

OPS/CEPIS/96
Original: español

FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES

Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes

**Ing. Antonio Guevara Vera
M.S. en Saneamiento Ambiental
Profesional Residente, CEPIS**



**Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
División de Salud y Ambiente
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana • Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud
Lima**

1996

FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES

Producción de gas y Saneamiento de Efluentes

Ing. ANTONIO GUEVARA VERA
M.S. Saneamiento Ambiental
Profesional Residente , CEPIS

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
División de Salud y Ambiente
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana. Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud
Lima - Perú
1996

**Siempre el inicio de toda tarea se torna
difícil, pero luego de comenzado ella,
el camino no parece tan tortuoso.**

A. G. V.

Dedicado a :

Margarita

Victor

Yaissa

Jose de la Paz

Esther

Quienes siempre están conmigo

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento:

Al Dr. **Clemente Quintero Rojo**, Rector de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales " Ezequiel Zamora" (UNELLEZ), y a todas las Autoridades Universitarias, por haber apoyado la realización de mi de año sabático.

Al Ing. **Sergio Caporali**, Director del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), y a todo su personal, por permitir que realizara mi año sabático en el Centro , me apoyaron y me dieron todas las facilidades para la realización del presente trabajo.

Al Ing. **Leonardo Taylhardat**, profesor del Instituto de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (UCV), Director del Centro de Investigaciones en Biogas, quien a través de su constante asesoramiento sobre la digestión anaeróbica, motivó a que me adentrara en el interesante campo de esta tecnología.

A los Ingenieros **Freddy Piñate** profesor Titular de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales " Romulo Gallegos " (UNERG.), y **Emerson Rincón** profesor Asociado de la UNELLEZ, Núcleo San Carlos Cojedes, por su aporte y ayuda a la realización de la presente Investigación.

ÍNDICE

	Pag.
Introducción	6
I. Objetivos	8
II. Antecedentes	9
III. Características De La Fermentación Metanogénica	11
III. 1. Microorganismos Que No Producen Metano	12
III. 2. Microorganismos Productores De Metano	14
IV. Factores A Considerar En El Proceso Metanogénico	15
IV. 1. Materiales De Carga Para La Fermentación	15
IV. 2. Relación Carbono - Nitrógeno (C / N)	15
IV. 3. Concentración De La Carga	16
IV. 4. Temperatura	18
IV. 5. Valor Del Ph	20
IV. 6. Promotores E Inhibidores De La Fermentación	20
V. Procesos De Digestión Para Tratar Los Residuos Orgánicos	22
V. 1. Por La Forma De Alimentación	22
V. 1. 1. Fermentación Continua	22
V. 1. 2. Fermentación Semi - Continua	22
V. 1. 3. Fermentación Por Lote	23
V. 2. Por La Temperatura	24
V. 2. 1. Fermentación Termofílica	24
V. 2. 2. Fermentación Mesofílica	24
V. 2. 3. Fermentación A Temperatura Ambiente	24
V. 3. Por El Numero De Etapas	24
V. 3. 1. Fermentación En Una Sola Etapa	24
V. 3. 2. Fermentación En Dos O Mas Etapas	24
VI. Tipos De Digestores Metanogénicos	25
VI. 1. Digestor De Mezcla Completa	25
VI. 2. Reactores De Filtro Anaeróbico, Lechos Expandidos Y Fluidizados Y Las Unidades U.A.S.B.	25
VII. Componentes Y Clasificación De Los Digestores	28
VII. 1. Componentes De Un Biodigestor	28
VII. 2. Clasificación De Los Digestores Rurales	28
VII. 2. 1. Según El Almacenamiento Del Gas	28
VII. 2. 2. Según Su Forma Geométrica	28
VII. 2. 3. Por Los Materiales De Construcción	28
VII. 2. 4. Según Su Posición Respecto A La Superficie Terrestre	28
VII. 2. 5. Modelos De Digestores	28
VII. 2. 5. 1. Modelo Chino	33
VII. 2. 5. 2. Modelo Indio	33
VII. 2. 5. 3. Modelo Horizontales	33
VII. 2. 5. 4. Modelo Batch O Por Lote	33

	Pag .
VIII. Objetivos En El Uso De La Biodigestión Anaeróbica	38
VIII. 1. Para El Saneamiento Ambiental	38
VIII. 2. Para La Producción Y Aprovechamiento Del Gas	39
VIII. 2. 1. En Cuanto A La Recolección Del Gas	41
VIII. 2. 2. En Relación A Los Gasómetros	41
VIII. 2. 3. Distribución Del Gas	41
VIII. 2. 4. Aplicación Del Gas	42
VIII. 3. Para La Producción De Fertilizantes	42
VIII. 4. Para La Introducción De La Tecnología	42
VIII. 5. Con Fines Conservacionistas	42
IX. Secuencias De Actividades Para Operar Los Digestores	47
IX. 1. Prueba De Los Nuevos Y Mantenimientos De Los Viejos Digestores	47
IX. 2. Preparación De La Carga	47
IX. 3. Verificación De La Concentración Y De La Relación C / N	47
IX. 4. Llenado Del Digestor	48
IX. 5. Producción De Gas	49
IX. 6. Duración De La Digestión	49
IX. 7. Descarga	49
IX. 8. Actividades Cotidianas	49
X. Diseño De Biodigestores	51
X. 1. Datos De La Zona De Estudio	51
X. 2. Selección Del Digestor Mas Factible A Realizar	52
X. 3. Especificaciones Para El Diseño De Biodigestores	52
X. 3. 1. Calculo De La Cámara De Fermentación	52
X. 3. 1. 1. Con Fines De Saneamiento	52
X. 3. 1. 2. Con Fines De Producción De Gas	53
X. 3. 2. Para Calcular La Oferta De La Materia Prima	54
X. 3. 3. Filtro Anaeróbico	57
X. 3. 4. Volumen De La Cámara De Carga Y Descarga	59
X. 3. 5. Calculo De Gasómetro	59
X. 3. 6. Requerimientos De Materiales Y Cálculos Métricos	63
XI. Conclusiones Y Recomendaciones	68
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	73

CUADROS

	Pag.
1. Clasificación De Las Metanobacterias (Balch, 1979)	14
2. Relación Carbono A Nitrógeno De Las Materias Primas Empleadas Corrientemente (Apróx..)	15
3. Análisis De Los Resultados De Diversos Recursos Efectuados Por El Instituto Industrial De Microbiología De Shanghai	17
4. Contenido De Sólidos Totales (Enseco) En Material De Fermentación Comúnmente Utilizados En Las Zonas Rurales (Apróx..)	17
5. Rendimiento De Gas En Digestores Pequeños Rurales A Distintas Temperaturas	18
6. Rendimiento De Gas Con Materiales Empleadas Comúnmente A Distinta Temperatura	18
7. Concentración Inhibidora De Inhibidores Comunes	21
8. Rendimiento De Gas Con Distintas Materias En Diferentes Regiones (Concentración De 6% (M3 / Kg. Ts)	39
9. Velocidad De Generación De Gas A Partir De Materiales De Uso Común ...	40
10. Composición Promedio Del Biogas	40
11. Resultado De Los Análisis Del Efluente De Un Digestor Modelo Chino Y Del Líquido De Digestores Batch	46
12. Valores Comparativos De Los Nutrientes Presentes En El Sub-Producto Sólido De Digestores Batch Provenientes De Dos Materias Primas Diferentes	46
13. Demanda De Biogas Para Diferentes Usos	54
14. Producción De Residuos Humanos Y Animales (Estimación)	54
15. Producción De Biogas A Partir De Desechos De Animales Y Humanos	55

FIGURAS

	Pag.
1. Etapas De La Fermentación Metanogénica	13
2. Efecto De La Temperatura Y El Tiempo De Retención Sobre La Producción De Gas A Partir De Efluentes Urbanos	19
3. Unidades De Tratamientos Anaeróbicos	26
4. Esquema Operativo Del Sistema Biodigestor Gasómetro	29
5. Digestor De Cúpula Fija	30
6. Digestor Con Depósito Flotante De Gas	30
7. Digestor Con Gasómetro De Plástico O Caucho En Forma De Bolsas	30
8. Digestor De Cúpula Móvil	31
9. Digestor Cilíndrico	31
10. Digestor Esférico	31
11. Digestor Ovalado	32
12. Digestor Rectangular	32
13. Digestor Cuadrado	32
14. Digestor Modelo Chino	34
15. Digestor Modelo Indio	35
16. Digestor Modelo Horizontal	36
17. Digestor Modelo Batch	37
18. Uso Del Biogás En El Campo Chino	43
19. Cocina Comercial (Marca Rivergas) Modificada Para Usarla Con Biogas. Ucv. Facultad De Agronomía. Planta De Biogás.....	44
20. Una Cocina Comercial (Marca No Identificada) Y Diseñada Para Gas Licuado, Modificada Para Usarse Con Biogas. Asentamiento Campesino "La Molinera" San Francisco De Asís. Edo. Aragua.	44
21. Lámpara De Biogas. Vivienda Campesina. Provincia De Sichuan. República De China.....	45
22. Lámpara De Biogas Construida En Los Talleres De La Facultad De Agronomía U.C.V. Maracay. Diseño Basado En La Lámpara "Tuojiang D 80-3" ..	45
23. Filtro Anaeróbico	58
24. Cámara De Descarga Y De Carga	60
25. Gasómetro Instalado	61
26. Presiones A Que Está Sometida El Gasómetro	62
27. Gasómetro Seco	64
28. El Sello De Agua	64

INTRODUCCIÓN

La creciente producción de desechos sólidos y líquidos, resultado de las distintas actividades que realizan las poblaciones humanas para satisfacer sus necesidades básicas de supervivencia y confort, ha originado que constantemente el medio ambiente se vea pulido y contaminado por el inadecuado tratamiento y disposición final de dichos desechos.

Los métodos tradicionales para el saneamiento de efluentes no han logrado una eficiencia óptima, en la disminución de los índices de contaminación de las aguas servidas a fin de que no sean agresivas a los cuerpos receptores; es por ello que se han venido implementando nuevos métodos de degradación de efluentes, algunos de los cuales permiten además el aprovechamiento energético de los gases que se originan de estos procesos, favoreciendo en este sentido a las zonas rurales en donde cada vez es más problemático proporcionarles energía adecuada, por los altos costos del petróleo y de la energía eléctrica.

En este sentido la biodigestión anaeróbica de los desechos orgánicos, como excretas de animales y de humanos, restos de cosechas y de procesos agroindustriales, se presenta como una alternativa factible de realizar en el campo, tanto por los costos que requiere, como por el saneamiento ambiental logrado y la producción de energía que se origina.

Sin embargo, al tratar de mejorar el saneamiento ambiental, nos encontramos que en nuestros países no existen investigaciones sobre los sistemas de saneamiento de efluentes más apropiados para las condiciones del trópico, menos aún, utilizando procesos anaeróbicos o diseños de sistemas de tratamiento de efluentes con aprovechamiento de la energía producida. Es por ello que se hace urgente desarrollar investigaciones que ayuden a buscar soluciones a lo antes planteado, sobre todo con la difícil situación económica que atraviesan los países Sudamericanos y que ya no se pueden dar el lujo de desperdiciar sus escasos recursos.

Por todo lo antes planteado el presente trabajo representa el resultado de una investigación documental sobre los diferentes aspectos que involucran la utilización de la biodigestión anaeróbica, tanto con el propósito de saneamiento, como de producción y aprovechamiento de energía. Se le ha estructurado por capítulos, en los cuales se recogen los principios básicos, así como los procesos y métodos que se deben conocer y aplicar en el "Diseño de Biodigestores Anaeróbicos en el Medio Rural".

En la redacción se ha utilizado un lenguaje sencillo de fácil comprensión, de tal manera que el lector pueda captar los conocimientos que se exponen y adquiera la información necesaria para orientarlo en la formulación y diseño de proyectos basados en la tecnología de la biodigestión anaeróbica para el tratamiento de excretas de origen animal ó domésticos, así como de los desechos agrícolas.

Es importante señalar que como la biodigestión anaeróbica en Latoamerica es poco conocida y las referencias bibliográficas son escasas, el trabajo que se presenta constituye una primera aproximación al conocimiento y comprensión de los diferentes aspectos que involucran el

diseño de biodigestión, sin embargo dado lo amplio de la materia que se esta tratando, se ha resumido todo lo posible en la exposición técnica de los diferentes tópicos que abarca el trabajo.

El texto esta conformado por XI capítulos; en el capítulo I se plantean los objetivos que se buscan con este trabajo, el capítulo II se refiere a los antecedentes tanto en el exterior como en Venezuela sobre la aplicación de esta tecnología; el capítulo III expone las características más importantes de la fermentación metanogénica y el papel que juegan las bacterias en la reacciones bioquímicas que se originan; el capítulo IV tiene que ver con los factores que se deben tener en cuenta en el proceso metanogénico, ya que ellos influyen ó modifican el proceso; el capítulo V se refiere a los procesos de digestión para tratar los diversos residuos orgánicos; en el capítulo VI se habla de los diferentes tipos de digestores metanogénicos que se emplean en el medio rural; luego en el capítulo VII se explican todas las partes que conforman un biodigestor usado en el medio rural, igualmente se da una clasificación de los mismos; en el capítulo VIII se detalla cuales son los objetivos que se buscan en la utilización de la digestión anaeróbica; en el capítulo IX se habla sobre la secuencia de actividades que se deben cumplir en la operación de los digestores; en el capítulo X, se dan las especificaciones para el diseño de Biodigestores, y finalmente en el capítulo XI se expone algunas conclusiones y recomendaciones.

I. OBJETIVOS

1. Objetivo General.

- Exponer los elementos básicos que se deben tener en cuenta para el diseño de biodigestores anaeróbicos que se usan en el medio rural, tanto para el tratamiento de desechos orgánicos de origen doméstico y agropecuario como para la producción y aprovechamiento energético de los gases y lodos producidos.

2. Objetivos Específicos.

- Analizar las características de la fermentación metanogénica, en lo referente a la participación de las bacterias anaeróbicas.

- Identificar los factores que influyen en el proceso metanogénico.

- Exponer los procesos de digestión para tratar los residuos orgánicos.

- Señalar los tipos, la clasificación y los componentes de los digestores usados en el medio rural.

- Determinar los objetivos que se buscan en el uso de la digestión anaeróbica.

- Proponer la secuencia más adecuada para la operación y para el diseño de los biodigestores.

II. ANTECEDENTES

El proceso de la Biodigestión Anaeróbica ha sido conocido y aplicado desde la antigüedad, así por ejemplo, se utilizaba para el curtido de cueros, para la obtención de etanol, ácidos orgánicos como el láctico, etc., pero era comprendido en razón de sus productos finales y no en función de sus procesos, Taylhardat, (1986).

Ya para 1884 Louis Pasteur al presentar los trabajos de su discípulo Gayón concluyó que la fermentación de estiércoles podría ser una fuente de energía para la calefacción e iluminación, Medina (1984). En Inglaterra en el año de 1896, Donald Cameron perfeccionó el tanque séptico y utilizó el gas que se origina en el proceso como fuente de energía. En los EE.UU. de Norteamérica se empezó a investigar esta tecnología en Massachusetts, por intermedio del Dr. Louis P. Kinnincutt.

Para el año de 1900 es puesto en funcionamiento el primer Biodigestor en Bombai - La India, Charles James utilizó el gas producido en el proceso para el funcionamiento de un Motor.

El desarrollo de la bioquímica para satisfacer las altas demandas de solventes químicos que requería la Primera Guerra Mundial y el impacto de problemas sanitarios productos de ella, derivaron en el desarrollo acelerado de la microbiología de los procesos anaeróbicos que podría ayudar eficientemente a aportar soluciones que los procesos aeróbicos (asociados al oxígeno) no habían podido solucionar; además, la creciente población mundial requería cada día más fuentes de energía alternas que complementarán las ya existentes.

En Alemania a partir de 1923 se empieza a utilizar el biogas, mediante una red pública para satisfacer las demandas de energía. En Inglaterra es sin embargo a partir de 1927 cuando se impulsa el uso de biogas, para suplir las necesidades de la comunidades que pasaban de 7.000 habitantes; es aquí también, donde se introduce el sistema para recolectar gas por medio de estructuras flotantes de concreto armado, Herrera (1977).

Para el año de 1939 la India inaugura una unidad experimental para el estudio y diseño de sistemas de equipos que requiere la utilización del Biogas, es en este país y en especial en la República Popular China, donde esta tecnología se ha difundido en forma masiva en el sector campesino, existiendo más de 7.5 millones de digestores construidos y operando, TAYLHARDAT (1986).

Sin embargo la Biodigestión Aneróbica que inicialmente se había empleado para satisfacer la demanda de energía (requerimiento de combustible), en los últimos años ha venido demostrando su potencialidad para el tratamiento de los residuos y excretas de origen domésticos y agropecuario, principales contaminantes del ambiente. Países como China, India, Australia, Inglaterra, etc, han encontrado en la fermentación anaeróbica una técnica aliada en la lucha contra la contaminación ambiental, especialmente en el área rural en donde los efluentes urbanos y agropecuarios son transformados en sustancias inofensivas al ecosistema circundante, mejorando la calidad de vida de sus habitantes, FAO, (1986); en este sentido HOBSON, P. et al (1980) utilizando la Biodigestión anaeróbica lograron grandes reducciones en los niveles de Demanda

Bioquímica de oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) de estos efluentes, además los constituyentes olorosos de los residuos como el fenol y el indol fueron destruidos por la digestión; iguales resultados encontraron SUMMER, R. and Bousfield en (1980).

La utilización progresiva y creciente del proceso anaeróbico en estos últimos años a nivel mundial, nos hacen ver que la descontaminación es una realidad, así lo han corroborado muchos ensayos al respecto.

Por ello, en Europa y Asia, cada día se está incrementando su uso. Según Hobson y otros (1980) en Inglaterra y otros países de Europa se está aumentando la presión popular y legislativa para el uso preferencial de procesos anaeróbicos.

En América (según lo expresado en el seminario taller sobre biogas y otras fuentes alternas de energía en el medio rural, realizado en Cali, Colombia del 14-17 de octubre de 1986) se están desarrollando algunas experiencias en países como Colombia, Perú, Bolivia, Costa Rica, Honduras; la Organización para la Agricultura y la Alimentación (F.A.O.) está dando un apoyo decidido; asimismo algunos países industrializados como la República Federal de Alemania, concibió el programa especial de energías renovables (PEER), este proyecto debería fomentar la investigación sobre el uso de energéticos renovables, entre ellos la tecnología del biogas, teniendo como objetivo la reducción de cargas contaminantes y la sustitución de abonos químicos mediante el uso de los efluentes tratados y de buena calidad fertilizante.

En Venezuela puede pensarse que dada la abundancia de recursos energéticos, tanto hidráulicos como fósiles, no tenga relevancia el uso de formas alternas de energía como la utilización de Biogas, sin embargo, para el área rural y las zonas alejadas donde existe una gran superficie que no tiene acceso a la electrificación por los altos costos de las redes y equipos eléctricos (Pasa de 600 mil Bs. / Km. lineal de red) sí tiene mucha importancia, y así lo han entendido los organismos oficiales como CADAFE, el I.V.I.C. y la U.C.V., quienes están aunando esfuerzos y recursos para realizar investigaciones tendientes a un mejor conocimiento de la técnica del Biogas, así como una mayor difusión técnica para lograr su implementación popular y rápida.

Sin embargo la investigación en Venezuela es incipiente, los pocos estudios que se conocen son los realizados en la U.C.V. en su planta Piloto generadora de Biogas y las pocas tesis de grado realizadas por estudiantes de la Facultad de Agronomía de la U.C.V. (Maracay), así tenemos trabajos sobre la "Evaluación teórico económica de estanques para Biogas", Medina, L. (1984); "Evaluación de Producción de Biogas a partir de desechos orgánicos", Colmenares (1987); "Diseño y Construcción de un Gasómetro y Formulación de Programas de Computación para diseño de un Biodigestor Chino" Moreno. (1988).

También existen algunas experiencias sobre tratamiento de efluentes porcinos que han demostrado la eficiencia del sistema en la reducción de la DBO la DQO, de los sólidos y de los coliformes totales en más del 80%, podemos mencionar los trabajos de LUNA (1991) sobre el tratamiento de efluentes porcinos utilizando un reactor de flujo ascendente con filtro anaeróbico; y de SILVA (1991) sobre la evaluación de un digestor horizontal para efluente porcinos con fines de saneamiento y producción de energía.

III. CARACTERÍSTICAS DE LA FERMENTACIÓN METANOGENICA.

La digestión de lodos es un proceso de descomposición anaeróbica, que consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. El proceso para producir metano (CH_4), bióxido de carbono y otros compuestos implica la realización de una serie de reacciones bioquímicas, donde participan una gran variedad de microorganismos, los cuales a una parte del carbono lo oxidan completamente formando anhídrido carbónico y a la otra lo reduce en alto grado para formar metano, siendo químicamente estables ambos compuestos.

Casi todas las materias orgánicas pueden emplearse para la fermentación. El hombre en la producción de biogas utiliza principalmente diversas aguas residenciales, aguas residuales de la industria liviana y alimenticia, los desechos municipales y diversos subproductos agrícolas (residuos de cultivos y excrementos humanos y de animales), además se aprovechan algunos cultivos energéticos. La composición química principal de estos recursos son polisacáridos, proteínas, grasas y pequeñas cantidades de metabolitos, la mayoría de ellos insolubles en agua.

Estos compuestos son desdoblados fundamentalmente por bacterias que descomponen los materiales orgánicos, algunos de los cuales producen gas metano y otros no producen ningún gas, también se han encontrado en los aislamientos protozoarios y hongos. La cooperación e interacción entre estos microorganismos es lo que produce la transformación y degradación de los diversos materiales, de allí que el conocimiento de la microbiología de la fermentación metanogénica sea la base fundamental para el diseño del equipo, la organización del proceso, la política tecnológica de la producción y el control de las condiciones técnicas, FAO, (1986).

Según ZEIKUS (1986), citado por TAYLHARDAT (1989) hasta el presente, se reconocen cuatro grupos de bacterias que poseen diferentes funciones catabólicas sobre el carbono, en el proceso de degradación de la materia orgánica hasta el metano, estos grupos son:

GRUPO I. Bacterias hidrolíticas, catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros constituyentes menores de la biomasa.

GRUPO II. Bacterias acetogénicas, productoras de hidrógeno, catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros.

GRUPO III. Bacteria Homoacetogénicas, catabolizan compuestos monocarbonados, y / o hidrolizan compuestos multicarbonos hacia la producción de ácido acético.

GRUPO IV. Bacterias metanogénicas, catabolizan acetato compuestos monocarbonatos para producir metano; contemplándose solo cuatro géneros=Metanobacterium Methanococcus, Methanospirillum y Methanosarcina, basado en la clasificación taxonómica propuesta por BATCH y otros.

Considerando la acción de los microbios en la fermentación metanogénica, TAYLHARDAT (1989) expresa que "Actualmente se considera que el proceso es mejor

explicado bajo un esquema de tres etapas", como se observa en la figura (N°1). En este sentido Citerio y Herrera (1977), dan la siguiente explicación del proceso.

1. Periodo de producción intensiva de ácidos (acidificación). Se inicia con los alimentos y compuestos de más fácil descomposición (grasas) existe gran producción de dióxido de carbono (CO_2), producción de ácido sulfídrico (H_2S), ácidos orgánicos, bicarbonatos. El pH. se encuentra en la zona ácida 5.1 a 6.8.

2. Período de digestión de ácidos (Regresión, licuefacción). Ataque a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, producción de pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno e hidrógeno, Producción de bicarbonatos y de compuestos amoniacales, mal olor causado por el ácido sulfídrico (H_2S). Gran parte de los sólidos flotan y el P.H. se encuentra entre 6.6 y 6.8.

3. Periodo de digestión intensiva ó de fermentación alcalina, digestión de materias resistentes, proteínas, aminoácidos, celulosa, etc, producción de amoníaco, sales de ácidos orgánicos y grandes volúmenes de gas, principalmente metano y cantidades menores de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno, olor a alquitran. Pequeñas cantidades de sólidos flotantes. El pH. pasa a la zona alcalina 6.9 a 7.4.

Normalmente en un digestor se cumplen las tres etapas.

Para que un proceso de fermentación se realice en forma normal y vital es preciso contar con la acción conjunta y combinada de bacterias que producen metano y las que no lo producen. El exceso o falta de cualquier grupo de bacterias y su función más o menos activa o inactiva, tienden a destruir el equilibrio cinético lo que lleva a la anormalidad o incluso al fracaso del proceso de fermentación.

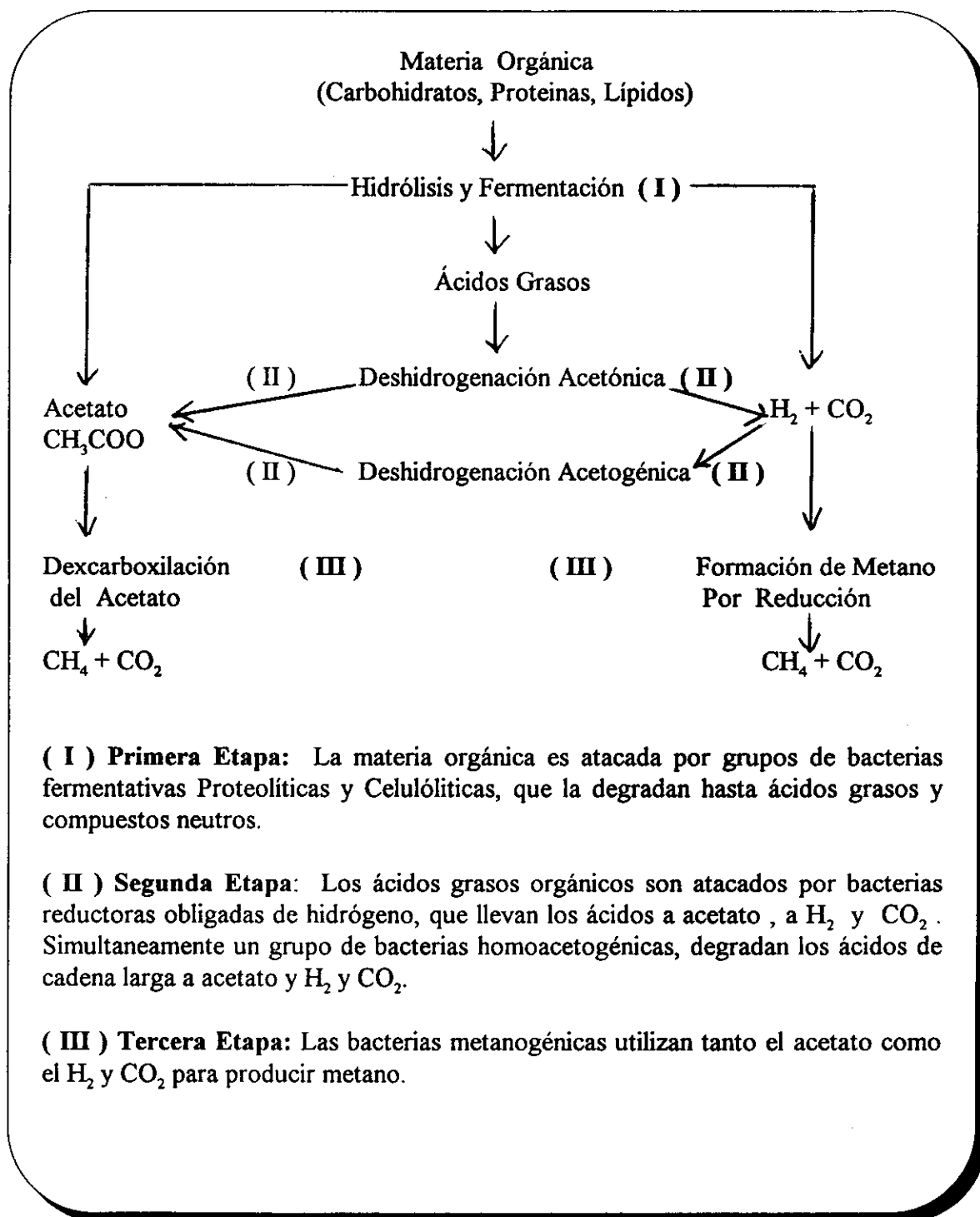
1. Microorganismos que no producen metano.

Son una serie de microorganismos que convierten complejos productos orgánicos en compuestos de moléculas más sencillas y más pequeñas. Participan numerosos y variados microbios anaeróbicos y facultativos, dependiendo su número y su variedad de los materiales de fermentación.

Los microbios que no producen metano pueden clasificarse en tres grupos, bacterias, mohos y protozoos, entre los cuales tienen mayor importancia los primeros.

- Bacterias: Hay muchos tipos de bacterias que no producen metano. Según la FAO (1986), sobre la base de sus grupos fisiológicos, se clasifican las bacterias no metanogénicas en siete grupos: las que descomponen la celulosa, la semi - celulosa, las proteínas y las grasas, las que producen hidrógeno, otros microbios específicos como los Thiovibrios y las que emplean el ácido láctico.

- Mohos: Mediante el cultivo artificial se han aislado numerosos mohos y levaduras en la digestión anaeróbica, llegándose a la conclusión que estos organismos podrían participar en el proceso de la digestión, del cual obtendrían los nutrientes para producirse.

Figura N° 1 ETAPAS DE LA FERMENTACIÓN METANOGENICA

Fuente : Tomado de McInerney and Bryant (1980)

- Protozoos: Algunos investigadores han señalado que los protozoos también intervienen en este proceso, tratándose principalmente de Plasmodium, flagelados y amebas, aunque consideran que podrían desempeñar un papel de menor importancia en el proceso.

En la digestión anaeróbica la mayoría de las bacterias son no metanogénicas, y tienen una gran importancia en el desarrollo del proceso anaeróbico, ya que las bacterias productoras de biogas no pueden aprovechar directamente los compuestos orgánicos a menos que éstos hayan sido degradados y convertidos en compuestos más sencillos, de menor peso molecular, gracias a la acción de las bacterias no metanogénicas.

2. Microorganismos productores de Metano.

Son el grupo más importante de microbios de fermentación en la fabricación del biogas. Estas bacterias se caracterizan por ser muy sensibles al oxígeno y a los ácidos solo pueden usar como sustrato los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos. El crecimiento y reproducción de las bacterias metanogénicas es muy lento. Doblar su población demora de 4 a 6 días. Su estudio ha avanzado muy lentamente por la dificultad de aislar, incubar y almacenarlos. Hasta ahora se han obtenido muy pocas especies puras, no pasan de 13 Cepas puras (Ver cuadro N° 1).

Cuadro N° 1
Clasificación de las metanobacterias
(Balch, 1979)

Orden	Familia	Genero	Especies
Methanobacteriates	Methanobacteriaceae	Methanobacterium	Methanoformicum Methanobryantil M.thermoautotrophic
		Methanobrevibacter	Methanoruminantium Methanoarboriphilus Methanosmithil
Methanococcales	Methanococcaceae	Methanocoecus	Methanovanniellii Methanovoltae
Methanomicrobiates	Methanomicrobiaceae	Methanogenium	Methanocaraci Methanomarispigri
		Methanospirillum	Methanohongatei
		Methanomicrobium	Methanomobile
	Methanohalobium	Methanosarcina	Methanobarkerie

Fuente: Tomado de el Biogas una experiencia en China. FAO (1986)

IV. FACTORES A CONSIDERAR EN EL PROCESO METANOGÉNICO

Existen muchos factores que influyen directamente en la fermentación metanogénica y son capaces de modificar la rapidez de la descomposición, entre ellos tenemos:

1. Material de carga para la fermentación.

Llamamos así a todos los desechos orgánicos que se introducen dentro de un biodigestor para su degradación. Pero para la fermentación los microorganismos metanogénicos necesitan nutrientes para producir biogas, por ello es necesario contar con suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa. La materia orgánica que se utiliza como material de carga (residuos de los cultivos, excretas de humanos y de animales) pueden dividirse en dos grupos, las materias primas ricas en nitrógeno y las materias primas ricas en carbono, el nitrógeno y las materias primas ricas en carbono, el nitrógeno se utiliza como constituyente para la formación de la estructura celular, y el carbono se utiliza como fuente de energía.

2. Relación Carbono-Nitrógeno (C / N).

Los microbios siempre consumen estos elementos en determinada proporción, medidos por la relación carbono-nitrógeno (C / N) que contiene la materia orgánica. Existen muchos criterios en lo referente a esta relación, pero se reconoce en general como aceptable una relación C / N de 20-30:1.

Las excretas de humanos y de animales son ricos en nitrógeno, con una relación C / N inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mejor velocidad de biodegradación y de generación de gas; en cambio los residuos agrícolas son ricos en carbono, con una relación C / N superior a 30:1, pero con una generación más lenta de gas en el proceso de digestión (Cuadro N°2).

Cuadro N°2 Relación carbono a nitrógeno de las materias primas empleadas corrientemente (aproximación)

Materias Primas	Contenido de carbono de las materias primas por peso (%)	Contenido de nitrógeno de las materias primas por peso (%)	Relación carbono a nitrógeno (C / N)
Paja seca de trigo	46	0.53	87:1
Paja seca de arroz	42	0.64	67:1
Tallo del maíz	40	0.75	53:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Estiércol de aves	41	1.30	32:1
Pasto	14	0.54	27:1
Cacahuets tallos y hojas	11	0.59	19:1
Estiércol fresco de oveja	16	0.55	29:1
Estiércol fresco de vaca	7.3	0.29	25:1
Estiércol fresco de caballo	10	0.42	24:1
Estiércol fresco de cerdo	7.8	0.60	13:1
Excretas frescas humanas	2.5	0.85	2.9:1
Estiércol de aves			15:1

En general las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas), que las ricas en carbono (paja y tallos). Mientras en los primeros 10 días de fermentación las materias primas nitrogenadas generan de 34.4%-46% del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8.8% (FAO, 1986a,b).

Por ello para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimiento y de distintas velocidades de generación; también es conveniente agregar las materias primas ricas en nitrógenos a las materias primas de alta relación C / N, a fin de bajar esta relación. Por ejemplo, residuos de animales y humanos se aplica a la paja y a los tallos.

La relación C / N se puede calcular aplicando la fórmula siguiente:

$$K = \frac{C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + \dots}{N_1 X_1 + N_2 X_2 + N_3 X_3 + \dots} = \frac{\sum C_i X_i}{\sum N_i X_i}$$

C = Porcentaje de carbono en la materia prima

N = Porcentaje de nitrógeno en la materia prima

En donde X = Peso de la materia Prima

K = C / N de la mezcla de las materias primas

Por ejemplo: se tiene 100 Kg. de excretas de humanos
100 Kg. de estiércol de cerdos
X Kg. de paja de arroz

¿Cuanta paja de arroz necesito para tener una mezcla de ellas cuya relación C / N sea de 25:1?

Aplicando la fórmula tendremos

$$25 = \frac{2.5\% \times 100 + 7.8\% \times 100 + 42\% \times X_3}{0.85\% \times 100 + 0.6\% \times 100 + 0.63\% \times X_3}$$

Desarrollando ----- $X_3 = 98.9 \text{ Kg.}$

3. Concentración de la carga.

Para la producción de gas, tratamiento de los efluentes y operación del reactor no es conveniente que la carga a degradar este muy concentrada ni muy diluida, se recomienda una concentración de 5-10%. Sobre la base de los sólidos totales de la carga pueden calcularse la concentración de los lodos, la cantidad de agua que habrá que agregar y las proporciones de los componentes; los cuadros (3) y (4) nos muestran el contenido de sólidos totales de algunos materiales de carga para los digestores.

Cuadro N°3
Análisis de los resultados de diversos recursos efectuados
por el Instituto Industrial de Micro biología de Shanghai

Materiales	Renglones		Sólidos totales (TS)	Sólidos volátiles (VS)	Grasas	Lignina	Celulosa compleja	Proteína
	%							
Estiércol porcino	Frescos	%	27.4	20.97	3.15	5.8	8.88	3.0
	Totales	%	100	76.54	11.5	21.49	32.39	10.95
	VS	%	----	100	15.03	28.08	42.32	14.31
Estiércol vacuno	Frescos	%	20.0	15.8	0.65	7.11	6.56	1.81
	Totales	%	100	76.89	3.23	35.57	32.49	9.05
	VS	%	----	100	4.20	46.2	42.26	11.77
Estiércol de aves	Frescos	%	68.9	56.64	2.96	13.66	24.83	6.36
	Totales	%	100	82.20	2.84	19.82	50.55	9.56
	VS	%	----	100	3.46	24.11	61.5	11.58
Paja de arroz	Frescos	%	88.82	76.41	8.54	11.28	53.25	4.81
	Totales	%	100	86.02	9.62	12.7	59.95	5.42
	VS	%	-----	100	11.18	14.76	69.19	6.3
Pasto verde	Frescos	%	15.9	12.93	1.28	1.56	9.1	0.79
	Totales	%	100	81.32	8.05	9.8	57.22	4.94
	VS	%	----	100	9.90	17.05	70.36	6.07

Fuente : El Biogas. 1986

Cuadro N°4
Contenido de sólidos totales (en seco) en materiales de
fermentación comúnmente utilizados en las zonas rurales
(aproximado)

Materiales	Contenido seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina humana	0.4	99.6
Orina de cerdo	0.4	99.6
Orina de vaca	0.6	99.4

Fuente : El Biogas. 1986

4. La temperatura.

Es uno de los factores que tiene mayor relevancia en el proceso anaeróbico, ya que define las zonas en donde el proceso puede llevarse a cabo ya sea por la latitud y/o la altura. También ella es vista como el factor en potencia para aumentar la eficiencia de los sistemas, principalmente cuando de saneamiento se trata (TAYLHARDAT 1989).

La temperatura afecta el tiempo de retención para la digestión y degradación del material dentro del digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de la temperatura de trabajo, además se incrementa la producción de gas, (Ver Figura N°2) y cuadro (5) y (6)

Cuadro 5
Rendimiento de gas en digestores pequeños rurales a distintas temperaturas

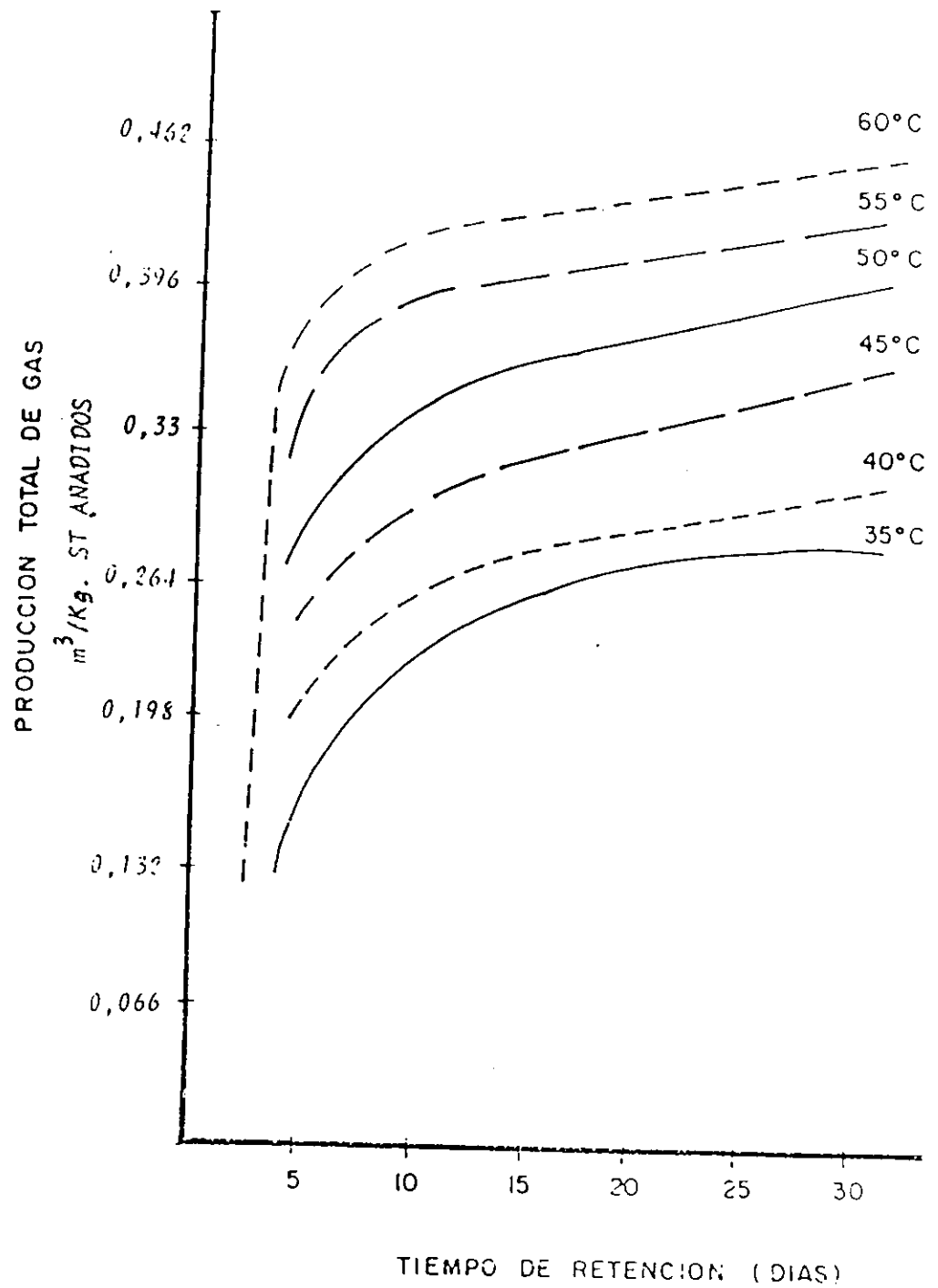
Material de carga	Temperatura (°C)	Producción de gas (m ³ / m ³ x día)
Paja de arroz + estiércol	29-30	0.55
Porcino + pastos	24-26	0.21
Porcino + pastos	16-20	0.10
Porcino + pastos	12-15	0.07
Porcino + pastos	menos de 8	escasa

Cuadro 6
Rendimiento de gas con materiales empleados comúnmente a distinta temperatura

Materiales	Mesofílico (35°C)	Ambiente (8-25°C)
Estiércol de cerdo	0.42	0.25-0.3
Estiércol de vaca	0.3	0.2-0.25
Estiércol de humano	0.43	0.25-0.3
Paja de arroz	0.4	0.2-0.25
Paja de trigo	0.45	0.2-0.25
Pasto verde	0.44	0.2-0.25

Una forma de aumentar la eficiencia del sistema es calentado el efluente, para ello se hace circular agua caliente por un serpentín colocado dentro de la cámara de fermentación, también se utiliza bujías de calentamiento, pero tienen el inconveniente que el calor no se distribuye uniformemente en el efluente. Finalmente el ciclo digestivo al ser más rápido a altas temperaturas, determina que la capacidad del digestor debe ser mayor a menores temperaturas que a altas temperaturas.

Figura N°2 Efecto de la Temperatura y Tiempo de Retención sobre la Producción de Gas



Fuente: Golueke (1977), Citado por Moreno, J. (1988)

5. Valor del pH.

El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6.5-7.5, cuando baja de 5 ó sube de 8 puede inhibir el proceso de fermentación ó incluso detenerlo. Normalmente cuando se trabaja con residuos domésticos y agropecuarios, la dinámica del mismo proceso ajusta el pH.

El pH se puede corregir en forma práctica, de la siguiente manera:

Sacando frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregando materia prima fresca en la misma cantidad y en forma simultánea.

Cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas, agua amoniacal diluida ó una mezcla de ambos y licor fermentado.

6. Promotores e inhibidores de la fermentación.

Los promotores son materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de gas; entre ellos tenemos enzimas, sales inorgánicas, se puede emplear urea, carbonato de calcio (CaCO_3). Los inhibidores, son aquellos factores, que inhiben la actividad vital de los microbios.

Entre los promotores de la fermentación hay diversos tipos de materiales entre ellos enzimas, sales inorgánicas. Cuando se carga el digestor, es útil agregar celulosa para promover el proceso y la producción de gas.

La Urea y el carbonato de calcio han dado buenos resultados. El primero acelera la producción de metano y la degradación del material, el segundo es útil para la generación de gas y para aumentar el contenido de metano en el gas.

En relación a los inhibidores. Por la naturaleza biológica del proceso son muchos los factores que afectan la actividad de los microorganismos. La alta concentración de ácidos volátiles (más de 2000 ppm en la fermentación mesofílica y de 3600 ppm para la termofílica). La excesiva concentración de amoníaco y nitrógeno, destruyen las bacterias, todo tipo de productos químicos agrícolas, en especial los tóxicos fuertes aún en ínfimas proporciones podrían destruir totalmente la digestión normal. Muchas sales como los iones metálicos son fuertes inhibidores. Van Velsen y Lettinga, (1980) FAO, (1986). En el Cuadro N°7 se indican las concentraciones inhibitoras de algunos inhibidores comunes:

Cuadro N°7**Concentración inhibidora de inhibidores comunes**

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm.
NaCl	40000 ppm.
Nitrato (Según contenido de nitrógeno)	0.05 mg. / ml.
Cu	100 mg. / l.
Cr	200 mg. / l.
Ni	200-500 mg. / l.
CN	25 mg. / l. mg. / l.
Detergente sintético	20-40 mg. / l.
Na	3500-5500 mg. / l.
K	2500-4500 mg. / l.
Ca	2500-4500 mg. / l.
1000-1500 mg. / l.	1000-1500 mg. / l.

Fuente: FAO, 1986.

V. PROCESOS DE DIGESTIÓN PARA TRATAR LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

La digestión para degradar los residuos orgánicos y/o producir biogas en un proceso microbiano, por lo que se necesita condiciones ambientales propicias y un manejo adecuado para que funcione eficientemente el sistema, desde que se carga el digestor hasta la producción del gas y salida del efluente. Existen muchos procesos para tratar los diversos residuos orgánicos, los cuales dependen de las condiciones de diseño del sistema, como de los propios digestores y del modo del sistema, como de los propios digestores y del modo de presentación de los substratos a ser fermentados.

En este sentido los procesos pueden ser clasificados según:

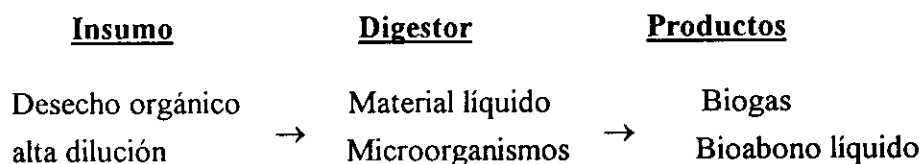
1. Por la forma de alimentación pueden ser:

1.1. Fermentación continua. Cuando la fermentación en el digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al material que entra, la producción de gas es uniforme en el tiempo; este proceso se aplica en zonas con ricas materias residuales y digestor de tamaño grande (mayor de 15m³) y mediano (entre 6.3 y 15m³).

La característica más importante es la alta dilución de la carga, de 3 a 5 veces agua / excreta y además su manejo es relativamente fácil, pues lo que se hace es un manejo hidráulico del sistema, que puede llegar a no requerir mano de obra en la operación si las condiciones topográficas son favorables.

El digestor se carga diaria o interdiariamente adicionando nuevas cantidades de lodos frescos.

Esquema del Proceso



Tiempo de Retención

Fuente : Tomado de Jacome (1990)

1.2. Fermentación semicontinua. La primera carga que se introduce, consta de gran cantidad de materiales; cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento del gas se agregan nuevas materias primas y se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad.

El sustrato a degradar ocupa un volumen en el digestor (80%), mientras que el resto del volumen (20%) es reservado para realizar cargas continuas diarias o intermedias, a medida que va disminuyendo gradualmente el rendimiento del gas.

Esta operación reúne las ventajas y desventajas del batch, pero en el caso del bioabono, por la adición continua de materia rica en nutrientes incrementa aún más su calidad.

Una forma de operación podría ser: se incorpora al digestor una carga batch de pasto o restos de cosecha y la carga continua es con excretas de porcinos o humanos.

Debido a que el suministro de lodos frescos no es constante el proceso se hace bastante largo, por esta razón en la práctica se acelera mediante la utilización y el control de factores favorables.

1.3. Fermentación por lotes. Los digestores se cargan con material en un sólo lote, cuando el rendimiento de gas decae a un bajo nivel, después de un periodo de fermentación, se vacían los digestores por completo y se alimenta de nuevo.

También se conoce como operación "Batch", todo adentro todo fuera.

El material de carga se caracteriza, por una alta concentración de sólidos, el cual debe ser adecuadamente inoculado, sobretodo cuando se fermentan materiales vegetales. Las ventajas operativas es que el proceso una vez iniciado llega al final sin contratiempos, necesitando mano de obra solo al momento de la carga y la descarga. La desventaja es que al tratarse de manejo de sólidos sobre todo cuando son grandes volúmenes requiere mecanizarlo, no obstante hay gran producción de gas por unidad de volumen y un bioabono de buena calidad, el proceso es el siguiente:

Esquema del Proceso

<u>Insumo</u>	<u>Digestor</u>	<u>Productos</u>
Desecho orgánico Sólido + H ₂ O	→ Material Sólido + H ₂ O Microorganismos	→ Biogas Bioabono líquido Bioabono sólido

Tiempo de Retención

Fuente : Tomado de Jacome (1990)

2. Por la temperatura.

Es de suma importancia, puesto que la temperatura determina la formación de gas en un tiempo determinado, a menor temperatura mayor tiempo de retención, pudiendo inhibir la formación del gas.

2.1. Fermentación termofílica: necesita una temperatura de 51-55°C, se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y un corto tiempo de retención, tiene buenas características de desinfección.

2.2. Fermentación mesofílica. La temperatura va de 28-35°C, la descomposición de la carga es más lenta que el anterior con menos consumo de energía.

2.3. Fermentación a temperatura ambiente. La producción del gas varía de una estación a otra dependiendo de la temperatura atmosférica tiene la ventaja de que sus estructuras son simples y de baja inversión.

3. Por el número de Etapas. Pueden ser:

3.1. Fermentación en una sola etapa. Cuando la digestión se realiza en un sólo depósito de fermentación, su estructura es simple, fácil operación y bajo costo, se usa mucho en las zonas rurales.

3.2. Fermentación en dos ó más etapas. La digestión ocurre en dos o más depósitos de fermentación. El material de la carga primero se degrada y produce gas en la primera etapa; luego el efluente de la primera etapa sufre un nuevo proceso de digestión en la segunda etapa. Con este principio se pueden construir digestores de 3 ó 4 etapas.

Los digestores de etapas múltiples se caracterizan por un largo período de retención, buena descomposición de la materia orgánica y una alta inversión.

VI. TIPOS DE DIGESTORES METANOGENICOS

La base fundamental para que se cumpla la digestión anaeróbica es la de mantener la suficiente cantidad de lodos activados dentro del reactor, para que al entrar en contacto con el material de carga, las bacterias que existan en ellos puedan ayudar a la fermentación y degradación de la materia orgánica. Dependiendo de la forma de contacto entre el material o sustrato fermentante y la población bacteriana dentro del reactor, se definen dos tipos de digestores anaeróbicos.

1. Digestor de mezcla completa.

Denominados así por que el sustrato a ser digerido y los microorganismos encargados de su degradación se encuentran formando una sola unidad, dentro del cuerpo del digestor, originándose la fermentación de la materia orgánica, como ejemplos de esto tenemos los digestores rurales, de fácil operación así como los digestores construidos en Francia, China y la India. Los modelos de digestores clásicos industriales son esencialmente de tipo de mezcla completa con una recirculación del líquido en suspensión y con agitación mecánica.

2. Reactores de filtro anaeróbico, lechos expandidos y fluidizados y las unidades U.A.S.B. (Upflow anaerobic sludge blanket)

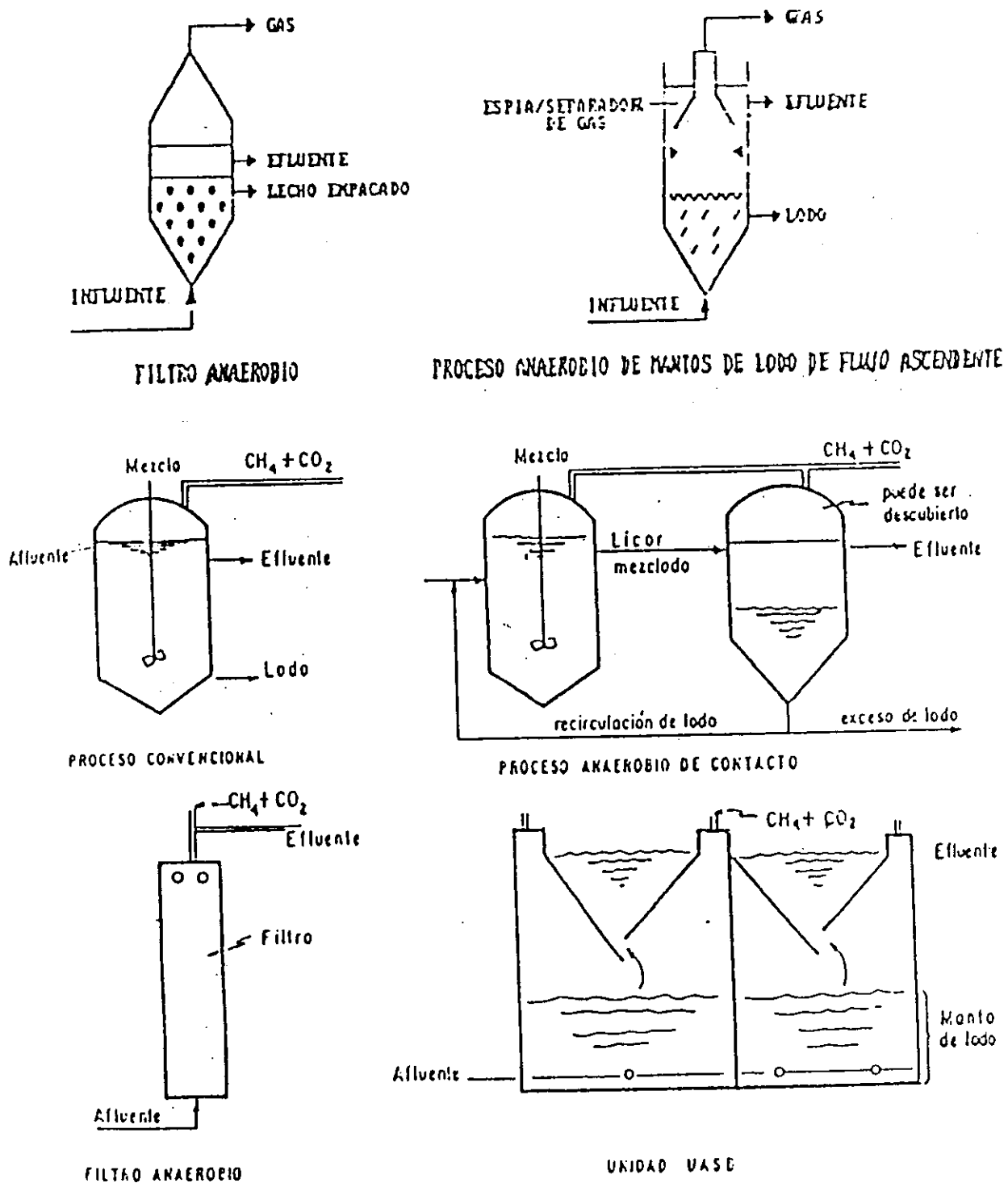
Todos estos reactores están basados en la tendencia que tienen las bacterias, especialmente las metanogénicas a fijarse sobre superficies sólidas.

La carga incremental en un reactor de flujo continuo sin retención de microorganismos y / o materia orgánica ocasiona un lavado y por lo tanto una disminución del proceso ya iniciado. De ahí que se han intentado algunos mecanismos (Ver figura N°3) en los cuales se busca separar los sólidos del efluente y recargarlos al cuerpo del reactor o también retornar parte del efluente con sólidos en suspensión al cuerpo del mismo. En los reactores de filtro fijo, las bacterias se adhieren sobre soportes estacionarios y especialmente provistos para tal fin, en cambio en las U.A.S.B. y reactores similares, la adherencia se da entre las propias bacterias formándose flóculos que tienen la capacidad de sedimentar a velocidades superiores que la velocidad neta del líquido, Silva (1991).

El sistema que ha obtenido éxito en el medio rural es el digestor con filtro anaeróbico donde el agua residual al entrar en el digestor se le hace pasar a través de una cama de soporte de material poroso inerte, que contiene gravas, rocas, carbón activado, ladrillos triturados, sepiolita, conchas marinas HUYSMAN (1998) WILKIS (1984), o multitud de materiales plásticos, como anillos de P.V.C. ó de Poliuretano (espuma) (Paris 1986); silicatos: Saponita, mantmorillonita, etc.

El filtro anaeróbico tiene la característica de aumentar el tiempo de residencia de los microorganismos en su interior, por estar formando por una matriz que posee una mayor superficie de contacto, donde se fijan las bacterias metanogénicas.

Figura N°3 Unidades de Tratamiento Anaeróbico



Fuente: Tomado de cubillos 1985

Con estos procesos de biomasa retenida, se consiguen tiempos de retención de sólidos entre 10 y 100 veces mayores que en los digestores convencionales de mezcla completas. Con lo cual se obtienen tiempos hidráulicos de retención notablemente inferiores y permiten un incremento en la cantidad o volumen de carga a degradar.

Estos reactores son operados básicamente en forma continua con cargas diarias ó interdiarias, en las cuales el material a fermentar se encuentra suspendido en la solución.

VII. COMPONENTES Y CLASIFICACIÓN DE LOS DIGESTORES

1. Componentes de un Biodigestor.

El digestor que es una planta de fermentación anaeróbica, para la fabricación de biogas, esta compuesto por las siguientes partes:

- Tubo de entrada de materia orgánica.
- Cámara de fermentación o cuerpo del Digestor.
- Cámara de depósito de gas.
- Cámara de salida de materia estabilizado o fermentada.
- Conducto de gas, lleva el gas para ser usado.
- Tapa hermética.
- Gasómetro (Ver figura N°4)

2. Clasificación de los Digestores Rurales.

Por sus forma y estructura los digestores pueden agruparse en los siguientes diseños.

2.1. Según el almacenamiento del gas pueden ser:

- Cúpula fija (figura 5)
- Cúpula móvil (figura 8)
- Con depósito flotante, ó de presión constante (figura 6).
- Con gasómetro de Caucho ó material plástico en forma de Bolsa (Figura 7).

2.2. Según su forma geométrica, pueden ser:

- Cámara vertical cilíndrica (figura 9)
- Cámara esférica (figura 10)
- Cámara ovalada (figura 11)
- Cámara rectangular (figura 12)
- Cámara cuadrada (figura 13)

2.3. Por los materiales de construcción pueden ser de ladrillo, de mampostería, de hormigón, de hormigón armado y de plástico.

2.4. Según su posición respecto a la superficie terrestre pueden ser:

- Superficiales (ver figura 8)
- Semienterrados (ver figura 13)
- Subterráneos (ver figura 10)

2.5. Modelo de digestores.

Existen muchos modelos entre los más populares tenemos "El modelo Chino", "El Modelo Indio", "El Modelo Olade de Guatemala", "El Modelo Xochicalli". Los modelos "Plásticos Tubulares y "Rectangulares", los materiales con que son construidos varían desde mampostería, prefabricados, hasta metálicos de diferentes aleaciones; lo importante es que estén bien construidos, para que se pueda cumplir el proceso.

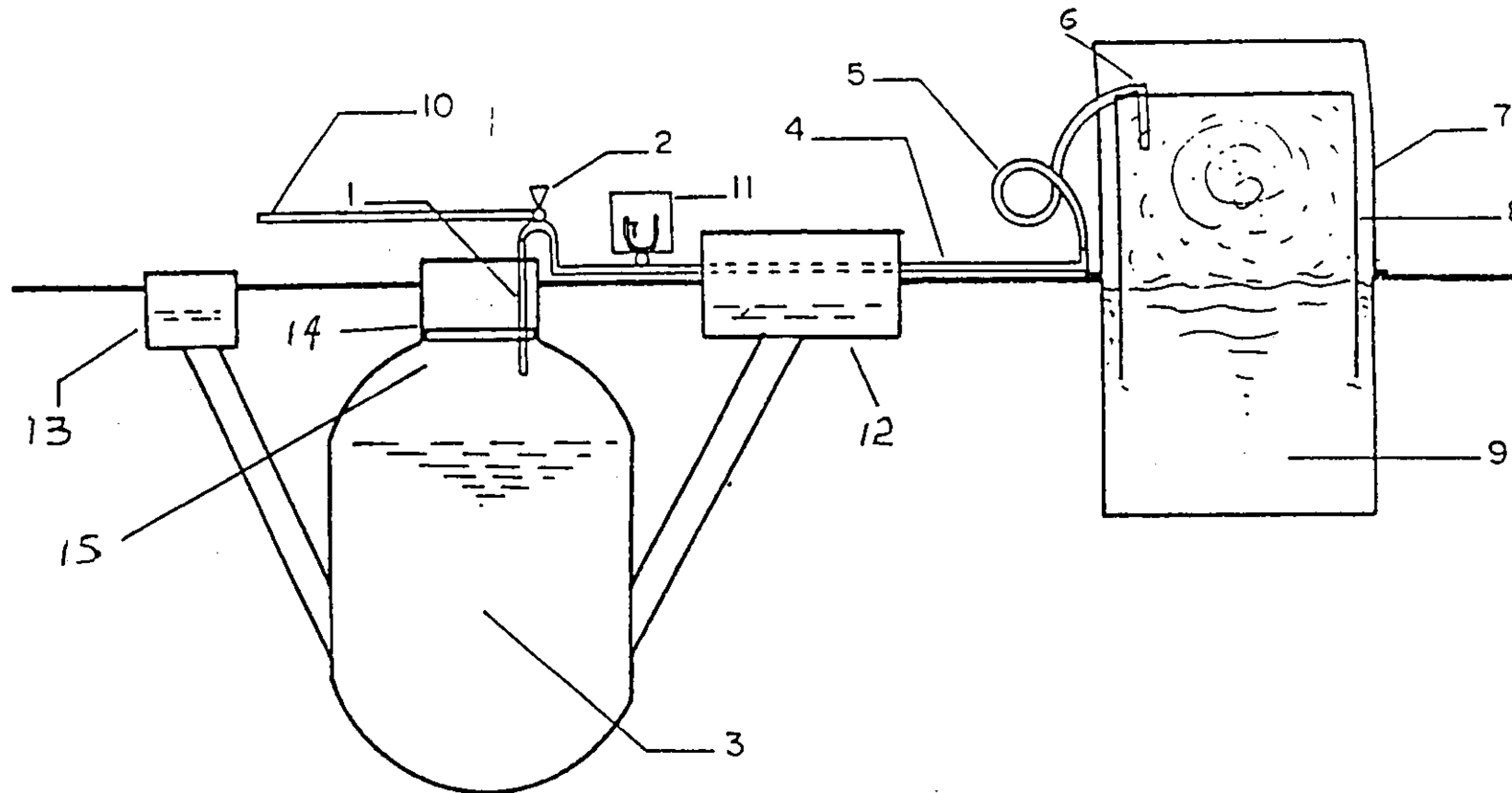


Fig. 4 Esquema operativo del sistema Biodigestor - Gasómetro

1- Tubería que conduce el gas fuera del digestor

2- Llave reguladora del uso del gas.

3- Biodigestor (cuerpo)

4- Tubería que conduce el gas al gasómetro

5- Manguera flexible

6- Tubería de entrada y salida del gasómetro

7- Barras guías del gasómetro.

8- Gasómetro

9- Tanque de agua sobre la cual flota el gasómetro

10- Tubería de distribución del gas

11- Manómetro

12. Cámara de salida del material

13. Tubo de entrada

14. Tapa Hermética

15. Cámara de depósito de gas.

Figura 4. Esquema operativo del Sistema Biodigestor - Gasómetro

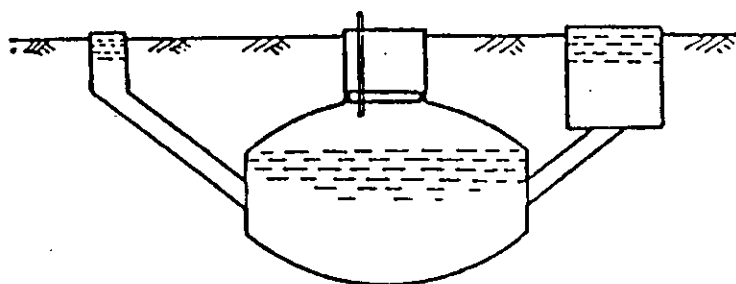


Fig. 5 Digestor de cúpula fija.

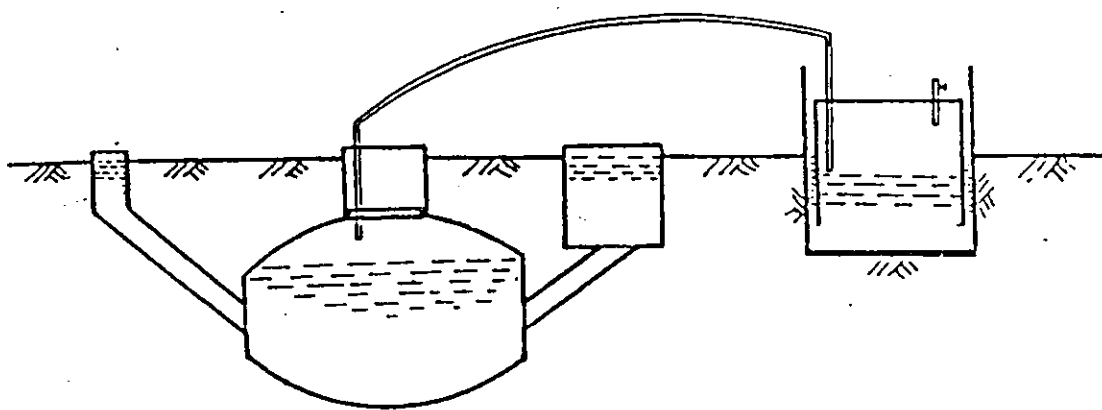


Fig 6 Digestor con depósito flotante de gas.

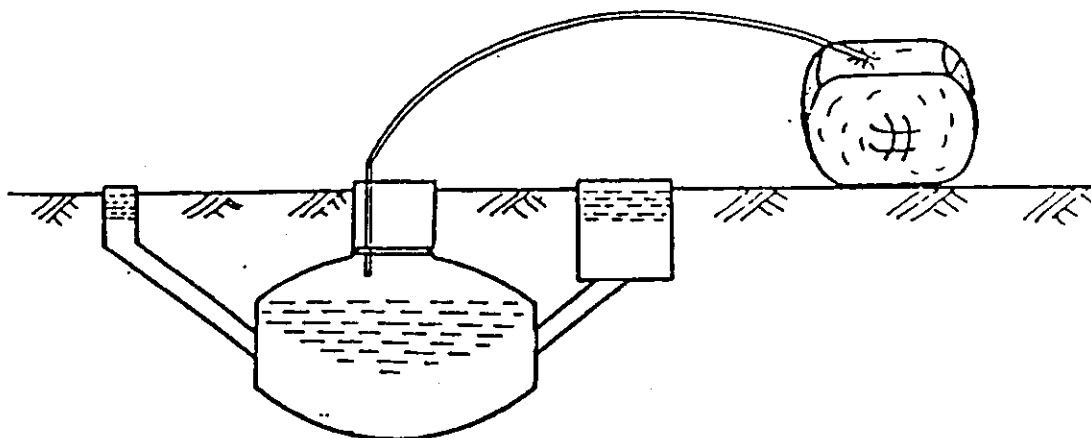


Figura 7. Digestor con gasómetro de Plásticos o caucho en forma de Bolsa

Fuente: Tomado de Juan Moreno 1888

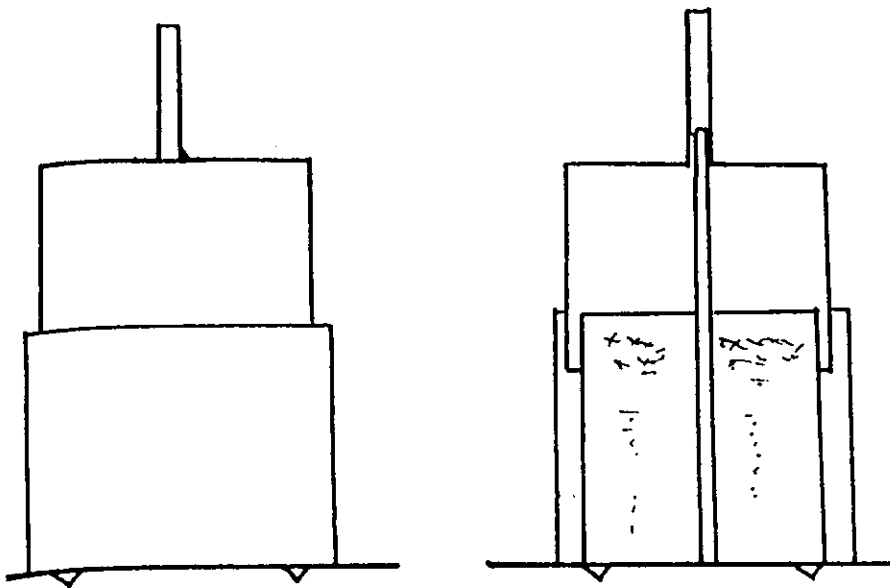


FIGURA N° 8
Digestor de Cúpula Móvil
Fuente: Elaboración propia

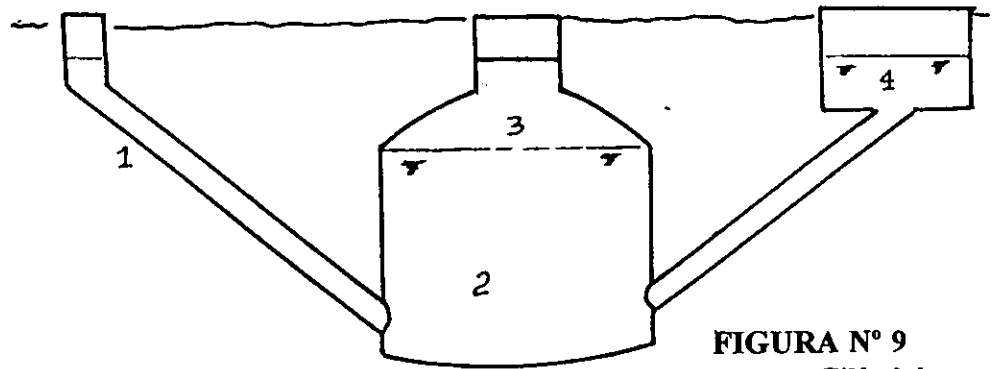


FIGURA N° 9
Digestor Cilíndrico
Fuente: Tomado del Biogas 1986

1. Tubo de entrada de materia
2. Camara de fermentación
3. Camara de deposito de gas
4. Camara de salida

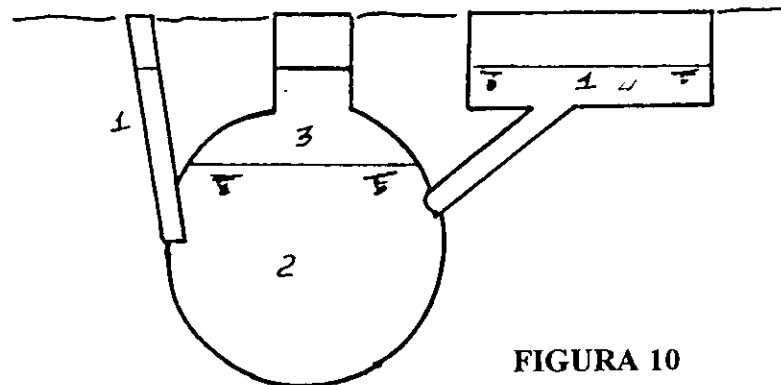


FIGURA 10
Digestor Esférico

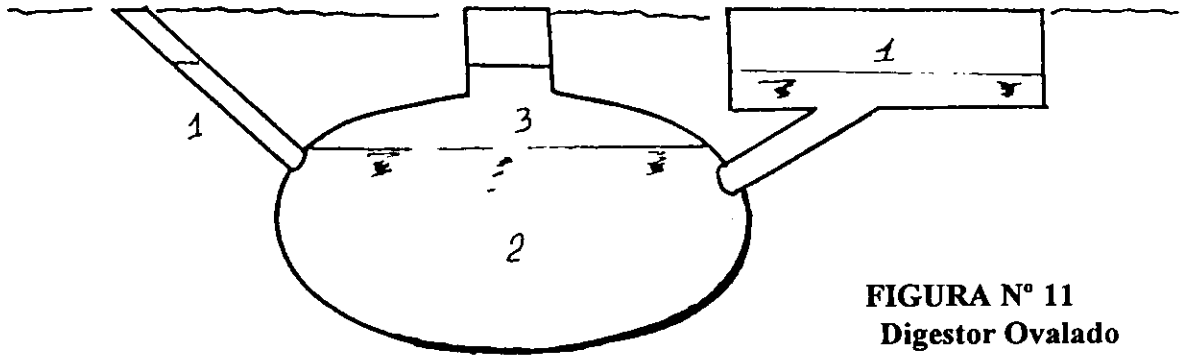


FIGURA N° 11
Digestor Ovalado
Fuente: Tomado del Biogas 1986

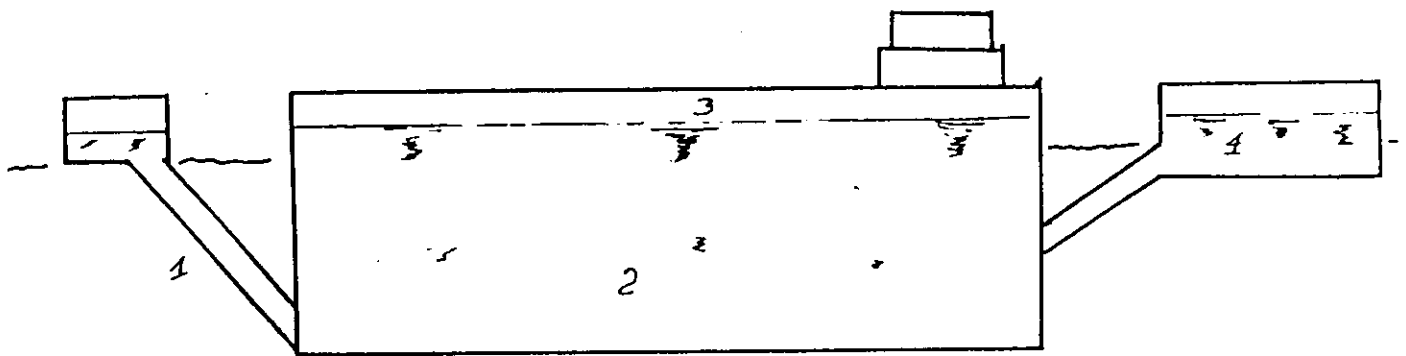


FIGURA N° 12
Digestor Rectangular
Fuente: Elaboración propia

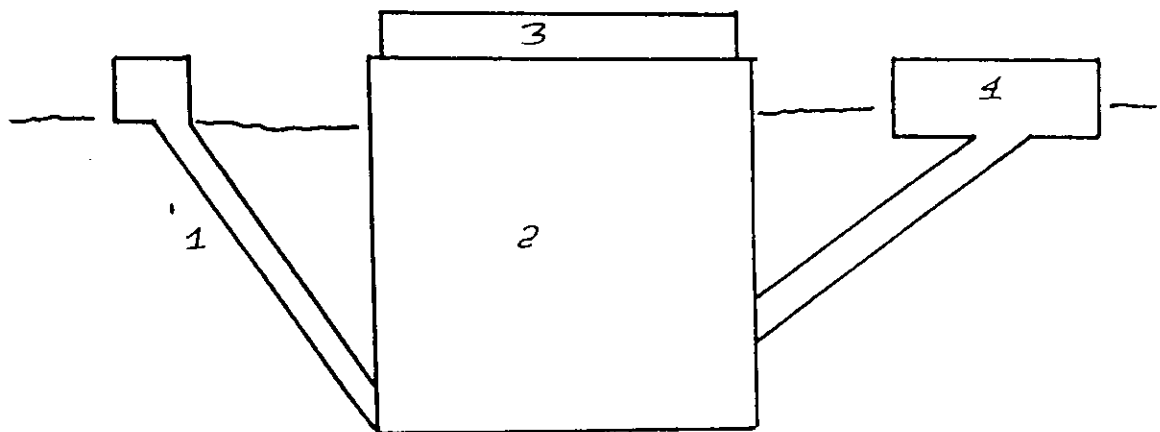


FIGURA N° 13
Digestor Cuadrado
Fuente: Elaboración propia

2.5.1. Modelo Chino. Este modelo está muy difundido en China, es un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrados con cámaras de Hidropresión (ver figura 14).

La estructura puede ser de hormigón, de ladrillos, bloques y adobes, se le puede adicionar el gasómetro. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura, la desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiente del volumen acumulado.

2.5.2. Modelo Indio. Es originario de la India y se ha difundido mucho porque mantiene una presión de trabajo constante, generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado (Por lo que se llama digestor de Cúpula Móvil), la estructura se construye de bloques y concreto, y el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso.

El "Gasómetro" posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no rose con las paredes ni escoree, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado enjaulado.

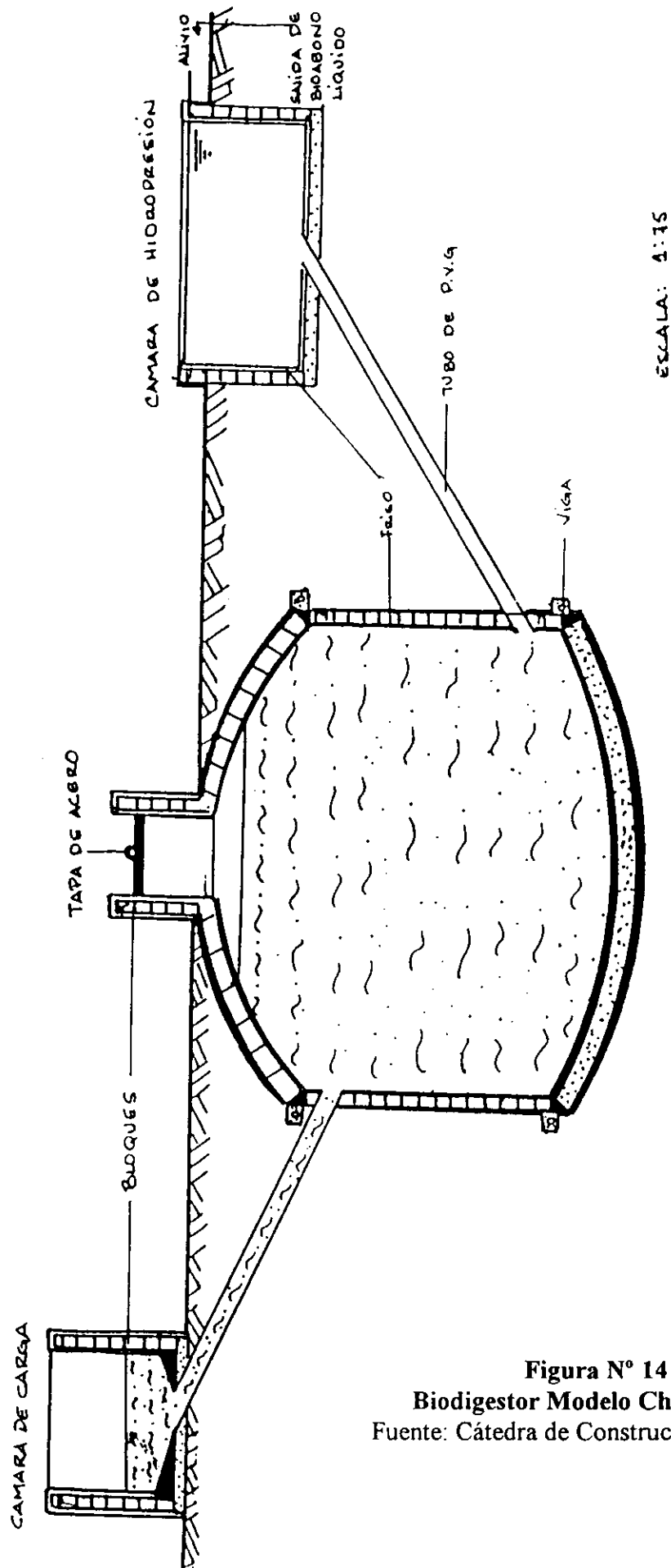
Estos digestores son de alimentación continua, se construyen generalmente enterrados quedando la cúpula sin gas en un nivel cercano a la superficie del terreno. (ver figura 15).

2.5.3. Modelos Horizontales. Se habla de digestores horizontales cuando estos no profundizan en el suelo, son de forma rectangular, aunque pueden ser cuadrados, se caracterizan por ser en su mayoría de concreto armado debido a las presiones que están sometidos. Su uso es generalmente para el saneamiento de descargas cloacales, ya que su conformación alargada garantiza que el efluente al salir del cuerpo del digestor, debido al flujo pistón y al tiempo de retención sean debidamente degradados.

Estos digestores llevan generalmente en la parte superior una pequeña cúpula metálica desmontable que sirve de boca de visita, la presión se controla por el sello de agua, además requieren gasómetro adicional debido a la poca capacidad de almacenamiento de la cúpula y el cuerpo del digestor (Ver figura 16).

2.5.4. Modelos Batch por lotes. Estos digestores se caracterizan porque se cargan una sola vez, tienen una cúpula metálica con sello de agua, la estructura se construye con bloques y concreto reforzado; la desventaja es que se debe construir obligatoriamente un gasómetro y al ser aéreos están afectados por la temperatura ambiental, se utiliza para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales, desechos sólidos orgánicos, el requisito básico es utilizar una buena inoculación, (5 al 10% en base al peso), para garantizar una buena fermentación.

El rendimiento volumétrico de gas es superior a cualquier digestor continuo (debido al contenido de sólidos totales), igualmente el rendimiento de abonos sólidos es elevado; por eso este método permite el tratamiento sanitario de desperdicios orgánicos, el control satisfactorio de toda clase de plagas, así como la proliferación de moscas, así mismo la recuperación eficiente y económico del metano y la retención de humus e ingredientes para uso de fertilizantes (ver figura 17).



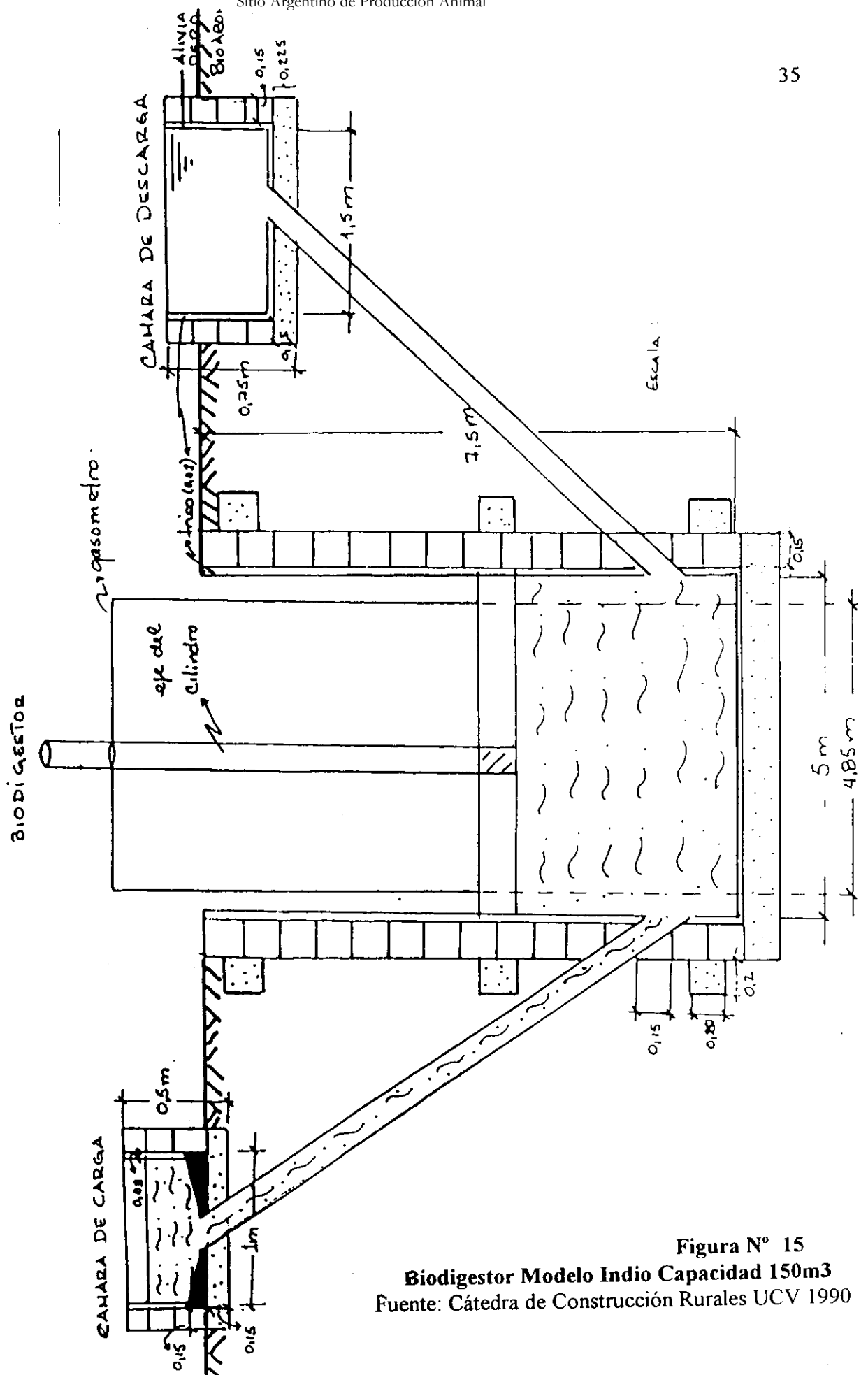


Figura N° 15
Biodigester Modelo Indio Capacidad 150m³
 Fuente: Cátedra de Construcción Rurales UCV 1990

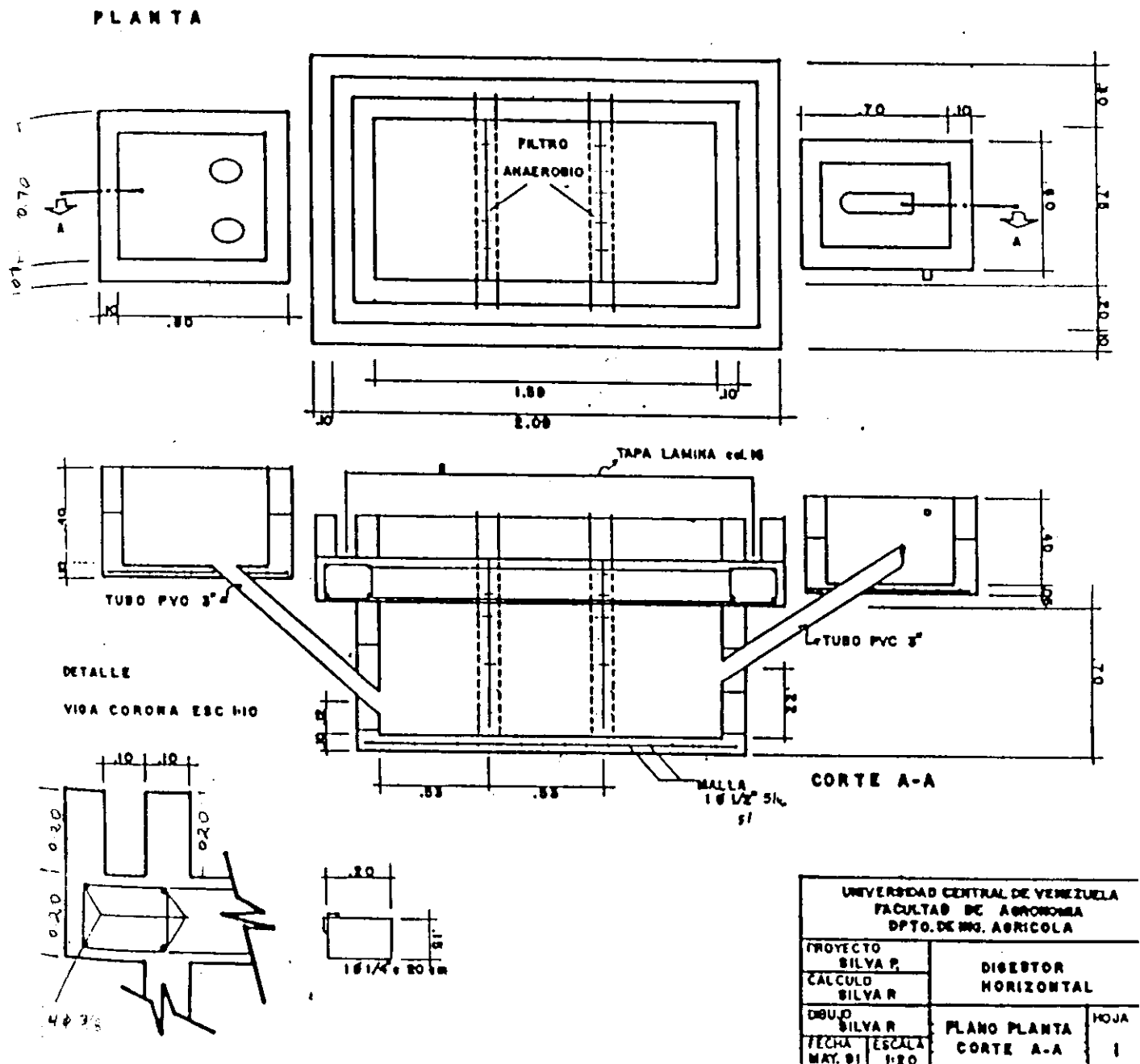


Figura N° 16
Biodigestor Modelo Horizontal
 Fuente: Cátedra de Construcción Rurales UCV 1990

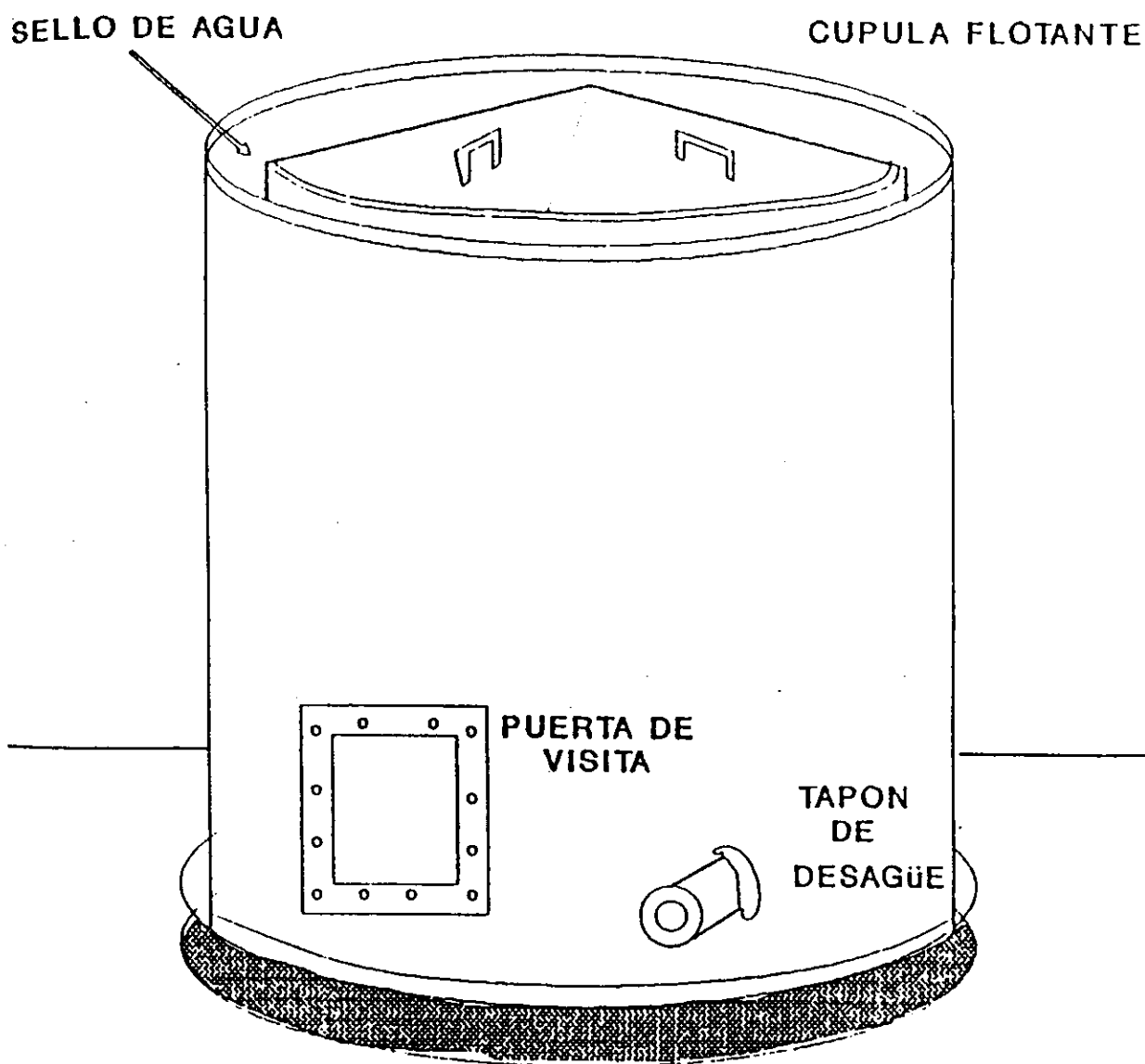


Figura N° 17
Biodigestor Modelo Batch
Fuente: Tayllhardat, 1989

VIII. OBJETIVOS EN EL USO DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica puede utilizarse para los siguientes objetivos.

1. Para el Saneamiento Ambiental
2. Para la producción y aprovechamiento del gas
3. Para la producción de abonos sólidos
4. Para la producción de abonos líquidos
5. Desarrollo o Introducción de la tecnología
6. Con fines conservacionistas

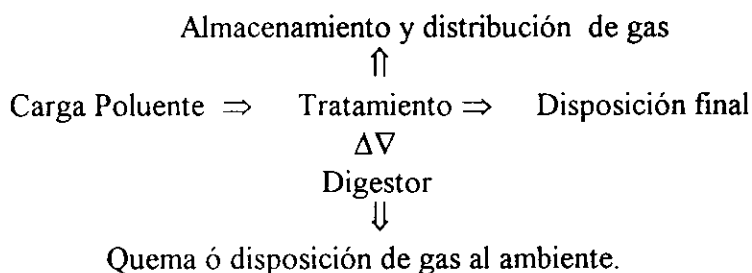
1. Para el Saneamiento Ambiental.

La finalidad básica es lograr reducir los parámetros físico-químico y biológicos de las aguas servidas, domésticas o agropecuarias, después de un período de tiempo en los digestores, que permitan obtener al final un efluente, cuyas características y calidad aseguren una baja o nula contaminación, medida en valores de DBO, DQO bacteriológico y pueden ser dispuestos al medio ambiente sin peligro para los cuerpos de agua receptores finales de ellos.

Se recomienda desde el punto de vista de saneamiento ambiental utilizar los digestores horizontales con un eje de recorrido largo del material, el cual contribuye a que el crudo salga apropiadamente degradado con una DBO muy baja, lo que no ocurre en los digestores redondos, donde por el corto recorrido (diámetro corto) parte del crudo entrante, puede encontrar en el efluente saliente sin haberse degradado, bajando así la eficiencia del sistema; también la experiencia determina que digestores chinos de mucho diámetro son estructuralmente complejos o difíciles de construir, de igual manera digestores indios de gran diámetro, requieren una gran inversión, tanto por la cúpula flotante, como por la excavación, sobre todo cuando se realiza de poco diámetro, requiriendo profundas excavaciones.

En los referente a la capacidad de saneamiento de los digestores se han obtenido en Venezuela, reducciones superior al 90% en los S.V., DBO y DQO, Silva (1991) y la investigación se orienta al diseño y evaluación de sistemas anaeróbicos de alta eficiencia, con la utilización de filtros anaeróbicos, tendientes a reducir el tiempo de retención hidráulico de la materia prima, que tiene que ver con el tamaño de la estructura del digestor; así como se está investigando la reducción y esterilización de huevos de parásitos en las excretas; ya existen resultados sobre la esterilización de huevos de lombrices intestinales y el bacilo de la disentería.

La secuencia que se sigue en el esquema es:



Generalmente se trabaja con influentes de baja concentración de S.T. operados en forma continua.

2. Para la Producción y aprovechamiento del gas

Para lograr una buena producción de gas es conveniente contar con un adecuado material de carga, con una relación de C / N conveniente como se explicó anteriormente (ver capítulos sobre material de carga) pudiéndose estimar casi la producción de gas que se origina; en general los materiales de origen vegetal tienen una producción mayor que las de origen animal, se estima que los pastos rinden un promedio 0,40 m³ / kg. S.T. y las excretas rinden un promedio 0,25 m³/kg S.T. En el cuadro 8 se exponen algunos rendimientos y en el cuadro 9 la velocidad de generación del gas.

**Cuadro 8 Rendimiento de gas con distintas materias en diferentes regiones
(concentración de 6%) (m³ / Kg. TS.)**

	Estiércol de vaca	Estiércol de caballo	Estiércol de cerdo	Excretas humanas	Pasto verde	Paja de arroz	Paja de trigo	Tallo de maíz	Tallo de sorgo
Instituto Hebei de Microbiología	0.154	0.345	0.394	0.432	--	--	--	--	--
Instituto Liaoning de recursos energéticos	0.173	0.243	0.224	--	0.248	0.394	.392	0.365	0.386
Instituto Shangdong de recursos energéticos	0.11	--	0.48	0.47	--	0.47	0.51	0.55	--
Colegio Pedagógico del Sudoeste	0.211	--	0.423	0.332	0.442	0.395	0.42	0.4	--
Instituto Lisoning de Ciencias Agrícolas	0.284	0.286	0.313	--	0.404	0.308	.367	0.454	--
Instituto Changdú de Biogas	0.3	0.2	0.405	0.376	0.408	0.418	.435	--	--

Fuente: Biogas (1986)

Cuadro N°9 Velocidad de generación de gas a partir de materiales de uso común

Días de fermentación	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Tasa de generación (m3 / Kg. TS)
Materiales	Porcentaje del volumen total de gas generado (%)									
Excretas humanas	40.7	81.5	94.1	98.2	98.7	100				0.478
Estiercol de cerdo	46.0	78.1	93.9	97.5	99.1	100				0.405
Estiercol de vaca	34.4	74.6	86.2	92.7	97.3	100				0.300
Pasto verde	--	--	--	98.2	--	100				0.410
Paja de trigo	8.8	30.8	53.7	78.3	88.7	93.2	96.7	98.7	100	0.435

Fuente : Biogas (1986)

La composición del biogas viene dada por el tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. Su composición promedio se resume a continuación (Ver cuadro N 10)

Cuadro 10: Composición Promedio del Biogas

Componentes	% en volumen
Metano (CH ₄)	55 - 65
Dioxido de Carbono (CO ₂)	34 - 45
Nitrógeno (N ₂)	0 - 3
Hidrógeno (H ₂)	0 - 1
Sulfuro de Hidrógeno (S ₂ H)	0 - 1

Fuente: De Gouveia y otros, (1988)

El metano es el componente energético útil y del contenido de éste depende el valor combustible del biogas (Poder calorífico 5000 K. cal / m3 aproximadamente)

Para la producción de gas se sigue la siguiente secuencia:

Producción ⇒ Almacenamiento ⇒ Distribución ⇒ Uso
 Digestor Gasómetro Redes

En lo referente al digestor, los que producen más gas son los reactores batch, luego los semicontínuos y por último los continuos, dependiendo también del material de carga y de los

volúmenes de desechos que se va a tratar; al contrario de los digestores utilizados para el saneamiento, los tiempos de retención hidráulico en este caso son más largos.

2.1. En cuanto a la recolección del gas, se utilizan varios métodos:

2.1.1. Cuando el sistema usa tanques Imhoff (Ver anexo) sale económico utilizar las cámaras de sedimentación para almacenar el gas, se aprovecha el área destinada a la espuma para la liberación y pequeña acumulación del gas, mediante una cubierta adecuada.

2.1.2. Cuando las instalaciones tienen digestores separados se presentan los siguientes casos:

- Digestores de cúpula fija
- Digestores de cúpula flotante

En el primer caso es necesario evitar la formación de vacío parcial, para esto se utiliza lo siguiente:

- Digestores de cúpula fija con mezcla directa de gas a un secundario de cúpula móvil.
- Digestor de cúpula fija con mezcla directa de gas a un gasómetro.

Los digestores de cúpula flotante constituyen el tipo más seguro y conveniente pero su costo es relativamente alto.

2.2. En relación a los Gasómetros. Estos se utilizan para regular la presión del gas, establecen el equilibrio de presión entre la producción y el consumo.

Los gasómetros pueden ser de baja presión y de alta presión.

Los de baja presión son del tipo flotante en donde la presión interna se establece por el propio peso de la estructura flotante. Esta comprensión esta entre 7,5 y 30 cm. de columna de agua, en la parte superior se debe colocar una válvula de seguridad para evitar el vacío y el exceso de presión.

Los gasómetros de alta presión, son tanques esféricos comercialmente conocidos con el nombre de HORTONS PHERE y son operados a presiones entre 1.5 y 3.5 atmósferas, estos requieren compresores y equipos de seguridad automáticos de gran efectividad. Estos gasómetros comprimen el gas en un tercio o un cuarto de su volumen a condiciones normales, ocupando un área menor. Para la construcción del gasómetro se utilizan láminas de acero de 6 mm. a un 1/4 de pulgada de espesor y recubierto con pintura anticorrosiva.

Se recomienda almacenar el volumen medio diario de producción, sin embargo el volumen del gasómetro puede estar entre el 20% y 100% de la producción media diaria.

2.3. Un aspecto que es necesario resaltar, es lo referente a la distribución del gas; en este sentido, para llevar el gas desde donde está almacenado, a los puntos de consumo, se necesita una presión inicial, que varía de 100 cms. a 10 cm. de agua. Cuando se dispone de gasómetro se debe trabajar con presiones bajas, el sistema debe proyectarse con la mayor sencillez evitando codos y accesorios innecesarios, la velocidad para conducir el gas debe estar entre 3-10 m / s, Herning (1975)

2.4. Finalmente, el gas que se genera en el proceso puede tener una amplia gama de aplicación, como por ejemplo en calefacción, funcionamiento de motores (diesel y a gasolina), iluminación, incubadoras de pollos y cerdos recién nacidos, iluminación, refrigeración etc. (en la figura 18-19-20-21-22) mostramos ejemplos de utilización).

3. Para la producción de fertilizantes.

Como subproductos después de la generación del metano y en función a la carga utilizada y al método seguido se pueden obtener dos tipos de abonos, líquidos o sólidos.

3.1. Líquidos provenientes de digestores continuos de alta tasa de carga, con bajo contenido de sólidos totales, (inferior al 12%), el inconveniente de este abono es su comercialización por el estado físico de su presentación.

3.2. Sólidos provenientes de digestores batch ó semicontínuos, estos producen residuos sólidos de buen poder fertilizantes (ver cuadro 11 y 12) y que luego de secados se pueden comercializar sin problemas.

4. Para la introducción de la tecnología.

Se refiere a los digestores que se utilizan para realizar investigaciones, sobre diferentes aspectos del proceso metanogénico ó para demostraciones prácticas, estos digestores experimentales pueden ser del tipo batch, continuos o semicontínuos; normalmente son de poca capacidad, ya que no pasan de 2 m³, esto para permitir su fácil operación y poder simular diversos procesos o tratamientos, sin embargo la capacidad del digestor dependerá de lo que se está estudiando; se ubican bien sean en laboratorios, al aire libre o en ambientes cerrados. Para estudiar ó simular casos reales se utilizan modelos o prototipos contruidos mediante el principio de similitud hidráulica o geometría con la realidad.

5. Con fines conservacionistas.

Se trata de preservar y mejorar el medio ambiente ecológico, protegiendo los bosques, sustituyendo metano por leña, disminuyendo así la presión sobre las masas forestales, que generalmente se observa en el medio rural, debido al déficit de combustible. También ayuda a la conservación del ambiente a tratar en forma adecuada los desechos de origen orgánico que causan contaminación, acumulación de basuras y proliferación de artrópodos, vectores de diferentes enfermedades.

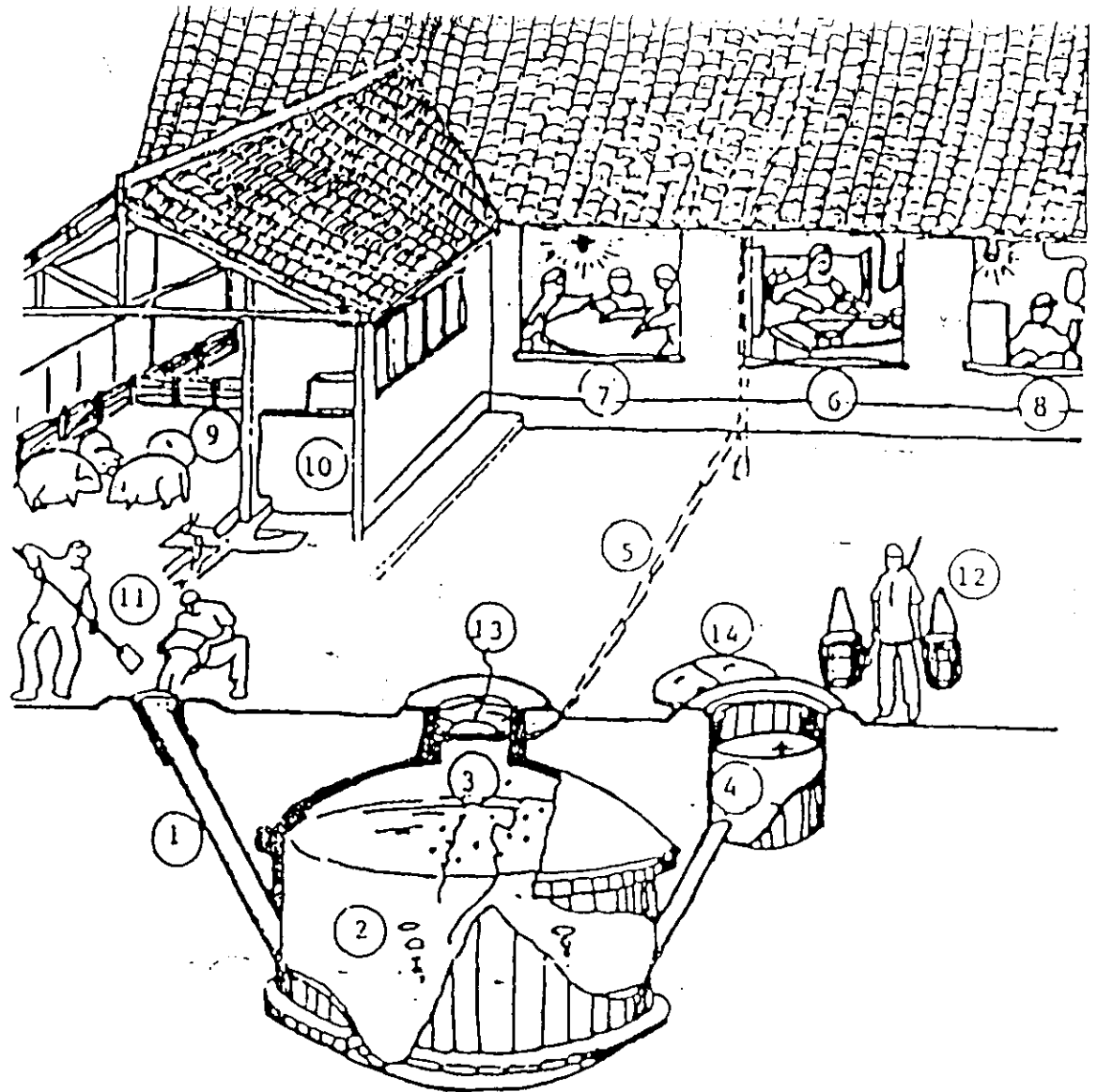
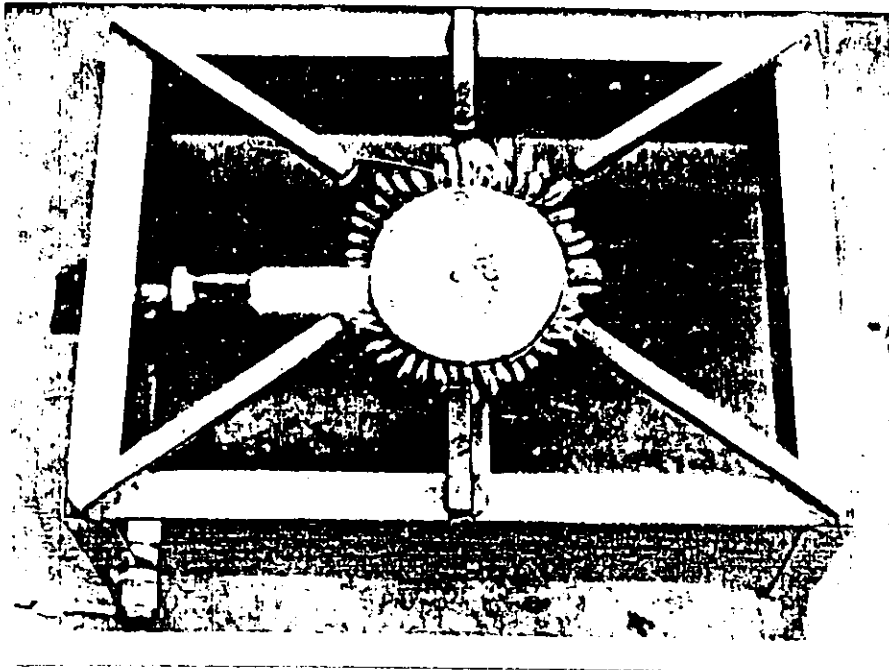


Figura N° 18 Uso del Biogas en el Campo Chino

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Tubo de entrada de materia | 2. Cámara de fermentación |
| 3. Cámara de depósito de gas | 4. Cámara de hidropresión |
| 5. Conducto de gas | 6. Estufa de gas |
| 7. Lámpara de gas | 8. Uso del biogás como fuerza propulsora |
| 9. Porqueriza | 10. Baño (letrina) |
| 11. Entrada de materia | 12. Salida de materia (abono) |
| 13. Tapa hermética con agua | 14. Tapa de la cámara de hidropresión |



**Figura N° 19 Cocina comercial (marca Rivergas) modificada para usarla con Biogas. UCV
Facultad de Agronomía Planta de Biogas**



**Figura N° 20 Una cocina comercial (marca no identificada), y diseñada para gas licuado.
modificada para usarse con biogas. Asentamiento campesino "La Molinera "
San Francisco de Asís. Estado Aragua . Venezuela.**

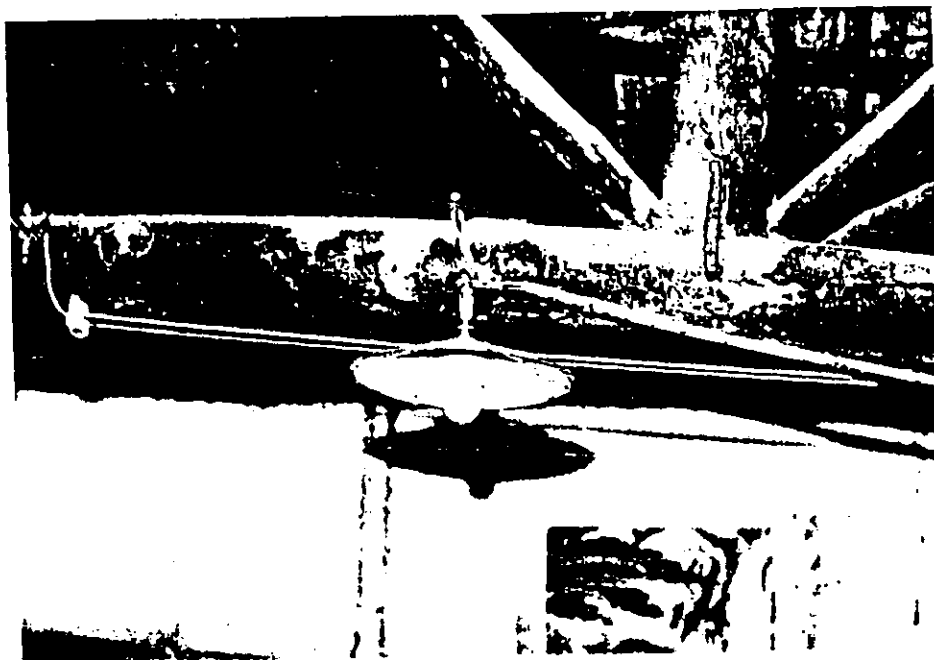


Figura N° 21 Lampara de biogas. Vivienda campesina. Provincia de Sichuan. República Popular de China

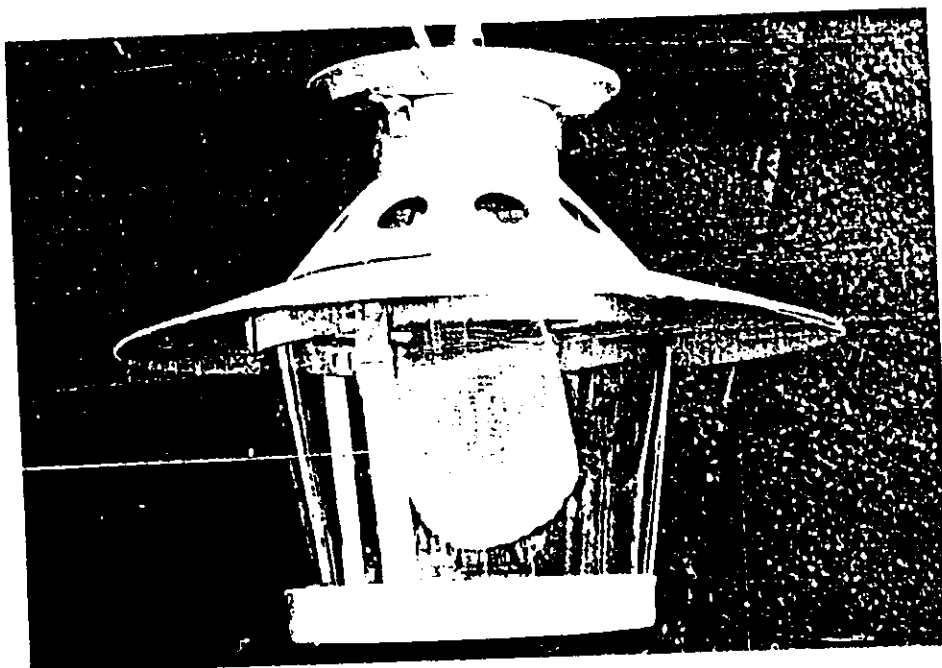


Figura N° 22 Lampara de Biogas construida en los talleres de la Facultad de Agronomia UCV. Maracay. Diseño basado en la lámpara "Tuojiang D 80-3"

Cuadro N 11 Resultado de los análisis de efluentes de un digestor Modelo Chino y del líquido de digestores Batch

Digestor	P (ppm)	% N (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	K (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)
Chino ¹	475	0.039	117.3	200.4	283.8	0.02	0.10	0.10	0.05
Batch ²	450	0.022	314.3	274.2	187.3	0.67	0.10	0.10	0.05
Batch ³	145	0.034	121.5	85.3	186	0.02	0.10	0.10	0.05
Tanque ⁴	437	0.006	67.0	65.8	115.2	0.88	0.10	0.10	0.05

Fuente : Planta de Biogas. UCV Facultad de Agronomía

1. En base a excretas de conejo
2. Pulpa de café, con un 5% de inoculación
3. Pulpa de café, con 1% de inóculo (Hubo que reinocular)
4. Pasto y excretas porcinas (Aprox. seis meses almacenado)

Cuadro N 12 Valores comparativos de los nutrientes presentes en el Subproducto Sólido de digestores Batch provenientes de dos materias primas diferentes.

Materia Prima	% N	% P	% K	% Ca	% Mg	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)
Pasto	1.35	0.94	0.03	0.17	0.02	75.1	10125.32	580.02	795.85
Pulpa de café	1.30	0.12	0.08	0.14	0.03	25.0	8110.72	92.04	299.18

Fuente: Planta de Biogas UCV. Facultad de Agronomía

IX. SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA OPERAR LOS DIGESTORES

Se debe procurar un ambiente estrictamente anaeróbico, ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno y expuestas al aire, aunque sea por un par de minutos morirán; será difícil la digestión en presencia inclusive de rasgos de oxígeno, por ello el digestor debe estar perfectamente sellado.

La secuencia de actividades en la operación de los digestores es la siguiente:

1. Prueba de los nuevos digestores y mantenimiento de los antiguos.

Es necesario examinar detenidamente los nuevos digestores, para comprobar que no tienen fugas ni filtraciones, deben verificarse y probarse antes de ponerse en marcha. Cuando un digestor ya tiene más de un año de uso, se le debe hacer mantenimiento verificando su impermeabilidad y sellado.

2. Preparación de la carga

Sobretudo cuando utilizamos digestores Batch, se debe reunir material suficiente con 20 ó 30 días antes de empezar el proceso, los tallos y otros residuos agrícolas deben picarse en trozos de 2 a 9 cm. antes de alimentar el digestor; si es posible se debe machacar, moler o licuar; estos materiales almacenados por un tiempo, al sacarlos y tratarlos térmicamente favorecen ampliamente la fermentación.

En algunos casos, como las excretas de aves, que contienen un alto contenido de amoníaco, o residuos vegetales poco degradables, como cortezas de árboles o conchas de cereales, se acostumbra tratarlas previamente con sustancias químicas adecuadas (sales).

- En regímenes continuos cuando se trabaja con excretas de animales, humanos, o descargas domésticas, mayormente no requieren preparación, sin embargo es conveniente analizar que no tengan inhibidores del proceso, ni que tampoco tengan muchos elementos en suspensión y que no estén tan concentradas.

3. Verificación de la concentración y de la relación C / N.

Como se dijo, la concentración debe estar entre 5-10% y en relación C / N, cuando se busca producción de gas, debe estar en el rango 20-30:1; para verificar la concentración se puede aplicar la siguiente relación:

$$Mo = \frac{W2}{W1} \times 100$$

Mo = Concentración de sólidos (%)
 en donde W1 = Peso de la muestra
 W2 = Peso de la muestra 105°C

- Cuando la materia prima es compuesta se aplica

$$Mo = \sum \frac{Xi Mi}{\sum Xi} \times 100$$

Mo = Concentración sólidos en la materia prima compuesta
 Xi = Peso de la materia prima
 Mi = Concentración de sólidos para una sola materia prima (%)

- Para calcular la cantidad de agua en la materia prima compuesta se aplica.

$$Mo = \frac{\sum Xi Mi}{\sum Xi + W}$$

W = Peso del agua a agregar

4. Llenado del digestor

- En el tipo batch tenemos:

Se puede mezclar en el suelo, los residuos agrícolas (cortados) con los excrementos, el inoculo (material de arranque) y el agua, luego se uniformiza y se llena el digestor.

Si no fuera posible esta operación se puede cargar el digestor por capas alternadas y no muy gruesas de materias primas e inoculo, tallos en la primera capa, luego excretas y a continuación del inoculo; las capas se deben comprimir.

En algunos casos cuando no hay inoculo, se debe dejar fermentar la materia prima por espacio de 1-2 semanas y luego se introduce al digestor. La mezcla se introduce por la cúpula, aplastando cada capa.

Después de llenado el digestor se deja en compostación de 1-3 días, no debe cerrarse el digestor en esta etapa para que pueda desarrollarse la digestión con bacterias facultativas y aeróbicas.

Cuando la temperatura llega a 40-60°C (a los dos días) se agrega agua por las bocas de toma y salida. Al terminar esta operación se determina el pH de la masa de fermentación (con un papel universal para pH)

El digestor puede sellarse con su cubierta móvil cuando el pH sube a 6, sino alcanza este valor será preciso ajustar la acidez, agregando cenizas, agua amoniacal o incluso cal hasta que llegue a 7 y entonces se puede tapar el digestor.

Después de sellar el digestor deben terminarse de instalar las griferías, conexiones para el gas, asimismo la llave de paso debe estar cerrada.

Recomendación. El inoculo puede ser aguas municipales, lodos del fondo de los lagos, lagunas y estercoleros, los lodos de mataderos y de fábricas de alimentos ofrece un medio favorable para los microbios metanogénicos, también se puede utilizar lodo activo de las alcantarillas y lodo del propio digestor. El inoculo debe ser el 10-15% del volumen que se va a llenar y del 30% cuando proviene del mismo digestor.

Después de cierto tiempo de descomposición, los excrementos humanos, de animales y otras materias primas de fermentación, así como material de carga descompuesto con anterioridad, más un lodo activo, pueden servir como material de arranque.

- En el digestor continuo tenemos: La carga inicial, en este caso se inocula preferiblemente con aguas de lagunas de oxidación; el manejo se limita a un manejo hidráulico del sistema; para llenar el digestor se calcula la carga diaria que viene dada por:

$$\frac{\text{Volumen de carga}}{\text{día}} = \frac{\text{Volumen carga de Fermentación}}{\text{Tiempo de retención}}$$

El tiempo de retención se estima en función de la reducción diaria del sustrato, y es el tiempo que va a estar dentro del reactor la carga diaria que se introduce, antes de su disposición final.

Cada día se introduce la carga diaria por la cámara de entrada, la cual al llegar a la cámara de fermentación va a desplazar, mediante el principio físico de flujo pistón, un volumen de materia estabilizada que va a salir por el tubo de salida.

5. Producción de gas.

A los 2 ó 3 días se empieza a producir gas, pero inicialmente tienen un alto porcentaje de dióxido de carbono, cuando los gases de escape permiten tener una llama continua ya está listo para su uso.

- En el caso del digestor continuo se debe esperar a que el digestor esté en régimen, se considera que está en régimen cuando el volumen de gas que se produce diariamente se ha estabilizado, se considera que está estabilizado cuando existe una variación diaria de + ó - 25%

El gas producido se debe almacenar en un gasómetro ó se debe quemar ó vertirlo al medio ambiente despejado.

6. Duración de la digestión:

En el caso Batch. La producción de gas aumenta al inicio del proceso, hasta alcanzar un máximo y finalmente decrece, cuando gran parte del material ha sido descompuesto; el ciclo dura de 1 a 2 meses.

En el caso semi continuo. Se agregan nuevas materias primas cada 5-6 días, en un volumen que equivale al 4 ó 5% del volumen total.

En el caso continuo. Se debe cargar todos los días; la digestión dura mientras dure el proceso.

7. Descarga.

Antes de descargar el digestor se debe sacar todo el gas remanente que tenga dentro, luego se quita la cubierta para hacer la limpieza.

Se debe dejar el 10% del lodo del fondo ó de 10-30% del efluente como inóculo.

8. Actividades Cotidianas

- Se recomienda llevar un control de la temperatura, para ello se puede utilizar un medidor de resistencia (multitester) u otro método.

- También se debe llevar un control de las presiones generadas en el proceso, medido en cm. de agua a fin de evitar daños al sistema por el exceso de presión.
- Observación frecuente de los dispositivos del sistema para detectar fugas, filtraciones o conexiones dañadas para su reparación inmediata.
- En los digestores batch se debe colocar una lámina de aceite de un (1 cm.) de espesor, para proteger la cubierta contra la corrosión.
- En los digestores experimentales o para investigaciones específicas, se debe llevar un control de la eficiencia del sistema, medido en reducciones de los parámetros como DBO, DQO, S.T, S.V, S.F, coliformes, etc. en función al objetivo que se busca.

X. DISEÑO DE BIODIGESTORES

El diseño de los digestores debe responder tanto al lugar como el grado de aplicación y a la finalidad de la tecnología. Conociendo la región, la localidad, y el lugar donde va a estar ubicada la planta, y en función al material de carga que se dispone y que se va a tratar, o de acuerdo a las necesidades de producción, se seleccionará el sistema de digestión más adecuado, de acuerdo a una secuencia o flujo que permita tener una idea clara del tamaño y forma del digestor necesitado.

El diseño abarca una serie de actividades que van desde la etapa preliminar hasta el cálculo de materiales y gráfica. Se recomienda la siguiente secuencia:

1. Recolección de información de la zona en estudio; información socio-económica y del clima para hacer uso del sistema.

2. Precisar, el objetivo, el régimen de operación y selección del tipo de digestor más factible de realizar en la zona en estudio.

3. Especificaciones para el diseño de Biodigestores.

3.1. Cálculo de la cámara de fermentación.

3.2. Alternativas de la materia prima a utilizar, demanda, tipo etc.

3.3. Filtros anaeróbicos, para el medio rural.

3.4. Volumen de la cámara de carga y descarga.

3.5. Gasómetro.

3.6. Requerimiento de materiales de construcción (infraestructuras).

3.7. Cómputos métricos de las instalaciones, espesor de pisos, número de columnas, altura, diámetro de la cámara de fermentación, etc.

3.8. Representación gráfica y dimensiones del modelo (planos).

1. Datos de la zona en estudio.

Este punto abarca recolectar la siguiente información:

- Sobre la ubicación política de la zona, las características geográficas, las condiciones climáticas de la región.

- Sobre los medios de vida de los habitantes, la tipología familiar, los servicios públicos, las condiciones de la vivienda etc., que existen en el lugar.

- Sobre los servicios sanitarios, las condiciones sanitarias generales de la localidad, el abastecimiento de agua, la disposición de basuras y de excretas, etc.

- Demografía y catastro (N de habitantes).

- Sobre, el suelo y subsuelo, la información referente a las características y calidad del terreno, la altura de la mesa de agua.

- Sobre las descargas y donde y como se descargan las aguas servidas.

- Sobre la producción agrícola y pecuaria más importante de zona y que tenga relación con el diseño.

Esta información es indicativa ya que depende del objetivo de la tecnología y de su ubicación; cuando se trata de Saneamiento se debe buscar o generar datos sobre las características de las aguas servidas, así mismo se deben analizar los cuerpos de aguas receptores de ellas, etc.

2. Para la selección del modelo de digestor más factible a realizar

Es conveniente relacionar el objetivo y el régimen de operación, con los recursos técnicos, económicos y de materiales con que se cuenta en la zona.

3. Especificaciones para el diseño de biodigestores

3.1. Cálculo de la cámara de fermentación

3.1.1. Con fines de saneamiento; se aplica la siguiente relación

$$V.C.F. = V.C.T. + (5 - 10)\% V.C.T.$$

$$V.C.T. = T.R.H. \times V.C.D.$$

V.C.F. = Volumen de la cámara de fermentación.

V.C.T. = Volumen de la carga total

T.R.H. = Tiempo retención hidráulico

V.C.D. = Volumen carga diaria

El V.C.T. Máximo de entrada equivale al 95% del V.C.F.

- T.R.H. representa el tiempo que el efluente está dentro del digestor; Van Helsen y Lettinga (1980), sugieren para la digestión de desechos con una concentración de sólidos totales por encima del 5% un digestor de flujo continuo con un tiempo de retención de 10 días y operando en condiciones mesófilas. Cuando la concentración de sólidos totales es muy baja, (0.75% - 1.5%), se debe mantener una suficiente cantidad de lodos activados dentro del digestor, para esto se utilizan los filtros anaeróbicos ya explicados anteriormente; los filtros aumentan la capacidad degradativa del digestor y permite reducir el T.R.H.; con 5 días de T.R.H. se han conseguido reducciones del contenido de S.T, S.V., D.Q.O, por encima del 90% de su valor, por ello el centro de Biogas de la U.C.V. recomienda T.R.H. de 5 días, usando filtros anaeróbicos.

- V.C.D. Volumen de carga diaria: Para el caso de aguas domésticas el gasto promedio diario, se debe calcular siguiendo el método aplicado para el diseño de cloacas rurales; en donde el gasto promedio diario de las aguas servidas se consideran provenientes de tres fuentes, aguas negras domiciliarias, aguas residuales de industrias e infiltraciones de agua del subsuelo hacia las cloacas; solamente se debe considerar la primera fuente ya que las dos restantes, no son significativas en los asentamientos campesinos. En lo referente al cálculo de aguas negras domiciliarias, se calcula un gasto promedio en función de la población servida por el acueducto y la dotación per cápita día, ésta dotación se multiplicará por el coeficiente 0.85 (se considera que el 85% del agua potable prevista irá a la cloaca una vez utilizada); la resultante no debe ser menor a 125 litros / hab / día neto. Para el cálculo de la población futura se debe calcular por tres métodos diferentes y se tomará el valor promedio (los métodos pueden ser gráficos comparativos, gráficos de tendencias, método aritmético, método geométrico, método de crecimiento de crecientes). La relación entre la población futura y la actual será como mínimo 2,2 de la actual ó 130 personas / Ha; considerando el aporte de aguas negras por persona y por día de 125 Lt. y un gasto máximo calculado de 0,188 Lt / seg. / Ha x 2.5 = 0,47 Lt / seg. / Ha (para 6 habitantes por / casa).

Para el caso de excretas de origen agropecuario, para calcular el gasto promedio diario se hará de la siguiente manera:

* Se estima la producción diaria de excretas de cada animal y se multiplica por el número total.

* Se calcula la cantidad de agua para limpieza que se gasta en lavar los pisos donde están alojados los animales ($\text{Lt} / \text{mt}^2 \times \text{área total}$)

* Se suma otro tipo de agua de desecho que se produce en la explotación.

3.1.2. Con fines de producción de biogás. Los cálculos pueden hacerse partiendo de dos criterios.

- Utilizar todos o una determinada parte de los desechos orgánicos originados y disponibles en un lugar para producir gas de uso variado.

- Producir una cantidad determinada de gas para satisfacer la demanda para unos usos específicos, como cocinar, comer, calefacción, etc.

Ambos casos dependen de la cantidad de materia prima disponible en el lugar.

- Para el cálculo del volumen de la cámara de fermentación se aplican las siguientes relaciones:

$$\text{V.C.F.} = \text{V.C.T.} + 5\% \text{ V.C.T.}$$

$$\text{V.C.T.} = \frac{\text{Demanda de Biogas (mt}^3\text{)}}{\text{Rendimiento de Biogas mt}^3 / \text{kg. Rend. del desecho orgánico}} = \frac{\text{D.B.}}{\text{Rend.}}$$

- D.B. se calcula en base a los requerimientos de combustibles para los equipos, se toma en cuenta los siguientes parámetros:

$$\text{Biogas} = 60\% \text{ metano} + 40\% \text{ Co}_2$$

- * Poder calorífico 4767 K. Cal / m³
- * Eficiencia de combustión 60%
- * Poder calorífico efectivo: 2860 K. Cal / m³

Algunos datos de demanda de biogas en el medio rural:

- * Se estima un consumo diario de gas de 0.2-0.3 m³ per cápita.
- * Para una familia varía 4-10 m³ según número de personas
- * Cocina doméstica ----- 2 m³ / día (familia de 5 a 6 pers.)
- * Calentamiento agua ----- 3 m³ / día (tanque de 100 lt.)
- * Refrigeración alimentos -- 3 m³ / día (familia 5 a 6 pers.)
- * Iluminación 0.1 m³ / día
- * Una máquina de 2 HP 0.9 m³ / hora
- * Para enfriar 90 lt. de leche 10 m³ / día

Para otros equipos ver cuadro N°13

Cuadro N° 13 Demanda de Biogás para diferentes usos

Equipos	Características	Consumo (m ³ /)
Lampara	Equivalente aprox. a 100 W.	0.09
Cocina	Por hornilla Standard	0.40
Horno		0.44
Nevera	1 quemador- 1 inyector	0.15
Motor	ciclo otto	0.45 / HP
Soplete		0.80
Criadora	!500 K calorías, por 1 inyector	0.16
	Hervir agua a 100°C	0.08 / lt
	Electricidad	0.62 / KW

Fuente: FAO - Embrater - Mendoza

- Rendimiento puede ser expresado en m³/kg de sólidos húmedos, sólidos secos, sólidos volátiles ó ácidos volátiles. Se considera un rendimiento aproximado de:

0,25 m³ / m³ para digestores continuos
 0,50 m³ / 1 kg. S.T. para digestores Batch
 0,40 m³ / 1 kg. S.T. para pastos
 0,25 mt³ / kg. S.T. para excretas

* 1 tonelada métrica de residuos produce de 50 a 70 mt³ de gas dependiendo de la materia orgánica y de la cantidad de carbono que posee.

3.2. Para calcular la oferta de materias primas consideramos el cuadro N° 14 y 15.

Cuadro N° 14 Producción de residuos humanos y animales (Estimado)

Productor	Peso (Kg.)	Producción diaria de estiércol (Kg.)	Producción anual de estiércol (Kg.)	Producción anual de estiércol (Kg.)
Cerdo	50	6	15	2.190
Vaca	500	34	34	12.410
Caballo	500	10	15	3.650
Oveja	15	1.5	2	548
Ave	1.5	0.1	0	36.5
Humanos	50	0.5	1	182.5

Fuente : Biogas. (1986)

Cuadro N° 15 Producción de Biogas a partir de desechos de animales y Humanos

Materia prima	Biogas (M / Kg. SV)	Tiempo de retención (días)	Sólidos volátiles (%)
Estiércol bovino	0.0158	35	4
Estiércol porcino	0.0315	35	6
Estiércol ave	0.05652	35	9
Estiércol ovino	0.0245	35	5
Estiércol humano	0.02303	35	7
Estiércol equino	0.00852	35	3

Fuente: Cátedra de construcciones rurales (FAGRO, 1987)

Estos nos van a ser útiles para poder estimar el número de animales requeridos para una producción de Biogás determinada, para esto aplicamos la siguiente relación

$$\text{número de animales} = \frac{\text{Demanda de gas}}{\frac{\text{Rendimiento en biogas del desecho orgánico}}{\text{Rendimiento de estiércol producido por unidad de tipo animal / animal}}}$$

mt³ / kg.

- Algunos ejemplos para el cálculo del volumen de la cámara de fermentación.

* Para digestores continuos. Ejemplo para 8 mt³ de demanda diarias que requiere una familia.

$$\text{V.C.F.} = \frac{\text{demanda de gas}}{\text{rendimiento}} = \frac{8 \text{ m}^3}{0.25 \text{ m}^3 / \text{m}^3} = 32 \text{ m}^3$$

* Para digestores batch en función a la carga orgánica y del tiempo de retención. Ejemplo para vacunos

$$\text{V.C.F.} = \frac{\text{T. RH. X A'}}{1000} \quad \text{m}^3$$

A' = Carga orgánica

$$A' = \text{V.C.D.} + \text{Agua en Kg. / día}$$

$$A' \times \text{T. RH.} = \text{Carga total}$$

1/1000 = Factor de conversión de carga a volumen para concentración de sólidos 7 - 9%, m³/kg.

Es conveniente tener en cuenta que la dilución de agua se hace en proporción adecuada para cada tipo de desecho, según la humedad de este, con el objetivo de conseguir concentraciones de 7-9% en pesos de sólidos secos. Para el ejemplo de diseño tomamos las siguientes estimaciones o parámetros.

- Excretas de vacuno humedad 80 - 90% dilución 1:1
(1 kg. de excretas con 1 de agua)
- Dilución 1:1 en un m^3 (0.5 m^3 excretas, 0.5 m^3 de agua).
- Por cada m^3 de excretas hay 800 Kg. de la misma para vacunos $\frac{(800 \text{ Kg. excretas})}{\text{m}^3 \text{ excretas}}$
- 25% de sólidos volátiles en base a excretas frescas.
- De 25-60% de aprovechamiento de sólidos.
- Tiempo de retención de 35 días
- Se considera que hay 0.35 m^3 de Biogas por cada Kg. de sólidos volátiles (0,35 m^3 biogas / Kg. S.V.)
- La carga va al 8% de S.V. lo que equivale al 10% S.T. para un metro cúbico de excretas de vacuno tendremos:

$$0,5 \text{ m}^3 \text{ exc.} \times \frac{800 \text{ Kg. excretas}}{\text{m}^3 \text{ exc.}} = 400 \text{ Kg. excretas}$$

$$400 \text{ Kg. exc.} \times 0.25 \frac{\text{Kg. S.V.}}{\text{Kg. exc.}} = 100 \text{ Kg. S.V.}$$

$$100 \text{ Kg. S.V.} \times 0.43 \text{ (Eficiencia)} = 43 \text{ Kg. S.V.}$$

$$43 \text{ Kg. S.V.} \times 0.35 \frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{Kg. SV}} = 15,05 \text{ m}^3 \text{ biogas}$$

$$\frac{15,05 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{35 \text{ días}} = 0,43 \frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ dig.} \times \text{día}}$$

$$0,4 \text{ m}^3 \text{ biogas} / \text{m}^3 \text{ dig.} \times \text{día}$$

Con este resultado y el valor estimado de la demanda de biogas, se puede obtener el volumen del digester a diseñar. (Juan Alberto Moreno L.)

Veamos otro ejemplo:

Supongamos que tenemos una carga con 22% de S.T. tiempo de fermentación = 2 meses (60 días)

Demanda de Biogas 8 mt³ / día para una familia

Volumen de gas requerido: 8 x 60 = 480 mt³

Sólidos totales = $\frac{\text{Volumen gas requerido}}{\text{rendimiento}} = \frac{480 \text{ mt}^3}{0.05 \text{ mt}^3 / \text{Kg. ST}} = 960 \text{ kg. S.T.}$

Materia Prima = $\frac{960 \text{ kg. S.T.}}{0.2} = 4.800 \text{ kg. Mat}$

Volumen de materia prima seca = $\frac{4800 \text{ Kg. mat}}{200} = 24 \text{ mt}^3$

Criterios para el N° de digestores

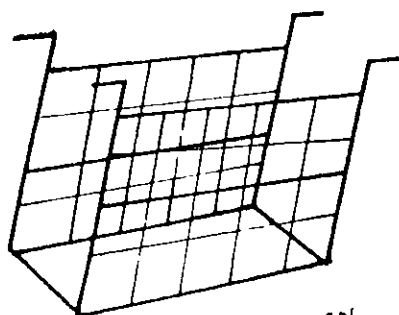
Mínima instalación para una familia, es un t aunque digestor con capacidad de 4-5 mt³ y un gasómetro de 2 m³ de capacidad.

Se aconseja 2 ó mas digestores par que no exista interrupciones en el suministro de gas.

Tamaño ideal 2 x 2 x 2 = 8 mt³

En el ejemplo anterior serían 3 digestores de 8 mt³ y un gasómetro de 14 mt³ de capacidad (se almacena el 50% de la producción de gas diario)

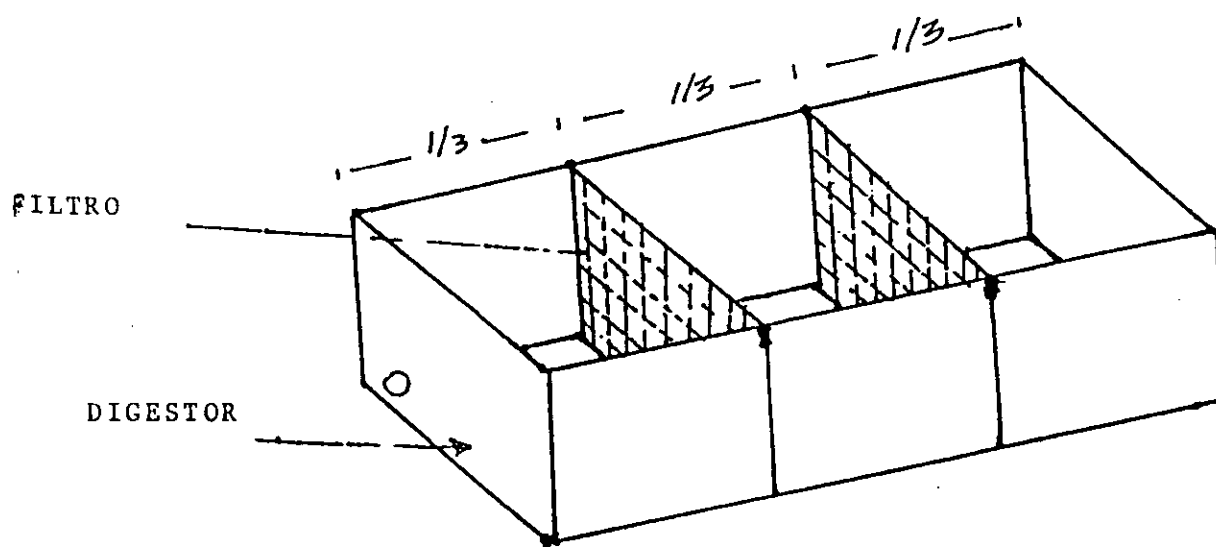
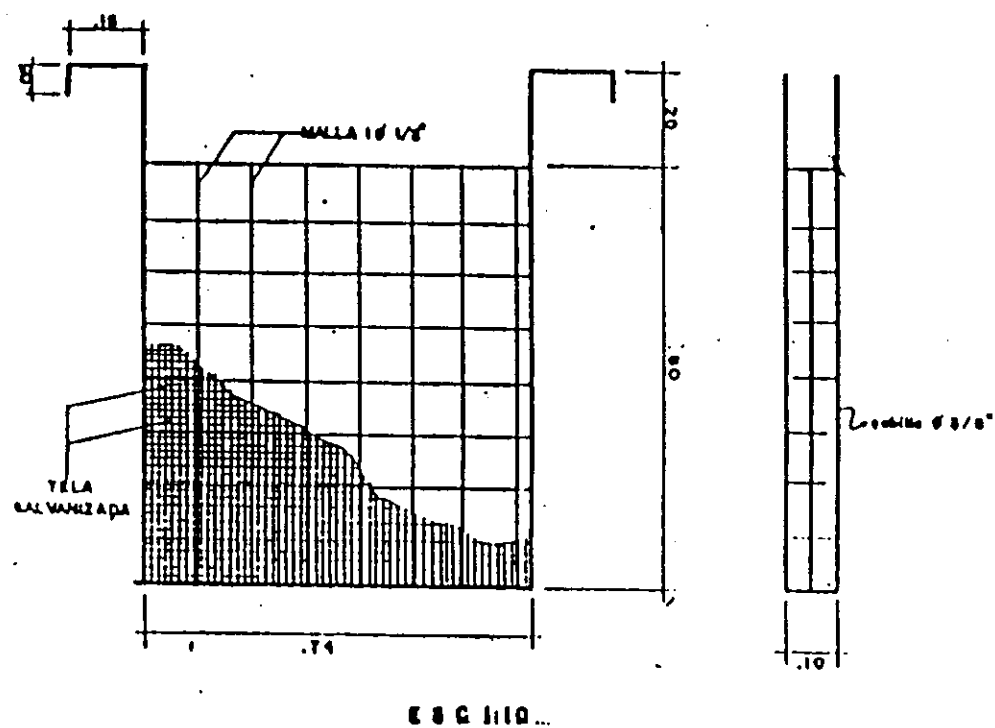
3.3. Filtro anaeróbico, utilizado en el centro de Biogas de la U.C.V; tiene las siguientes características: se utiliza en digestores continuos y básicamente con fines de saneamiento; se estima que ocupan un volumen aproximado del 10% del volumen de la cámara de fermentación; este volumen se divide en dos filtros que se ubican a un tercio y a dos tercios de la entrada respectivamente, estos filtros ocupan todo el ancho del digestor.



5 % de volumen
del digestor

cesta armada con cabillas de 1/2" y malla metálica (trucson) recubierta con tela galvanizada, se rellena con Pellet de arcilla cocida (agregados-livianos) alivien de diámetro entre 8-12 mm., con una densidad de 450 kg. / mt³. (Ver Gráfico N 23)

Figura N° 23 Filtro Anaerobio



Fuente: Elaboración propia

3.4. Volumen de la cámara de carga y descarga

Para el cálculo de la cámara de entrada y salida tomamos en cuenta lo siguiente:

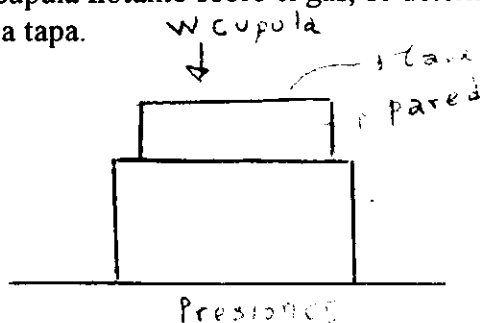
- La cámara de carga está compuesta por un tubo derecho que se coloca en forma oblicua, lo que facilita su construcción, ahorra mano de obra y materiales, asegura una entrada expedita y facilita la agitación del líquido.

- La cámara de descarga es por donde se evacuan los materiales de fermentación. Los biogas producido en el digestor presiona el líquido fermentado hacia una pileta de salida para un almacenamiento. Cuando se usa el biogas el material líquido vuelve al digestor por la disminución de la presión del gas dentro de la cámara, la pileta de salida también se llama cámara hidráulica o de hidropresión. La cámara debe ir cubierta con una plancha para mejorar las condiciones sanitarias (en la figura 24 se muestra la cámara de carga y descarga).

3.5. El gasómetro. Como se explicó es muy conveniente utilizarlo como complemento en el sistema de biodigestión, ya que garantiza presiones estables ó constantes de trabajo y le confiere al sistema una mayor autonomía en lo referente al almacenamiento de gas a baja presión y el gas no necesita de tratamientos especiales.

Estos gasómetros están conformados de dos partes, de una parte inferior compuesta de un tanque de agua, y otra superior, el recipiente de gas, que es una cubierta flotante provista de un sello para evitar el escape de gas y la admisión de aire; pueden estar contruidos de concreto reforzado, de mampostería, de metal o de fibra de vidrio o de plástico; la forma puede ser circular o cuadrado. El peso de la cubierta flotante del gasómetro mantiene la presión necesaria del gas, presión que varía entre 5-20 cm. de columna de agua; ésta cubierta se mueve hacia arriba o hacia abajo de acuerdo a la cantidad de gas que reciba del digestor; la forma más conveniente es la circular (Ver figura N 25). La cubierta está hecha usualmente de láminas de acero de 2 a 3 mm. de espesor; para guiar la cubierta flotante en su movimiento vertical se coloca, o un sistema de rodillos y un perfil de V de acero que guía la cubierta, o en su defecto se coloca un tubo en el entro sujeto al fondo (Ver figura N 25); se acostumbre colocar una o más aberturas que distan de cinco a 7 centímetros del fondo de la cubierta, a través de los cuales el exceso de gas puede escapar cuando el recipiente se aproxime al máximo de su desplazamiento.

Debido a que el peso de la cubierta flotante mantiene baja presión al gas, si la cubierta es muy pesada se hace necesario instalar, un contrapeso para reducir la excesiva presión del gas en el punto de uso, si por el contrario la cubierta es muy liviana debe preverse de pesos adicionales para dar una presión al gas de 10-20 gramos / cm² (4 a 8 pulgadas). Para calcular la presión de la cúpula flotante sobre el gas, se determina el peso de la cúpula flotante y se divide entre el área de la tapa.



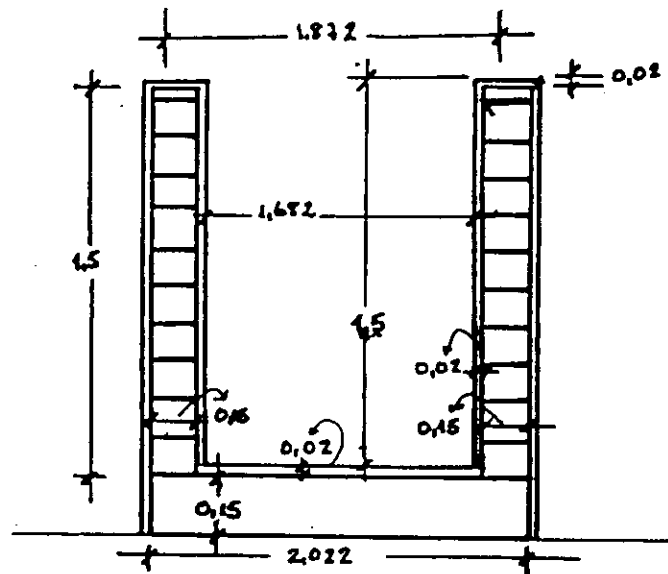
Volumen material = (área tapa + área pared) x grosor.

Peso = volumen material x P.E. de material.

Presión de la cúpula = $\frac{\text{Peso}}{\text{Área tapa}}$

Figura N° 24 Cámara de carga y descarga
 Fuente: Cátedra de Construcción Rurales UCV 1990

DETALLE DE LA CÁMARA DE CARGA



DETALLE DE LA CÁMARA DE HIDROPRESIÓN

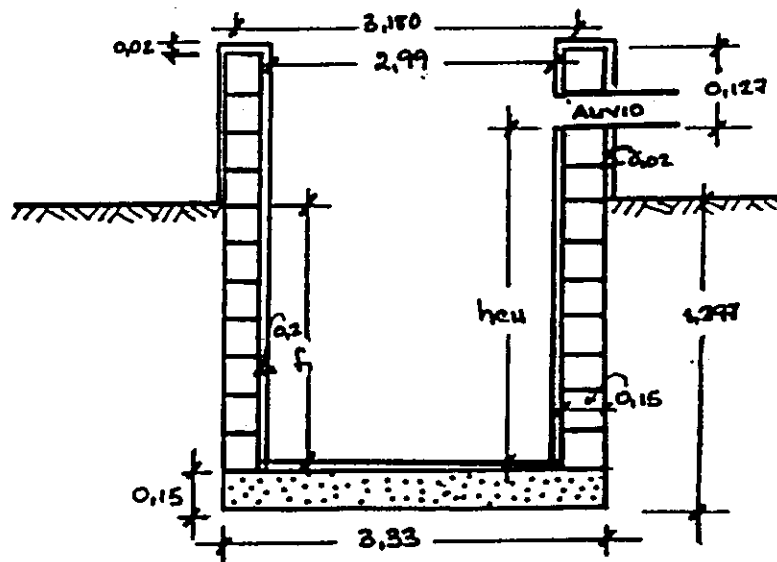
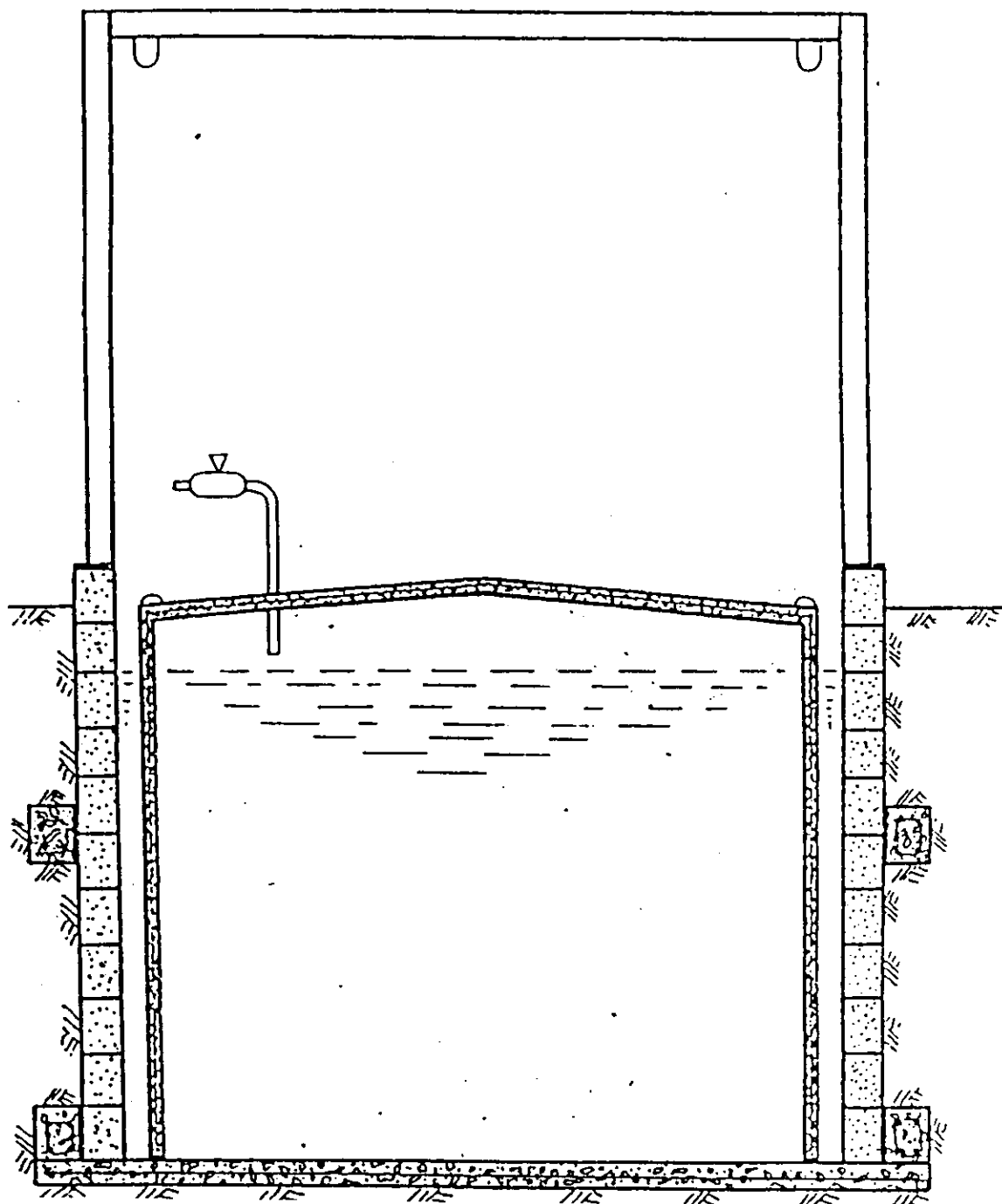
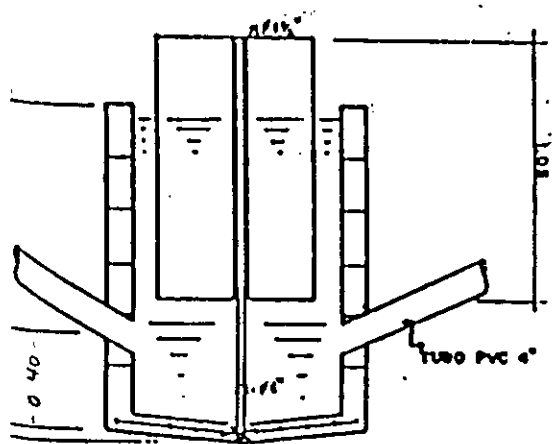


Figura N° 25 Gasometro instalado

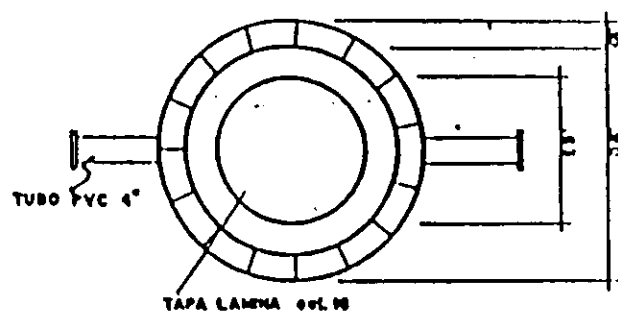


Gasometro

Sección



Planta



También el gasómetro puede ser del tipo seco, (figura 27) que el tanque de concreto o mampostería de la parte inferior de él, está sin agua interna, debido a que también tiene gas; en este caso para evitar la fuga del gas se utiliza un sello de sistema bach (Ver figura 28); este sistema se utiliza generalmente cuando el gasómetro va sobre el digestor. Los gasómetros se pueden ubicar encima de los digestores o a un lado de ellos.

Si son muy grandes se recomienda construir dos que sumen la capacidad del primero.

3.6. Requerimiento de materiales y cálculos métricos. Para determinar la cantidad de materiales que requiere los digestores es necesario determinar sus principales formas geométricas para que conjuntamente con las cargas que soporta realizar el cálculo estructural.

- Forma de las estructuras.

Cúpula o techo esférica, rectangular, cuadrada, circular.

Pared..... cilíndrica, rectangular, cuadrada.

Piso o fondo..... esférica invertida, plana rectangular, circular.

- Cálculo de superficie, incluye las superficies internas medias y externas del digestor: la cantidad de materiales necesarios pueden calcularse según las superficies mencionadas.

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 = \text{Área (techo + pared + piso)}$$

- Cálculo de volumen. Área base x altura (En el Chino será

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 = V. \text{ Cúpula} + V. \text{ digestor} + V. \text{ Piso}$$

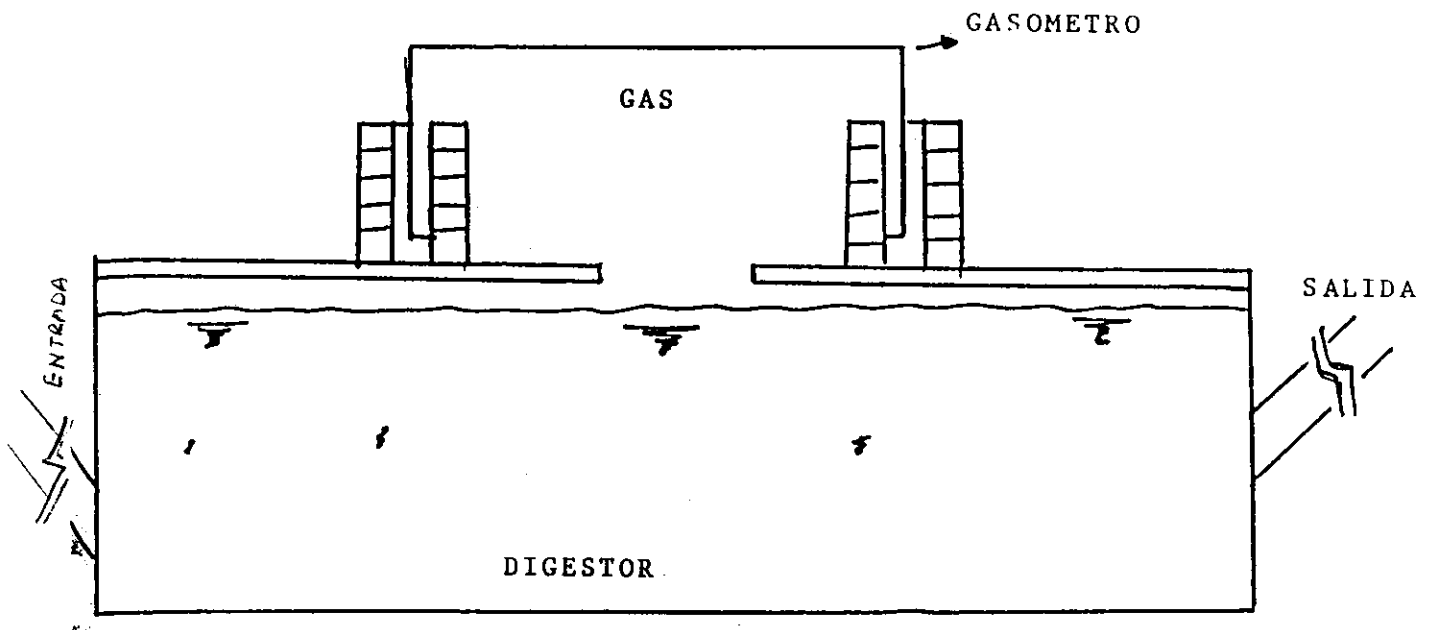
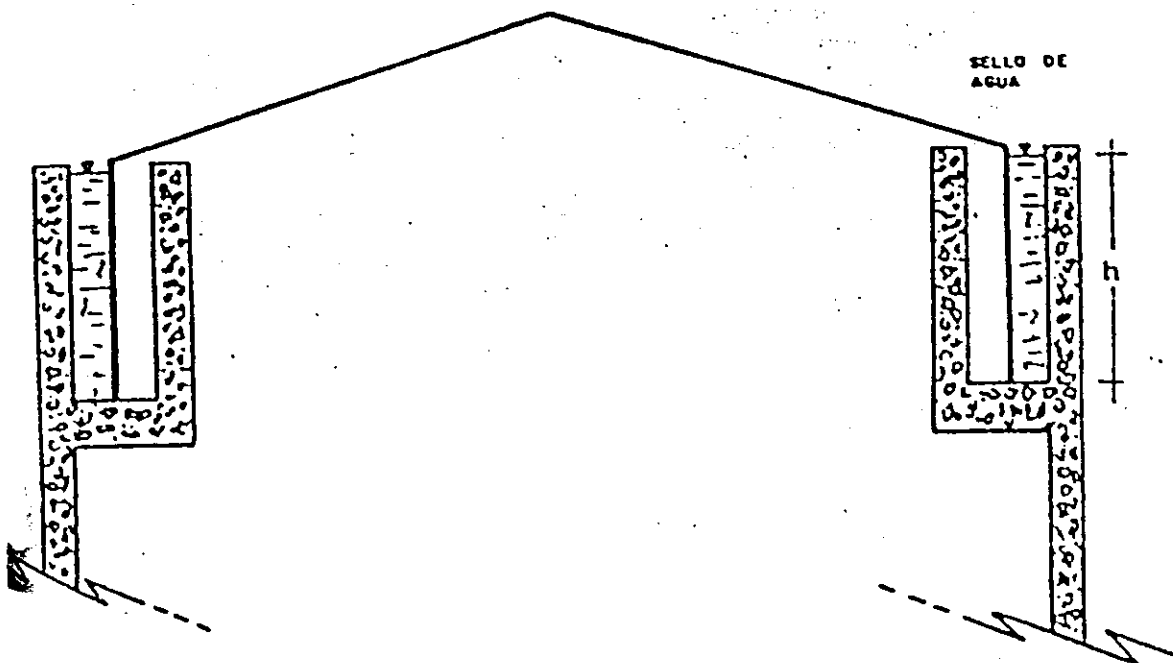
- Cálculo de las cargas, deben definirse todas las cargas que actúan sobre el digestor, estas son:

Techo < Peso de la cúpula conociendo, materiales espesor, área
 Presión del gas
 Cargas vivas si está enterrado

Pared < Presión lateral de la tierra
 Presión vertical del gas sobre la pared
 Carga vertical; tiene de la cúpula superior
 Carga muerta; peso de la pared

Piso < Presión del gas
 Presión hidráulica del material líquido
 Peso de la cúpula inferior
 Reacción de la base

Figura N° 27 Gasometro Seco

Figura N° 28 El sello de agua, detalle de la inserción de la cupula
h = Presión máxima

Por ejemplo, en el diseño de los digestores más usados, para cálculo del área, del volumen y el requerimiento de materiales, deben tomarse en cuenta los siguientes Parámetros:

Parámetro	Modelo Indio	Modelo Olade	Modelo Chino	Modelo Horizontal
Diámetro del digestor	x	x	x	-
Altura del digestor	x	x	x	-
Altura del piso del digestor	x	x	x	x
Dimensión Viga Base	x	x	x	x
Dimensión Viga Corona	x	x	x	x
Profundidad de excavación	x	x	x	-
Producción de Biogas diaria	x	x	x	x
Diámetro cúpula	-	x	-	-
Altura cúpula	-	x	-	-
Peso cúpula	-	x	-	-

Cámara de fermentación	Modelo Indio	Modelo Olade	Modelo Chino	Modelo Horizontal
Largo	x	x	-	x
Ancho	x	x	-	x
Altura	x	x	-	x
Capacidad	x	x	x	x

Gasómetro	Modelo Indio	Modelo Olade	Modelo Chino	Modelo Horizontal
Diámetro de la cúpula		x	x	
Altura del gasómetro		x	x	
Peso de la cúpula		x	x	
Tolerancia a ambos lados del digestor		x	x	
Presión kg / m2		x	x	
Presión cm / cargas		x	x	
Presión en atmósfera		x	x	

Cámara de Carga	Modelo Indio	Modelo Olade	Modelo Chino	Modelo Horizontal
Largo de la Cámara	x	x	x	x
Ancho de la cámara	x	x	x	x
Altura	x	x	x	x
Capacidad	x	x	x	x

Requerimientos de materiales

Volumen de Concreto (m³)

Paredes del digestor

Viga base

Viga corona

Cámara de carga

Cámara de descarga

Cámara de fermentación

Piso gasómetro

Piso del digestor

TOTAL: Volumen concreto requerido

Volumen de Friso (m³)

Base de digestor

Paredes del digestor

TOTAL : Friso requerido

Acero requerido

Cúpula

Tapa metálica digestor

Cúpula gasómetro

Malla (m²)

Cabillas (mt²)

Tuberías

Carga

Descarga

Tubo Hierro eje central

Volumen ceniza (mt³)

Volumen material refractario

Volumen piedra

Algunas apreciaciones sobre los materiales de construcción utilizados en la construcción de digestores rurales.

La resistencia del concreto a los 28 días debe ser mayor a 200 Kg. / cm²

La cantidad de materiales por metro cúbico de concreto, para una resistencia mayor de 300 kg. / cm² es la siguiente:

Piedra 1000 Kg., arena 600 kg., cemento 350 kg.

Impermeabilizante que se usa en el acabado de los digestores es el Sika (Second 4 hidrófugo) en la proporción de 1 lt. por saco de cemento.

Los bloques de cemento que se utilizan son los de 10 cm. - 15 cm., (14 bloques por m² de pared).

El friso tiene un grosor de 0.03 mt.

Los pisos tienen una altura de 0.10-20 mt y van reforzadas con malla trukson o cabillas de 1/4 de pulgada.

Lámina para la cúpula es de calibre 16 (1.56 mm.)

Tolerancia a ambos lados de la cúpula con la base del digestor es de 0.10 mt.

La viga corona puede ser de 20x20 (cm²) y la viga base puede ser de 40x20 (cm²).

Cámara de carga puede ser de 10x10 (cm²), la cámara de descarga puede ser de 20x20 (cm²), unido a la cámara de fermentación con tubería P.C.V. de 4" de diámetro.

Costo de materiales

Total mt³ de concreto en:

- Piedra picada -----	costo
- Arena -----	costo
- Cemento total sacos -----	costo
Friso, total sacos -----	costo
Acero, total mt ² -----	costo
Cabillas, total mt ² -----	costo
Malla, total mt ² -----	costo
Tubos, total mt ² -----	costo
Bloques, total mt ² -----	costo
Ceniza, total mt ² -----	costo

Total costo

XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La Digestión Anaeróbica es conocida desde la antigüedad (en 1884 Luis Pasteur ya hablaba de ella), no obstante es a partir de la crisis energética que se extendió su uso para producir gas, sin embargo últimamente se está utilizando para el tratamiento de excretas domésticas y agropecuarias, con excelentes resultados.

- A pesar de la importancia de esta tecnología, en el mejoramiento de las condiciones sanitarias de la población, la preservación del medio ambiente y la producción de gas, en nuestros países muy poco se conoce de ella.

- Los pocos estudios que se han realizado en Venezuela corresponden a tesis de grados existentes fundamentalmente en la U.C.V. de Maracay.

- Las condiciones climáticas tropicales, favorecen grandemente para la implementación de esta tecnología, debido a que a mayor temperatura, se produce una mayor degradación de la materia orgánica y disminuye el tamaño de las estructuras que requiere el sistema.

- El gas metano obtenido en el proceso de fermentación es de alto poder calorífico, por lo cual es de gran utilidad para satisfacer los requerimientos de energía a nivel doméstico y a nivel de la unidad de producción.

- La familia campesina se podría beneficiar con esta tecnología tanto, por la producción de gas, como por la obtención de fertilizantes, para uso agrícola.

- Para la construcción de los biodigestores se puede utilizar, concreto, bloques concreto estructural, mampostería. A pesar de que su construcción es muy simple es conveniente tomar precauciones, para evitar daños por la fuga o sobre presión de los gases producidos.

- El digestor continuo es el que se recomienda desde el punto de vista del Saneamiento, ya que su largo recorrido, permite que el efluente salga bien degradado; en cambio para la producción de gas se recomienda el modelo tipo batch.

- El tiempo de retención hidráulico y el volumen de carga diario, determinan el tamaño de la cámara de fermentación.

- Los digestores se pueden construir con concreto simple sin reforsamiento a espesores pequeños, pero sin embargo es preferible construir la estructura en concreto armado, para que la misma soporte cualquier esfuerzo adicional de manipuleo u otras cargas.

- Es preferible colocar las plantas en zonas cercanas a fuentes de materias orgánicas, ya que así se logran eficiencia en la operación del sistema.

- Se recomienda la difusión técnica de la biodigestión anaeróbica, para que sea conocida y comprendida por toda la población, en especial la rural.

- Se hace necesario realizar investigaciones en cuanto al proceso y producción de biogas, a partir de diferentes substratos.

- Se necesita establecer plantas pilotos de experimentación sobre la digestión anaeróbica, para poder generar conocimientos sobre la fermentación metanogénica.

- Evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento y producción de gas mediante la digestión anaeróbica para diversas condiciones así como para diversos usos, permitirá avanzar en el apropiado conocimiento de esta tecnología. .

- Se hace necesario realizar estudios más exhaustivos referentes al diseño de biodigestores, especialmente para zonas rurales apartadas de los centros urbanos.

- Se recomienda instalar digestores experimentales en diferentes regiones y países, para evaluar los diferentes parámetros que influyen en el proceso.

- Se recomienda el estudio de posibles instalaciones de plantas de tratamientos y producción de biogas, a partir de la descomposición anaeróbica de las aguas negras en zonas rurales del País, basados en un análisis económico de la zona y de los recursos a utilizar por entidades gubernamentales o particulares.

-Es necesario que las Instituciones de Educación Superior y de investigación de nuestros Países, especialmente las relacionadas con el sector agropecuario y agroindustrial, propicien líneas de investigación, referente al diseño y construcción de Biodigestores anaeróbicos, para el tratamiento de efluentes y residuos orgánicos de diferentes procedencia, y que además estos centros de investigación se conviertan en difusores y extensionistas de esta tecnología

BIBLIOGRAFÍA

APHA - AWWA -WPCF (1985) Standard Methodos for the examination of water and wastewater U.S.A. 1193 p.

ARIAS, R. (1986). Difusión de programas de biogas en la cuenca del alto Río Cauca. C.V.C. Cali. Colombia 18 p.

CRITERIO, L Y HERRERA, E. (1977) Aprovechamiento energético de los gases producidos por la descomposición Anaerobica en las aguas negras. Valencia. Trabajo especial de grado. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Capítulos II, III y XIII

COLMENARES, J. (1987) Evaluación de la Producción de Biogas y aislamientos de Colonias Bacterianas Anaeróbicas, en digestores Batch o por lote, a partir de la utilización de desechos orgánicos. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía U.C.V. 69 p.

CUBILLOS, A. (1981) Lagunas de Estabilización. (2da. ed.) rev. Mérida CIDIAT. Serie Ambiente y Recursos Naturales Renovables. AR-15. p. 1-7. 61-62, 83-85

CUBILLOS, A. (1982). Criterios para el dimensionamiento de lagunas de estabilización. Mérida. CIDIAT: Serie Ambiente y Recursos Naturales Renovables. AR-9 p. 1-7

CUBILLOS, A (1985). Lagunas de Estabilización (3ra. ed.) rev. Mérida. CIDIAT: Serie Ambiente y Recursos Naturales Renovables AR-15. p. 50-60

DE GINER, G. (1988). Química Sanitaria = notas sobre Demanda Bioquímica de Oxígeno. Caracas. Dpto. Ingeniería Sanitaria. Escuela de Ingeniería Civil. U.C.V. Guía mimeografiada. 20 p.

DE GOUVEIA, P, FITT, A y SOJO, S. (1988). Biogas, una perspectiva. San Juan de los Morros. Trabajo de Monografía. UNERG. 62 p.

FAO (1986). Reciclaje de materias orgánicas y Biogas. Una experiencia en China. Santiago de Chile. Curso de capacitación. Chengdu. China. 1a., 2a. y 3a parte.

FAO. (1986) Estudio Potencial bioenergético de desechos agroindustriales y agrícolas. Cali, Colombia. Seminario Taller sobre biogas y otras fuentes alternas de energia en el medio rural.

HAWKES, D.(1980). Factors affecting net energy production from Mesophilic Anaerobic Digestión. In Anaerobic Digestión. Applied Sciencie Publishers. L.T.D. London p. 131-149

HOBSON, P. et al (1980). Anaerobic Digestion of piggery and poultry wastes. In Anaerobic Digestion Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 237-254

HORTON, R. (1980). The implication of engineering design an Anaerobic Digester System. In Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 321-344

INOS S/F. Manual de Laboratorio fisico-químico-bacteriológico. Caracas. Dirección General de Inspección, Construcción y Funcionamiento. p. 154-180

INOS S/F. Manual de tratamiento de agua. II. Caracas. Dirección de Administración y Operaciones. 16 p.

JACOME, A (1990) Proyecto de una planta de saneamiento de los desechos sólidos agropecuarios producidos en la Facultad de Ciencias Veterinarias de la U.C.V. Maracay. Tesis de Grado. U.C.V. 14 p.

LETTINGA, G. et al (1980). The application of Anaerobic Digestion to Industrial Pollution Tratment. In Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 167-186

LÓPEZ, H. (1983). Disposición y tratamiento de excretas. Valencia. Edo. Carabobo. Trabajo de Ascenso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Carabobo. p. 21 - 35, 156-181

LUNA, V.1991 Tratamiento de efluentes porcinos utilizando un reactor de flujo ascendente con filtro anaerobio. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. U.C.V. 37 p.

McINERNEY, M BRYANT, M. and STAFFORD, D. (1980). Metabolic stages and energetic of microbial. In Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 91-98

MEDINA, L. (1984). Evaluación técnico-económica del uso de estanques prefabricados de asbesto-cemento; modificados para producir biogas. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. U.C.V. 65 p.

MINISTERIO DEL AMBIENTE. (1986). Temática Nacional IV. Congreso Venezolano de Conservación. Maracaibo. Zulia. p. 33-36

MORENO, J. (1988). Diseño y construcción de un almacenador de biogas en concreto armado y formulación del programa de computación para el cálculo geométrico de digestores chinos. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. U.C.V. 64 p.

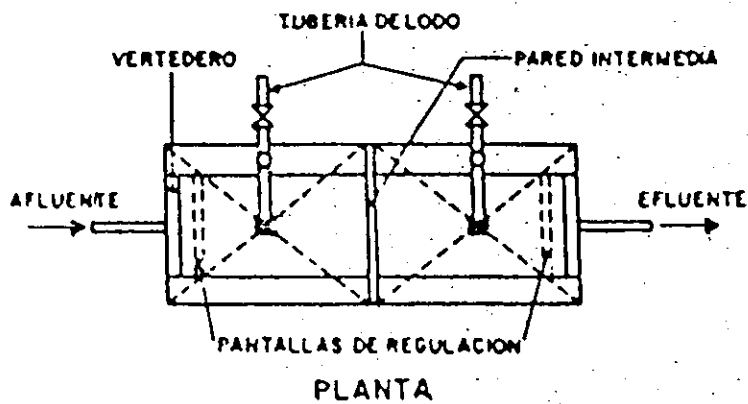
MORRIS, J. (1980). The digestion of crop residuos. An example from the far east. In Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers, L.T.D. London p. 289-302

MOSEY, F.(1980). Sewage treatmen using Anaerobic Digestion. In Anaerobic Digestión. Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 205-236

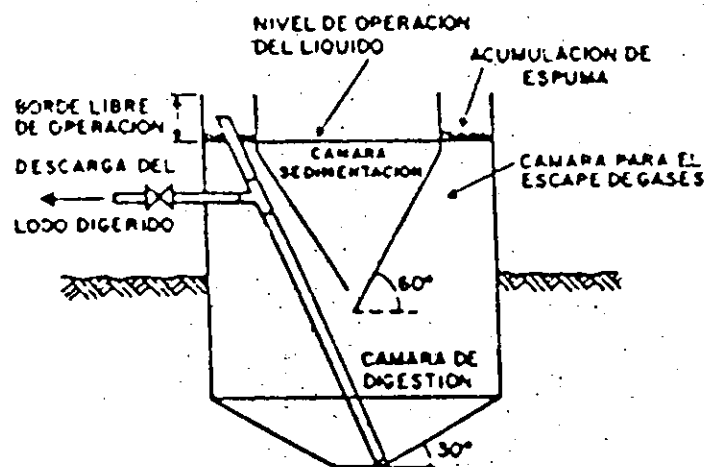
- OLADE (1981) Manual de biogas. Primer curso latinoamericano de biogas. Guatemala 230 p.
- REBOLLEDO, D y LÓPEZ, A. (1983). Diagnóstico evaluativo de la infraestructura de una granja porcina. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. U.C.V. p. 8-13.
- REPUBLICA DE VENEZUELA. (1985). Normas sobre efluentes líquidos. Gaceta Oficial N 33232. Capítulo II. Art. 4
- REPÚBLICA DE VENEZUELA. (1977). Ley Orgánica del Ambiente Caracas. Venezuela.
- REPÚBLICA DE VENEZUELA. (1991). Ley Penal de Protección al Ambiente. Caracas. Venezuela.
- RIVAS, M. (1978). Tratamiento de aguas residuales. 2 ed. Madrid. Edit. Vega. Vol. 10. 534 p.
- SALAS, F. (1983). Uso potencial del biogas en granjas avícolas del Estado Aragua. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía U.C.V. 48 p.
- SILVA, P. (1991). Evaluación de un digestor para efluentes porcinos con fines de saneamiento y producción de energía. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. U.C.V. 60 p.
- SUMMER, R. and BOUSFIELD. (1980). Uses and analyses of digested sludge. In Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 409-414.
- STOKER, S. y SEAGER, S. (1981). Química Ambiental; Contaminación del aire y del agua. Barcelona. Editorial Blume. España p. 161-174
- TAYLHARDAT, L. (1985). Biodigestores. Su utilización como estructuras alternas de saneamiento y como fuente alterna de energía accesoria. Revista Porciven. Año 2. N 5. p. 4-7
- TAYLHARDAT, L. (1986). El biogas. Fundamentos e infraestructura rural. Maracay. Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. U.C.V. 68 p.
- TRUEBA, S. (1972). Hidráulica. México. Compañía Editorial Continental, S.A., p. 295-347
- TRUJILLO, G.(1986). Diseño de incinerador para porcinos y su utilización con Biogas. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. U.C.V. 66 p.
- UNELLEZ (1995). Proyecto Apuroquia. Guanare. Estado Portuguesa p. 27-45
- VAN VELSEN, A. and LETTING, G. (1980). Effect of feed composition on digestion performance. In Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers. L.T.D. London. p. 113-130

ANEXO 1

ESTANQUE IMHOFF DISEÑO TÍPICO



SECCION LONGITUDINAL



SECCION TRANSVERSAL

Fuente : Cubillos A. (1982)

A N E X O 2

CALCULO DE LAS PRINCIPALES MEDIDAS DEL BIODIGESTOR

TIPO CHINO

(TOMADO DE MORENO, J. (1988))

Principales medidas de la cámara de fermentación del biodigestor chino. Signos usados en las fórmulas para los cálculos de la medida de las cámaras de fermentación:

V1	=	Volumen del casquete de la cubierta
V2	=	Volumen del casquete del fondo
V3	=	Volumen del cilindro
S1	=	Superficie de la parte de la esfera formada por la cubierta.
S2	=	Superficie de la parte de la esfera formada por el fondo.
S3	=	Superficie del cilindro.
R1	=	Radio de la curvatura de la parte de la esfera formada por la cubierta.
R2	=	Radio de la cubierta de la parte de la esfera formada por el fondo.
D	=	Diámetro del cilindro
Ho	=	Altura del cilindro
f1	=	Altura del vector de la cubierta
f2	=	Altura del vector del fondo
r	=	Radio del cilindro

(ver figura A)

Fórmulas:

$$V1 = \frac{\pi f1}{6} (3r^2 + f1^2) = f1^2 (R1 - \frac{f1}{3})$$

$$V2 = \frac{\pi f2}{6} (3r^2 + f2^2) = f2^2 (R2 - \frac{f2}{3})$$

$$V3 = r Ho$$

$$S1 = 2 \pi R1 f1 = \pi (r^2 + f1^2)$$

$$S2 = 2 \pi R2 f2 = \pi (r^2 + f2^2)$$

$$S3 = 2 \pi r Ho$$

$$R1 = \frac{r^2 + f1^2}{2f1}$$

$$D = \frac{16.655 + \sqrt{(16.655)^2 - (4 \times 5.61758 \times (15.8194) - V)}}{2 \times 5.61758}$$

$$V = V1 + V2 + V3$$

$$r = D/2$$

$$H_o = H - f1 - f2$$

$$f1 = D/5$$

$$f2 = D/8$$

Medidas de la cámara de hidropresión, del biogestor chino. Signos usados en las fórmulas para los cálculos de las medidas de la cama de hidropresión.

$h2$ = altura de bajada del nivel del líquido en la cámara de fermentación, producto de la presión del gas ($P2$).

V = volumen total de la cámara de fermentación.

V_o = volumen de alimentación del líquido, en la cámara de fermentación.

V_o = Volumen de alimentación del líquido, en la cámara de fermentación.

$V2$ = volumen de gas acumulado sobre la superficie de presión $P2$.

h = diferencia de altura entre el nivel del líquido en la cámara de fermentación y el de la cámara de hidropresión.

$h1$ = diferencia de niveles de líquidos en la etapa inicial.

DW = diámetro de la cámara de hidropresión.

b = altura de la boca de salida de la cámara de hidropresión.

a = profundidad a la cual debe quedar con respecto a la superficie el fondo de la cámara de entrada.

$h3 + b$ = profundidad de la cámara de hidropresión.

$h3$ = nivel de subida a la superficie de la cámara de hidropresión.

(ver figura B).

Fórmulas:

$$h2 = 2R1 \cos (1/3) \arccos (1-(3V2 /2 R1)) + 240 - \cos (1/3) \arccos (1-(3V1/2 R1)) + 240$$

$$V_o = 0,95 \times V$$

V = cte. igual al volumen total de la cámara de fermentación.

$$V2 = 0,5 \times 0, \times V_o$$

$$V1 = V - V_o$$

$$V2 = V1 + V'2$$

$$h = h1 + h2 + h3$$

$$h1 = h - h1 - h2$$

$$DW = \frac{4 \times V3}{h3}$$

$$b = h_3$$

$$a = h_1 + h_3 + b - h_0$$

$$h_3 = h - h_1 - h_2$$

$$V_3 = V_2$$

Todas estas fórmulas para el cálculo de las principales medidas de un Biodigestor tipo chino sirve de apoyo para el desarrollo lógico del programa. Enlazando en forma correcta todas estas ecuaciones y definiendo todos los parámetros que ellas implica, se facilitará el desarrollo de cálculo.

FIG.A Medidas de la camara de fermentación.

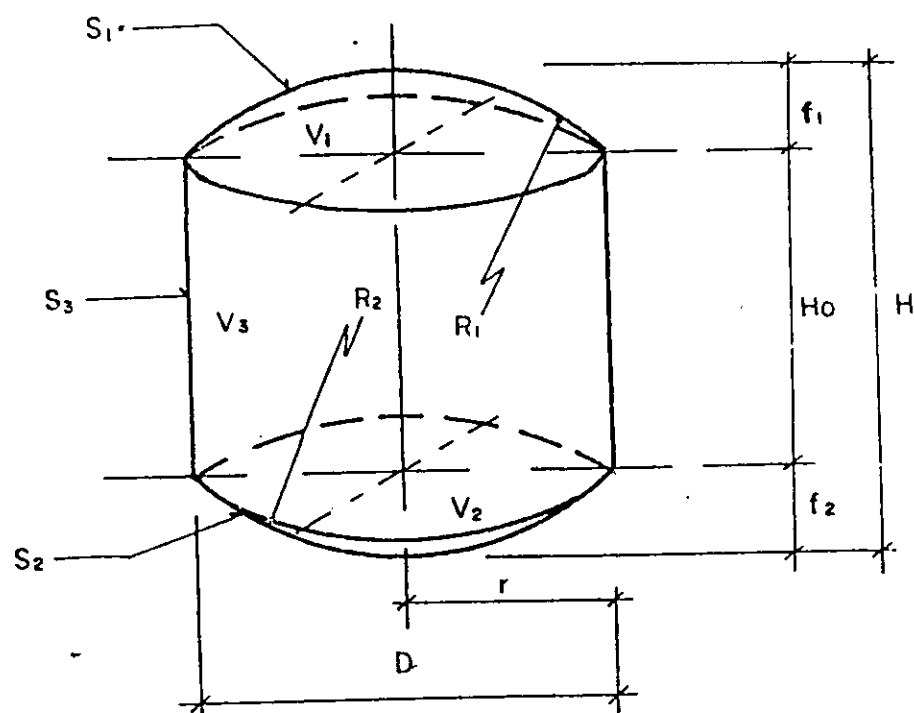


FIG.B. Medidas de la camara de hidropresión

