRESENTA

**PABLO DANIEL ZAMBRANA GUMIEL**

Asesores:

MCV. Jorge Francisco Monroy López.

Dr. Juan Manuel Morgan Sagastume.

**México D.F.**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

- 1 **RESUMEN** .....;Error! Marcador no definido.
- 2 **INTRODUCCIÓN**.....;Error! Marcador no definido.
  - 2.1 ANTECEDENTES ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3 **Fundamentos de la digestión anaerobia**;Error! Marcador no definido.
  - 3.1 HIDRÓLISIS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 3.2 FERMENTACIÓN ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 3.3 METANOGENÉISIS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 3.4 MICROBIOLOGÍA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 4 **Tipos de digestores** .....;Error! Marcador no definido.
  - 4.1 DIGESTORES TIPO I ó 1A GENERACIÓN..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 4.2 DIGESTORES TIPO II ó 2A GENERACIÓN ... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 4.3 DIGESTORES TIPO III ó 3A GENERACIÓN .. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 4.4 LAGUNA ANAEROBIA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 4.5 DIGESTOR ANAEROBIO DE BAJA TASA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 4.6 DIGESTOR ANAEROBIO DE ALTA TASA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 5 **Factores que afectan la digestión anaerobia**.....;Error! Marcador no definido.
  - 5.1 pH..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 5.2 TEMPERATURA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 5.3 CONCENTRACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 5.4 PRESENCIA DE SUSTANCIAS TOXICAS E INHIBITORIAS .;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 6 **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**;Error! Marcador no definido.
- 7 **HIPÓTESIS** .....;Error! Marcador no definido.
- 8 **OBJETIVOS** .....;Error! Marcador no definido.
- 9 **MATERIAL Y MÉTODOS** .....;Error! Marcador no definido.
- 10 **DIAGNÓSTICO SITUACIONAL**.....;Error! Marcador no definido.
- 11 **RESULTADOS**.....;Error! Marcador no definido.
  - 11.1 COMPARATIVA DE SISTEMAS ANAEROBIOS. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 11.2 PONDERACIÓN DE LOS FACTORES A EVALUAR;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 11.3 EVALUACIÓN DE FACTORES ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 11.4 MATRIZ DE DECISIÓN DEL SISTEMA DIGESTOR COMPLETAMENTE MEZCLADO **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 11.5 MATRIZ DE DECISIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTOR CONVENCIONAL .....**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

11.6 MATRIZ DE DECISIÓN DEL SISTEMA DE LAGUNA ANAEROBIA CUBIERTA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**12 DISCUSION.....**¡Error! Marcador no definido.

**13 CONCLUSIONES.....**¡Error! Marcador no definido.

**14 LITERATURA CITADA. ....**¡Error! Marcador no definido.

## **ANEXOS**

**1 Tratamiento de aguas residuales .....**¡Error! Marcador no definido.

1.1 MÉTODOS FÍSICOS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.2 MÉTODOS QUÍMICOS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.3 MÉTODOS BIOLÓGICOS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.4 PRELIMINAR..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.5 PRIMARIO..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.6 SECUNDARIO..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.7 Terciario o Avanzado..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1.8 LITERATURA CITADA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**2 DATOS HISTORICOS.....**¡Error! Marcador no definido.

2.1 LITERATURA CITADA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**3 Criterios de diseño.....**¡Error! Marcador no definido.

3.1 FLUJO (Q)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.2 TIEMPO DE RETENCIÓN (T)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.3 VOLUMEN DEL DIGESTOR (V)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.4 ÁREA DEL DIGESTOR..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.5 DIÁMETRO DEL DIGESTOR..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.6 CARGA DE LODO..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.7 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO).. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.8 SÓLIDOS TOTALES (ST)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.9 SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES (STV)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.10 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) .... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.11 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV) **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.12 ESTABILIZACIÓN..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.13 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.14 PRODUCCIÓN DE GAS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

3.15 LITERATURA CITADA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

#### 4 Descripción de los elementos que conforman los trenes de tratamiento ¡Error! Marcador no definido.

- 4.1 REJILLA ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.2 LAGUNA ANAEROBIA CUBIERTA ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.3 DIGESTOR CONVENCIONAL ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.4 DIGESTOR COMPLETAMENTE MEZCLADO ... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.5 SEDIMENTADOR ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.6 LAGUNA FACULTATIVA..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.7 LITERATURA CITADA. .... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

#### 5 Definición de los rubros considerados en la matriz de decisión.¡Error! Marcador no definido.

- 5.1 APLICABILIDAD DEL PROCESO ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.2 INTERVALO DEL FLUJO EN EL CUAL EL SISTEMA ES APLICABLE .....¡ERROR!  
**MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 5.3 TOLERANCIA A VARIACIONES DE FLUJO .... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.4 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.5 COSTO DE LA INVERSIÓN INICIAL ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
  - 5.5.1 *Obra civil*..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.5.2 *Equipamiento* ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.5.3 *Instalación eléctrica* ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.5.4 *Tuberías* ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.5.5 *Instrumentación y control*..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.5.6 *Otros* ..... ¡Error! Marcador no definido.
- 5.6 COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
  - 5.6.1 *Costo de insumos* ..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.6.2 *Costo de la energía*..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.6.3 *Gastos administrativos y de personal*..... ¡Error! Marcador no definido.
  - 5.6.4 *Costo de refacciones y material de mantenimiento* . ¡Error! Marcador no  
*definido.*
- 5.7 GENERACIÓN DE RESIDUOS ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.8 REQUERIMIENTO DE REACTIVOS ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.9 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.10 ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.11 GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE REUSO ¡ERROR!  
**MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 5.12 VIDA ÚTIL ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.13 REQUERIMIENTO DE ÁREA ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.14 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.15 CRITERIOS DE DISEÑO ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.16 EXPERIENCIA DEL CONTRATISTA ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.17 TECNOLOGÍA AMPLIAMENTE PROBADA..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 5.18 COMPLEJIDAD DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPAMIENTO... ¡ERROR! MARCADOR NO  
**DEFINIDO.**

5.19	OPERACIÓN.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
5.19.1	<i>Flexibilidad de operación.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.19.2	<i>Confiabilidad del proceso.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.19.3	<i>Eficiencia de remoción .....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.19.4	<i>Complejidad de operación del proceso ...</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.19.5	<i>Requerimientos de personal.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.19.6	<i>Disponibilidad de repuestos y centros de servicio ..</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.20	ENTORNO.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
5.20.1	<i>Temperatura.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.20.2	<i>Ruido.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.20.3	<i>Contaminación visual .....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.20.4	<i>Malos olores .....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.20.5	<i>Animales dañinos.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.21	OPERACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN ...	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
5.21.1	<i>Calificación de criterios y comentarios...</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.22	LITERATURA CITADA. ....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>6</b>	<b>Balances de Materia .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.1	BALANCE DE MATERIA DEL DIGESTOR COMPLETAMENTE MEZCLADO ...	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
6.2	BALANCE DE MATERIA DEL DIGESTOR CONVENCIONAL	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
6.3	BALANCE DE MATERIA DE LA LAGUNA ANAEROBIA CUBIERTA .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## INDICE DE CUADROS.

CUADRO 1 NUMERO DE PLANTAS DE BIOGAS EN DIFERENTES PAÍSES DE EUROPA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CUADRO 2 INVESTIGACIONES SOBRE DIGESTIÓN ANAEROBIA APLICADA A LA PRODUCCIÓN ANIMAL	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CUADRO 3 PESAJE DE ESTIERCOL PRODUCIDO EN EL CENTRO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CUADRO 4 CONSUMO DE GAS SEGÚN LAS NOTAS PROPORCIONADAS POR EL ADMINISTRADOR DEL CENTRO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CUADRO 5 CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS EVALUADOS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CUADRO 6 PONDERACION DE LOS FACTORES EVALUADOS EN LA MATRIZ DE DECISION.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CUADRO 7 CALIFICACION DE LOS FACTORES EVALUADOS EN LA MATRIZ DE DECISION.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

## INDICIE DE FIGURAS

FIGURA 1 TRANSFORMACION DE LA MATERIA ORGÁNICA EN METANO POR VIA ANAEROBIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2 LAGUNA ANAEROBIA CUBIERTA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 3 DIGESTOR CONVENCIONAL	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4 DIGESTOR COMPLETAMENTE MEZCLADO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5 PANORÁMICA DEL CENTRO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 6 EJEMPLAR DEL HATO OVINO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 7 EJEMPLAR DEL HATO CAPRINO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 8 EJEMPLAR DEL HATO BOVINO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 9 CENTRO DE PROCESAMIENTO DE LÁCTEOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 10 CORRALES BOVINOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 11 ESTIÉRCOL RECOLECTADO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 12 ESTIÉRCOL OVINO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 13 ESTERCOLERO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 14 CASAS COLINDANTES AL ESTERCOLERO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 15 CASAS COLINDANTES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 16 ESQUEMA DE UNA GRANJA AUTOSUSTENTABLE.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

## INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 TIEMPO DE RETENCIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 2 VOLUMEN DEL DIGESTOR	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 3 ÁREA DEL DIGESTOR	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 4 DIÁMETRO DEL DIGESTOR	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 5 CARGA DE LODO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 6 ESTABILIZACION	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 7 SÓLIDOS PRODUCIDOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 8 PRODUCCIÓN DE GAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

## 1 RESUMEN

ZAMBRANA GUMIEL PABLO DANIEL. Digestión anaerobia para el tratamiento de los desechos producidos por rumiantes (bajo la dirección de: MCV. José Francisco Monroy López y Dr. Juan Manuel Morgan Sagastume)

Las cría del ganado de manera intensiva ha traído como consecuencia la generación de grandes cantidades de estiércol en un espacio reducido, a su vez en la ciudad de México el crecimiento de asentamientos urbanos está absorbiendo a granjas y centros de producción, lo que hace que la disposición adecuada de estos residuos se vuelva una urgencia. El Centro de Enseñanza, Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal (CEPIPSA) está inmerso en esta problemática por lo que se propone la digestión anaerobia como un método viable para la adecuada disposición de estos residuos de este tipo de tratamiento. Se hicieron los cálculos para el dimensionamiento de 3 sistemas anaerobios y se analizaron por medio de una matriz de decisión, la cual considera diversos rubros que hacen el análisis mas objetivo; con lo cual se concluyo que el digestor anaerobio convencional es el mas adecuado tomando en cuenta las características de los desechos y la forma de operación del Centro.

## 2 INTRODUCCIÓN

### 2.1 Antecedentes

La intensificación ganadera genera diversos problemas propios de este método de cría.<sup>1,2</sup> Si bien “la intensificación ganadera disminuye entre un 15 y 20 % el consumo de pienso, y por lo tanto, el número de toneladas de residuos o subproductos ganaderos”<sup>1</sup> la concentración del excremento en un solo lugar, así como su disposición se convierten en un problema grave para el productor ya que esto significa un costo extra. Aunado a esto, este tipo de explotaciones, en la actualidad, no cuentan con campos de cultivo en los cuales utilizar los desechos como abono y no siempre es posible incorporarlos a los terrenos agrícolas donde se podrían ser utilizados.,<sup>1,2</sup>

Por otra parte la aplicación desmedida e inadecuada de este tipo de abono provoca la contaminación de las aguas subterráneas por el efecto de las lluvias con las subsecuentes filtraciones<sup>1,2</sup>. Los compuestos nitrogenados son los más contaminantes y la ganadería es una de las industrias que más compuestos de este tipo genera; el nitrato, es el que se encuentra con más frecuencia. En el agua resulta benéfico en ciertas concentraciones, ya que es el compuesto que mejor asimilan las plantas, sin embargo las concentraciones elevadas de dicho compuesto contribuyen a un desarrollo desmedido de algunas algas con la consecuente pérdida del equilibrio en los lechos de ríos, lagos, lagunas y mares.

3

Las normas oficiales mexicanas, en específico la NOM-004-SEMARNAT-2002, tienden a normar sobre el volumen máximo permisible para su aplicación como

abono ya que el agua que se infiltra conduce el nitrógeno de las excretas a las aguas subterráneas que a su vez alimentan los manantiales. También hay que tener en cuenta para su aplicación como abono, que las excretas contienen parásitos y bacterias patógenas para el humano y para otras especies (Brucella, Salmonella etc.)<sup>2,4</sup>.

Además al dejar las excretas a cielo abierto se producen fermentaciones que liberan gases como el metano, dióxido de carbono, amoníaco y olores, si bien el dióxido de carbono es mínimo, la producción de metano y amoníaco que conlleva serios problemas de contaminación del medio ambiente. El metano es producido por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, las cuales se presentan de manera frecuente en las capas profundas del estercolero, los gases que se liberan a la atmósfera tienen un efecto en la destrucción de la capa de ozono y el efecto invernadero “de los 500 millones de toneladas anuales de gases invernadero liberados actualmente a la atmósfera, el 70% es imputable a la actividad humana, principalmente a la agricultura y a la ganadería (rumiantes bovinos 80 millones Ton/año)”<sup>5</sup>

El metano permanece en la atmósfera aproximadamente 10 años, es por esta razón el aumento en la concentración de este gas al doble en los últimos 100 años.<sup>5</sup>

Los residuos que genera la ganadería, al ser de origen orgánico son totalmente reciclables, por lo que con un adecuado manejo y aprovechamiento pueden ser considerados como subproductos de utilidad, impactando de forma positiva en la economía de los ganaderos y productores.<sup>1,6</sup>

A pesar de lo anterior debe tomarse en cuenta la falta de sitios para el tratamiento de los desechos sólidos además que estos requieren tener características especiales para poder ser tomados en cuenta como posibles sitios de relleno sanitario o lagunas de estabilización. Por esta razón acualmente se toman en cuenta diferentes métodos biotecnológicos para el tratamiento de los desechos sólidos, por lo cual los tratamientos que reducen la materia orgánica se vuelven competitivos simplemente por el espacio que ahorran, si a esto le agregamos que algunos son independientes energéticamente hablando, los sistemas que producen energía, como los biodigestores anaerobios, son una opción viable para el tratamiento de los desechos.<sup>7</sup>

En Latinoamérica la adopción del método de digestión anaerobia como una tecnología se puede observar en tres diferentes etapas:

La etapa inicial ocurre en los años 50, donde países pioneros como Colombia y Guatemala instalan algunas plantas para el aprovechamiento de los desechos agrícolas y pecuarios utilizando como base los diseños utilizados después de la segunda guerra mundial. En esta etapa se logró mantener un equilibrio en el interés por la producción del biogás así como del lodo residual que se usaba como acondicionador de suelos. La siguiente etapa se desarrolla debido a la crisis energética de los años 70 donde la digestión anaerobia para la obtención de biogás se ve como una posible alternativa para tal crisis, en esta etapa la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) financiaron una gran cantidad de proyectos

para la construcción de plantas anaerobias de tratamiento, sin embargo el ímpetu de esta etapa decae paulatinamente principalmente por la globalización de la economía y la dificultad de integración del medio rural latinoamericano.<sup>8</sup> La siguiente etapa que se desarrolla actualmente en Latinoamérica tiene su base en contrarrestar la contaminación ambiental y es aquí donde se pone atención una vez más en la digestión anaerobia quedando de lado la producción de gas y de lodos residuales como mejoradores de suelos, sin dejar de ser importantes ya que hacen al proceso independiente energéticamente hablando.<sup>8</sup>

En Latinoamérica la digestión anaerobia ha sido tomada en cuenta por su capacidad para contrarrestar problemas como: la deforestación, dependencia y precio elevado de combustibles, escasez de fertilizantes y mejoradores de suelos, contaminación por las descargas de la industria agropecuaria y de aguas municipales no tratadas, etc.<sup>8</sup>

Sin embargo, y pese a la difusión de la digestión anaerobia, la dependencia tecnológica sigue presente y en la mayoría de los casos la tecnología aplicada es adaptada de modelos extranjeros. Sin embargo, uno de los países con más éxito en el desarrollo de tecnología anaerobia es Brasil, ya que actualmente es el primer lugar a nivel latinoamericano en cuanto al número de reactores anaerobios construidos y centros de investigación que han desarrollado esta tecnología.<sup>8</sup>

Debido a la crisis energética que sufrió Europa en los años 70 se inició la búsqueda de alternativas energéticas presentándose como una buena opción la producción de biogás a partir de la materia orgánica. Hoy en día, debido a que la

producción de biogas para su utilización como combustible, aun es mas cara que utilizar combustibles fósiles, se han orientando las investigaciones sobre la digestión anaerobia hacia el manejo y control de los contaminantes.<sup>8</sup>

En la Unión Europea se encuentran instalados al menos 739 plantas de tratamiento de tipo anaerobio distribuidas como se indica en el cuadro 1.

Del total de los digestores de la Unión Europea el 67% son utilizados en granjas mientras que el 28% son plantas industriales.

En la cuadro 2 Se observan los resultados de diversas investigaciones en las que se ha utilizado la digestión anaerobia para el tratamiento de los desechos generados por la producción animal y algunos de sus derivados. En estas investigaciones el uso de los digestores completamente mezclados ha sido probada con resultados óptimos que permiten sustentar la hipótesis de este trabajo.

En México la utilización de la digestión anaerobia para el tratamiento de los desechos se desarrollo con atraso considerable en comparación con otros países latinoamericanos, siendo en el año de 1987 cuando se construye el primer digestor anaerobio.

La digestión anaerobia en México constituye el 4.3% del total de tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales lo cual indica que dicha tecnología no ha sido difundida en el país, ya que los procesos anaerobios predominan; sin embargo, estos también son los que más han sido abandonados, del 100% que no están en operación el 30% son sistemas

anaerobios, debido probablemente a los elevados costos de mantenimiento y operación y a su limitada capacidad para el tratamiento de lodos.<sup>9</sup>

En México la digestión anaerobia ha sido utilizada para el tratamiento de efluentes típicos para este sistema.<sup>9</sup>

La digestión anaerobia es un sistema apreciado por la recuperación del biogás con fines energéticos, a pesar de esto en México muy pocas plantas utilizan el biogás producido, esto además es preocupante porque la mayoría de las plantas deja que el biogás se escape al medio ambiente, con lo cual libera cantidades de gases que favorecen el efecto invernadero y la lluvia ácida.<sup>9</sup>

### **3 Fundamentos de la digestión anaerobia**

La digestión anaerobia consta de una serie de procesos metabólicos que resultan en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular.(figura 1)

Los procesos que conforman a la digestión anaerobia son: hidrólisis, fermentación o acidogénesis y metanogénesis.

#### **3.1 Hidrólisis**

Este es el primer paso, en el que los polímeros orgánicos complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) son convertidos a monómeros simples solubles de cadena larga ( aminoácidos, azúcares y ácidos grasos).Estas transformaciones son posibles por la intervención de enzimas producidas por las bacterias que llevan a cabo la fermentación, para tener disponible la materia orgánica solubilizada <sup>1</sup>

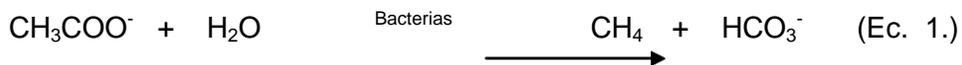
#### **3.2 Fermentación**

En este proceso los aminoácidos, azúcares y algunos ácidos grasos son captados por la membrana celular de bacterias fermentativas, en su mayoría anaerobias obligadas, y degradados hacia compuestos más simples como ácidos grasos volátiles como propionato y butirato, alcoholes y ácido láctico. El propionato y butirato serán fermentados mas adelante para al final producir CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y acetato. Estos son precursores de la formación de metano y son los productos principales de esta etapa; también se producen compuestos

inorgánicos simples como, amoníaco y sulfuro de hidrógeno. Los substratos orgánicos sirven tanto como aceptores y donadores de electrones. El intercambio de energía asociado con la conversión del propionato y butirato a acetato e hidrógeno requiere que este último se encuentre en bajas concentraciones dentro del sistema ( $H_2 < 10^{-4}$  atm), o la reacción no se llevaría a cabo.<sup>1</sup>

### 3.3 Metanogénesis

Este tercer paso es realizado por un grupo de organismos conocido en su conjunto como metanógenos, de ellos, dos grupos están directamente relacionados con la producción de metano, uno, las bacterias metanogénicas acetoclásticas, convierte el acetato en metano y dióxido de carbono, mientras que las bacterias metanogénicas hidrogenofílicas utilizan el hidrógeno como donador de electrones y el  $CO_2$  como aceptor de electrones para producir metano. Algunas bacterias acetógenas están presentes en el proceso anaerobio, así como otros grupos de bacterias que producen enzimas proteolíticas, lipolíticas, urolíticas y celulíticas.<sup>1</sup>



Los sistemas anaerobios presentan un balance energético positivo, es decir producen mas energía de la que consumen, por lo cual representan una opción económicamente viable para el tratamiento de los desechos, también son

seleccionados por la gran capacidad de tratamiento de materia orgánica en comparación con los sistemas aerobios<sup>1</sup>

### **3.4 Microbiología**

El grupo de microorganismos no metanogénicos responsable de la hidrólisis y la fermentación está compuesto por bacterias anaerobias facultativas y anaerobias obligadas, con actividad proteolítica que fermentan los azúcares formando ácido láctico e isovalérico; bacterias amilolíticas que producen ácido acético y butírico como resultado de su fermentación. Otros géneros bacterianos incluyen aquellos que producen enzimas lipolíticas, ureolíticas y celulolíticas.<sup>1</sup>

Los microorganismos responsables de la producción de metano, son anaerobios obligados estrictos, es decir, no crecen en presencia de oxígeno molecular, ni en presencia de compuestos que fácilmente liberen oxígeno. Su rango de pH óptimo es de 7.2 a 8.2 para su crecimiento utilizan sales de amonio como fuentes de nitrógeno, muestran una extrema especificidad por el sustrato y producen como mayor y principal metabolito el gas metano.

Estas bacterias producen el metano a partir de una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, a partir del ácido fórmico, a partir del acetato, butirato, ácido fórmico e hidrógeno.<sup>1</sup>

Por otra parte en el efluente del biodigestor participa además una microflora anaerobia. Dentro de la principal microflora anaerobia que actúa en el efluente se encuentran bacterias heterotróficas, bacterias reductoras del sulfato,

bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, bacterias homoacetogénicas, bacterias metanogénicas y las bacterias celulolíticas.

Muchos de los microorganismos metanogénicos identificados en los digestores anaerobios son similares a los encontrados en el rumen de los bovinos.<sup>1</sup>

## **4 Tipos de digestores**

Durante el transcurso del tiempo se han desarrollado tecnologías que han hecho más eficientes a los digestores.

La evolución de los procesos anaerobios se ha dado en el sentido de controlar la biomasa activa en el reactor y desacoplar el tiempo de retención celular, del tiempo de retención hidráulica; debido a que la capacidad de tratamiento de los sistemas biológicos esta determinada por la cantidad de biomasa activa que puede tener el sistema y por el grado de eficiencia en el contacto entre dicha biomasa y el agua a tratar. Lo anterior ha llevado a que con base en su evolución tecnológica se clasifique a los digestores en 3 generaciones o tipos.<sup>1</sup>

### **4.1 Digestores Tipo I ó 1a Generación**

Estos han sido ampliamente utilizados a nivel domestico y de granja para la obtención de biogás, dentro de este grupo encontramos a la fosa séptica como el más antiguo, el Tanque Hihoff, las lagunas anaerobias, el digestor anaerobio convencional, el digestor anaerobio completamente mezclado, y el reactor de contacto anaerobio.<sup>1</sup>

### **4.2 Digestores Tipo II ó 2a Generación**

En estos la retención de los microorganismos dentro del reactor por medio de soportes o sedimentación es la característica principal, con lo cual se logran tiempos de retención hidráulica menores, con la consecuente disminución del volumen del digestor, en este grupo encontramos al Filtro Anaerobio, al Reactor

Tubular de Película Fija y al Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo ascendente.<sup>1</sup>

### **4.3 Digestores Tipo III ó 3a Generación**

En este tipo de la interacción microorganismo-materia orgánica se mejora al proporcionarle a los microorganismos, un soporte expandido o fluidificado donde adherirse; este tipo de digestores están a nivel piloto o semi-industrial y estos son utilizados principalmente para el tratamiento de efluentes líquidos y se conocen: los de Lecho Fluidificado y de Lecho Expandido.<sup>1</sup>

El principal objetivo en la evolución ha sido mejorar el contacto de la materia orgánica con los microorganismos y reducir el tiempo de retención.

A pesar de esta división hay que tener en cuenta que no se puede descartar a ninguno de los tipos, ya que para las diferentes necesidades de depuración y según las exigencias de las normas, pueden emplearse cualquiera de ellos. A continuación se describen brevemente los digestores propuestos para el tratamiento de los desechos generados por el Centro.

### **4.4 Laguna anaerobia**

Son un proceso de baja tasa, han sido utilizadas para el tratamiento de aguas con grandes contenidos de materia orgánica, los tiempos de retención varían de los 1.2 a los 160 días con una profundidad de 5 a 10 metros.<sup>1</sup>

El sistema se construye de forma rectangular en forma de zanja lineal o como un gran tanque. El efluente se introduce por el fondo de la laguna, esto incrementa

el contacto entre el efluente y los lodos anaerobios sedimentados; el biogás generado contribuye también al mezclado interno al mover los lodos cuando se desprenden las burbujas generadas en los lodos anaerobios del fondo.<sup>1</sup>

A lo largo de la laguna la altura y la actividad biológica de los lodos disminuye; cerca de la zona de salida del efluente se genera un área de sedimentación lo que reduce la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente.<sup>1</sup>

La laguna está cubierta por una cubierta flotante que permite recolectar el gas generado en la laguna y a su vez conserva la temperatura.<sup>1</sup>

Las principales ventajas de las lagunas cubiertas son su construcción es relativamente barata, su habilidad para manejar desperdicios de diversas características y con altas concentraciones de sólidos suspendidos, aceites y grasas, el gran volumen de desechos que se pueden estabilizar, son de fácil muestreo, por manejar grandes volúmenes se pueden controlar los efectos producidos por tóxicos y choques orgánicos, alta calidad del efluente, al tener grandes tiempos de retención celular disminuye la cantidad de lodos de desecho, la cobertura permite la recolección del biogás, así como un control adecuado de los olores.<sup>1</sup>

Dentro de las desventajas están la gran cantidad de terreno requerido, problemas en el mezclado interno y en la distribución del flujo, probable ineficiencia en la distribución al momento de la alimentación del caudal y el mantenimiento de la geomembrana de cobertura.<sup>1</sup>

Para una laguna que trate los desechos generados por vacas el tiempo de retención es de 20 a 24 días, cuando se mezcla con agua residual para alcanzar una concentración total de sólidos de 8 a 10%.<sup>1</sup>

En general el comportamiento del sistema es el óptimo con excretas frescas al contrario de excretas que hayan sido secadas antes. El grado de conversión de las excretas dependerá de la concentración de DQO biodegradable que contengan las excretas. Típicamente el cociente de SSV/SST es de 0.80 a 0.85. de los sólidos suspendidos volátiles entre el 30 y 40% es biodegradable.

Se estima que los tiempos de retención pueden variar de 50 a 100 días. El desempeño de las lagunas cubiertas puede mejorarse construyendo una serie de pozas o charcas con un volumen igual al de una sola laguna.<sup>1</sup>

en éstas se realiza un proceso biológico con ausencia de oxígeno, a una temperatura entre 20 y 35°C aproximadamente. Si la temperatura es menor de 15°C el sistema es deficiente. En ésta, no se remueven los flotantes para conservar el calor y para aislar la laguna del oxígeno atmosférico.<sup>1</sup>

La laguna debe estar retirada por lo menos un kilómetro del límite sanitario del municipio por la producción de olores. Por ésta razón, es necesario tener en cuenta la dirección de los vientos. La profundidad de éstas lagunas oscila entre 4.5 a 5.0 metros. El tiempo de retención del agua residual en ellas es de 5 días.<sup>1</sup>

Estas lagunas se comportan como tanques de sedimentación-digestión, de forma que se retienen los sólidos sedimentables siendo mineralizados en el fondo de la laguna. Los sólidos deben retirarse tras 5 - 10 años de uso. Son por tanto un tipo de tratamiento primario que puede verse seguido por otros

procesos aerobios que necesitan tratamiento primario, como lagunas facultativas, discos biológicos rotativos, lechos bacterianos y lechos de turba ( no es forzoso que tengan tratamiento primario estos últimos). Estas lagunas tienen una profundidad mayor de 3 metros y una carga orgánica elevada para mantener condiciones anaerobias. <sup>1</sup>

#### **4.5 Digestor anaerobio de baja tasa**

Son los más antiguos pero no por eso menos eficientes, generalmente carecen de sistemas de agitación, los tiempos retención son prolongados, generalmente los tiempos de retención hidráulicos (TRH) y celular (TRC) son iguales, algunos de estos son: fosa séptica, tanque Imhoff, lagunas anaerobias y digestores; los cuales son los mas utilizados a nivel mundial a pequeña escala, operados por los mismos productores de los desechos generalmente a nivel rural “Ni y Nyns (1993) informan de la existencia de más de 6 millones de digestores de desechos rurales en el mundo, donde China y la India tienen el liderato (4.7 y 1.2 millones, respectivamente). <sup>1</sup>

Este tipo de digestores consisten en un tanque cerrado sin agitación y sin calentamiento, el desecho a tratar se estratifica en zonas definidas; la parte donde se lleva a cabo la totalidad de la digestión por medio de las bacterias representa aproximadamente el 30% del volumen total del digestor lo cual provoca volúmenes del reactor considerablemente mayores esto ha sido una de las mayores limitantes en su uso actual, sin embargo es el sistemas anaerobio de tratamiento mas usado en el mundo en cuanto a número, principalmente

debido al bajo costo de operación y mantenimiento, a pesar de la baja calidad del efluente.<sup>1</sup>

En este digestor el tiempo de retención se divide en hidráulico y celular, los tiempos de retención son de mas de 30 días.<sup>1</sup>

#### **4.6 Digestor anaerobio de alta tasa**

Desarrollados a finales de los 60's se los, incorporan conceptos como la biomasa fija ya sea por soportes inertes o por la formación de partículas llamadas flóculos que son retenidos por procesos de sedimentación, este tipo de reactores son mas utilizados en el tratamiento de aguas residuales.<sup>1</sup>

Difiere del anterior en que la cantidad de sólidos alimentados es mayor el lodo es mezclado por diversos sistemas lo que permite una mayor interacción entre los microorganismos y la materia orgánica lo que favorece su degradación y hace mas eficiente el sistema, como consecuencia se reduce el tamaño del digestor y el tiempo de retención, que en este caso es el mismo tanto celular como hidráulico. Este tipo de digestores trabaja con tiempos de retención de 28 días.<sup>1</sup>

También se propone un sistema de postratamiento para el agua proveniente de los diferentes digestores que esta conformado por una laguna de estabilización

## 5 Factores que afectan la digestión anaerobia

Los factores ambientales que influyen de manera más directa en el proceso de la digestión anaerobia son: <sup>1</sup>

- pH
- Temperatura
- Concentración de materia orgánica y nutrientes
- Presencia de sustancias tóxicas e inhibidoras

### 5.1 pH

Según la experiencia de varios autores el pH óptimo está en intervalos cercanos a 7, por tratarse de un proceso dependiente de la actividad microbiana, por lo tanto una variación significativa a este valor afecta negativamente la solubilidad y reactividad de varias sustancias.<sup>1</sup>

Esta variación puede deberse a la acumulación o a la producción excesiva de compuestos generados en el proceso en sí, por ejemplo al aumentar el flujo de materia orgánica más allá de los que el sistema puede manejar el pH aumenta ya que la velocidad en la que se forman los ácidos grasos es mayor a la velocidad en la que estos son convertidos en acetato y metano.<sup>1</sup>

El Calcio, Magnesio y los bicarbonatos de amonio son sustancias amortiguadoras que se encuentran normalmente en los digestores. El proceso de digestión produce bicarbonatos de amonio provenientes de la destrucción de las proteínas del lodo alimentado. La alcalinidad del digestor está relacionada

directamente a la concentración de sólidos que tenga el lodo alimentado, un digester ya establecido debe tener una alcalinidad de 2000 a 5000 mg/L. <sup>1</sup>

El principal consumidor de alcalinidad en un digester es el dióxido de carbono y no los ácidos grasos volátiles como generalmente se cree, el dióxido de carbono es producido en las etapas de fermentación y de metanogénesis de la digestión anaerobia debido a la presión parcial de gas en el digester, el dióxido de carbono se solubiliza formando ácido carbónico el cual consume alcalinidad, por lo tanto, la concentración de dióxido de carbono se ve reflejada directamente en las necesidades de alcalinidad del sistema, de ser necesario se puede agregar alcalinidad al sistema con la adición de bicarbonato de sodio, cal o carbonato de sodio. <sup>1</sup>

Sin embargo el sistema tiene la una capacidad limitada de amortiguamiento de cambios de pH por la presencia de sistemas ácido-base como el carbónico, ortofosforico y amoniacal <sup>1</sup>

## **5.2 Temperatura**

Por tratarse de un proceso biológico es muy sensible a los cambios de temperatura, en este proceso la temperatura determina la velocidad con la que se lleva a cabo el proceso.

Se ha observado que la temperatura óptima para la digestión esta entre los 30° y 40° centígrados sin embargo a pesar de su gran sensibilidad a la temperatura la digestión anaerobia puede ser aplicada a diversas temperaturas inclusive algunas tan bajas como 15°.

Hay que tener en cuenta que el proceso de digestión anaerobias libera la mayor cantidad de energía en forma de metano por lo cual no hay que esperar un autocalentamiento del sistema <sup>1</sup>

La temperatura no solo tiene influencia sobre la actividad de los microorganismos metanogénicos, también tiene un profundo efecto sobre el rango de transferencia de gas y las características del sólido. En la digestión anaerobia la temperatura es importante para determinar el rango de digestibilidad particularmente rangos de hidrólisis y formación de metano; si bien es importante definir la temperatura de operación es aún más importante mantener estable la temperatura ya que las bacterias metanogénicas son especialmente sensibles a los cambios de temperatura por lo que esto puede afectar el desempeño óptimo del digestor. <sup>1</sup>

### **5.3 Concentración de materia orgánica y nutrientes**

La materia orgánica junto con los nutrientes son fundamentales para el desarrollo y crecimiento de los microorganismos involucrados en el proceso.

La carga orgánica es la cantidad de materia orgánica, generalmente medida en DBO, que ingresa al digestor, se expresa en forma de peso por unidad de tiempo, por unidad de superficie o por unidad de peso. La cantidad de materia orgánica que ingresa al sistema es muy importante ya que si se rebasa el límite de degradación de las bacterias que convierten los ácidos a acetatos y metano el medio se acidifica mucho lo que a su vez inhibe a las bacterias

metanogénicas formándose así un círculo vicioso, al detener el proceso de degradación de la materia orgánica.<sup>1</sup>

Dentro de los nutrientes encontramos a los macro nutrientes que son aquellos que se requieren en cantidades mayores estos son nitrógeno y fósforo, y los micro nutrientes que son necesarios en cantidades mínimas dentro de estos encontramos al hierro, níquel, magnesio, calcio, sodio, bario, tungsteno, molibdeno, selenio y cobalto.<sup>1</sup>

Según el tipo de desechos que se requiera tratar será necesaria o no la adición de alguno o varios nutrientes.<sup>1</sup>

#### **5.4 Presencia de sustancias toxicas e inhibitorias**

Además de las sustancias toxicas e inhibitorias que se pueden generar en el mismo proceso podemos encontrar algunas dentro del afluente. Algunas de estas sustancias son ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), amoniaco (NH<sub>3</sub>), metales pesados (Ni, Hg, Pb, Cr, Zn), cianuro (CN<sup>-</sup>), compuestos recalcitrantes (compuestos orgánicos clorados: CCl<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>Cl; formaldehído).

La toxicidad puede ser transitoria o crónica; algunas de las opciones para mitigar el problema de la toxicidad crónica seria mezclar el afluente con el efluente (recirculación) para permitir que el nivel de toxicidad sea tolerable o biodegradable y permitir la adaptación de la biomasa. Y si la toxicidad es transitoria utilizar procesos con altos tiempos de retención de biomasa y bajos tiempos de retención hidráulicos.<sup>1</sup>

## **6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se considerará al Centro de Enseñanza, Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal como base para el desarrollo de este estudio en el cual se está planteando una metodología con base en matrices de decisión para la toma de decisiones.

En este sentido se plantea el siguiente cuestionamiento: ¿Cuál sistema anaerobio de los siguientes: digestor completamente mezclado, digestor convencional y lagunas anaerobias es el idóneo para la disposición y tratamiento de los desechos generados en el CEPIPSA?

## **7 HIPÓTESIS**

El sistema que presenta las mejores ventajas tecnológicas y económicas para el CEPIPSA es el digestor completamente mezclado, en comparación con el digestor convencional y las lagunas anaerobias. Esto se fundamenta en que el digestor completamente mezclado es una unidad de tratamiento mas eficiente y que produce mayor cantidad de gas además de ser la más probada y difundida en el mundo con buenos resultados, esto fundamentado en las investigaciones realizadas por Z. Maldenovska.<sup>10</sup> en la Universidad de Dinamarca, Grant S.<sup>11</sup> en Estados Unidos de Norteamérica, Chao K.<sup>12</sup> de Korea, Nyns J.<sup>13</sup> de Bélgica.

## 8 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son:

- Establecer la ingeniería conceptual de los procesos de digestión anaerobia que pudieran resolver la problemática del CEPIPSA.
- Efectuar los balances de masa y energía en los diferentes procesos así como el diseño preliminar de las unidades que lo integran. Utilizando la ecuación general de balance la cual dice:  $\text{entradas} + \text{generación} = \text{salidas} + \text{acumulación}$ .
- Efectuar un análisis comparativo de 3 sistemas de tratamiento: el digestor convencional, las lagunas anaerobias y el digestor completamente mezclado para conocer el que mejor aplicación tenga en el CEPIPSA.

## **9 MATERIAL Y MÉTODOS**

Se realizó un diagnóstico de la situación del Centro de Enseñanza, Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal (CEPIPSA), mediante la aplicación de la matriz de decisión, la cual toma en cuenta los distintos aspectos que intervienen en la evaluación de un proceso de tratamiento de agua residual, bajo circunstancias específicas, con calificaciones que son asignadas por el criterio del evaluador, lo que permite que la evaluación sea más objetiva, como se describe en el anexo 8.<sup>14</sup>

Se obtuvieron los resultados que permitieron la comparación de los 3 sistemas propuestos basándose en la producción de biogás y en la generación de lodos.

## 10 DIAGNÓSTICO SITUACIONAL

El CEIPSA, se encuentra en la Av. Cruz Blanca No. 486, en San Miguel Topilejo, Delegación Tlalpan, México 14500, DF.<sup>15</sup>

El Centro cuenta con una superficie total de 33,755 m<sup>2</sup>. Ubicado en el Km 28.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, a 19° latitud norte y 99° longitud Oeste a una altura de 2760 m. sobre el nivel del mar. El clima de la región es c (w) b (ij) que corresponde a semifrío semihúmedo con lluvias en verano y con una precipitación pluvial de 800 a 1200 mm anuales y una temperatura promedio de 19°C.<sup>15</sup>

El objetivo del Centro es contribuir a la enseñanza de alumnos de licenciatura y postgrado en la producción y clínica de las diferentes especies de rumiantes domésticos, así como la generación de tecnología y la vinculación entre la Universidad y el sector pecuario orientado a la producción de estas especies animales.<sup>15</sup>

El Centro apoya a diversos Departamentos Académicos de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Autónoma de México con la realización de prácticas, para que el estudiante adquiera conocimientos y habilidades prácticas que le permitan prevenir y solucionar problemas en la producción de los rumiantes domésticos.<sup>15</sup>

En el Centro también se realizan proyectos de investigación, principalmente en las siguientes líneas de investigación: Reproducción y Genética, Nutrición, Parasitología, Microbiología y Calidad de la Carne, lo que permite obtener y desarrollar el conocimiento para la solución de problemas presentes en la

producción de rumiantes domésticos; Así mismo el Centro coadyuva en la difusión de conocimientos y tecnología validada para satisfacer necesidades específicas en la producción de rumiantes en el país, implementación de programas de apoyo y servicio a la comunidad como:

- Apoyo a la investigación
- Cursos de capacitación y actualización en diferentes aspectos de la producción de rumiantes, así como carne y embutidos.
- Venta de las diferentes especies de rumiantes.
- Venta de leche, quesos y dulces.
- Venta de carne y productos procesados de ésta.

El centro posee tres hatos:

- Ovino: El rebaño ovino esta conformado por 200 animales mantenidos en condiciones intensivas, de las razas Suffolk, Dorset, Pelibuey, Rambouillet y algunas cruza entre razas. Estos animales son utilizados principalmente para investigación y prácticas, <sup>15</sup> ilustración 2.
- Caprino: El rebaño caprino constituido por 200 animales de las razas Alpino Francés, Saanen, Toggenburg, Anglo Nubia, Murciano Granadina y Angora. La mayor parte del rebaño se destina a la producción de leche en forma colateral a la investigación y prácticas, <sup>15</sup> ilustración 3.
- Bovino: El hato bovino está formado por 67 animales del las razas Holstein y está destinado a prácticas e investigación, <sup>15</sup> ilustración 4.

En la sala de procesamiento de lácteos del centro, la leche es transformada en algunos de sus derivados más importantes como queso en diferentes modalidades, cajeta y otro tipo de dulces.<sup>15</sup> ilustración 5

En el Centro la disposición de las excretas se realiza diariamente sin utilizar agua, en el caso de los corrales de los bovinos, ver ilustraciones 6 y 7, por medio de tractor, es trasladado el estiércol generado por los animales y es depositado en el estercolero; en el caso del área de ovinos y caprinos la recolección es manual con palas y carretillas, el estiércol es depositado en unas carretas donde se acumula hasta llenarlas, ilustración 8, lo cual sucede aproximadamente cada 3 o 4 días, y posteriormente es trasladado al estercolero a cielo abierto ubicado en la parte posterior del centro, alejada de los corrales, ilustración 9.

Se realizaron pesajes del tractor y las carretas para obtener el peso neto de estiércol que se produce; dichos pesajes se realizaron en días aleatorios y se utilizó la báscula para camiones del mismo Centro, los resultados obtenidos fueron los que se muestran en el cuadro 3.

El estiércol no recibe tratamiento alguno, en épocas de siembra se regala o vende a los agricultores locales.

Como se observa en el cuadro 4 el consumo mensual de gas del Centro en promedio es de 602 litros.

Según los registros de la compra de gas que se obtuvieron, y después de conversar con el administrador, se concluye que cerca del 80% de la capacidad

del tanque, el cual es de 300 litros es para consumo de las actividades de la quesería, es decir, aproximadamente 240 litros al mes,

La problemática del Centro radica en que se encuentra inmerso en una zona que se esta urbanizando con rapidez por lo que es probable que en poco tiempo el estercolero se convierta en un problema de contaminación para los vecinos, cabe señalar que actualmente el estercolero colinda directamente con 2 casas, imágenes 10 y 11, por lo que tomar medidas para el tratamiento de los desechos que produce el Centro se convertirá en una necesidad en el futuro cercano. Por lo anteriormente señalado el tratamiento de dichos desechos se ha convertido en una problemática a resolver urgentemente.

Para el tratamiento de estos desechos se propone implementar y aplicar la tecnología de la digestión anaerobia como una alternativa para realizar el tratamiento. Esta propuesta se fundamenta en las experiencias positivas que se han obtenido en diferentes países. cuadro 2.

## **11 RESULTADOS**

### **11.1 Comparativa de sistemas anaerobios**

Como se ve en el cuadro 5 el volumen del digestor completamente mezclado es el menor de todos y proporciona una ventaja en cuanto a la necesidad de espacio también se puede ver que dicho sistema el que mayor cantidad de gas produce, así como lodos de desecho.

### **11.2 Ponderación de los factores a evaluar**

En el cuadro 6 podemos observar la evaluación que se realizó con los comentarios pertinentes a los factores evaluados, y la ponderación que se le otorga a cada uno, esta ponderación esta basada en la importancia que tiene cada rubro en el proyecto.

### **11.3 Evaluación de factores**

En el cuadro 7 se presenta la evaluación de los diversos factores que conforman la matriz de decisión y los comentarios pertinentes, así como la calificación que se le otorga a cada sistema dependiendo del grado de cumplimiento del factor que se esta evaluando y del criterio del evaluador el cual debe tener los conocimientos necesarios para hacer una evaluación objetiva.<sup>16</sup>

#### 11.4 Matriz de decisión del sistema digestor completamente mezclado

	A	B	C	D	E
#	%	ASPECTO EVALUADO	CALIFICACIÓN*	C/5	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	10	Generación de residuos	3	0.6	6
3	0	Aceptación de la comunidad	5	1	0
4	15	Subproductos útiles	5	1	15
5	5	Vida útil	5	1	5
6	10	Área requerida	5	1	10
7	15	Costo			
7.1		Inversión	1		
7.2		Operación y mantenimiento	1		
7.3		sumar 7.1 y 7.2, dividir el total entre 10 anotar en casilla 7.3D		0.2	3
8	10	Insumos			
8.1		reactivos	5		
8.2		energía requerida	1		
8.3		sumar 8.1 y 8.2, dividir el total entre 10 anotar en casilla 8.3D		0.6	6
9	10	Diseño y construcción			
9.1		criterios de diseño	5		
9.2		tecnología probada	5		
9.3		complejidad en la construcción y equipamiento	3		
9.4		sumar todo 9 dividir entre 20 anotar en casilla 9.5D		0.87	8.67
10	10	Operación			
10.1		flexibilidad de operación	2		
10.2		confiabilidad del proceso	5		
10.3		complejidad de operación del proceso	3		
10.4		requerimiento de personal	3		
10.5		mantenimiento	3		
10.6		sumar todo 10, dividir entre 25, anotar en casilla 10.6D		0.64	6.4
11	5	Entorno			
11.1		sensibilidad a la temperatura	5		
11.2		producción de ruido	5		
11.3		malos olores	5		
11.4		atracción de fauna nociva	5		
11.6		sumar 11, dividir entre 25, anotar en casilla 11.6D		1	5
12	100		CALIFICACION		75.07

\*0= no aplica 1= suficiente 3= adecuado 5= muy bueno

### 11.5 Matriz de decisión del sistema de digester convencional

	A	B	C	D	E
#	%	ASPECTO EVALUADO	CALIFICACIÓN*	C/5	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	10	Generación de residuos	3	0.6	6
3	0	Aceptación de la comunidad	5	1	0
4	15	Subproductos útiles	3	0.6	9
5	5	Vida útil	5	1	5
6	10	Área requerida	3	0.6	6
7	15	Costo			
7.1		Inversión	3		
7.2		Operación y mantenimiento	5		
7.3		sumar 7.1 y 7.2, dividir el total entre 10 anotar en casilla 7.3D		0.8	12
8	10	Insumos			
8.1		reactivos	5		
8.2		energía requerida	5		
8.3		sumar 8.1 y 8.2, dividir el total entre 10 anotar en casilla 8.3D		1	10
9	10	Diseño y construcción			
9.1		criterios de diseño	5		
9.2		tecnología probada	5		
9.3		complejidad en la construcción y equipamiento	5		
9.4		sumar todo 9 dividir entre 20 anotar en casilla 9.5D		1.00	10.00
10	10	Operación			
10.1		flexibilidad de operación	1		
10.2		confiabilidad del proceso	3		
10.3		complejidad de operación del proceso	5		
10.4		requerimiento de personal	3		
10.5		mantenimiento	3		
10.6		sumar todo 10, dividir entre 25, anotar en casilla 10.6D		0.6	6
11	5	Entorno			
11.1		sensibilidad a la temperatura	1		
11.2		producción de ruido	5		
11.3		malos olores	5		
11.4		atracción de fauna nociva	5		
11.6		sumar 11, dividir entre 20, anotar en casilla 11.6D		0.8	4
12	100		CALIFICACION		78.00

\*0= no aplica 1= suficiente 3= adecuado 5= muy bueno

## 11.6 Matriz de decisión del sistema de laguna anaerobia cubierta

#	A	B	C	D	E
	%	ASPECTO EVALUADO	CALIFICACIÓN *	C/5	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	10	Generación de residuos	5	1	10
3	0	Aceptación de la comunidad	5	1	0
4	15	Subproductos útiles	1	0.2	3
5	5	Vida útil	5	1	5
6	10	Área requerida	1	0.2	2
7	15	Costo			0
7.1		Inversión	5		
7.2		Operación y mantenimiento	5		
7.3		sumar 7.1 y 7.2, dividir el total entre 10 anotar en casilla 7.3D		1	15
8	10	Insumos			
8.1		reactivos	5		
8.2		energía requerida	5		
8.3		sumar 8.1 y 8.2, dividir el total entre 10 anotar en casilla 8.3D		1	10
9	10	Diseño y construcción			
9.1		criterios de diseño	5		
9.2		tecnología probada	5		
9.3		complejidad en la construcción y equipamiento	5		
9.4		sumar todo 9 dividir entre 15 anotar en casilla 9.5D		1	10
10	10	Operación			
10.1		flexibilidad de operación	5		
10.2		confiabilidad del proceso	3		
10.3		complejidad de operación del proceso	5		
10.4		requerimiento de personal	5		
10.5		mantenimiento	1		
10.6		sumar todo 10, dividir entre 25, anotar en casilla 10.6D		0.76	7.6
11	5	Entorno			
11.1		sensibilidad a la temperatura	1		
11.2		producción de ruido	5		
11.3		malos olores	1		
11.4		atracción de fauna nociva	1		
11.6		sumar 11, dividir entre 20, anotar en casilla 11.6D		0.4	2
12	100		CALIFICACION		74.6

\*0= no aplica 1= suficiente 3= adecuado 5= muy bueno



## 12 DISCUSION

La digestión anaerobia constituye una opción viable para el tratamiento de los desechos agropecuarios, como lo mencionan: Cheremisinoff y Morresi <sup>2</sup>, así como Torres Fernández<sup>17</sup>.

Además dicho sistema tiene ventajas importantes como:

- Menor requerimiento de energía
- Menor producción de lodos (efluentes)
- Poca o nula adición de nutrientes
- Producción de metano el cual se puede utilizar como fuente de energía
- Menor volumen requerido por el digestor
- Respuesta rápida a la adición de sustrato después de periodos largos de no alimentación

Lo que lo hacen viable y adecuado para las condiciones en las que operaría en el Centro, sobre todo al compararlo con los sistemas aerobios que representan la otra opción de tratamiento biológico estas ventajas son mencionadas por Vochten et al<sup>18</sup>, Eckenfelder et al<sup>19</sup> y Noyola.<sup>20</sup> (anexo 1) demuestran que la digestión anaerobia es una mejor opción para el tratamiento de los desechos producidos por el Centro.

Dentro de los sistemas analizados en el presente trabajo el digestor completamente mezclado es una opción técnicamente más viable debido a que este tipo de digestor favorece la interacción sustrato-microorganismo por efecto de la mezcla, (Metcalf and Eddy<sup>21</sup>, Werner U. Et al<sup>6</sup>)

Es necesario tomar en cuenta que este sistema es más sensible a los cambios de pH, flujo y temperatura, por lo tanto es necesario considerar que el digestor convencional representa una opción mas adecuada desde el punto de vista económico, en cuanto a gastos de mantenimiento y operación debido a que el digestor completamente mezclado requiere mayor equipamiento, como bombas o agitadores para lograr la mezcla y un sistema que mantenga la temperatura dentro de un mínimo rango, lo cual implica, en ambos casos un gasto energético.

El digestor convencional ha sido probado ampliamente en países en vías de desarrollo con éxito, se ha evaluado y es un sistema resistente y eficaz, además de que su operación es sencilla, y su construcción puede hacerse con materiales económicos (Werner U. et al <sup>6</sup>) es necesario mencionar que el digestor convencional genera subproductos útiles como el biogás, que puede ser utilizado como combustible en lugar del gas LP (licuado de petróleo) o en un motor para la generación de energía eléctrica. Además del gas, los lodos secados al sol servirían para la vermicultura, esta transforma los lodos por la acción de las lombrices, las cuales degradan la materia orgánica hasta humus que se puede utilizar como mejorador de suelos, además las lombrices se pueden utilizar para producir harinas con valor proteico que pueden ser utilizados como alimento para los animales.

Además el agua tratada en el digestor convencional, pueden ser utilizada para producir lemna, también conocida como lenteja de agua, la cual es una hierba acuática con propiedades alimenticias con valores proteicos interesantes. El

agua que ha sido tratada aún más en la producción de lemna, también se puede utilizar para alimentar algunas especies acuáticas, a los cuales se puede alimentar con la misma lemna. (ver ilustración 12)

## 13 CONCLUSIONES

La ubicación del Centro dentro de un área urbana, hace imprescindible que se tomen acciones para el tratamiento de las excretas producidas en este lugar, debido principalmente a la generación de olores desagradables y la presencia de fauna nociva en el estercolero.

La digestión anaerobia es un sistema de tratamiento eficaz que le permitirá al Centro un adecuado manejo de los desechos que se generan, además hay que considerar los subproductos, como el biogás, que genera este sistema, los cuales son un valor agregado que pueden ser considerados por su valor económico.

El Centro por sus características serviría de ejemplo para la adopción de este tipo de tecnologías por los productores de la zona demostrando las ventajas que tiene la digestión anaerobia para el tratamiento de los desechos generados por la actividad agropecuaria.

Después de evaluar los diferentes digestores con la matriz de decisión se llegó a la conclusión de que el mejor método para el tratamiento del estiércol que genera el Centro, es el digestor convencional, por sus características de operación y de mantenimiento.

El biogás generado, después de ser limpiado por un filtro de limadura de hierro, podría ser usado en la fabricación de quesos en la quesería del Centro donde el valor económico de este subproducto sería apreciado de manera directa.

Los lodos pueden ser utilizados para la vermicultura y así obtener abono el cual puede ser utilizado en la producción de forraje para los mismos animales del centro.

El sistema de una granja sostenible, mencionado en la discusión, es posible y conveniente, la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia podría implementar este sistema en sus Centros y así aplicar los resultados de la investigación en el área del tratamiento de desechos agropecuarios y su utilización para la producción ecológica de alimentos.

## 14 CUADROS Y FIGURAS

**Cuadro 1 NUMERO DE PLANTAS DE BIOGAS EN DIFERENTES PAÍSES DE EUROPA**

País	Numero de plantas
Bélgica y Luxemburgo	47
Dinamarca	37
Irlanda	8
Francia	131
Grecia	9
Italia	140
Holanda	65
Portugal	33
España	63
Gran Bretaña	73
Alemania	140 (estimación)

Del material tecnológico "tratamiento anaerobio de aguas residuales" segunda edición SEMARNAT MÉXICO 2002

**Cuadro 2 INVESTIGACIONES SOBRE DIGESTIÓN ANAEROBIA APLICADA A LA PRODUCCIÓN ANIMAL**

Referencia	Tipo de digestor	Tipo de afluente	Flujo	País
Z. Mladenovska et al.	2 digestores a escala de laboratorio con un volumen de 3 litros y con una temperatura de 37° y un TRH de 15 días	Estiércol de bovino y una mezcla de estiércol de bovino y tirolato de glicerol.	-	Dinamarca
Grant S. et al.	tipo comercial, reactores ADI- BVF	Aguas de desperdicio de establos lecheros y queserías	580-730 m <sup>3</sup> /d	Etados Unidos de Norteamérica, Canadá y Australia.
Chao K. et al.	Completamente mezclado, con un volumen de 200 m <sup>3</sup> y una temperatura de 35 ° con un TRS de 20 días	Estiércol de cerdo	10m <sup>3</sup> /d	Korea
Nyns J. and Ferrero L.	Completamente mezclado sin recirculación, alimentación continua con TRS de 24 a 38 días con una temperatura de 35 °	Estiércol de cerdo	4- 3 m <sup>3</sup> /d	Bélgica
www.eutec-ingenieure.de	Digestor convencional con domo fijo	Estiércol porcino	-	México

**Cuadro 3 PESAJE DE ESTIERCOL PRODUCIDIO EN EL CENTRO**

<b>FECHA</b>	<b>PESO NETO TOTAL EN Kg</b>
13/02/04	1000
16/02/04	1725
17/02/04	1855
20/02/04	725
23/02/04	1275
26/02/04	1654
28/02/04	505
02/03/2004*	1670
08/03/04	1005
11/03/04	1725
15/03/04	1165
24/03/04	1105
29/03/04	1805
02/04/2004*	1815
07/04/04	1745
19/04/04	893
22/04/04	1683
28/04/04	1015
13/05/04	998
18/05/04	1070

\* carreta ovinos y caprinos

**Cuadro 4 CONSUMO DE GAS SEGÚN LAS NOTAS PROPORCIONADAS POR EL ADMINISTRADOR DEL CENTRO**

CONSUMO DE GAS			TOTALES MES	
FECHA	LITROS	PESOS	MES/ Año	LITROS
18/10/02	223	700.22	Oct-02	223
01/11/02	248	688.44	Nov-02	449
16/11/02	201	629.18	Dic-02	Sin datos
27/01/03	951	3318.99	Ene-03	951
05/02/03	213	730.59	Feb-03	272
19/02/03	59	202.37	Mar-03	2217
11/03/03	951	3318	Abr-03	216
20/03/03	213	730	May-03	1010
24/03/03	1053	3611.79	Jun-03	766
01/04/03	216	740.88	Jul-03	936
20/05/03	862	2956.66	Ago-03	209
31/05/03	148	507.64	Sep-03	Sin datos
11/06/03	766	2659.98	Oct-03	214
01/07/03	150	514.5	Nov-03	1048
11/07/03	786	2695.98	Dic-03	151
20/08/03	209	718.96	Ene-04	165
07/10/03	214	744.72	Feb-04	Sin datos
14/11/03	1048	3657.52	Mar-04	205
11/12/03	151	531.52		
21/01/04	165	584.1		
02/03/04	205	744.15		

**Cuadro 5 CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS EVALUADOS.**

<b>Datos</b>	<b>digestor completamente mezclado</b>	<b>digestor convencional</b>	<b>laguna anaerobia</b>
Flujo de lodo	15 m <sup>3</sup> /d	15 m <sup>3</sup> /d	15 m <sup>3</sup> /d
Flujo másico de lodo	1227 kgSST/d	1227 kgSST/d	1227 kgSST/d
Tiempo de retención celular, TRC	28 d	60 d	90 d
Humedad de sólidos	91 %	91 %	91 %
Eficiencia	75 %	60 %	40 %
Coefficiente de prod. de biomasa, Y	1 lb SSV/lb DBO	1 lb SSV/lb DBO	1 lb SSV/lb DBO
Kd	0.32 1/d	0.32 1/d	0.32 1/d
Gravedad específica del lodo	1.02	1.02	1.02
<b>Cálculos</b>			
Volumen del digestor	420.00 m <sup>3</sup>	900.00 m <sup>3</sup>	1350.00 m <sup>3</sup>
Altura	4.00 m	4.00 M	4.00 m
Area	105.00 m <sup>2</sup>	225.00 m <sup>2</sup>	337.50 m <sup>2</sup>
Diámetro	11.56 m	16.93 M	20.73 m
Carga de lodo al digestor	2.92 kg/m <sup>3</sup> /d	1.36 kg/m <sup>3</sup> /d	0.91 kg/m <sup>3</sup> /d
Cantidad de SSV producidos al día, Px	503.0960 kg/d	402.4768 kg/d	268.31790 kg/d
% de estabilización de lodo	95.96 %	97.53 %	98.13 %
Producción de biogás	35.76011 m <sup>3</sup> /d	28.60809 m <sup>3</sup> /d	19.07206 m <sup>3</sup> /d

**Cuadro 6 PONDERACION DE LOS FACTORES EVALUADOS EN LA MATRIZ DE DECISION.**

FACTOR EVALUADO	COMENTARIOS	PONDERACION
Aplicabilidad del proceso	Se requiere que el proceso tolere cambios en el flujo, que la alimentación sea semicontinua, que pueda tratar de manera eficiente el afluente. A pesar de que los sistemas contemplados utilizan el mismo principio (anaerobiosis) para tratar los desechos hay diferencias en cuanto a la susceptibilidad a variaciones en la temperatura y el flujo que pueden ser significativas al momento de elegir uno de los sistemas	10
Generación de residuos	Este es uno de los rubros mas importantes que hay que tener en cuenta en la selección del sistema, el Centro cuenta con una cantidad de terreno limitada por lo que se requiere de la menor producción de residuos posible para su posterior disposición dentro del mismo Centro; es por eso que este rubro se considera uno de los mas importantes y se le asigna un valor de ponderación alto.	10
Aceptación por parte de la comunidad	Al ser un Centro de enseñanza cerrado este parámetro no se considera como un obstáculo; es por eso que este rubro no posee importancia para este análisis y se le da el valor de 0	0
Generación de subproductos con valor económico	Este es uno de los aspectos mas importantes en le desarrollo de este análisis ya que estos productos representan el valor agregado que tiene el proceso y por lo tanto impacta de manera importante el balance de costo-beneficio; es por este motivo que se le asigna un valor de ponderación alto.	15
Vida útil	Al ser una institución paraestatal se requiere que la vida útil de la planta sea lo mas larga posible ya que los recursos para su renovación puede ser limitados en el futuro	5
Área requerida	Aunque el Centro cuenta con una extensión de terreno la cual podría	10

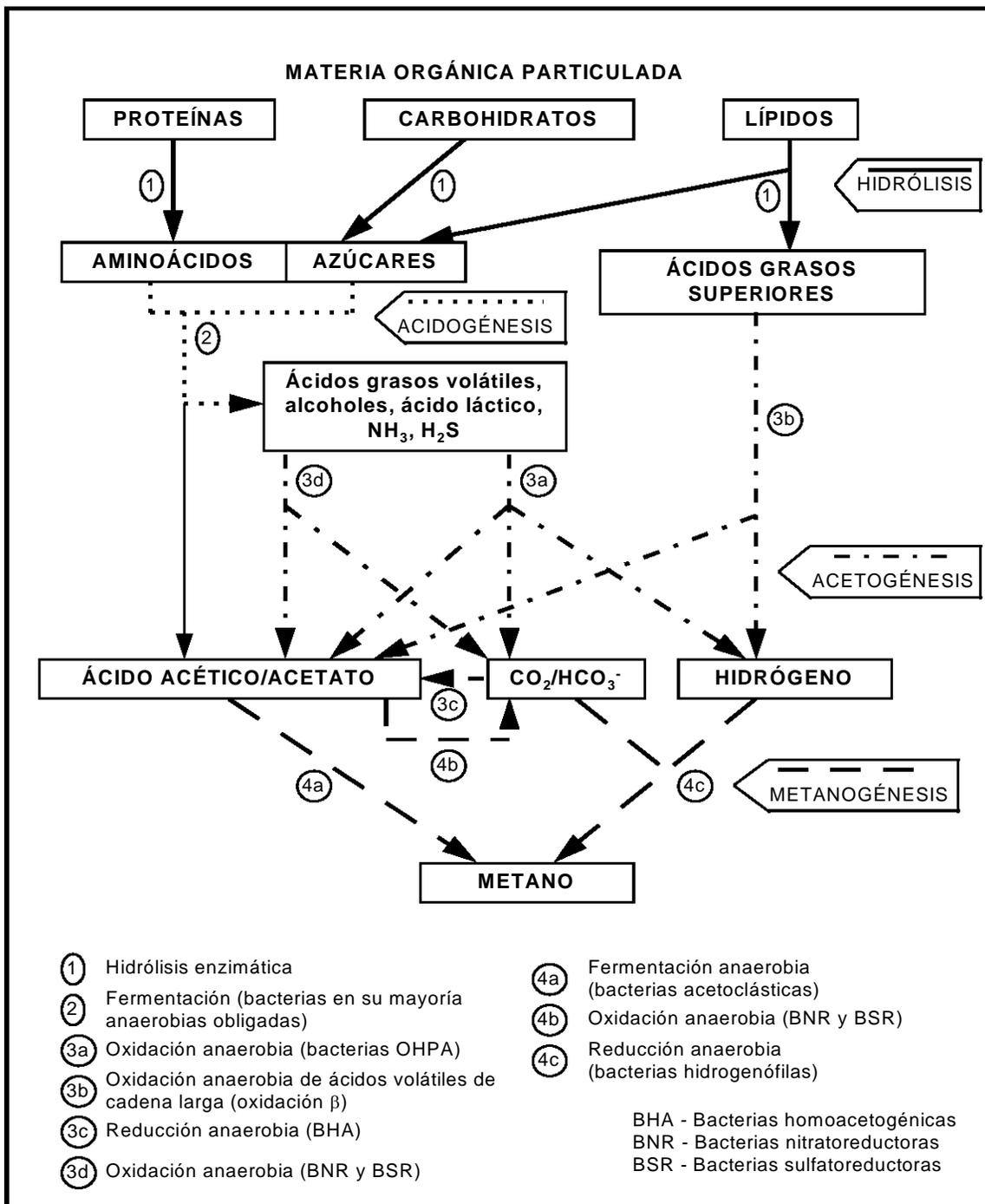
	utilizarse, se requiere que la planta utilice la menor cantidad de área posible	
Costo inicial y de mantenimiento	Se requiere que los costos iniciales sean los mas bajos posibles ya que los recursos son limitados, así mismo los costos de operación y mantenimiento deberán ser lo mas bajos posibles para que la relación costo-beneficio sea favorable al Centro	15
Insumos	No se pretenden utilizar reactivos puesto que la materia a tratar tiene las bacterias necesarias para el arranque del sistema En cuanto al requerimiento energético se requiere que sea el menor posible y que no rebase en ningún momento el valor de los subproductos producidos	10
Diseño y construcción	Se requiere que el diseño se adapte a las características del Centro y que la construcción sea lo mas sencilla posible que se puedan utilizar materiales baratos y fáciles de conseguir y que no se requiera de trabajos complejos	10
Operación	Se requiere que la operación sea simple y segura para que sirva de demostración a personas interesadas en aplicar esta tecnología , que los trabajadores, con un mínimo de preparación, puedan operar de manera adecuada la planta y que su operación pueda ser llevada a cabo por cualquier persona	10
Entorno	Como el Centro esta ubicado en una zona urbana es necesario observar aspectos como la generación de ruidos, malos olores, y atracción de animales dañinos	5
TOTAL		100

**Cuadro 7 CALIFICACION DE LOS FACTORES EVALUADOS EN LA MATRIZ DE DECISION.**

<b>FACTOR EVALUADO</b>	<b>COMENTARIOS</b>	<b>LAGUNA</b>	<b>DIGESTOR CONVENCIONAL</b>	<b>DIGESTOR C M</b>
<b>Aplicabilidad del proceso</b>	Todos los procesos han sido probados ampliamente en el tratamiento de excretas animales y ya que todos los procesos son anaerobios la aplicabilidad del sistema es prácticamente igual, sin embargo el digestor completamente mezclado tiene la ventaja de estar mas controlado y tener mas homeostasis sobre todo en el caso de la temperatura, sin embargo es un poco mas sensible a los cambios de caudal, rubro en el cual la launa tiene mejor comportamiento.	5	5	5
<b>Generación de residuos</b>	En el caso de la digestor completamente mezclado se generan mas residuos, sin embargo esos residuos tienen un valor como enriquecedores de suelo, sin embargo dichos residuos requieren de un procesamiento posterior.	5	4	3
<b>Aceptación de la comunidad</b>	Ningún sistema supone ningún problema para la comunidad	5	5	5
<b>Generación de subproductos de valor económico</b>	Todos los sistemas generan biogás y el efluente puede ser utilizado como enriquecedor de suelos, sin embargo el que mayor biogás produce, que es el subproducto con mas	2	3	5

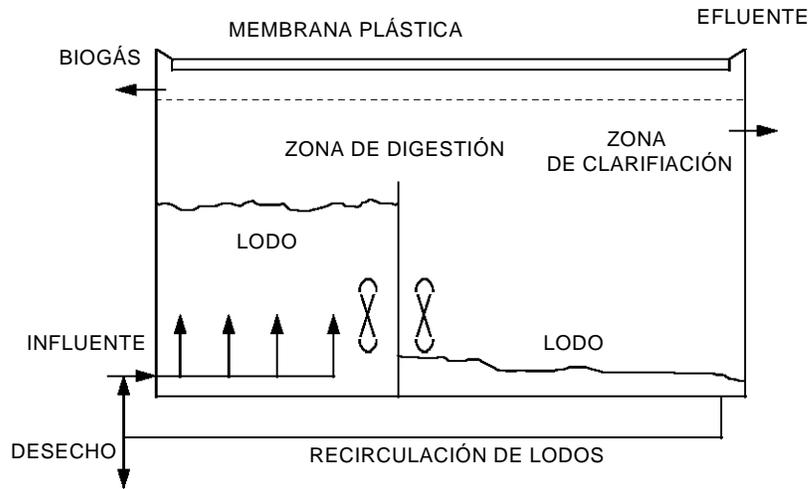
	valor, es el digestor completamente mezclado			
<b>Vida útil</b>	Por lo general la vida útil es de al menos 20 años en este tipo de sistemas siendo la misma para todos	5	5	5
<b>Área requerida</b>	El terreno con que se cuenta es limitado así que es importante ahorrar la mayor cantidad de terreno posible, en este rubro la mejor opción es el digestor completamente mezclado	1	3	5
<b>Costo inicial y de mantenimiento</b>	En este rubro el digestor convencional es la mejor opción ya que no requiere tanto terreno como la laguna y el costo de mantenimiento es menor que el del digestor completamente mezclado	3	4	2
<b>Insumos</b>	En este rubro se consideran los reactivos, que ninguno de los procesos requiere ya que el agua a tratar cuenta con las bacterias necesarias para la metanogénesis	5	5	5
<b>Diseño y construcción</b>	Se tiene referencia de que los diversos sistemas han sido probados para el tratamiento de aguas similares a la que se pretende tratar con resultados óptimos para cada sistema.	5	5	5
<b>Operación</b>	La laguna anaerobia es la que menores costos	1	5	5

	<p>genera, seguida por el digester convencional, siendo el digester completamente mezclado el mas costoso debido principalmente a la necesidad de energía y a los instrumentos de medición y control</p>			
<b>Entorno</b>	<p>La laguna por un lado presenta mayor tolerancia a los cambios de flujo, ya que su tamaño le permite amortiguar estos cambios, sin embargo al ser un sistema sin calefacción, al igual que el digester convencional es mas sensible a los cambio (principalmente la disminución) de temperatura por otra parte el digester completamente mezclado es un sistema mucho mas controlado y homeostático así que es el que mejor califica en este rubro</p>	2.25	4	5

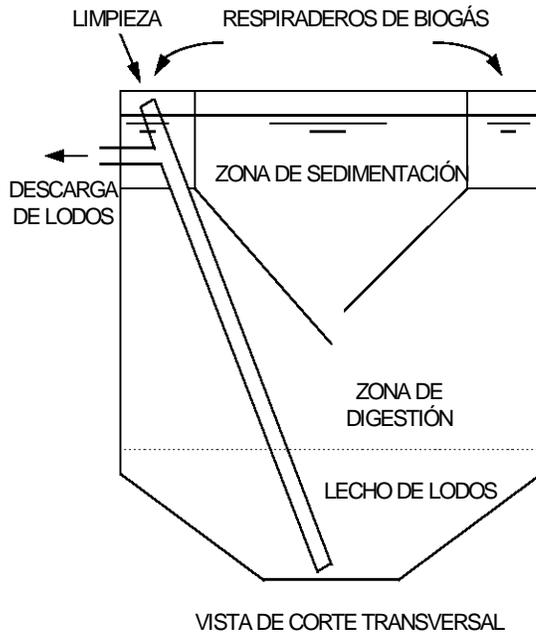


**Figura 1 Transformación de la Materia Orgánica en Metano por vía Anaerobia**

Fuente: TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES, Adalberto Noyola y Fernando Morgan Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

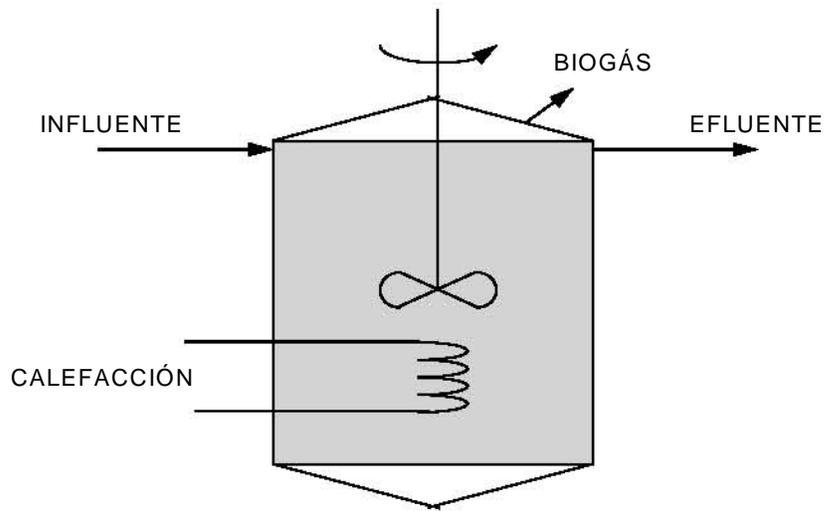


**Figura 2 Laguna Anaerobia Cubierta**



**Figura 3 Digestor Convencional**





**Figura 4 Digestor Completamente Mezclado**



**Figura 5 Panorámica del Centro**



**Figura 6 Ejemplar del Hato Ovino**



**Figura 7 Ejemplar del Hato Caprino**



**Figura 8 Ejemplar del Hato Bovino**



**Figura 9 Centro de Procesamiento de Lácteos**



**Figura 10 Corrales Bovinos**



**Figura 11 Estiércol Recolectado**



**Figura 12 Estiércol Ovino**



**Figura 13 Estercolero**



**Figura 14 Casas Colindantes al Estercolero**



**Figura 15 Casas Colindantes**

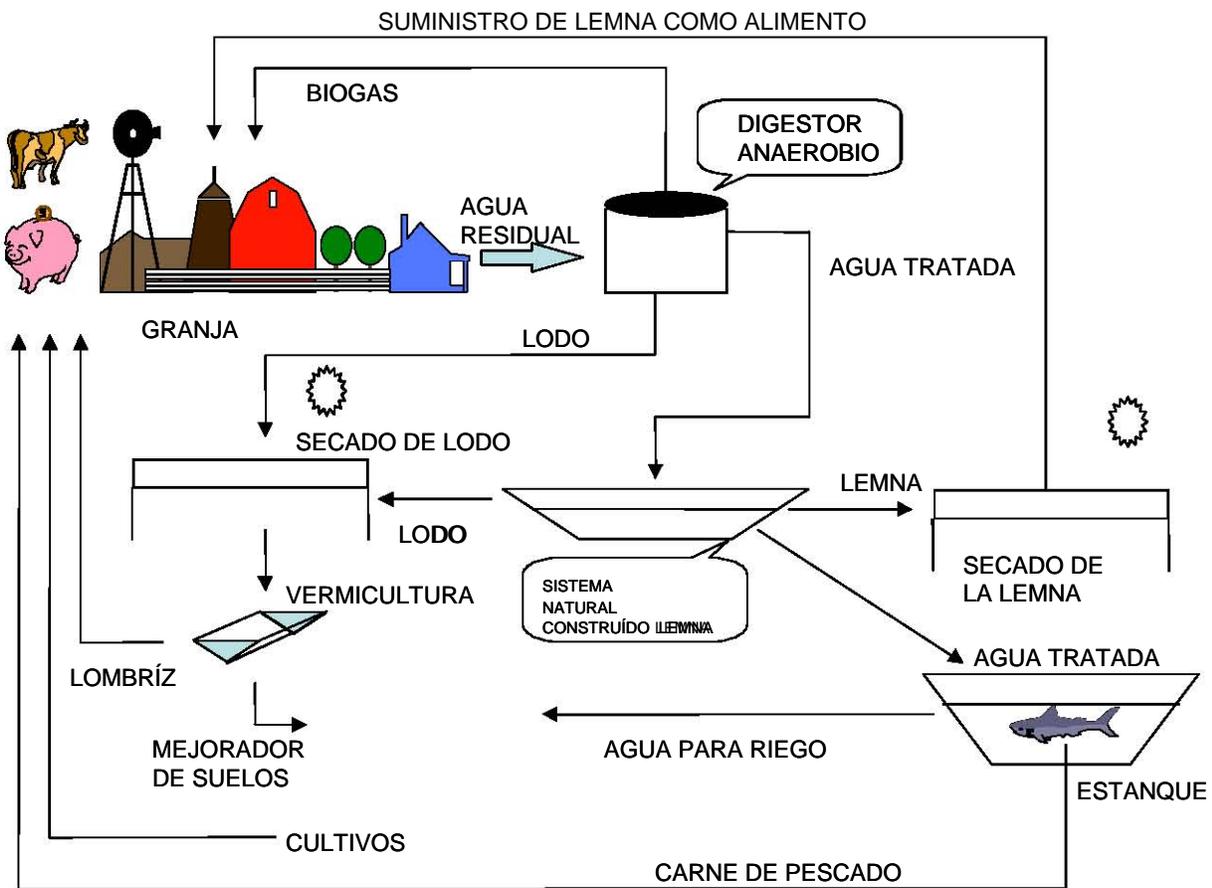


Figura 16 Esquema de una granja autosustentable.

## 15 LITERATURA CITADA.

1. Coll D. La intensificación ganadera como proceso de reducción de residuos. En: Residuos Ganaderos, Jornadas Técnicas, Fundación La Caixa. Barcelona España: Aedos S.A.,1993: 5-15.
2. Cheremisinoff P., Morresi A. Energy form solid wastes. Nueva York, USA: Marcel Dekker Inc., 1976.
3. Cann C. La polución producida por los compuestos azoados. Alteraciones al medio ambiente por los desechos zootécnicos. En: Residuos Ganaderos, Jornadas Técnicas, Fundación La Caixa. Barcelona España: Aedos S.A.,1993: 40-45.
4. Meeus-Verdinne K y Destain J.P. Contaminación de los suelos por los desechos de la cría de ganado. En: Residuos Ganaderos, Jornadas Técnicas, Fundación La Caixa. Barcelona España: Aedos S.A.,1993: 26-38.
5. Batallo M. La problemática atmosférica de los residuos ganaderos. En: Residuos Ganaderos, Jornadas Técnicas, Fundación La Caixa. Barcelona España: Aedos S.A.,1993: 59-73.
6. Biogas plants in animal husbandry Werner U. Stöhr U. Hees N. Bertelsmann Publishing Group. República Federal de Alemania 1989.
7. Manilla E. Diseño de un Biorreactor para la producción de biogás a partir de desechos agrícolas. (tesis de licenciatura) DF México: UNAM, 2000.

8. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Tratamiento anaerobio de aguas residuales, material tecnológico. 2ª edición. México: 2002.
9. Monroy O., Famá G., Meraz M., Montoya L., Macarie H. Digestión anaerobia en México. Estado de la tecnología. Ingeniería y Ciencias Ambientales 1998; 39: 12-23.
10. Mladenovska, Z., Dabrowski, S., Ahring, B. in journal: Water Science and Technology (ISSN: 0273-1223) vol: 48, issue: 6, pages: 271-278, 2003, i w a publishing
11. Grant S, Landine R, Wilson D, Molina J, Norton S, Qiu Z, Cocci A. Low rate anaerobic treatment of dairy processing wastewaters. ADI Systems Inc., USA, 2000.
12. Jaicaf.org (home page on the internet) Japan association for international collaboration of agriculture and forestry. (updated 2005 January 20; cited 2005 may 24). Available form: <http://www.jaicaf.or.jp>.
13. Nyns E., Ferrero G. A case estudio : the demonstration project caranted by DG XVII of the CEC to the international association for rural development within its subprogram biomass and energetic valorization of wastes. In: Biogas Plants in Europe: A practical hand book Belgium : 1989.
14. Morgan J. Tratamiento de aguas residuales: Matriz de escisión para la selección de tecnología. Vector de la ingeniería civil noviembre 1999; 31: 7-20.

15. [fmvz.unam.mx](http://www.fmvz.unam.mx) (home page on the internet) Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia UNAM.(updated 2005 march, cited 2005 June 18). Available from: <http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/centros/cepipsa/cepipsa>.
16. Morgan Sagastume J., López Hernández J., Noyola Robles A. Tratamiento de aguas residuales: matriz de decisión para la selección de tecnología. Vector de la ingeniería civil. 31, 7-20. 1999.
17. Torres E. Plan de tratamiento de residuos ganaderos. Experiencia en Cataluña. En: Residuos Ganaderos, Jornadas Técnicas, Fundación La Caixa. Barcelona España: Aedos S.A.,1993: 75-97
18. Vochten, P.; Schowanek, D.; Verstraete, W. Aerobic versus anaerobic wastewater treatment. Proceedings of the 5th International Symposium on Anaerobic Digestion. London, Pergamon Press, 1988. p.91-103. Presentado en: International Symposium on Anaerobic Digestion, 5. Bologna, 22-26 May 1988.
19. Eckenfelder W., Patoczka J., Pulliam G., Anaerobic versus aerobic treatment in the U.S.A. Proceedings of the 5th International Symposium on Anaerobic Digestion. London, Pergamon Press, 1988. p.91-103. Presentado en: International Symposium on Anaerobic Digestion, 5. Bologna, 22-26 May 1988.
20. Noyola A. Anaerobio vs. Aerobio un debate casi superado Biológico vs. Primario avanzad, ¿el nuevo debate? Ingenieria y ciencias ambientales 1998; 34: 10-14.

21. Metclaf and Eddy Inc. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th edition. Mc Graw Hill. NY U.S.A. 2003.

## ANEXO 1

### 1 Tratamiento de aguas residuales

El agua que se colecta requiere ser tratada para su posterior incorporación a los cuerpos de agua, riego o reutilización.

Los diferentes tipos de tratamiento los podemos dividir en tres: los físicos, los químicos y los biológicos.<sup>1</sup>

#### 1.1 Métodos físicos

En los métodos físicos de tratamiento se involucra la interacción de fuerzas físicas como la gravedad, el tamaño de las partículas, la concentración etc. Algunos ejemplos de estos métodos son: cribado, floculación, sedimentación flotación, filtración, mezclado etc.<sup>1</sup>

#### 1.2 Métodos químicos

En los métodos químicos se efectúan reacciones químicas, donde no intervienen microorganismos, con estas reacciones se lleva a cabo la remoción o transformación de los contaminantes, algunos ejemplos de estos métodos son: coagulación-floculación-precipitación, adsorción química así como la desinfección.

1

#### 1.3 Métodos biológicos

En este método se hace uso de la actividad de microorganismos para la transformación y remoción de los contaminantes que necesariamente tienen que

ser materia biodegradable. En estos métodos los contaminantes son transformados en materia celular nueva, energía necesaria para los procesos metabólicos propios de los microorganismos y en otros compuestos orgánicos e inorgánicos que son liberados al medio ambiente.<sup>1</sup>

Dentro de las unidades de procesos biológicos los dos sistemas más importantes son el aerobio y el anaerobio. La diferencia entre estos es el aceptor final de electrones, lo que influye significativamente en el costo y consideraciones técnicas para el diseño y selección de la tecnología mas apropiada.<sup>1,2</sup>

Estos tipos de tratamiento se conjuntan para dar lugar a varios niveles de tratamiento del agua, dependiendo de la calidad de agua que se requiera.

Los niveles de tratamiento son los siguientes:

#### **1.4 Preliminar**

En este nivel se elimina del agua materiales gruesos tales como telas, varas, arena flotante, y grasas, las cuales podrían ocasionar problemas de mantenimiento y operación en las subsecuentes unidades de tratamiento. Este tratamiento se efectúa con desarenadores, flotadores o desgrasadores y algunas veces se utilizan trituradores para las partículas de gran tamaño.<sup>1</sup>

#### **1.5 Primario**

En este nivel se remueven parte se los sólidos y materia orgánica suspendida con el uso de la fuerza de gravedad, generalmente por sedimentación.<sup>1</sup>

## **1.6 Secundario**

Se remueve la materia orgánica disuelta o coloidal, en solución, y los sólidos suspendidos; para ello se utilizan los métodos biológicos por su alta eficacia y bajo costo.<sup>1</sup>

## **1.7 Terciario o Avanzado**

Se refiere a todo tratamiento posterior al secundario con el fin de eliminar compuestos como nutrientes y materia orgánica no biodegradable y persistente, también remueve los sólidos suspendidos residuales del tratamiento secundario, usualmente por precipitación química y sedimentación, la desinfección también forma parte de este nivel de tratamiento.<sup>1</sup>

Los sistemas anaerobios han demostrado ser de gran utilidad en el tratamiento de aguas con altas concentraciones de materia orgánica, como sucede con las aguas o biosólidos residuales de las granjas, sin embargo los niveles de tratamiento alcanzados con estos sistemas son de menor calidad que los que se alcanzan con los sistemas aerobios, por otra parte los sistemas aerobios consumen energía para la aireación, cosa que no ocurre con los sistemas anaerobios que generan biogás el cual puede ser utilizado como fuente de energía.<sup>1,2</sup>

El sistema anaerobio estabiliza la materia orgánica conservando los nutrientes necesarios para que el efluente pueda ser considerado un fertilizante y mejorador de suelos, lo cual puede ser un valor agregado muy importante en el medio rural, por eso los sistemas de digestión anaerobia son ampliamente usados en el

tratamiento de los desechos producidos por granjas de cría y engorde de animales.<sup>1</sup>

Hoy en día es muy común utilizar los sistemas anaerobios como pretratamiento para disminuir la concentración de materia orgánica y hacer lo que se conoce como pulimento con los sistemas aerobios con lo cual se reducen los costos de tratamiento y se obtienen niveles óptimos de calidad en el tratamiento.<sup>2</sup>

Las ventajas de la digestión anaerobia frente a procesos aerobios convencionales se hacen más claras conforme la concentración de materia orgánica aumenta.<sup>2</sup>

Algunas de las ventajas de los sistemas anaerobios sobre los aerobios son:

- Menor requerimiento de energía
- Menor producción de lodos (efluentes)
- Poca o nula adición de nutrientes
- Producción de metano el cual se puede utilizar como fuente de energía
- Menor volumen requerido por el digestor
- Respuesta rápida a la adición de substrato después de periodos largos de no alimentación<sup>1</sup>

## 1.8 **Literatura citada**

1. Metclaf and Eddy Inc. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th edition. Mc Graw Hill. NY U.S.A. 2003.
2. Noyola A. Anaerobio vs. Aerobio un debate casi superado Biológico vs. Primario avanzad, ¿El nuevo debate? Ingenieria y ciencias ambientales 1998; 34: 10-14.

## ANEXO 2

### 2 DATOS HISTORICOS

Los datos históricos reportan el desarrollo del primer tanque para separar sólidos en el año de 1805, posteriormente en el año de 1881 Louis H. Mouras creó la primera instalación para el tratamiento de los sólidos sedimentados, llamado eliminador automático de Mouras, el cual consistía en mantener los sólidos en un depósito cerrado hasta que se convirtieran en líquido; W. D. Scott Moncrieff en 1891 construye un tanque parcialmente empacado el cual tenía un espacio vacío en la parte inferior y estaba empacado con piedras en la parte superior, este tanque trataba desechos líquidos de 10 personas, con flujo ascendente. Donald Cameron, quien construyó el primer tanque séptico en la ciudad de Exeter en 1895, donde el agua residual fluye por la parte superior de la fosa, mientras que los sólidos del agua se sedimentan hacia la parte baja y en el fondo son digeridos por el lodo anaerobio; fue el primero en observar que se desprendía un gas combustible al licuar los sólidos del agua residual, el cual recogió y usó para alumbrar los alrededores de la planta; Harry W. Clark en 1899 separa los lodos de la fosa séptica para su digestión en un tanque por separado, en 1904 en la ciudad de Hampton Inglaterra, W. O. Travis puso en operación por primera vez el tanque de doble acción basado en el diseño de Clark, el cual incorporaba la sedimentación y el tratamiento de lodos, dicho tanque funcionó hasta 1936.<sup>1</sup>

En Alemania el doctor Karl Himhoff, en el año de 1904, patentó un tanque de doble acción llamado tanque Himhoff, este tanque que cuenta con mamparas inclinadas y traslapadas, que permiten diferenciar una zona de digestión y otra de

sedimentación. Solamente los sólidos suspendidos removidos eran tratados anaerobiamente.<sup>1</sup>

En 1910 Winslow y Phelps crean un Tanque empacado con piedras que se operaba con un TRH de 8.5 h. y flujo ascendente llamado Tanque biológico; Schroepfer et al. En 1955 desarrollan el Proceso de contacto anaerobio, el cual se aplicó a aguas de desecho diluidas de empacadoras de carne. Esto marca el inicio de la aplicación de los procesos anaerobios al tratamiento de aguas residuales industriales.<sup>1</sup>

En 1957 Coulter, Soneda y Ettinger desarrollan el Reactor de contacto de lodos y filtro anaerobio empacado con piedras, El tanque de contacto tenía un volumen de 4.7 m<sup>3</sup> y el filtro de 2.6 m<sup>3</sup> de volumen total. Este tanque tiene una importante remoción de DBO (80%) y de SST (90%)y un tiempo de retención de 18 a 24 hrs. En 1957 Coulter, Soneda y Ettinger desarrollan el reactor de contacto de lodos y filtro anaerobio empacado con piedras, posteriormente en el año de 1971 Pretorius aplica un reactor de contacto de lodos y filtro anaerobio empacado con piedras conectados en serie. Ese mismo año Simpson utiliza un reactor de contacto de lodos y dos sedimentadores en serie.<sup>1</sup>

## **2.1 Literatura citada.**

1. Manilla E. Diseño de un Biorreactor para la producción de biogás a partir de desechos agrícolas. (tesis de licenciatura) DF México: UNAM, 2000.

## ANEXO 3

### 3 Criterios de diseño

El dimensionamiento del digestor anaerobio esta basado en proveer el suficiente tiempo de residencia para permitir una destrucción significativa de los sólidos suspendidos volátiles el criterio para el dimensionamiento es que el tiempo de retención celular o de sólidos es el tiempo promedio en el que los sólidos son retenidos en el proceso de digestión y el tiempo de retención hidráulico es el promedio de tiempo que el líquido es retenido en el proceso de digestión. Para el caso de los digestores sin recirculación el tiempo de retención celular o de sólidos y el tiempo de retención hidráulico son iguales.<sup>1</sup>

Hay que tomar en cuenta que existe un mínimo de tiempo de retención celular, si el tiempo de retención celular es menor que este parámetro el crecimiento de las bacterias no será lo suficientemente rápido y el proceso de digestión fallara.<sup>1</sup>

Generalmente se utilizan dos formas para el diseño de los digestores. Una esta basada en la experiencia adquirida en años de experiencia, en esta forma se proponen valores de carga y se predice el grado de eliminación de materia orgánica; en la segunda se hace uso de un método conceptual simulando matemáticamente los procesos que se llevan a cabo en el reactor y así predecir de manera más exacta la eficiencia de remoción.<sup>2</sup>

A continuación se describen brevemente los parámetros más importantes en el diseño de los reactores:

### 3.1 Flujo (Q)

Es la cantidad de desechos que se introducen al digestor se obtiene sumando la cantidad de excretas y la cantidad de agua que se agrega.<sup>1</sup>

### 3.2 Tiempo de retención (τ)

El tiempo de retención es el tiempo que tarda una partícula dentro del digestor se calcula utilizando la siguiente ecuación:<sup>1</sup>

$$\tau = V/Q$$

**Ecuación 1 tiempo de retención**

donde:

- $\tau$  es el tiempo de retención
- $V$  es el volumen del reactor
- $Q$  es el flujo

Generalmente el tiempo de retención se divide en dos, el tiempo de retención celular (TRC) y el tiempo de retención hidráulico (TRH).

El TRC es el tiempo, generalmente medido en días, que permanece la biomasa desde que entra al digestor hasta que sale del, y el TRH es el tiempo que tarda el agua residual desde que entra al digestor hasta que sale.<sup>3</sup>

En este trabajo se utilizaron tiempos de retención mencionados en la literatura. metcalf and Edy<sup>1</sup>

### **3.3 Volumen del digestor (V)**

Es el tamaño en m<sup>3</sup> que tiene el digestor este valor se obtiene tomando en cuenta el flujo y el tiempo de retención celular

Por lo tanto para obtener el volumen se despeja V de la ecuación 1 quedando la siguiente ecuación: <sup>1</sup>

$$V = Q \times TRS$$

**Ecuación 2 Volumen del digestor**

donde:

- V = volumen del digestor
- Q = flujo
- TRS = tiempo de retención

### **3.4 Área del digestor**

$$a = V/h$$

**Ecuación 3 Área del Digestor**

donde:

- a = área
- V = volumen
- h = altura

### **3.5 Diámetro del digestor**

$$2 \times \left( \frac{h}{\pi} \right)^{0.5}$$

**Ecuación 4 Diámetro del Digestor**

donde:

- $h$  = altura
- $\pi$  = constante pi

### **3.6 Carga de lodo**

Es la cantidad de lodo alimentado al digestor por unidad de volumen.<sup>1</sup>

$$\frac{Q_m}{V}$$

**Ecuación 5 Carga de Lodo**

donde:

- $Q_m$  = flujo másico
- $V$  = volumen del digestor

### **3.7 Demanda química de oxígeno (DQO)**

Este parámetro se obtiene en el laboratorio, mide el oxígeno equivalente a la materia orgánica que puede ser oxidada químicamente utilizando dicromato en una solución ácida.<sup>1</sup>

### **3.8 Sólidos totales (ST)**

Es el residuo remanente después de que una muestra de agua por tratar ha sido evaporada y secada a una temperatura específica de 103 a 105°C<sup>1</sup>

### **3.9 Sólidos totales volátiles (STV)**

Son aquellos sólidos que pueden ser volatilizados y cremados cuando los ST son incinerados a 500 +/- 50°C<sup>1</sup>

### **3.10 Sólidos suspendidos totales (SST)**

Porción de los ST retenida en un filtro con un tamaño de poro medido después de haber sido secado a una temperatura de 150°C. El filtro mas comúnmente usado el Whatman de fibra de vidrio con un tamaño de poro de 1.58µm.<sup>1</sup>

### **3.11 Sólidos suspendidos volátiles (SSV)**

Son aquellos sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los TSS son quemados a 500 +/- 50°C<sup>1</sup>

### **3.12 Estabilización**

Es la cantidad de materia orgánica que son capaces de eliminar las bacterias del digestor a una temperatura determinada, como ya se ha mencionado antes la temperatura es un factor que interviene de manera importante en el proceso de digestión.<sup>1</sup>

Para este trabajo se considero una eficiencia de 70%

$$estabilizacion = \frac{[(Q_m - Q_m(1 - ef)) - 1.42 * P_x] * 100}{Q_m}$$

**Ecuación 6 Estabilizacion**

donde :

- $Q_m$  = flujo másico
- $ef$  = eficiencia de utilización del sustrato
- $P_x$  = sólidos producidos

### **3.13 Determinación de sólidos**

La determinación de la producción de sólidos es importante ya que es necesario conocer la cantidad de desechos que se van a generar los cuales son susceptibles de ser aprovechados para su aplicación como mejoradores de suelos. Además es importante conocer este dato para el diseño de los digestores contemplando el almacenaje de estos, sobre todo en la laguna ya que los sólidos se quedan dentro de ella y es necesario retirarlos cada cierto tiempo.<sup>1</sup>

La ecuación para determinar la cantidad de sólidos biológicos producidos por día, es la siguiente:

$$P_x = \frac{y * Q_m - Q_m(1 - ef)}{1 + k_d * TRS}$$

**Ecuación 7 Sólidos Producidos**

donde:

- $P_x$  = sólidos producidos
- $y$  = coeficiente de producción de biomasa
- $Q_m$  = flujo masico
- $ef$  = eficiencia de utilización del sustrato
- $k_d$  = coeficiente endogeno

- $TRS$  = tiempo de retención

### 3.14 Producción de gas

$$gas = \frac{0.40 * (Q_m - Q_m(1 - ef)) - 1.42 * P_x}{\%CH_4}$$

**Ecuación 8 Producción de Gas**

donde:

- $Q_m$  = flujo másico
- $ef$  = eficiencia de utilización del sustrato
- $P_x$  = sólidos producidos

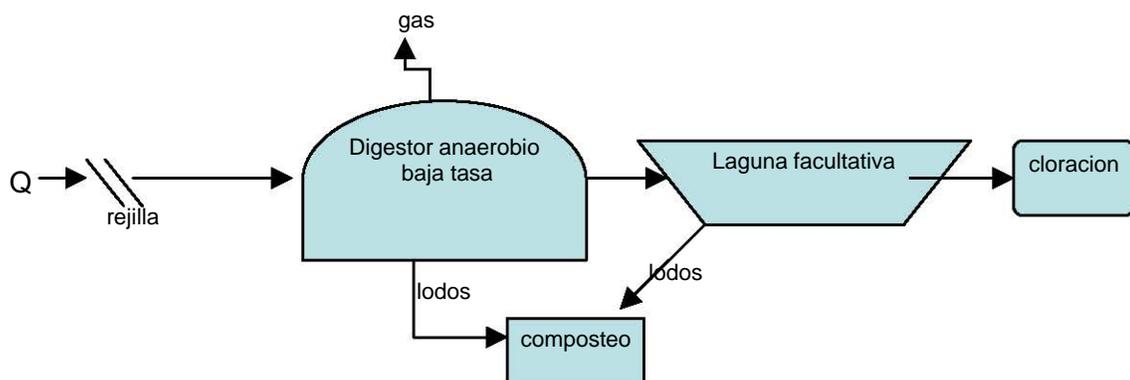
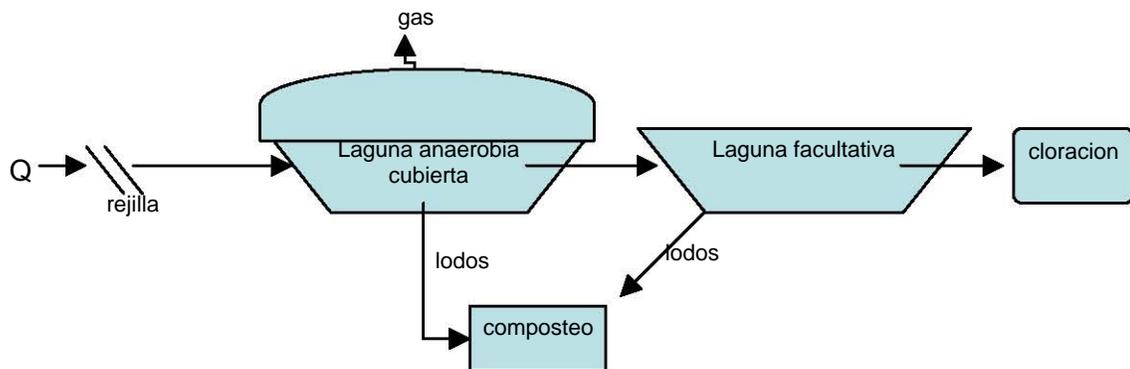
### 3.15 Literatura citada.

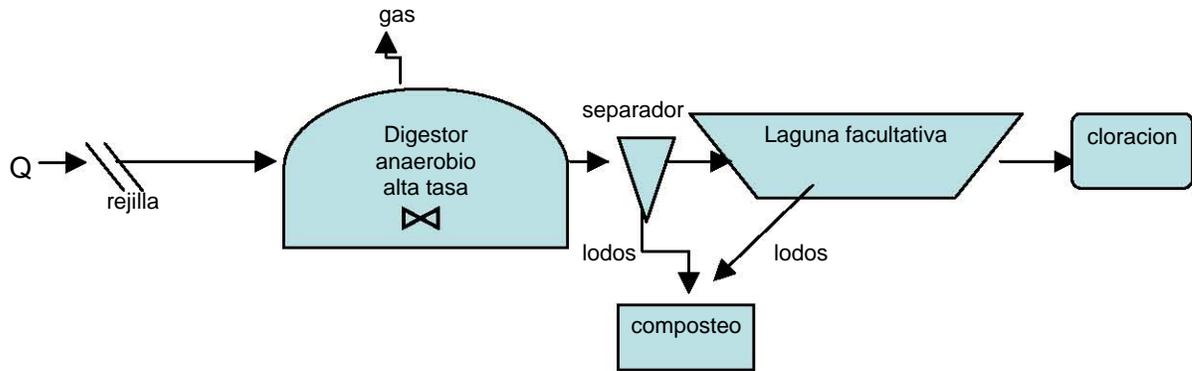
1. Metclaf and Eddy Inc. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th edition. Mc Graw Hill. NY U.S.A. 2003.
2. Manilla E. Diseño de un Biorreactor para la producción de biogás a partir de desechos agrícolas. (tesis de licenciatura) DF México: UNAM, 2000.
3. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Tratamiento anaerobio de aguas residuales, material tecnológico. 2ª edición. México: 2002.

## ANEXO 4

### 4 Descripción de los elementos que conforman los trenes de tratamiento

Los trenes de tratamiento son representaciones esquemáticas de los diferentes componentes que conforman un sistema de tratamiento de aguas residuales, en ellos se pueden observar las entradas y salidas de los diferentes componentes del sistema.<sup>1,2</sup>





#### 4.1 Rejilla

con separación de 5 a 10 cm entre barrotos, Utilizadas para la eliminación de materiales de grueso calibre (plásticos, ramas, piedras, etc.) para que no bloqueen las conducciones. <sup>1</sup>

#### 4.2 Laguna anaerobia cubierta

Se utiliza para tratar flujos con grandes concentraciones de materia orgánica en la laguna se lleva a cabo el proceso de digestión y se libera gas el cual se colecta en la cubierta de poliuretano por medio de mangueras. Este sistema es poco sensible a las variaciones de flujo y es necesario que salga de operación para poder purgar los lodos, por lo que generalmente se construyen en paralelo. <sup>1,2</sup>

#### 4.3 Digestor convencional

Este tipo de digestor esta conformado por un tanque sin agitación el cual funciona de manera similar a la laguna en su interior se lleva a cabo el proceso de digestión en condiciones anaerobias, y el biogás que se forma se colecta en el mismo

tanque en la parte superior llamada cúpula que puede ser fija o flotante, en este tanque se puede realizar la purga de los lodos sin que para ello sea necesario que salga de operación esto se realiza por la parte baja del tanque que es donde se sedimentan dichos lodos, formando diferentes zonas.<sup>1,2</sup>

#### **4.4 Digestor completamente mezclado**

Este digestor es similar al anterior, con la diferencia de que este tanque cuenta con un sistema de agitación, con el propósito de mejorar el contacto de la materia orgánica con las bacterias; en este tipo de digestores el afluente es mas liquido que en el caso anterior es decir no solo salen los sólidos ya que no hay sedimentación por lo que generalmente es necesario colocar posteriormente un sedimentador.<sup>1,2</sup>

#### **4.5 Sedimentador**

Este equipo se coloca el afluente proveniente del digestor completamente mezclado, para que los sólidos sedimenten en el fondo y puedan ser posteriormente depurados, generalmente el agua que se obtiene puede ser recirculada al mismo digestor por medio de una bomba.<sup>1</sup>

#### **4.6 Laguna facultativa**

Este tipo de laguna se utiliza para darle un tratamiento aerobio al agua lo que permite que la remoción de DBO sea mayor que en el tratamiento anaerobio, a su

vez se siguen sedimentando algunos sólidos los cuales forman lodos que siguen degradándose de manera anaerobia en el fondo de la laguna.<sup>1, 2</sup>

#### **4.7 Literatura citada.**

1. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Tratamiento anaerobio de aguas residuales, material tecnológico. 2ª edición. México: 2002.
2. Metclaf and Eddy Inc. W astewater engineering treatment and reuse. 4th edition. Mc Graw Hill. NY U.S.A. 2003.

## **ANEXO 5**

### **5 Definición de los rubros considerados en la matriz de decisión.**

Esta es una metodología para ayudar en la elección del mejor sistema de tratamiento, desde el punto de vista técnico.

Es importante que el evaluador tenga conocimientos técnicos sobre los sistemas a evaluar y cuente con la información necesaria y veraz para hacer la evaluación de la manera mas objetiva posible.<sup>1</sup>

#### **5.1 Aplicabilidad del proceso**

en este criterio se toman en cuenta las diferentes características del agua a tratar por lo tanto se subdivide en los siguientes factores:<sup>1</sup>

#### **5.2 Intervalo del flujo en el cual el sistema es aplicable**

Los sistemas de tratamiento pueden ser diseñados y aplicados, de manera adecuada, dentro de ciertos intervalos de caudal. <sup>1</sup>

#### **5.3 Tolerancia a variaciones de flujo**

Es necesario considerar las variaciones de flujo que pudieran presentarse ya que los sistemas trabajan mejor a flujos constantes, sin embargo hay sistemas que toleran de mejor manera las variaciones de flujo, en otros casos será necesario considerar la instalación de un tanque regulador; por otra parte hay algunos sistemas que responden mejor a periodos sin alimentación. <sup>1</sup>

## **5.4 Características del agua residual**

Las características del agua a tratar son el rubro mas importante a considerar para la selección del proceso adecuado, para sistemas biológicos hay que tener en cuenta la disponibilidad de nutrientes, así como la presencia de sustancias inhibitorias y la afectación que causan al sistema. <sup>1</sup>

## **5.5 Costo de la inversión inicial**

En este criterio hay que considerar todos los costos; este criterio no tienen que ver directamente con el proceso en sí y se somete a consideraciones ajenas al propio proceso de tratamiento, sin embargo el éxito del sistema de tratamiento radica también en la adecuada inversión que se realice; también hay que tomar en cuenta que los costos pueden variar considerablemente debido al costo de la mano de obra así como al costo de los materiales de construcción en este criterio se analiza el costo por m<sup>3</sup> tratado y comprende los costos por los siguientes rubros: <sup>1</sup>

### **5.5.1 Obra civil**

se toma en cuenta el numero de m<sup>3</sup> de concreto armado que se requieren. <sup>1</sup>

### **5.5.2 Equipamiento**

Se incluye el suministro, instalación y pruebas del equipo. <sup>1</sup>

### **5.5.3 Instalación eléctrica**

Considerar un 10% del costo de inversión total. <sup>1</sup>

#### **5.5.4 Tuberías**

considerar un 25% del costo de inversión total. <sup>1</sup>

#### **5.5.5 Instrumentación y control**

Considerar hasta un 5% de la inversión total. <sup>1</sup>

#### **5.5.6 Otros**

En este rubro se consideran costos de tecnología, inóculos y arranque de los sistemas. <sup>1</sup>

### **5.6 Costo de operación y mantenimiento**

Debido a la escasez de recursos económicos este es uno de los criterios mas importantes a tomar en cuenta, en general el sistema de tratamiento puede convertirse en un carga económica; este criterio es inclusive de mas peso al tener en cuenta que un elevado costo de mantenimiento y operación pueden provocar que el sistema tienda a ser obsoleto y al final abandonado. En este criterio se analizan los siguientes rubros: <sup>1</sup>

#### **5.6.1 Costo de insumos**

Los reactivos necesarios para la operación apropiada del sistema son un costo fijo que en general no se puede amortizar. <sup>1</sup>

#### **5.6.2 Costo de la energía**

Hay que favorecer aquellos procesos donde el consumo de energía sea mínimo. <sup>1</sup>

### **5.6.3 Gastos administrativos y de personal**

Es necesario tomar en cuenta los gastos administrativos como permisos etc. Para la construcción y puesta en marcha de la planta, así mismo hay que tomar en cuenta el personal que se requiere para operar la planta, entre mas complejo sea el sistema se requerirá de personal calificado.<sup>1</sup>

### **5.6.4 Costo de refacciones y material de mantenimiento**

Los proceso con mas equipos de operación así como los equipos mas complejos implicaran mayores costos de mantenimiento.<sup>1</sup>

## **5.7 Generación de residuos**

Todo sistema genera residuos, sin embargo es necesario tomar en consideración la cantidad y el tipo de residuos que genera cada sistema, así como sus características. También es necesario considerar el sitio de disposición para tales residuos, los costos de manejo y disposición del mismo.<sup>1</sup>

## **5.8 Requerimiento de reactivos**

En este criterio se evalúa la cantidad de reactivos químicos que se requiere para la operación del sistema o aquellos que permiten mejorar la eficiencia de dicho sistema. Hay que asegurarse de contar con el suministro de dichos reactivos por tiempos prolongados.<sup>1</sup>

## **5.9 Requerimientos energéticos**

Este criterio es fundamental en la evaluación del sistema de tratamiento, ya que se relaciona directamente con la cantidad de recursos económicos que se requieren para la operación de la planta, es fundamental favorecer a aquellos procesos donde el consumo de energía sea menor o mejor aun a aquellos que generan algún tipo de residuo energético que los vuelva energéticamente autosuficientes.<sup>1</sup>

## **5.10 Aceptación por parte de la comunidad**

En algunos casos este es el factor decisivo para la implementación de la planta ya que puede afectar de cierta manera la convivencia con los vecinos de la planta, los cuales pueden llegar a convertirse en un obstáculo para la posterior operación de dicha planta.<sup>1</sup>

## **5.11 Generación de subproductos con valor económico o de reuso**

Algunos sistemas de tratamiento generan algunos residuos que tienen un valor económico estos le dan al sistema un valor agregado que hay que tomar en cuenta.<sup>1</sup>

## **5.12 Vida útil**

Este rubro considera el tiempo en que la planta estará operando sin perder su capacidad de tratamiento.<sup>1</sup>

### **5.13 Requerimiento de área**

Este puede ser un factor determinante al momento de tomar una decisión ya que el sistema puede requerir de cantidades considerables de terreno, se puede carecer del suficiente para implementar algún tipo de sistema o el precio del terreno necesario puede ser muy elevado.<sup>1</sup>

### **5.14 Diseño y construcción**

En este rubro se han agrupado diversos criterios de diseño así como la experiencia del contratista en la construcción de los diversos tipos de sistemas propuestos, el tipo de experiencias reportadas con esos sistemas, la complejidad de construcción y la complejidad del equipo necesario.<sup>1</sup>

### **5.15 Criterios de diseño**

En este rubro se evalúa los conocimientos y el dominio de los modelos teóricos o empíricos que se posee para el adecuado diseño de la planta. Los valores para las ecuaciones son tomados de la práctica, así como de la literatura y los resultados de plantas piloto.<sup>1</sup>

### **5.16 Experiencia del contratista**

Se evalúa la capacidad y experiencia previa del contratista en la ejecución de proyectos similares.<sup>1</sup>

### **5.17 Tecnología ampliamente probada**

Se evalúa la existencia de plantas similares en la región o a nivel mundial que utilicen el sistema propuesto con el fin de evaluar el funcionamiento de dicho sistema así como de conocer los problemas y limitaciones a los que se han enfrentado.<sup>1</sup>

### **5.18 Complejidad de construcción y equipamiento**

Se evalúa la complejidad del sistema, el número de equipos necesarios, su complejidad de operación, su disponibilidad en el mercado así como el costo de los servicios e instalación que requieran.<sup>1</sup>

### **5.19 Operación**

En este rubro se agrupan los siguientes criterios:<sup>1</sup>

#### **5.19.1 Flexibilidad de operación**

Se evalúa la facilidad de operación, las condiciones bajo las cuales opera el sistema, las variaciones que acepta el sistema y la sensibilidad a alteraciones en las condiciones de operación.<sup>1</sup>

#### **5.19.2 Confiabilidad del proceso**

En este criterio se toma en cuenta el tiempo de operación continua con la consecuente producción de un efluente con la calidad requerida, sin fallos en la operación ni daños en los equipos clave.<sup>1</sup>

### **5.19.3 Eficiencia de remoción**

La calidad del efluente es el parámetro con el cual podemos medir la operación adecuada de la planta, esta calidad es generalmente establecida en la legislación.

1

### **5.19.4 Complejidad de operación del proceso**

Se requiere establecer desde un principio la complejidad de los proceso en condiciones normales y en condiciones adversas para así poder establecer el perfil y número de personal requerido y calificado en la operación de los diversos equipos dependiendo de su complejidad. <sup>1</sup>

### **5.19.5 Requerimientos de personal**

Este factor esta directamente relacionado con el tamaño de la planta así como con su complejidad, así un sistema sencillo en su operación es mejor ya que limita al numero de personal requerido y a la capacitación del mismo. <sup>1</sup>

### **5.19.6 Disponibilidad de repuestos y centros de servicio**

Se evalúa el mantenimiento preventivo y correctivo de los diferentes equipos utilizados es deseable que exista una gran oferta de refacciones y centros de servicio disponible. <sup>1</sup>

## **5.20 Entorno**

Dentro de este criterio se evalúan los siguientes parámetros: <sup>1</sup>

### **5.20.1 Temperatura**

En algunos procesos las variaciones en la temperatura así como la temperatura ambiente afectan la rapidez de degradación del sistema o la operación física de los equipos es por eso que la temperatura promedio del sitio debe ser conocida.<sup>1</sup>

### **5.20.2 Ruido**

Equipos que generen mucho ruido pueden ser molestos si se tienen casas habitación colindantes a la planta.<sup>1</sup>

### **5.20.3 Contaminación visual**

Es necesario que el diseño arquitectónico concuerde con el paisaje y que se integre a él.<sup>1</sup>

### **5.20.4 Malos olores**

La dirección de los vientos dominantes puede impedir el uso de ciertos sistemas que generan malos olores, así mismo hay que tener en cuenta si hay casas o escuelas colindantes.<sup>1</sup>

### **5.20.5 Animales dañinos**

Hay que considerar la proliferación de animales dañinos como ratas, cucarachas, moscas etc. Que pueden afectar a la población y animales cercanos a la planta.<sup>1</sup>

## **5.21 Operación de la matriz de decisión**

La matriz consta de 5 columnas (**A,B,C,D,E**) y 32 renglones.

En la columna **B** se listan los aspectos que serán ponderados

Según los requerimientos (columna **A**) y evaluados según la propuesta técnica que se presente (columna **C**).<sup>1</sup>

La suma de los valores ponderados en la columna **A** deben sumar 100. los valores de la columna **A** deben ser fijados considerando la importancia que tiene cada rubro dentro del proyecto y deberán permanecer constantes independientemente de que sistema de tratamiento de aguas se este evaluando. <sup>1</sup>

En la columna **C** se evalúa cada aspecto de la columna **B** al otorgar un valor cero para cuando el aspecto evaluado no aplique, 1 cuando el proceso cumpla con el aspecto en forma deficiente, 3 cuando el cumpla con el aspecto en forma buena y 5 cuando el proceso cumpla con el aspecto evaluado en forma muy buena o excelente. <sup>1</sup>

En la columna **D** se divide la calificación asignada a cada rubro en la columna **C** entre la calificación máxima que puede obtener. <sup>1</sup>

En la columna **E** se multiplica el valor de cada renglón de la columna **D** por el valor ponderado de la columna **A** y finalmente se suman todos los renglones de la columna **E** para obtener la calificación global(casilla **32 E**) del proceso aplicado bajo las condiciones ponderadas en la columna **A**. <sup>1</sup>

### **5.21.1 Calificación de criterios y comentarios**

Posteriormente se presenta la evaluación con sus comentarios de los sistemas propuestos, de acuerdo con los criterios señalados anteriormente. Se proporciona una calificación par cada criterio (columna **C**)según corresponda al tipo de proceso en evaluación, con el fin de que sirva de guía únicamente para la elaboración de la matriz de decisión. <sup>1</sup>

El valor asignado dependerá de las circunstancias propias de el agua a tratar y de las necesidades y posibilidades de cada proyecto en particular.<sup>1</sup>

## **5.22 Literatura citada.**

1. Morgan Sagastume J., López Hernández J., Noyola Robles A. tratamiento de aguas residuales: matriz de decisión para la selección de tecnología. Vector de la ingeniería civil. 31, 7-20. 1999

## ANEXO 6

### 6 Balances de Materia

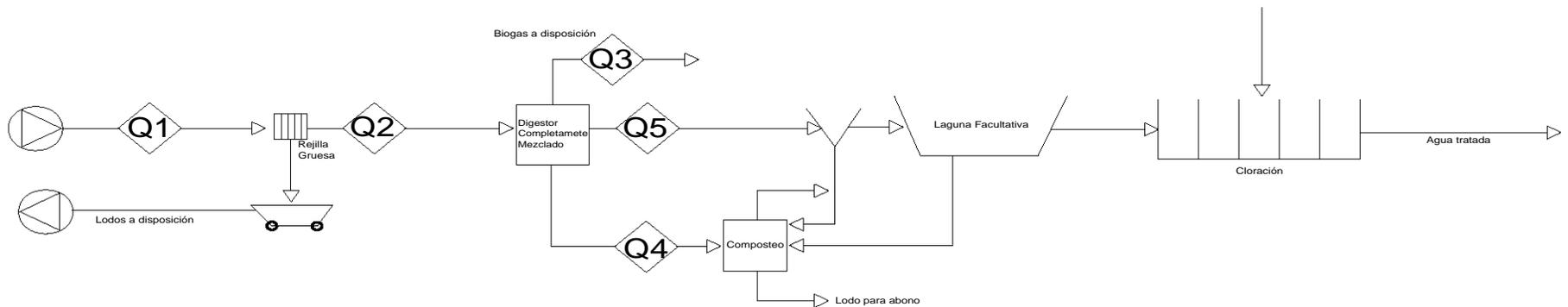
#### 6.1 Balance de materia del Digestor Completamente mezclado

##### Características Del Influyente

Flujo	Q	14.95m <sup>3</sup> /d
Demanda Química de Oxígeno	DQO	44.6kg/m <sup>3</sup>
Demanda Química de Oxígeno conv	DQOconv	33.45kg/m <sup>3</sup>
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO	5.923kg/m <sup>3</sup>
Sólidos Suspendidos Volátiles	SSV	117.5kg/m <sup>3</sup>

##### Consideraciones De Diseño

Tiempo de retención	tr	28d
Constante de degradación	kd	0.32531601
Eficiencia propuesta	%	75%
Temperatura	t	19°C
Coefficiente de producción de biomasa	y	1
Producción de metano por Kg. de dborem		0.35m <sup>3</sup> /kg DBOrem
Porcentaje de CH <sub>4</sub> en el biogás		65%



	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Q	14.95m3/d	14.95m3/d			
DQO	44.6kg/m3	44.6kg/m3			11.15kg/m3
wDQO	666.77kg/d	666.77kg/d			166.6925kg/d
DBO	5.923kg/m3	5.923kg/m3			1.48075kg/m3
wDBO	88.54885kg/d	88.54885kg/d			22.1372125kg/d
SSV	117.5kg/m3	117.5kg/m3			
wSSV	1756.625kg/d	1756.625kg/d		503.096076 kg/d	
lodos al 9%				5.58995641 m3/d	
Biogas			35.7601125m3/d		

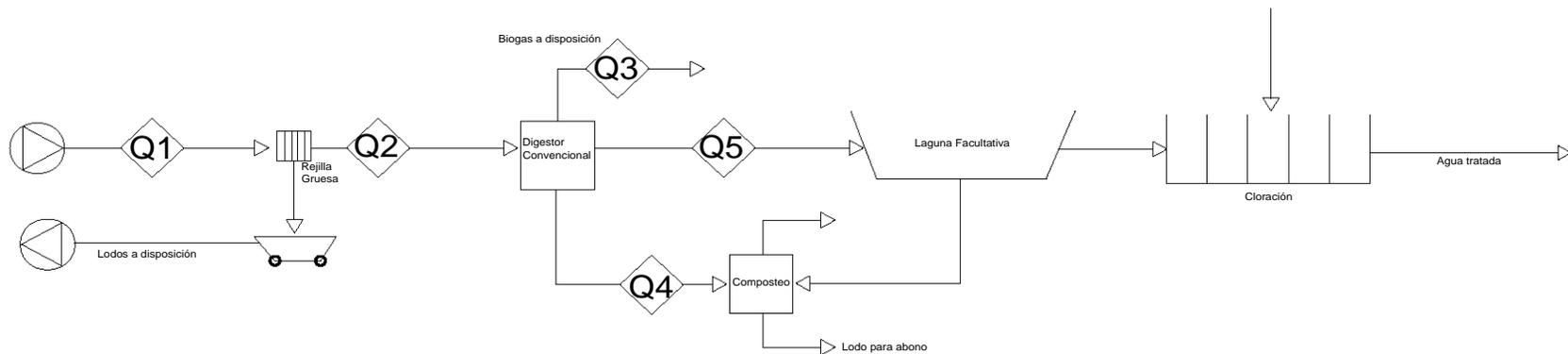
## 6.2 Balance de Materia del Digestor Convencional

### Características Del Influyente

Flujo	Q	14.95m <sup>3</sup> /d
Demanda Química de Oxígeno	DQO	44.6kg/m <sup>3</sup>
Demanda Química de Oxígeno conv	DQOconv	26.76kg/m <sup>3</sup>
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO	5.923kg/m <sup>3</sup>
Sólidos suspendidos volátiles	SSV	117.5kg/m <sup>3</sup>

### Consideraciones De Diseño

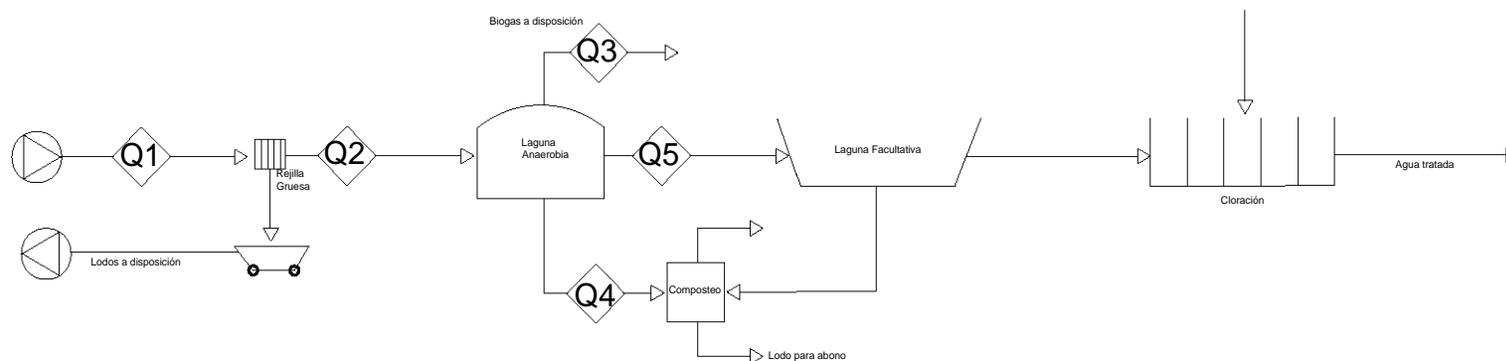
Tiempo de retención	tr	60d
Constante de degradación	kd	0.32531601
Eficiencia propuesta	%	60%
Temperatura	t	19°C
Coficiente de producción de biomasa	y	1
Producción de metano por Kg. de dborem		0.35m <sup>3</sup> /kg DBOrem
Porcentaje de CH <sub>4</sub> en el biogás		65%



	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Q	14.95m3/d	14.95m3/d			
DQO	44.6kg/m3	44.6kg/m3			17.84kg/m3
wDQO	666.77kg/d	666.77kg/d			266.708kg/d
DBO	5.923kg/m3	5.923kg/m3			2.3692kg/m3
wDBO	88.54885kg/d	88.54885kg/d			35.41954kg/d
SSV	117.5kg/m3	117.5kg/m3			
wSSV	1756.625kg/d	1756.625kg/d		402.476861	
lodos al 9%				4.47196512m3/d	
Biogas			28.60809m3/d		

### 6.3 Balance de Materia de la Laguna Anaerobia Cubierta

<b>Características Del Influyente</b>		
Flujo	Q	14.95m <sup>3</sup> /d
Demanda Química de Oxígeno	DQO	44.6kg/m <sup>3</sup>
Demanda Química de Oxígeno conv	DQOconv	17.84kg/m <sup>3</sup>
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO	5.923kg/m <sup>3</sup>
Sólidos suspendidos volátiles	SSV	117.5kg/m <sup>3</sup>
<b>Consideraciones De Diseño</b>		
Tiempo de retención	tr	90d
Constante de degradación	kd	0.32531601
Eficiencia propuesta	%	40%
Temperatura	t	19°C
Coefficiente de producción de biomasa	y	1
Producción de metano por Kg. de dborem		0.35m <sup>3</sup> /kg DBOrem
Porcentaje de CH <sub>4</sub> en el biogás		65%





	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Q	14.95m3/d	14.95m3/d			
DQO	44.6kg/m3	44.6kg/m3			26.76kg/m3
wDQO	666.77kg/d	666.77kg/d			400.062kg/d
DBO	5.923kg/m3	5.923kg/m3			3.5538kg/m3
wDBO	88.54885kg/d	88.54885kg/d			53.12931kg/d
SSV	117.5kg/m3	117.5kg/m3			
wSSV	1756.625kg/d	1756.625kg/d		268.317907 kg/d	
lodos al 9%				2.98131008m3/d	
Biogas			19.07206m3/d		