

300615  
13  
2 eje.



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

Escuela de Ingeniería  
Incorporada a la U.N.A.M.

**Proyecto de un Digestor para la  
Transformación de los Desechos  
Pecuarios de un Establo Lechero**

**TESIS PROFESIONAL**

que para obtener el título de  
**INGENIERO CIVIL**

presenta

**Federico Ontiveros Romo**

Asesor de Tesis

**Ing. Joaquín Chávez Zuñiga**

México, D.F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1994



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

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

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

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



Al pasante señor: **Federico Ontiveros Romo**

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Ud. a continuación, el tema que aprobado por esta Dirección, propuso como Asesor de Tesis el Ing. Joaquín Chávez Zúñiga, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero Civil.

**Proyecto de un Digestor para  
la Transformación de los Desechos  
Pecuarios de un Establo Lechero**

Con el siguiente índice:

|                     |   |
|---------------------|---|
|                     | <b>Introducción</b>                                     |
| <b>Capitulo I</b>   | <b>Generalidades</b>                                    |
| <b>Capitulo II</b>  | <b>Características Generales de la Materia Orgánica</b> |
| <b>Capitulo III</b> | <b>La Digestión Anaerobia y la Metanogénesis</b>        |
| <b>Capitulo IV</b>  | <b>Evaluación de los Desechos Organicos</b>             |
| <b>Capitulo V</b>   | <b>Diseño del Digestor</b>                              |
| <b>Capitulo VI</b>  | <b>Conslusiones</b>                                     |
|                     | <b>Bibliografía</b>                                     |

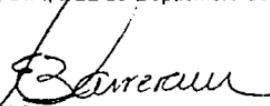
Ruego a Ud. tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional, así como disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente

**"Indivisa Manent"**

**Escuela de Ingeniería**

México, D.F., a 22 de Septiembre de 1993.

  
Ing. **Edmundo Barrera Monsivais**  
Director

## AGRADECIMIENTOS

Al instituto de Investigaciones Eléctricas de Cuernavaca, Mor., por haberme permitido el acceso a sus instalaciones e información que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A todos los integrantes y colaboradores del Grupo de Trabajo y Solidaridad con las Comunidades Indígenas A.C., por haberme dado la oportunidad de conocer directamente la problemática de esta parte tan importante del campesinado mexicano.

Al Grupo C.E.M.A.T., Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Apropriada de Guatemala, C.A. por concederme generosamente esa visita de intercambio, tan valiosa, a ese país hermano y maravilloso.

Al Centro de Convivencia Campesino, A.C., de Amecameca, Mex., por haber servido de enlace con grupos campesinos e instituciones interesados en desarrollar "tecnologías apropiadas".

Al Banco de Crédito Rural del Norte, S.N.C., por permitirme tomar datos de construcción y de producción de una de sus instalaciones pecuarias para el diseño del sistema propuesto.

Al Dr. Alfonso Viniegra S., por sus valiosas opiniones e informaciones respecto a los procesos de digestión en el ganado bovino.

A todas estas instituciones y personas mi reconocimiento sincero.

con todo respeto y admiración a:  
**mis maestros, asesor y compañeros de generación**

con todo cariño a:  
**mis padres**

**Carmen Romo de Ontiveros (E.P.D)**  
**y**  
**José Ontiveros Betancourt,**

mis hermanos

**J. Humberto,**  
**María Concepción y**  
**José (E.P.D),**

mi esposa

**Eugenia,**

mis hijos

**Argella,**  
**Gerónimo,**  
**Jacinto y**  
**Jazmín.**

# INDICE

|              |   |
|--------------|---|
| INTRODUCCION | 1 |
|--------------|---|

## CAPITULO 1 GENERALIDADES

|   |    |
|---|----|
| 1.1 EL PROBLEMA SANITARIO               | 4  |
| 1.2 FERTILIDAD AGRICOLA                 | 10 |
| 1.3 ENERGETICOS                         | 11 |
| 1.4 LA BIOMASA COMO RECURSO RENOVABLE   | 12 |
| 1.5 ANTECEDENTES DEL BIOGAS             | 13 |
| 1.6 METODOS DE CONVERSION DE LA BIOMASA | 14 |

## CAPITULO 2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LA MATERIA ORGANICA

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 2.1 SOLIDOS ORGANICOS               | 16 |
| 2.2 EL CICLO DE LA MATERIA ORGANICA | 18 |

## CAPITULO 3 LA DIGESTION ANAEROBIA Y LA METANOGENESIS

|  |    |
|--|----|
| 3.1 CONCEPTOS GENERALES                    | 20 |
| 3.2 FASES DE LA DEGRADACION ANAEROBICA     | 21 |
| 3.3 LA DIGESTION RUMIAL Y LA METANOGENESIS | 21 |
| 3.4 BIOQUIMICA DE LA METANOGENESIS         | 22 |
| 3.5 FISILOGIA DE LA BACTERIA METANOGENICA  | 25 |

## CAPITULO 4 DIGESTIBILIDAD DE LOS DESECHOS ORGANICOS

|  |    |
|--|----|
| 4.1 PRUEBAS DE LABORATORIO                               | 26 |
| 4.2 VARIABLES DE OPERACION<br>EN EL PROCESO DE DIGESTION | 27 |
| 4.3 TIEMPOS DE DIGESTION                                 | 37 |
| 4.4 INDICES DE ACCION DIGESTIVA                          | 39 |

## **CAPITULO 5**

### **EVALUACION DE LOS DESECHOS ORGANICOS**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.1 | DEFINICIONES _____   | 41 |
| 5.2 | DETERMINACION DE HUMEDAD Y SOLIDOS _____   | 41 |
| 5.3 | DETERMINACION DE LA RELACION<br>CARBONO:NITROGENO _____  | 45 |
| 5.4 | VALOR DEL pH DEL ESTIERCOL DE VACA _____   | 52 |
| 5.5 | GAS PRODUCIDO SEGUN LAS DIFERENTES<br>BASES UNITARIAS TOMADAS EN LA DIGESTION<br>DEL ESTIERCOL DE VACA _____ | 52 |
| 5.6 | GASES DE LAS AGUAS NEGRAS _____  | 58 |
| 5.7 | UTILIDAD PRACTICA DEL GAS BIOLÓGICO _____  | 58 |
| 5.8 | VALOR FERTILIZANTE DEL ESTIERCOL DE VACA _____   | 59 |
| 5.9 | CONSTITUYENTES QUIMICOS DE LOS<br>LADOS DE LAS AGUAS NEGRAS _____  | 62 |

## **CAPITULO 6**

### **DISEÑO DEL DIGESTOR**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 6.1 | UBICACION Y OBJETIVOS DEL PROYECTO _____   | 64 |
| 6.2 | SISTEMA PROPUESTO DE OPERACION _____   | 67 |
| 6.3 | DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA _____   | 72 |
| 6.4 | BALANCE ENERGETICO DEL SISTEMA _____   | 80 |
| 6.5 | PRODUCCION DE FERTILIZANTES _____  | 88 |
| 6.6 | RECOMENDACIONES NORMATIVAS DE<br>CONSTRUCCION PARA DEPOSITOS DE<br>CONCRETO ARMADO _____ | 89 |
| 6.7 | MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA EL USO<br>DEL GAS DE LOS DIGESTORES _____                      | 95 |
|     | CONCLUSIONES _____   | 99 |

BIBLIOGRAFIA

## INTRODUCCION

De los objetivos nacionales que se han venido estableciendo para lograr el desarrollo de las regiones agrarias de México, se puede destacar que los correspondientes a elevar sus índices de productividad son, permanentemente, motivos fundamentales mediante los cuales organismos gubernamentales y privados, involucrados en este ámbito de trabajo, impulsan la planeación y ejecución de los proyectos de infraestructura requeridos para el cumplimiento de estas metas.

Los avances logrados al respecto son inobjetable. Sin embargo, no han sido suficientes para superar la situación económica desventajosa en la que se encuentra el sector rural con relación al industrial y financiero, dado que la productividad que se alcanza no compensa el costo de insumos y créditos que se invierten. Por otra parte, la falta de "metodologías técnico-organizativas apropiadas", ha favorecido que sus empresas adopten modelos que no son adecuados para un intenso y racional aprovechamiento de los recursos que utilizan en sus procesos de producción. Factores que, entre otros, han propiciado una precaria capitalización de las áreas campesinas.

Tales circunstancias, ponen de manifiesto la necesidad impostergable de complementar estos sistemas productivos con técnicas que prevean la utilización integral de sus materias primas, eviten gastos excesivos por conceptos de insumos y posibiliten mayores ingresos.

El reciclaje de subproductos orgánicos procreados en las labores agropecuarias puede ser considerado, por sus características, como un elemento importante en esta clase de proyectos.

Estos desechos que generalmente son desperdiciados pueden llegar a generar, mediante tratamientos adecuados, fuentes alternativas de fertilizantes y energéticos necesarios para la producción agropecuaria. Simultáneamente a este beneficio, se proporcionaría un medio ambiente salubre para aquellos lugares de trabajo en los que se lograra su operación eficaz.

Actualmente, aplicaciones prácticas de este tipo de tecnologías se llevan a cabo con éxito en países como Alemania, Francia, India y China Popular.

En México, desde 1976, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en Cuernavaca, Mor., auspiciado por la Comisión Federal de Electricidad, ha realizado

estudios y experimentaciones, a diferentes escalas, sobre el proceso de digestión de diversos materiales para la producción de "bioabono y biogás".

Los estudios se iniciaron con la experimentación a niveles de laboratorio (digestores con capacidad para 0.2 M<sup>3</sup> de material), investigándose los parámetros que gobiernan el proceso de digestión, relacionando la generación y calidad del gas con la composición de los desechos orgánicos alimentados. Se estudiaron estiércoles de ganado bovino y porcino; mezclas de estiércol bovino con rastrojos de maíz, sorgo, arroz y cáscara de cacahuate; mezclas de desechos de ganado bovino, porcino y gallinaza con rastrojos de sorgo; y mezclas de estiércol bovino con lirio acuático.

Se estudió, además, el porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla utilizando estiércol bovino, la temperatura a la que se realiza el proceso, y también factores como el pH y la agitación.

Una vez terminados los estudios a escala de laboratorio, se procedió a construir un digestor de 10 M<sup>3</sup> tipo "Hindú", que cubriera las necesidades energéticas para el uso doméstico de alumbrado y cocción de alimentos en una familia de seis miembros. Este digestor se operó durante dos años a régimen continuo (carga diaria), y a cinco diferentes tiempos de retención, con y sin agitación, para evaluar, de esta manera, la producción de biogás bajo diferentes condiciones de operación.

Posteriormente se diseñó y construyó un digestor de 40 M<sup>3</sup> de volumen, enfocado hacia la instalación de estos sistemas en comunidades aisladas. Este digestor procesa media tonelada de estiércol bovino al día produciendo, en este lapso, 30 M<sup>3</sup> de biogás. Esta unidad, trabajada por gravedad con desplazamiento horizontal, ha estado operando con éxito bajo la dirección del Instituto Tecnológico Agropecuario (I.T.A.) No. 9 de Xoxocotla, Mor.

En lo referente a los usos del biogás se han realizado trabajos relacionados con su análisis, purificación, secado, compresión y almacenamiento. Se llevaron a cabo estudios de su utilización en estufas domésticas de dos quemadores, lámparas, refrigeradores de absorción, motor generador de 700 Watts y motor generador de 16 K.W. Todos estos equipos comerciales fueron adaptados para quemar biogás.

Los lodos del digestor se evaluaron para poder conocer su poder de fertilización, comparándolos con los productos químicos y con estiércol fresco. Los muestreos correspondientes se llevaron a cabo en una plantación de lechugas.

Tomando en cuenta estos aspectos generales, el presente trabajo de tesis

pretende diseñar un tanque digestor para el tratamiento y reciclaje de estiércoles en un establo lechero

El capítulo 1 relaciona el proyecto con las diferentes problemáticas que puede ayudar a resolver. El capítulo 2 define que es la materia orgánica, de donde procede y cual es su ciclo de transformaciones naturales. El capítulo 3 explica detalladamente las fases de la degradación anaeróbica de la materia orgánica y de que manera se desarrolla en la digestión del ganado bovino y que tipo de bacterias intervienen en el proceso. En el capítulo 4 se establecen las variables de operación que deben controlarse para una digestión satisfactoria. El capítulo 5 determina la potencialidad de los desechos orgánicos según su relación Carbono:Nitrógeno y las cantidades necesarias de agua que deben agregarse para una producción óptima de gases. En el capítulo 6 se calculan las dimensiones del tanque de digestión con base en los volúmenes diarios que se van a tratar, se compara la energía producida con la requerida para su calentamiento, se estiman las cantidades de fertilizantes generados y se comparan con los comerciales, se recomiendan las normas de construcción para depósitos de concreto armado y se enumeran las medidas de seguridad para el uso del gas producido. En las conclusiones se presentan algunos parámetros para la evaluación de este tipo de proyectos.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 El problema sanitario.

La salubridad relaciona todos los factores y aspectos que conciernen al mejoramiento de las condiciones de vida de la población y al cuidado de la salud colectiva. Busca adaptar el medio ambiente físico que rodea al hombre a las condiciones que le permitan vivir sano, sin molestias o incomodidades, a través de la aplicación de los principios y normas sanitarias.

En cada país existen normas y códigos sanitarios para la salud pública y el bienestar higiénico de los pueblos. En lo internacional, existen instituciones que normalizan, asesoran y trabajan en problemas ambientales. Entre otros se pueden enumerar:

**Código Sanitario Panamericano.**

**Servicio de Cooperación Técnica de los Estados Unidos.**

**Organización Mundial de la Salud.**

En relación con la terminología de "salud", es interesante transcribir algunas definiciones que presentó la Organización Mundial de la Salud y que fueron aprobadas en el Primer Congreso Interamericano de Higiene celebrado en la Habana, Cuba, en Septiembre de 1952.

**Salud.** Es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de enfermedades.

**Salubridad.** Es la ciencia y el arte de organizar y dirigir los esfuerzos colectivos para proteger, fomentar y reparar la salud.

**Higiene.** Es el conjunto de normas de vida que aseguran al individuo el ejercicio pleno de todas sus funciones.

**Saneamiento.** Es la rama de la salubridad destinada a eliminar los riesgos del ambiente natural, sobre todo los resultantes de la vida común, creando y promoviendo en él las condiciones óptimas para la salud.

**1.1.1. Grupos de enfermedades causadas por insalubridad.** La falta de control o solución a los problemas que originan riesgos del ambiente natural, ya sea por falta de interés de organismos municipales o estatales, escaso personal, falta de recursos económicos, material o equipo, u otra causa cualquiera, originan una serie de enfermedades o trastornos que se pueden clasificar en cuatro grupos, tendientes a reunir aquellas enfermedades cuya transmisión se debe fundamentalmente a factores similares o comunes.

**Enfermedades infecciosas entéricas.** Tifoidea, paratifoidea "A" y "B", disentería bacilar y amebiana, ascariasis, lambliasis (giardiasis), tricocefalosis, enterobiasis, etc.

**Factores de control.** Abastecimiento de agua potable, disposición de excretas, moscas, basuras, roedores, protección y refrigeración de alimentos, hábitos higiénicos de manipulación, etc.

**Enfermedades transmitidas por artrópodos (vectores).** Paludismo, fiebre amarilla, filariasis, tífus exantemático, peste, fiebre manchada de las Montañas Rocallosas, enfermedad de Chagas, oncocercosis, etc.

**Factores de control.** Deseccación de pantanos, drenajes, desinsectización, fumigación, saneamiento de puertos, aeropuertos y fronteras, etc.

**Enfermedades profesionales y seguridad Industrial** (higiene industrial y medicina del trabajo). Silicosis, dermatosis, saturnismo, intoxicaciones, traumatismos, etc.

**Factores de control.** Saneamiento de minas, canteras, molendas, extracción de gases, neutralización, protección del obrero y maquinarias, etc.

**Enfermedades de transmisión aérea.** Difteria, tuberculosis, sarampión, escarlatina, tosferina, viruela, varicela, resfriado común, etc.

**Factores de control.** Higiene de habitaciones, control de hospitales y salas públicas, locales escolares, desinfección, ventilación, calefacción, etc.

**1.1.2. Contaminación del agua.** Uno de los problemas de permanente preocupación de las agrupaciones humanas es la eliminación de las aguas servidas provenientes de la vida doméstica, colectiva, agrícola e industrial. Las aguas contaminadas por diversos desechos no sólo tienen significación desde los puntos de vista estético y urbanístico, sino también en relación con la transmisión de enfermedades, ya que transportan gérmenes patógenos y huevos de enteroparásitos en cantidad que depende fundamentalmente de la prevalencia de las enfermedades infecciosas entéricas. Por otra parte, su disposición inadecuada puede servir como foco de procreación de moscas y otros insectos.

**A continuación se describen algunos problemas específicos causados por la contaminación del agua.**

A nivel mundial el 70 % de la población no cuenta con agua salubre en cantidades adecuadas; 100 millones de personas son víctimas anualmente de la bilharzia, filariasis, cólera, hepatitis, tifo, disentería y otras enfermedades; el 90 % de las muertes infantiles son originadas por las aguas insalubres; el 90 % de la población del "tercer mundo" utiliza habitualmente agua no potable; mil millones de campesinos contaminan suelos y aguas por desagües inadecuados; en "América Latina" 90 millones de personas no cuentan con servicios de agua potable. Por otra parte, los desechos industriales contaminan 160 millones de metros cúbicos de agua, que por ser tan alto su grado de contaminación pululan 25 veces su volumen. Las consecuencias son alarmantes, las enfermedades propagadas por el agua insalubre matan todos los días a 25 mil personas.

El agua no es, como el petróleo y el carbón, un recurso que vaya agotándose progresiva e inexorablemente. Pero tampoco lo es como la madera y los peces, que pueden aumentar en determinadas condiciones. La cantidad de agua a disposición de la humanidad es fija: 38,800 kilómetros cúbicos; una masa de agua que sigue anualmente el ciclo hidrológico natural, se evapora, se condensa y precipita nuevamente a las vertientes naturales.

Tal volumen fijo de agua constituye el 1.00% (uno por ciento) del total existente en la tierra. El resto se encuentra en las masas de hielo, en los océanos (no utilizable) y bajo tierra. Este uno por ciento debería sin embargo ser suficiente. De acuerdo a cálculos minuciosos, aunque se duplicara la población del mundo, el "ciclo hidrológico" suministraría aún 4,500 metros cúbicos de agua por año a cada habitante del planeta, correspondiente a una dotación de 12,300 litros por habitante y por día, una cantidad muy superior a la utilizada actualmente por una persona en los países industrializados.

Pero, si atendiendo a las cifras globales hay agua suficiente para satisfacer las necesidades de la humanidad, ni la distribución natural sobre la superficie terrestre ni el tipo de utilización humana de ese recurso permite albergar optimismos. África recibe, por ejemplo, el 12 % del agua distribuida por el ciclo hidrológico natural, mientras Estados Unidos recibe más del 33 %.

Pero la irracionalidad en la utilización del agua es aún más inquietante. Mientras el agua falta para el consumo básico del 70 % de la humanidad, la industria utiliza unos 200 mil millones de metros cúbicos de agua al año. El Problema es grave: la contaminación de las aguas reduce en términos netos el volumen global del agua utilizable por el hombre, convirtiéndolo así, en términos funcionales, efectivamente, en un recurso natural no renovable.

También en la vida doméstica se contamina y se desperdicia el agua, el 40 % de toda el agua destinada a las zonas urbanas del mundo desarrollado se utiliza en las cisternas de los retretes. En cada uso del depósito se gastan cuando menos 22 litros de agua que ha costado mucho purificar, sólomente para eliminar unos cuantos gramos de heces fecales. La utilización de una cisterna de retrete durante un año contamina, en cifras promedio, unos 60 mil litros de agua limpia utilizada para eliminar 2,700 litros de heces humanas.

En este contexto, el problema del agua presenta una doble faz, y consecuentemente, una doble serie de políticas y medidas concretas para resolverlo. Por una parte, se trata de intervenir en el ciclo hidrológico natural a fin de desviar el curso del agua y redistribuirla más equitativamente de acuerdo a las distintas necesidades humanas básicas, agua potable, higiene, riego, teniendo en cuenta que para satisfacer las necesidades vinculadas a la alimentación y al agua limpia, se debe irrigar por lo menos un 50 % más de las tierras cultivables, evitando su degradación ecológica y poner las aguas tratadas a disposición del 70 % de la población mundial que actualmente carece de ella. "Hay suficiente agua -afirma Dominique Larre- especialista en la materia, pero en contadas ocasiones se encuentra en el lugar adecuado, en el momento en que se precisa y en la calidad y cantidad correctas. Por lo tanto, el problema radica una vez más, en la buena administración del agua".

Por otra parte, se trata de impedir el derroche, la utilización Ineficaz y hasta la inutilización del agua como consecuencia de actividades humanas. Saturar las aguas de elementos contaminadores anula, en lo práctico, la capacidad de la naturaleza para purificarse y regenerarse a sí misma.

**1.1.3. Contaminación ambiental por basuras y desperdicios.** El control de la recolección, transporte, disposición y tratamiento de las basuras y desperdicios, es otra de las actividades en las que participa el saneamiento de la higiene del ambiente. Se entiende por basuras el conjunto de desperdicios sólidos de origen doméstico, comercial, agrícola o industrial. Pueden ser orgánicos o inorgánicos, y se componen de residuos alimentarios y de cocina, desperdicios sólidos de mataderos, productos de barrido de calles, residuos sólidos de combustión, ramas y hojas de árboles, botellas, latas, objetos metálicos, animales muertos, escombros, etc.

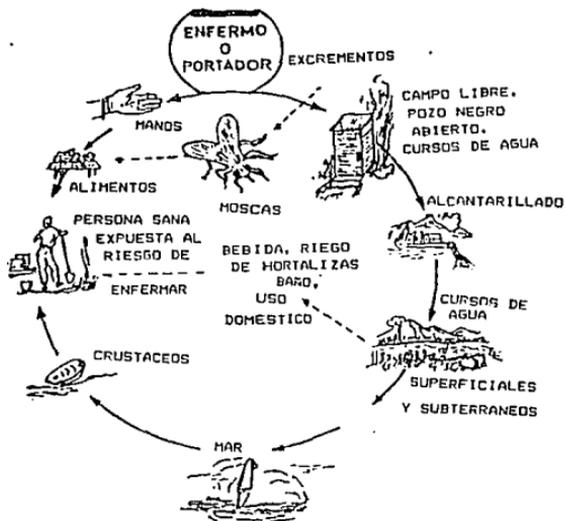
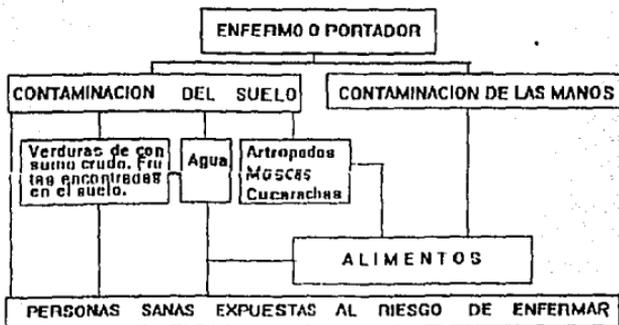
Las basuras representan una preocupación importante en el hogar y en la comunidad. Los factores que entran en esta preocupación están relacionados con los focos de infestaciones, procreación y alimentación de moscas domésticas, cucarachas, hormigas y posibles focos de contaminación microbiana patógena cuando las basuras albergan excretas. Por otra parte, el aspecto estético urbano y la limpieza de barrios, calles, hogares, etc., además de ser exigidos por nuestra civilización actual, reflejan la preocupación de las autoridades municipales por esta actividad y las características y hábitos de vida de nuestros pobladores.

Las autoridades responsables deben abarcar, con estas acciones, tanto la recolección casera y el transporte como la disposición y el tratamiento final, para lograr una solución sanitaria, y satisfactoria desde el punto de vista económico.

Está demostrado que en sectores poblados donde la basura se dispone a campo abierto, en sitios eriales, calles, canales, etc., la población de insectos, roedores, perros vagos, es mucho mayor que en barrios limpios y de hábitos higiénicos de sus moradores. Las basuras indebidamente tratadas son, en un alto porcentaje, la causa directa de la población de moscas domésticas y una fuente importante de alimentos para los roedores.

No debe descuidarse la forma en que se recolectan las basuras en el hogar. Si bien es cierto que es difícil la intervención de organismos estatales o municipales en esta acción, no cabe duda que una amplia educación sanitaria conducirá a un progreso paulatino en este sentido. El tratamiento final de las basuras de la colectividad es función, entre otros factores, del tipo de recolección, cantidad de basuras acumuladas, hábitos de la población, condiciones climáticas y características de las áreas adyacentes al pueblo o ciudad. En algunos casos debe recurrirse a dos o más sistemas de tratamiento, entre los cuales cabe señalar: el relleno sanitario, la incineración, la oxigenación bacteriana de las basuras (compost), vaciamiento al mar, digestión y, con muchas reservas, alimentación de cerdos. Ver cuadro 1-1 y figura 1-1.

**CUADRO 1-1 VIAS DE TRANSMISION DE ENFERMEDADES INTESTINALES - CICLO CORTO -**



**Figura 1-1. Vías de transmisión de enfermedades. Ciclo largo y corto.**

## 1.2. Fertilidad agrícola.

En la crisis actual que atravesamos, el medio agrícola se encuentra contra los factores militantes que lo angustian en su producción de alimentos: fertilizantes y combustibles; productos que están disponibles en el mercado exterior, pero su precio elevado es lo que imposibilita su consumo, ya que la demanda está muy por encima de la oferta.

El consumo mundial de fertilizantes tiende a duplicarse en un ciclo menor de diez años. Cien años transcurrieron para que el consumo de fertilizantes minerales ascendiese de cero hasta trece millones de toneladas, en tanto que solamente diez años (1962 a 1972) han sido necesarios para que el mismo sumase 26 millones de toneladas. Estas cifras muestran en forma evidente cuán súbito aumenta la importancia de la fertilización. Sin embargo cerca del 90 % del total de fertilizantes es consumido en Estados Unidos, Japón y países industriales de Europa.

El término fertilidad se puede definir como la virtud que tiene la tierra para producir abundantes frutos. Se fertiliza, cuando el hombre trata de fecundizar la tierra que ha perdido su fertilidad. Constituye uno de los máximos problemas para todos los pueblos la pérdida de fertilidad de sus suelos cultivables, puesto que representa escasa o nula producción y por consecuencia, "hambre".

Con el término abono se designa cualquier substancia que al agregarla al suelo, estimula el crecimiento y aumenta el rendimiento de las plantas. Los terrenos que no han sido cultivados nunca, necesitan poco o ningún abono. Pero como cada cosecha extrae del suelo substancias químicas y orgánicas valiosas, al cabo de un tiempo éste llega a perder su fertilidad, a menos que, se le repongan los nutrientes que originalmente tenía.

La lentitud en la variación del contenido de humus en los terrenos, comparte importantes consecuencias de orden práctico. Después de treinta o cuarenta años de cultivo, sin abono orgánico, el suelo no ha podido llegar aún a su límite estable, o de equilibrio, y la proporción de humus seguirá reduciéndose, durante largo tiempo, hasta alcanzar un estado de mínima fertilidad en el que sus valores se aproximen a los de los suelos minerales o desérticos.

Los estiércoles son los abonos orgánicos más importantes; se les denomina como abonos completos porque contienen los tres elementos nutritivos que más necesitan las plantas: Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

Diversos países se han preocupado por la complementación de la fertilización mediante el uso de abonos orgánicos. En Bogotá, Colombia, el XVIII Congreso Cafetalero celebrado en el año de 1954 creó la campaña de abonos y fertilizantes. En la República de El Salvador, se puso en práctica un nuevo plan que basa la fertilización en una intensiva aplicación y uso de abonos orgánicos. En Guatemala, el Banco de Guatemala, lanzó un documento con el título de "El Uso de Abonos Orgánicos": una alternativa para la fertilización adecuada de los suelos. En Alemania, existe un instituto para el estudio de la economía del humus; allí puede verse, una colección de todos los sistemas que el hombre ha ideado para la elaboración de abonos orgánicos y de humus, etc.

Lo que falta actualmente es la adecuada aplicación de la técnica, a niveles que el agricultor asimile, para el mantenimiento del humus en el suelo; en el campo, la producción de alimentos sería incrementada grandemente sin tener que depender de gastos altos en fertilizantes químicos.

### 1.3. Energéticos.

Durante milenios, las únicas fuentes de energía utilizadas por el hombre fueron el trabajo humano, los animales domésticos, la combustión de la madera, el viento y la utilización de algunos saltos de agua. La revolución industrial, que con razón ha podido ser denominada también la revolución de la energía, creó una poderosa dinámica que ha llevado al crecimiento exponencial de las necesidades y de la producción de la energía.

Así, en 1870, las fuentes arcaicas de energía (en particular la madera) representaban todavía el 68% de la producción total, mientras que el carbón significaba el 32%. A comienzos del siglo actual, este mineral había pasado a ser la fuente de energía de mayor importancia (representando un 59% del total), y el petróleo y el gas natural comenzaban apenas una tímida aparición, sin llegar a alcanzar, en todo caso, un porcentaje superior al 3% del total de la energía. En la actualidad, el carbón, que representa un 30% aproximadamente, de la producción total, ha cedido la primacía al petróleo y al gas natural (un 55%), mientras que las centrales hidroeléctricas y nucleares sólo representan el 5%, y las fuentes arcaicas siguen suministrando todavía un 10% de la total de la producción de la energía.

Como puede verse, un 85% de la producción mundial de energía se basa en

el consumo de los recursos energéticos de minerales combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón, que con justicia pueden denominarse los tres grandes de la energía.

La crisis de los años 1970 a 1973, en la perspectiva inmediata que conmocionó a los países industriales, ha servido de catalizador para que se acelerasen las tendencias hacia la puesta en marcha de procedimientos que puedan reemplazar al petróleo como fuente energética fundamental. Estas tendencias existían ya, como respuesta a dos constataciones básicas: en primer lugar, el consumo energético crece tan rápidamente que, en los umbrales del año 2000, será de dos a tres veces superior a la de 1972; en segundo lugar, a pesar de las divergencias en cuanto a la estimación de las reservas de petróleo, las más conocidas, oscilan entre 216,000 y 336,000 millones de metros cúbicos, si se acepta la cifra más optimista, puede preverse un máximo del consumo hacia el año 2000, después, unos 50 años de decadencia hasta llegar al agotamiento, si la cifra adoptada es la más baja, éste podría producirse unos veinticinco años antes.

Entre las fuentes de energía que, a corto plazo, pueden considerarse como viables en un proceso de sustitución del petróleo, existen, por un lado, los nuevos hidrocarburos que pueden obtenerse a partir del carbón, de los esquistos bituminosos y de las arenas asfálticas; por otro, la energía atómica, la biomasa, la energía geotérmica, la solar, la eólica y las centrales mareomotrices.

#### 1.4. La biomasa como recurso renovable.

Toda la materia vegetal es llamada biomasa y la energía que libera cuando es ingerida, quemada o convertida en combustible se llama energía de la biomasa. Tanto plantas, árboles, aceites vegetales, grasas animales, estiércoles, basuras orgánicas, etc., y aún los combustibles fósiles, representan formas de esta energía, las cuales pueden ser producidas, cultivadas o convertidas de diversos modos para cubrir necesidades del hombre. Las fuentes de abastecimiento de la biomasa son: a) materia vegetal, y b) desechos orgánicos.

Una forma antigua y tradicional de obtener energía es quemar materias vegetales o residuos orgánicos de animales, es decir, biomasa obtenida por la fotosíntesis a través de la agricultura, silvicultura o la ganadería, siguiendo la ecuación empírica de combustión de carbohidratos:



En esta reacción de la combustión, los carbohidratos generalmente liberan  $4.5 \times 10^8$  calorías por kilogramo de materia seca, pero el rendimiento práctico varía según el contenido de humedad, el estado físico de agregación de la materia y la presencia de otro tipo de materia orgánica.

Como la celulosa es el material más abundante en la biomasa combustible, se puede tomar 4.5 M cal./kg. como el valor más representativo de la energía acumulada en este recurso.

En el presente siglo se han desarrollado nuevas formas de transformar la biomasa en energéticos, entre los que podemos mencionar: en la Gran Bretaña, la combustión conjunta de basura municipal y carbón de piedra de hulla para generar electricidad; en China y la India la conversión de la biomasa de los excrementos animales en gas metano, a través de digestores, para uso doméstico; en Brasil, la transformación del azúcar de caña o los almidones de la yuca o huacamote (también llamado cazabe o mandioca) en alcohol etílico anhidro para usarlo como carburante complementario de la gasolina.

Algunas de estas formas transforman la biomasa en combustibles de más fácil manejo, como el alcohol; en otras como en la digestión anaeróbica de los excrementos, se pretende recuperar el valor fertilizante, y en otras más, como en la combustión de la basura municipal, se pretende eliminar una fuente de contaminación ambiental y secundariamente se recupera el valor energético de la biomasa.

### **1.5. Antecedentes del biogás.**

Los antecedentes del biogás se remontan al año de 1776 cuando Volta observó por primera vez la presencia de gas metano o formeno que se desprendía de los pantanos. En 1808 Humphry Davy estudió la fermentación que producía el gas de los pantanos. En 1868, Reiset, señaló la presencia de metano en los volcanes de estiércol. Schradey y Fischer, alemanes, mostraron igualmente que la muerte de un vegetal reuniendo ciertas condiciones, bajo una fermentación anaeróbica, desdobra la celulosa produciendo metano, hidrógeno y anhídrido carbónico. En la Academia de Ciencias de París, el 25 de Febrero de 1884, se presentan los resultados de los experimentos de V. Gayón, estableciendo que éste había realizado la producción de metano por fermentación anaeróbica del estiércol, produciendo por metro cúbico de materia más de 100 litros del gas. Pasteur, concluía diciendo que: "...esta fermentación podría llegar a ser una fuente de gas utilizable para el calentamiento y la iluminación".

A partir de 1940 los experimentos de MN Ducellier e Isman en Argelia, y utilizando los aparatos de carga automática comunes en vinificación, después de otras fermentaciones y después de haber instalado previamente diversos dispositivos y seguir varios procesos, fueron quienes contribuyeron principalmente al perfeccionamiento y la divulgación del procedimiento permanente para la obtención del gas del estiércol. Estos experimentos fueron llevados a cabo en la Escuela Nacional de Agricultura de Grignon, alrededor de los años de 1942 a 1943, habiendo hecho fundamentales modificaciones a su primitiva instalación en los años de 1945 a 1946.

A partir de 1900, se descubrió un método de generar el mismo gas por medio de aguas fecales. El proceso es llamado "digestión" de las aguas negras en un ambiente sin aire (anaeróbico). Las ciudades de Bombay en la India, Birminham en Inglaterra y Baltimore en los Estados Unidos, fueron las primeras en establecer plantas que empleaban materias sólidas producidas por el tratamiento de aguas fecales para generar gas y utilizarlo en la iluminación y operación de maquinaria.

El Instituto de Investigación de agricultura de la India inició algunos estudios hacia 1939 con el fin de desarrollar una técnica que permitiera que el estiércol proporcionara combustibles y fertilizantes de alto grado. Así se desarrollaron las plantas de biogás "Gobar" que producen gas combustible y abono agrícola. Existen hasta ahora, aproximadamente, 10,000 plantas de biogás operando en la India, 50 % se encuentran en los dos estados occidentales de Gujart y Maheratra. Algunas plantas han estado produciendo biogás y fertilizantes por más de 20 años.

En Alemania se han desarrollado, a partir de 1953, sistemas especiales para la purificación de las aguas negras con producción de gas metano y aprovechamiento de abonos orgánicos en forma líquida y sólida.

La tecnología del aprovechamiento de la biomasa como recurso energético y fertilizante se está practicando sobre todo en naciones en vías de desarrollo, como las asiáticas, debido a que es, actualmente, una alternativa real a la escasez de los elementos básicos y necesarios para el desarrollo rural de estos países. El máximo logro se puede encontrar en China, en donde se le está dando una importancia capital a este tipo de proyectos; solamente en la provincia de Szechuan se han construido 200 mil digestores rurales.

#### **1.6. Métodos de conversión de la biomasa.**

Los sistemas de conversión de la biomasa se clasifican en tres tipos:

- a) **Combustión directa de materiales de biomasa, generalmente para obtener calor del proceso y producción de vapor.**
- b) **Conversión de moléculas ricas en carbono, hidrógeno o ambos, y pobres en oxígeno y nitrógeno, elementos que no contribuyen al valor energético.**
- c) **Conversión a través de procesos biológicos.**

Los procesos involucrados en las tres posibilidades se realizan a través de reacciones térmicas o microbiológicas. Las dos primeras involucran altas temperaturas y presiones, productos químicos corrosivos y pueden provocar contaminación. La tercera tiene un efecto moderado sobre el medio ambiente.

La conversión de la biomasa en energía tiene por lo tanto dos caminos fundamentales, el biológico y el químico.

#### **Conversión química:**

- Hidrogenación
- Pirólisis
- Combustión
- Destilación
- Hidrogasificación

#### **Conversión biológica:**

- Digestión aeróbica
- Digestión anaeróbica
- Fotosíntesis.

## CAPITULO 2

### CARACTERISTICAS GENERALES DE LA MATERIA ORGANICA

#### 2.1. Sólidos orgánicos.

En general los sólidos orgánicos son de origen animal o vegetal; materia animal muerta, excretas humanas, estiércoles, materiales celulósicos, etc., y se componen principalmente de carbón, hidrógeno y oxígeno, algunos están combinados con nitrógeno, azufre y algunos otros elementos. Los grupos principales son las proteínas, los hidratos de carbono y las grasas. Los sólidos orgánicos están sujetos a degradación o descomposición por la actividad de las bacterias y otros organismos vivos; además son combustibles.

Las características que distinguen fundamentalmente a las proteínas es la posesión de un 15 a un 16 % de nitrógeno; pertenecen a este grupo las albúminas y la caseína. Los hidratos de carbono son compuestos orgánicos en los que la relación del hidrógeno al oxígeno es la misma que existe en el agua y el número de átomos de carbono es 6 o múltiplo de 6; a este grupo pertenecen los azúcares, los almidones y las celulosas. Las grasas se forman en unión de agua por la combinación de los ácidos grasos con la base triácida glicerina.

La materia orgánica contiene innumerables organismos vivos, la mayoría microscópicos. Son la parte viva y natural de la materia orgánica. Su presencia es indispensable para los procesos de degradación y descomposición de la misma. El éxito de un buen tratamiento de la materia orgánica depende de la alimentación y medio ambiente adecuados para que sobrevivan estos organismos. Estos microorganismos se pueden dividir en dos tipos generales: bacterias y organismos vivos complejos.

Las bacterias son organismos vivos microscópicos y constan de una sola célula. Sus procesos vitales, así como sus funciones, son similares a los de los vegetales. Se dividen en dos grandes grupos: bacterias parásitas y bacterias saprófitas.

Las bacterias parásitas viven normalmente a expensas de otro organismo vivo, llamado huésped, porque necesitan recibir el alimento ya preparado para consumirlo. Hay algunos que provienen del tracto intestinal de personas y animales, y durante su desarrollo producen compuestos tóxicos o venenosos que causan enfermedades al huésped; estas bacterias se conocen con el nombre de bacterias patógenas.

Las bacterias saprófitas se alimentan de materia orgánica muerta, descomponiendo los sólidos orgánicos para obtener su alimento, produciendo a su vez sustancias de desecho que consisten en sólidos orgánicos e inorgánicos. Por su actividad son muy importantes para facilitar o acelerar la descomposición de los sólidos orgánicos, proceso que no progresaría sin sus funciones.

Todas las bacterias parásitas o saprófitas, necesitan, además de alimento, oxígeno para su respiración. Existe un tipo de ellas que solamente pueden usar el oxígeno disuelto en el agua, y a veces también el oxígeno libre o molecular, a estos organismos se les conoce con el nombre de bacterias aerobias y el proceso de degradación que llevan a cabo se denomina descomposición aerobia, oxidación o degradación. Este tipo de descomposición se efectúa en presencia del oxígeno disuelto sin que se produzcan olores ofensivos o condiciones desagradables. Otro tipo de bacterias son aquellas que al contrario de las anteriores, tienen que obtener el oxígeno por medio de los sólidos orgánicos y de algunos inorgánicos, el cual se hace aprovechable en la descomposición de los sólidos; el proceso es llevado a cabo, en este caso, por bacterias llamadas anaerobias que producen la descomposición anaeróbica o putrefacción; es decir, la descomposición en ausencia de oxígeno disuelto, que dará origen a olores ofensivos y condiciones desagradables.

Hay un tipo de bacterias aerobias que pueden vivir en ausencia de oxígeno disuelto y se conocen como bacterias aerobias facultativas; de la misma manera las hay con el nombre de bacterias anaerobias facultativas, las cuales se adaptan a vivir en presencia del oxígeno disuelto. La adaptabilidad de este tipo de bacterias saprófitas es muy importante en el proceso de descomposición de los sólidos orgánicos.

Para lograr una eficiencia máxima en su función, las bacterias requieren una temperatura favorable. La gran mayoría de los tipos saprófitos prosperan mejor a temperaturas que varían de 20° a 40° C. Estos tipos se conocen como mesófilos. Unas cuantas viven a temperaturas desde 0° hasta 5° C. Estas se conocen como psicófilas.

En consecuencia, cuando todas estas condiciones ambientales, como son el abastecimiento alimenticio, el oxígeno, la humedad y temperatura se mantienen en forma adecuada y en cantidades suficientes para el pleno funcionamiento de las bacterias, la descomposición de los sólidos orgánicos se lleva a cabo de manera naturalmente ordenada.

Otros organismos microscópicos más complejos que los anteriores los hay en grandes cantidades en los residuos orgánicos. Pueden ser animales o vegetales,

proviene del suelo o de los desechos orgánicos, algunos capaces de moverse y otros no, pueden ser aerobios, anaerobios o facultativos, sus desechos sirven de alimentos a ciertos tipos de bacterias saprófitas. Estos organismos también actúan en la descomposición y degradación de los sólidos orgánicos.

Los virus son bacterias patógenas de tamaño microscópico, que aunque no intervienen en los procesos de descomposición de los sólidos orgánicos, su importancia estriba en que son agentes causales de cierto número de enfermedades en el hombre; como es la hepatitis, desarrollada en el intestino del hombre y arrastrada por las materias fecales hasta las aguas residuales.

Los organismos microscópicos existentes en los residuos orgánicos, incluyen algunas variedades de gusanos e insectos en diversos estados de desarrollo. Algunos son activos aprovechando los recursos de los procesos de degradación orgánica y otros prevalecen en residuos altamente contaminados.

Algunos organismos crecen y prosperan con facilidad bajo ciertas condiciones apropiadas para su desarrollo; otros viven en estado latente porque las condiciones de alimentación, del medio ambiente en general no les convienen o les convienen poco. Cuando estos dos factores experimentan un cambio en sentido favorable a la evolución de estos microorganismos es cuando se les ve pulular. Probablemente existen en la materia orgánica microbios que pueden resistir temperaturas de 100° C, por lo menos durante algunos minutos. Muchos microorganismos que existen en el suelo pueden resistir temperaturas extremadamente bajas.

## **2.2. El ciclo de la materia orgánica.**

La materia orgánica recorre un ciclo que se ha representado gráficamente en la figura 2-1, y al que se le han dado en ocasiones los nombres de ciclo de la vida y de la muerte, ciclo del nitrógeno, o ciclo de algunos de los elementos señalados en el esquema. El ciclo del nitrógeno puede describirse aproximadamente del siguiente modo: a la muerte de una planta o de un animal, se inicia la descomposición, acompañada de la formación de urea, que se descompone a su vez, dando amoníaco. Esta se llama la fase pútrida del ciclo del nitrógeno. La fase siguiente es la nitrificación, en la que los compuestos amoniacales se oxidan para formar nitritos y nitratos, y prepararse de este modo para servir de alimento a las plantas. En la fase de la planta viva, los nitritos y nitratos sufren la desnitrificación y de este modo son utilizados como alimento vegetal o animal. La fase superior del ciclo del nitrógeno, es la vida animal en la que este forma parte de la sustancia del animal vivo o se transforma en urea,

la que este forma parte de la sustancia del animal vivo o se transforma en urea, amoníaco, etc., por las funciones vitales del organismo animal. A la muerte del animal, el ciclo vuelve a comenzar. El ciclo del nitrógeno, al igual que el ciclo de la vida y de la muerte, es tan sólo una concepción ideal, porque en la naturaleza hay muchos cortos circuitos y retrocesos, que impiden la progresión continua del ciclo. La concepción de este ciclo es una ayuda para comprender los procesos biológicos del tratamiento de los residuos orgánicos, porque estos procesos siguen, de modo general, el ciclo de la vida y de la muerte.

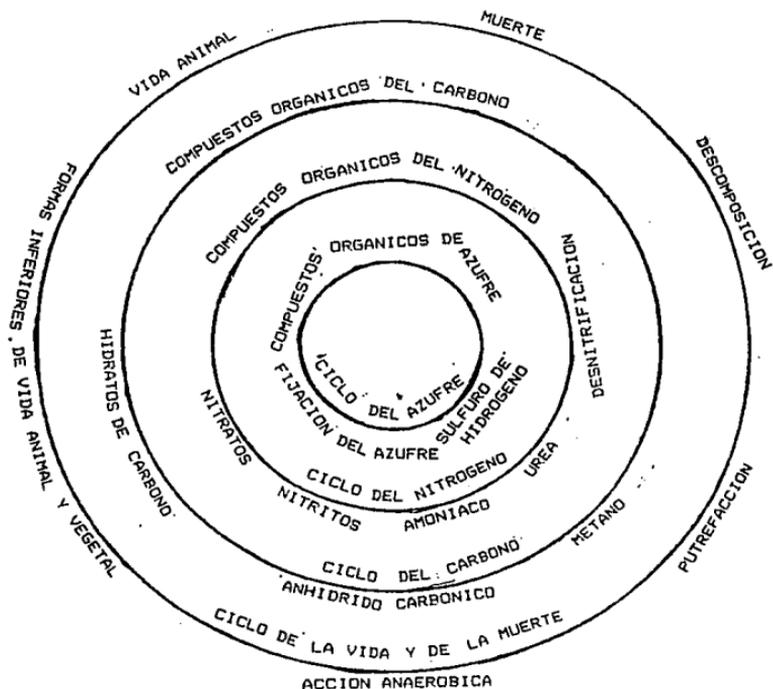


Figura 2-1. El ciclo de la materia orgánica.

## CAPITULO 3

### LA DIGESTION ANAEROBIA Y LA METANOGENESIS

#### 3.1. Conceptos generales.

La palabra fermentación proviene del latín "fervere" que significa hervir y fue primeramente empleada para describir el aspecto efervescente del jugo de la uva al elaborar el vino. En la actualidad, la acepción del término depende del área técnica o científica en que se esté empleando. Desde el punto de vista bioquímico la fermentación es la desasimilación anaerobia de compuestos orgánicos por la acción de microorganismos, células o extractos celulares. Técnicamente hablando se puede decir que, fermentación es aquella acción microbiana que es regulada por el hombre.

La desasimilación es un proceso enzimático que junto con la asimilación y biosíntesis integran el metabolismo celular. Mediante éste, compuestos utilizables como fuente de energía que se encuentran dentro de la célula o en el sustrato, son transformados en compuestos con menor energía que el compuesto del cual se forman, liberándose en este proceso una cierta cantidad de energía. A la desasimilación están sometidos la mayoría de los compuestos orgánicos naturales, algunos inorgánicos, y ciertos elementos tales como: glucósidos, alcoholes mono y polibásicos, aldehídos, ácidos orgánicos, hidroxilácidos y cetoácidos, aminoácidos, aminas, hidrocarburos, algunas sales de hierro, manganeso y arsénico, el carbón y azufre elementales, etc.

Los procesos de desasimilación son de naturaleza oxidante y pueden realizarse por: pérdida de un electrón; o por eliminación de hidrógeno. Este último es el caso más frecuente. Uno de los mecanismos para la deshidrogenación es el siguiente: se tiene una sustancia madre donadora de hidrógeno, el cual es transferido por un o una serie de portadores (como enzimas o pigmentos respiratorios), a una sustancia reducible que es la aceptora de hidrógeno; este aceptor puede ser el oxígeno atmosférico, uno o varios de los compuestos intermedios formados por el catabolismo o algún otro compuesto reducible presente en el sustrato.

Se dice que el proceso es una oxidación aerobia cuando el oxígeno atmosférico tomando parte en la reacción actúa como aceptor de hidrógeno. Cuando el proceso se efectúa sin la participación del oxígeno atmosférico la desasimilación es anaerobia y constituye una verdadera fermentación.

### **3.2. Fases de la degradación anaeróbica.**

**Desaparición del oxígeno presente en la materia.** En esta fase, la urea, el amoníaco y otros productos de la digestión pútrida, son oxidados parcialmente y en esta oxidación se consume rápidamente el oxígeno disuelto. Este es el inicio de la anaerobiosis.

**Putrefacción.** Las proteínas son descompuestas para formar urea, mercaptán, ácido sulfhídrico, ácidos grasos y ácidos aromáticos. Los hidratos de carbono se descomponen en sus ácidos grasos originales, agua, anhídrido carbónico, hidrógeno, metano y otras sustancias. La celulosa se descompone también pero más lentamente. Las grasas y los jabones se degradan y forman el ácido original de su composición, en unión de anhídrido carbónico, hidrógeno, metano, etc. La acción de las bacterias sobre las grasas y jabones es mucho más lenta que la acción sobre las proteínas, y los agentes biológicos activos en la biólisis de los hidratos de carbono, grasas y jabones no están completamente limitados a los anaerobios como en el caso de las proteínas.

**Estabilización.** Los productos de la descomposición se estabilizan transformándose en productos, como los nitratos y nitritos, que son utilizables para la alimentación de las plantas.

### **3.3. La digestión rumial y la metanogénesis.**

La fermentación metanogénica, también denominada digestión anaeróbica metanogénica, es un proceso bacteriano complejo, que ocurre de manera espontánea en la naturaleza cuando la materia orgánica bajo ciertas condiciones es cubierta por agua; dos ejemplos típicos se pueden mencionar: el primero se da en el cieno de las aguas pantanosas y el segundo en la digestión rumial o rúmen del ganado. En este último se han efectuado importantes estudios para tratar de explicar cuál es el camino que sigue dicho proceso.

Los animales rumiantes dependen de la fermentación bacteriana para poder digerir los vegetales de que se alimentan, que normalmente son plantas forrajeras y rastrojos, los cuales, contienen lignina, celulosa, pentosanas, materiales pécticos, fructosanas, azúcares simples, proteínas, algunos aminoácidos y materiales ácidos-nucleicos. Una dieta de granja puede, además, estar adicionada de: almidones, proteínas (vegetales o animales) procesadas y algunos compuestos nitrogenados no proteínicos como la urea. La lignina no es atacada en la digestión rumial, pero sí, los

carbohidratos que son hidrolizados y los azúcares simples que son fermentados para proveer energía al cultivo de bacterias. Estas obtienen nitrógeno de los productos de la degradación proteínica tales como aminoácidos y amoníaco. Los productos de la fermentación del total de la flora bacteriana son una mezcla de bióxido de carbono, hidrógeno, ácidos fórmico, acético, propiónico, butírico, succínico y láctico, como productos primarios, de los cuales el acético, propiónico y butírico son absorbidos por las paredes del aparato digestivo de donde pasan a la corriente sanguínea para ser usados como fuentes de energía del rumiante. Los otros productos primarios son sometidos a una segunda fermentación: el hidrógeno y bióxido de carbono junto con el formiato son convertidos a metano, y los ácidos láctico y succínico degradados a ácidos propiónico y acético. Siempre hay un exceso de bióxido de carbono ya que no sólo se produce de la fermentación bacteriana, sino también de la neutralización de ácidos por la saliva que actúa como buffer, fosfato bicarbonato. Esta acción moderadora de la saliva mantiene en cerca de 6.5 el valor del pH del rúmen y el cuerpo del animal regula la temperatura, conservando el habitat microbiano cerca de los 39° C.

Las bacterias responsables de la formación de metano en el rúmen y contenidas en el estiércol del ganado, continúan el proceso al proporcionárseles condiciones similares empleando recipientes herméticos o contenedores llamados "digestores". El estiércol alimentado al digestor contiene también lignina, celulosa y otros polisacáridos vegetales, así como detritus nitrogenados no proteínicos y lípidos (ver cuadro 3-1), estos materiales siguen un camino de degradación semejante al del rúmen. Sin embargo existe una diferencia fundamental en ambos casos, ya que, en el rúmen lo conveniente es la producción máxima de ácidos grasos y mínima de metano, mientras que en un digestor es a la inversa. Lo anterior se explica por el hecho de que la nutrición del rumiante depende de la absorción y subsecuente oxidación de los tres ácidos grasos mencionados (acético, propiónico y butírico), para proveerse de energía y productos biosintéticos intermedios; como el ganado no puede metabolizar el metano, la producción de más ácidos y menos metano será favorable a dicha nutrición, mientras que en una digestión anaeróbica aplicada al tratamiento de desechos orgánicos lo conveniente es la generación de más metano y menos ácidos grasos. Y en efecto ocurre: en el rúmen la relación metano : bióxido de carbono es alrededor de 0.3 a 1.0, mientras que en el digestor es de aproximadamente de 1.0 a 2.0; se desconocen los factores que controlan los diferentes balances en cada caso.

### **3.4. Bioquímica de la metanogénesis.**

En el digestor, los microorganismos responsables de la digestión están comprendidos en una amplia variedad de especies bacterianas con metabolismos

armónicos e interdependientes. Aunque el proceso en si no se conoce con exactitud se han podido diferenciar dos importantes familias bacterianas, las que actúan catalizadas por enzimas.

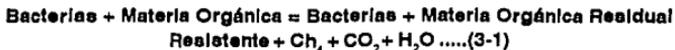
| CUADRO 3-1            |  |
|-----------------------|--|
| ORIGEN                | COMPONENTES DEL ESTIERCOL<br>TIPO DE MATERIAL  |
| DEL ALIMENTO          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• INDIGESTIBLES: PARTES LIGNIFICADAS, QUERITINA, LIGNINA, SUBERINA, PECTINA.</li> <li>• NO DIGERIDAS: CELULOSA, HEMICELULOSA, PENTOSANAS.</li> <li>• PRODUCTOS DIGESTIVOS NO REASORBIBLES: ALMIDON, GLUCOGENO, AMINOCIDOS, ACIDO OXALICO, OXIACIDOS.</li> <li>• SUBSTANCIAS MINERALES, AGUA.</li> </ul> |
| DEL CUERPO DEL GANADO | <ul style="list-style-type: none"> <li>• RESTOS DE LAS SECRECIONES DIGESTIVAS DE LA EXCRECION.</li> <li>• FERMENTOS: PIGMENTOS BILIARES, ACIDOS GALICOS, MUCUS, EPITELIO INTESTINAL, PROTEINAS, LIPOIDES.</li> </ul>   |
| VARIOS                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• BACTERIAS Y OTROS MICROORGANISMOS.</li> <li>• PRODUCTOS DE FERMENTACION Y DEGRACION: INDOL, FENOL, CRESOL, ESCATOL, ACIDOS ORGANICOS.</li> </ul>  |

**Organismos caprófitos acidogénicos** (facultativamente anaerobios). En este grupo se encuentran las bacterias formadoras de ácidos que producen ácidos grasos de poco peso molecular como el acético y el propiónico. Algunas veces se producen en cantidad suficiente para abatir el pH hasta un nivel en el que toda actividad biológica es imposible. Este grupo ataca las sustancias orgánicas complejas: proteínas, carbohidratos y grasas, para convertirlos en ácidos y alcoholes.

**Bacterias metanogénicas.** Estas convierten los ácidos y alcoholes en metano y bióxido de carbono.

Los organismos diferentes de las bacterias, los protozoarios por ejemplo, parecen tener una escasa influencia sobre la digestión de la materia, pero aún falta que se determine la posible efectividad de las levaduras a este respecto.

En la digestión anaeróbica no toda la materia orgánica se descompone, putrifica o digiere con rapidez. Son ejemplos de componentes resistentes la lignina y otras sustancias celulósicas. Estos componentes permanecen sustancialmente inalterados aún durante la digestión prolongada. Por consiguiente una relación ecuacional para la digestión de la materia orgánica tendría la siguiente forma:



Experimentalmente se ha encontrado que la digestión ocurre en, lo que podría considerarse como, 3 etapas básicas, las que deberán funcionar para una producción microbiológica efectiva de biogás.

La primera etapa es la hidrólisis y consiste en la conversión enzimática de polímeros y compuestos orgánicos insolubles como: polisacáridos, proteínas, las peptonas, los péptidos, los ésteres del alcohol, los ésteres del ácido fosfórico, los glicéridos y otros compuestos. Estos son convertidos a compuestos solubles más sencillos. La segunda etapa incluye la fermentación de los productos originales de la primera etapa, para la formación de ácidos grasos volátiles, hidrógeno y bióxido de carbono. La tercera etapa es la metanogénica; en ésta se fermentan los ácidos grasos y se reduce parte del bióxido de carbono produciéndose metano. En las dos primeras etapas actúan microorganismos tanto aerobios como anaerobios, produciéndose una atmósfera rica en bióxido de carbono favorable a las bacterias metanogénicas, que son estrictamente anaerobias.

En forma también experimental, se ha observado que las dos primeras etapas transcurren satisfactoriamente a temperaturas ambientales (aquí el rango de temperaturas de trabajo es bastante amplio) mientras que, en la etapa metanogénica el control de la temperatura es más estricto.

Las bacterias productoras de metano no existen en cantidades suficientes, ni su capacidad reproductora es comparable con la de muchos organismos saprófitos; en consecuencia, los ácidos orgánicos pueden formarse más rápidamente de lo que la limitada población de formadores de metano puede asimilarlos y como resultado los ácidos acumulados reducen el pH a niveles más desfavorables para los formadores de metano.

Fórmulas de algunas formaciones de metano:

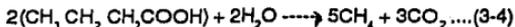
**Acido acético:**



**Acido propiónico:**



**Acido butírico:**



### 3.5. Fisiología de la bacteria metanogénica.

Existen muchas probabilidades que las especies de bacterias metanogénicas que se muestran en el cuadro 3-2, sean puras, todas ellas tienen como sustrato común hidrógeno y dióxido de carbono; algunas pueden usar formiato y sólo una, la *Methanosarcina barkeri* puede utilizar metano y acetato en la adición a hidrógeno y dióxido de carbono. Algunas especies requieren de factores de desarrollo que se encuentran en el fluido rumial, la *Methanobacterium rumiantium*, por ejemplo, requiere de acetato, 2 metilburato y coenzima M ( $\text{HS-CH}_2\text{-SO}_3^-$ ); en general todas las bacterias metanogénicas dependen de la acción metabólica de otros tipos de microorganismos que involucrados en la digestión anaeróbica producen hidrógeno, dióxido de carbono, algunas cadenas de carbono (a partir de carbohidratos) y amonio (a partir de proteínas), este último es la principal fuente de nitrógeno para la bacteria metanogénica que es esencialmente chemolithotrophic autotrophas y además es estrictamente anaerobia porque aún cuando requiere de un potencial redox de -350 milivoltios no tiene la facultad de reducirlo a este valor y la más ligera traza de oxígeno le resulta tóxica; obtiene su desarrollo en condiciones de pH cercanas a la neutralidad.

| CUADRO 3-2   | ESPECIES PROBABLEMENTE PURAS DE BACTERIAS METANOGENICAS                                 |
|--|---|
| SUBSTRATO  | ORGANISMOS  |
| $\text{H}_2 + \text{CO}_2$   | METHANOBACTERIUM M. O. H.<br>METHANOBACTERIUM THERMOANTOTROPHICUM                       |
| $\text{H}_2 + \text{CO}_2$   | METHANOCOCCUS VANNIELLII<br>METHANOBACTERIUM RUMIANTIIUM<br>METHANOBACTERIUM FORMICICUM |
| $\text{HCOOH}$   | METHANOBACTERIUM MOBILIS<br>METHANOSPIRILLUM HUNGATI                                    |
| $\text{H}_2 + \text{CO}_2$<br>$\text{CH}_3\text{OH}$<br>$\text{CH}_3\text{COOH}$ | METHANOSARCINA BARKERI  |

Las especies mostradas en el cuadro 3-2, cubren el rango de morfologías: bacilar, coco, espiral y sarcina e incluyen los tipos Gram Ve positivo y Gram Ve negativo, sobre estas bases, han sido clasificadas dentro de varios géneros de bacterias más conocidas, sin embargo su similitud fisiológica ha permitido que se les clasifique dentro de un grupo particular al que se ha denominado Methanobacteriáceas.

## CAPITULO 4

### DIGESTIBILIDAD DE LOS DESECHOS ORGANICOS

Sólo una parte del total de la materia prima alimentada al digestor es verdaderamente convertida a metano. En ella se encontrarán componentes total o parcialmente digeribles y compuestos definitivamente no digeribles. Controlar las condiciones de la digestión implica haber efectuado previamente pruebas de laboratorio, caracterización de la materia prima, aplicación de los tratamientos preliminares tales como mezclado con otros desechos para ajustar la relación carbono-nitrógeno, adiciones químicas que se requieren de nutrientes suplementarios, ajuste en el valor del pH, concentración o dilución para obtener el porcentaje óptimo de sólidos, agitación, filtración y separación de arenas, si se requiere de bombeo para el transporte de la mezcla, etc.

#### 4.1. Pruebas de laboratorio.

Algunas características de la digestión de los lodos se pueden determinar convenientemente en el laboratorio según una base intermitente. Si se simulan bien las condiciones esperadas de operación, los resultados obtenidos pueden proporcionar información utilizable para el diseño de las unidades de digestión. El comportamiento probable de las unidades continuas de digestión se puede suponer igual al de una sola carga diaria de lodos durante el período de almacenamiento requerido.

Las pruebas comparativas pueden incluir experimentos: 1) con y sin siembra; 2) a diferentes temperaturas; 3) con y sin tratamiento químico, tal como la adición de cal, y 4) con y sin agitación. Un aparato adecuado de prueba que se muestra en la figura 4-1, incluye un colector de gas (\*) conectado a un frasco parcialmente lleno con lodos y sumergido en un baño de agua con temperatura controlada. Las medidas de la digestibilidad son la cantidad de gas desprendido a determinados intervalos y su composición. En experimentos de digestión continua (condición estable), se agregan incrementos diarios de sólidos. Sus cantidades, después de que la digestión se hace normal, deben ser tales que se mantenga una producción constante de gas de composición uniforme.

\* Se llamará gas, en adelante, al producto crudo de la digestión, y a sus componentes con sus respectivos nombres o fórmulas.

Para fines experimentales, el rendimiento total de gas y de metano (siendo la diferencia sustancial bióxido de carbono en su totalidad), se informa convenientemente en relación con: 1) el volumen de gas total y  $\text{CH}_4$  (metano), por unidad de peso de sólidos volátiles frescos (S.V.) o de sólidos volátiles destruidos (S.V.D.); ó 2) peso del gas total y  $\text{CH}_4$  por unidad de peso de sólidos volátiles destruidos. En el laboratorio, los volúmenes de gas se miden generalmente en mililitros o en litros, y los pesos de gas y de sólidos en gramos o en kilogramos. La unidad de tiempo es por lo general, un día.

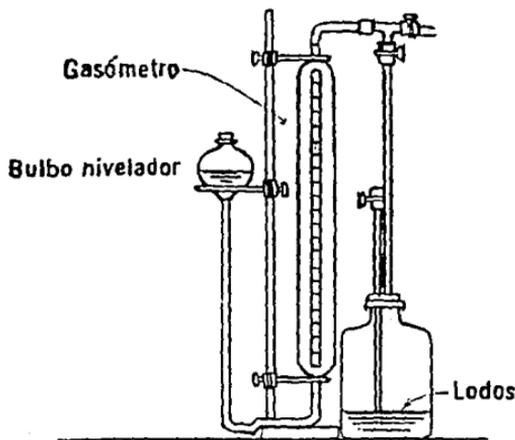


Figura 4-1. Aparato de laboratorio para medir la digestibilidad de los desechos orgánicos.

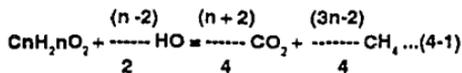
#### 4.2. Variables de operación en el proceso de digestión.

**Equilibrio entre la población de microorganismos.** Este equilibrio se logra con las siembras en los materiales influentes a los digestores y la capacidad de

amortiguamiento necesario para evitar que los ácidos orgánicos disminuyan el valor del pH de la materia en digestión a niveles desfavorables.

**Suministro de alimentos.** La digestión de la materia orgánica depende en gran medida de su composición, naturaleza y cantidad; cuando ésta es rica en contenido de celulosa y hemicelulosa y al mismo tiempo contiene compuestos nitrogenados de naturaleza proteínica o amónica en cantidad suficiente como para mantener un pH ligeramente alcalino, que neutralice los ácidos orgánicos generados durante la primera etapa de la fermentación, la producción de gas es grande y con elevada proporción de metano; sustancias pobres en compuestos nitrogenados dan bajo rendimiento de gas, y sustancias puramente proteínicas no producen metano. Los polisacáridos son favorables para la formación de metano.

Las grasas son digeridas satisfactoriamente en los tanques de digestión liberando anhídrido carbónico y metano de acuerdo con las reacciones hipotéticas explicadas por Buswell y Boruff como sigue:



en la que n es un número entero.

Puede verse por esta fórmula que el peso de los productos de la digestión excede del peso de la sustancia original digerida, a causa del agua que interviene en la reacción.

La evacuación de los restos de cocina a las atarjeas o a las instalaciones de tratamiento de aguas negras, sea como empresa municipal o privada se está generalizando mucho, y se le denomina con el nombre de evacuación doble.

Puede aceptarse en general, que el principal efecto sobre la instalación del tratamiento es cuantitativo, pues los sólidos de los residuos de cocina, en lo que al tratamiento se refiere, no difieren sustancialmente de los sólidos de las aguas negras. Estimaciones hechas sobre la calidad y la cantidad de dichos residuos, indican que si todos los desechos de cocina de una comunidad, de un país industrializado, se arrojaran a las atarjeas, la carga orgánica de la instalación para el tratamiento de las aguas negras sería aproximadamente el doble.

**Relación carbono-nitrógeno.** Experimentalmente se ha encontrado que la flora bacteriana requiere de 25 a 30 partes de carbono por una de nitrógeno para

efectuar sus funciones vitales en forma óptima (lo cual se traduce en mayor eficiencia del mismo), por lo tanto, se deberá procurar que en la materia prima la relación entre estos dos elementos se aproxime tanto como sea posible a estos valores; en el rango de 20:1 a 30:1 la reacción metanogénica se conduce satisfactoriamente pero se inhibe al rebasar estos valores límite.

Como el nitrógeno contenido en un material está presente en diversas formas químicas, no hay un método de análisis único para determinarlo sino que es necesario recurrir a varios. Uno que cuantifique el nitrógeno orgánico como amoníaco; y otro el que está en forma de nitratos y nitritos etc. Además, los porcentajes pueden obtenerse al peso seco, al peso húmedo o a los sólidos volátiles. Al primero es más práctico. La fuente principal de energía de la bacteria metanogénica es el nitrógeno amónico y en menor grado el que está presente como aminoácido; el carbono presente en compuestos no digeribles (como ligninas) no es asimilable.

**Nutrientes suplementarios.** Determinándose la cantidad de carbono y nitrógeno de un material, se está en condiciones de saber si es necesaria la adición de una sustancia que conteniendo estos elementos aproxime la relación a la condición de equilibrio óptima. En el caso del estiércol de vaca, se ha experimentado que la adición de otros nutrimentos no tiene ningún efecto sobre la producción de gas y sólo se observó un efecto estimulante al añadir pequeñas cantidades de urea.

Se ha experimentado que la adición de carbón activado en la digestión de las aguas negras tiene las siguientes ventajas: a) un aumento del pH en el tanque de digestión; b) aumento en la velocidad de la digestión; c) aumento en la cantidad y en el tanto por ciento de metano del gas producido; d) ausencia de olor en el lodo digerido; e) reducción de la cantidad de productos químicos acondicionadores que son necesarios; y f) mejoría en las condiciones de drenaje del lodo. La dosis empleada ha sido de 2 a 10 % de los sólidos volátiles secos brutos contenidos en el lodo; 8.81 kilogramos (15 libras) de carbón activado por 3,785 M<sup>3</sup> (un millón de galones) de aguas negras, con 120 mg. por litro de sólidos en suspensión, cuando se aplica un 2% de este carbón. Hay una dosis óptima, por encima y por debajo de la cual, parecen obtenerse resultados menos satisfactorios.

**Concentración de sólidos** El agua cumple un papel activo tanto en la hidrólisis como en la formación de metano y además como medio para el substrato bacteriano. Determinar analíticamente los requerimientos que de ella tiene el sistema sería prácticamente imposible por lo que se hace imperativo en esta etapa implementar a escala de laboratorio, digestores en los que se obtengan en forma experimental el porcentaje óptimo, que además es función del tipo de digestor que se va a emplear y

del tiempo de residencia. Por ser más práctico, este valor está referido a los sólidos totales (S.T.).

En la práctica se ha encontrado que el porcentaje óptimo de sólidos totales está alrededor del 7 % para digestores de flujo continuo; algunos autores amplían este valor a un rango entre 5 y 7 % de sólidos totales para este tipo de digestores, y hasta 25 % de S.T. para los de régimen intermitente que también son llamados digestores "batch".

**Modo de mezclado.** La digestión se convierte en una operación uniforme, en la que los sólidos entrantes o nuevos se dispersan rápida y uniformemente en los lodos bajo digestión y que no existe diferenciación ni vertical ni horizontal entre los lodos viejos y nuevos o entre sólidos y líquidos. Esto requiere mezclar o agitar efectivamente los lodos en digestión. La energía requerida se obtiene generalmente de fuerzas externas, pero se puede suministrar mediante la producción normal de gas; en tanques muy profundos la ascensión vertical de los gases que emanan de los lodos digeridos se vuelve suficientemente rápida y voluminosa para lograr el mezclado requerido.

El objetivo inmediato consiste en proporcionar la oportunidad óptima de contacto entre el alimento y los microorganismos, y la óptima dispersión de las enzimas que se van acumulando. Puede constituir un objetivo incidental, la prevención para que se formen bolsas concentradas de productos biológicos intermedios y finales, indeseables, incluyendo los ácidos orgánicos.

Dentro del proceso de digestión, la agitación es un medio eficaz y adecuado para romper las natas formadas en la superficie de la mezcla. Estas natas dificultan la salida de gas del interior de la mezcla y provocan la inhibición de la producción.

La agitación es, al mismo tiempo, útil para homogeneizar la temperatura dentro del digestor. Otro aspecto importante de la agitación en el proceso que nos ocupa, es el de mantener a las bacterias en permanente contacto con la materia nutritiva, esto ayuda a una reproducción más rápida y por lo tanto favorece la generación de gas. La agitación propuesta no debe ser permanente, sino por el contrario transitoria, intermitente, como para que permita cumplir con lo antes mencionado, sin tener el riesgo de perder una gran cantidad de materias biológicas sin digerir, con sus consecuencias correspondientes, en los lodos de desecho.

La acumulación interna de gas, provocada por la formación de natas en la superficie, trae como consecuencia una disminución del pH del medio debido al alto contenido de bióxido de carbono del gas producido.

En instalaciones de digestores realizadas en algunas provincias de China

Popular, de 10 a 20 metros cúbicos de capacidad, en los cuales por ciertos mecanismos remueven los lodos digeridos una vez por año, han llegado a la conclusión de que la instalación de un sistema de agitación no es necesaria.

Algunos tanques están dotados de dispositivos mecánicos de mezcla, accionados con motor. Otros métodos en uso comprenden, la descarga de los gases del digestor en los niveles inferiores del tanque, la recirculación del contenido del tanque por bombeo, la admisión del lodo por diversos lugares y alturas, y los dispositivos automáticos sugeridos por Rawn para digestores de aguas negras.

La agitación del lodo en un tanque de temperatura regulada, dotado de tubos de calefacción, mejora la transmisión del calor al contenido del tanque. Esta agitación tiende a evitar la formación de una capa de lodo aisladora en torno de los tubos. No obstante, la experiencia del funcionamiento ha demostrado que en algunos casos, como por ejemplo, cuando hay líquido que sobrenada, una agitación excesiva puede ser perjudicial. En un tanque con agitación o remoción mecánica, no hay líquido que sobrenade.

En una instalación pequeña, sin digestor secundario para la concentración del lodo, los inconvenientes de la mezcla pueden ser serios. En las grandes instalaciones donde se dispone de capacidad para digestión secundaria, se remueve o agita el contenido de los digestores primarios, para reducir el tiempo de digestión.

Los beneficios de la digestión rápida se pueden obtener en tanques de digestión donde se posibilite mezclar bien el contenido del tanque. El uso de la recirculación del gas, para la mezcla del lodo, se está practicando mucho en los procesos de reducción catalítica.

**Temperatura.** La temperatura óptima de operación dentro del rango mesofílico es de 35° C, pero el proceso transcurre aceptablemente con valores entre 25 a 35° C. La temperatura no tiene efecto sobre la cantidad total de gas producido, pero al incrementarse sobre el rango citado se experimenta un aumento en la velocidad de producción.

La acción de las bacterias disminuye casi proporcionalmente con la temperatura, hasta cesar prácticamente a los 10° C. Sin embargo la vida bacteriana no sufre ningún perjuicio permanente, incluso a temperaturas por debajo del punto de congelación, pues, al subir de nuevo la temperatura, la digestión se reanuda de un modo normal. Se ha comprobado que los lodos helados son tan eficaces para la siembra como los lodos que no se han helado. La figura 4-2, nos muestra la producción de gas, de una mezcla

de estiércol de vaca, a diferentes temperaturas.

Cuando la temperatura sube por encima de los 37.3° C hay una ligera reducción en la velocidad del incremento de la actividad bacteriana, hasta llegar a los 40.5° C empieza a incrementarse para alcanzar otro óptimo a los 53.3° C, que se denomina temperatura termófila. El funcionamiento de la temperatura termófila no se ha intentado en gran escala, a causa de la sensibilidad de los termófilos a ligeros cambios de temperatura y de la mala calidad del líquido que sobrenada.

Entre los métodos de calentamiento de los tanques para digestión de lodos figuran:

1. Circulación de agua caliente por tubos instalados en el interior del tanque.
2. Circulación del contenido del tanque a través de un transformador de calor como el mostrado en la figura 4-3.
3. La inyección de vapor en el contenido del tanque.
4. La inyección de agua caliente en la succión o la descarga de la bomba que lleva el lodo al tanque de digestión.
5. El calentamiento directo por combustión sumergida.
6. La difusión de los productos calientes de la combustión a través del lodo primario en un pequeño tanque de calentamiento, antes de que el lodo entre al tanque de digestión.
7. El uso de una bomba de calor.

Los métodos más usados son el 1 y el 2, con tendencia a preferirse el 2. Como los transformadores de calor externos r.o tienen los inconvenientes de los sistemas de calefacción interna, y requieren una circulación continua y una mezcla permanente del lodo, se regula más fácilmente la temperatura del contenido del tanque.

Cuando se usan tubos de circulación de agua caliente, el agua entra normalmente en ellos a una temperatura de 48.8 a 54.4° C y sale a unos 37.7° C. Si se usan temperaturas más altas, el lodo puede pegarse al tubo y actúa como un aislante contra la transmisión de calor. Los tubos de un diámetro de 5 a 6.25 cm. deben colocarse en la región en que la digestión es más activa, con la base del serpentín a 90 ó 120 cm.

por encima del fondo del tanque, y con la parte superior del serpentín a media altura del tanque. El punto más alto del serpentín puede tener una ventilación para evitar acumulaciones de aire. Para los tubos y soportes que se instalen en los tanques de digestión debe usarse material resistente a la corrosión.

Un dato común para calcular la transmisión de calor a través de serpentines de hierro galvanizado es el de 111 B.T.U./M<sup>2</sup> de superficie del tubo, por cada grado Fahrenheit de diferencia de temperatura, y por hora. Para conservar el calor en los límites fríos, el tanque debe estar bien aislado. Un método es rodear el tanque de una capa de tierra y aislar la parte superior con corcho y otro material aislante, o poner una cubierta doble. Otra forma de aislamiento de las paredes del tanque, que además le da mejor aspecto, es cubrirlo con un revestimiento de ladrillo, dejando un espacio muerto de unos 5 cm. entre el tanque y revestimiento.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas se han obtenido resultados satisfactorios empleando calentadores solares para elevar la temperatura de la mezcla alimentada de 5° C a 10° C por encima de la temperatura de operación, con lo cual se restituyen las pérdidas de calor del sistema.

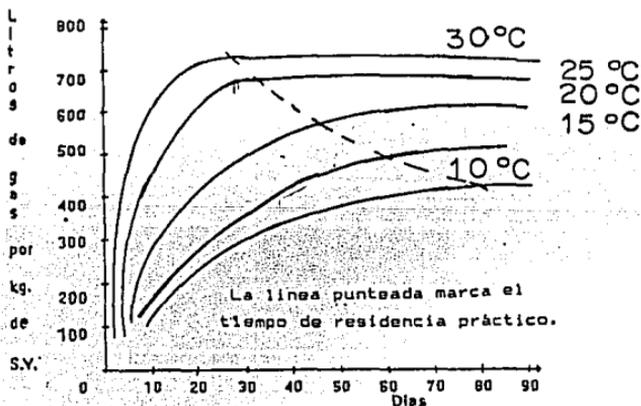


Figura 4-2. Producción de gas a diferentes temperaturas.

El Comité sobre Digestión de Lodo de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles dice:

Entre las consideraciones que deben tomarse en cuenta al elegir la temperatura para el funcionamiento del tanque y al proyectar éste, se encuentran: a) una comparación entre el costo que supone proporcionar mayor capacidad para la digestión a menor temperatura y el que necesita para el equipo adicional destinado al calentamiento y al aislamiento con temperaturas altas, dando el debido valor a la cantidad mayor de gas que se obtiene; b) la capacidad del tipo de tanque elegido para calentarse y retener el calor; c) el método de calefacción y la velocidad de transmisión del calor; d) el efecto de la mayor temperatura del agua sobre la rapidez con que puede aterronarse el lodo en los conductos en espiral calentados; e) el efecto sobre el balance de calor de la concentración de sólidos en el lodo en el tanque y en el lodo fresco; f) la pérdida de calor con el licor del lodo y la posibilidad de alguna recuperación por el intercambio de calor; g) el efecto de un desprendimiento de gas activo sobre el área y la profundidad del tanque y sobre la formación de espuma; h) la necesidad y el costo relativo de un almacenamiento de lodos durante el invierno; i) el hecho de que el tamaño total de los tanques de digestión de lodo y almacenamiento del mismo, no es directamente proporcional al tiempo necesario para la digestión; y j) el efecto de la duración de las temperaturas bajas del invierno sobre el costo relativo del funcionamiento a diferentes temperaturas.

El calor suministrado a los tanques calentados de digestión debe ser suficiente: 1) para elevar la temperatura de los lodos que entran, a la del tanque; 2) para compensar la pérdida de calor del tanque a través de sus paredes, fondo y cubierta, y 3) para compensar la pérdida de calor en las tuberías y otras estructuras entre la fuente de calor y el tanque. La cantidad de calor que interviene en las reacciones de digestión y que se utiliza en la evaporación del agua hacia los gases de los lodos es tan pequeña que se puede omitir en los cálculos de Ingeniería.

El calor específico de la mayor parte de los lodos es substancialmente el mismo que el del agua. La pérdida de calor  $Q$  a través de los muros, fondo y cubierta de un tanque es una función de la diferencia de temperatura  $\Delta T$ , el área  $A$  del tanque, y el coeficiente del flujo de calor  $C$  de donde:

$$Q = CA(\Delta T) \dots \dots \dots (4-2)$$

El valor  $C$  depende de: 1) el movimiento de los fluidos ambientales (los lodos en el interior y aire o agua fuera del tanque); 2) el espesor de las porciones específicas

del tanque y su conductancia relativa, y 3) las oportunidades para la radiación. Para tanques de concreto los valores aproximados globales para C en B.T.U. por plé cuadrado y por hora son 0.10, 0.15 y 0.30 (0.025, 0.0378 y 0.0756 K cal. por 929 cm<sup>2</sup> y por hora) para exposiciones a suelo seco, aire y suelo húmedo, respectivamente.

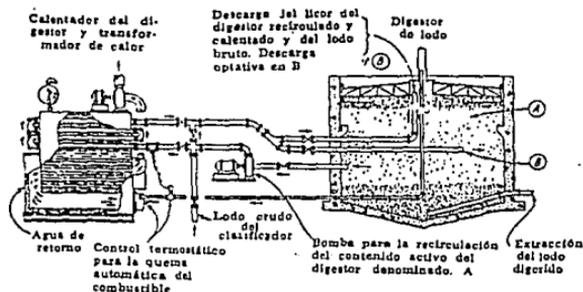


Figura 4-3. Diagrama de la disposición de un sistema de calefacción de un digestor, usando calentador, transformador de calor, y recirculación.

La geometría del tanque deberá elegirse de tal forma que se obtenga la relación más grande de volumen a superficie. Procurando exponer al mínimo las porciones donde ocurran las mayores pérdidas por unidad de área.

**Control del pH de la mezcla.** La digestión se caracteriza por el cambio gradual de una etapa ligeramente ácida a una alcalina conforme va transcurriendo, por lo que determinando los valores del pH en diferentes puntos del digestor, es posible conocer si las diversas etapas del proceso están conduciéndose convenientemente. El rango de valores de pH es el determinado por las condiciones de acidez-alcalinidad, que favorecen el cultivo de las diferentes familias bacterianas; las acidogénicas requieren un medio ligeramente ácido con valores óptimos de pH entre 6 y 6.5, a partir de éstos, los productos metabolizados (como el amoníaco) disminuyen el grado de acidez y tienden a la neutralidad o a valores de pH ligeramente alcalinos. En estas condiciones se favorece el cultivo de las bacterias metanogénicas, y la población que en un principio era predominantemente de acidogénicas, desplaza el equilibrio hacia el lado de las metanogénicas. De esta manera, si las condiciones iniciales y de operación son propicias, el proceso va autorregulando sus condiciones de acidez-alcalinidad y automáticamente se pasa de la etapa acidogénica a la metanogénica.

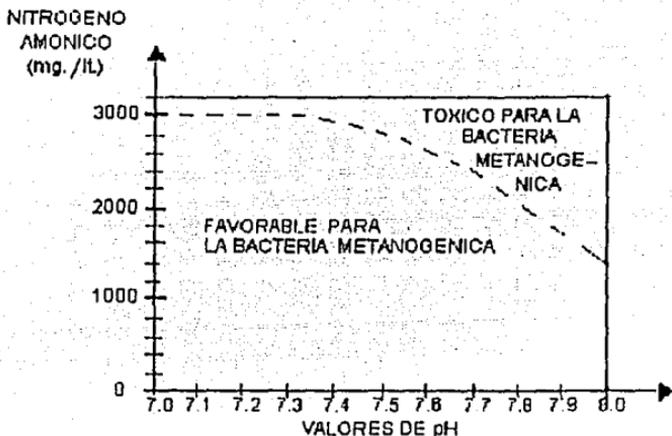


Figura 4-4. Contenido máximo permisible de nitrógeno amoníaco.

Puede ocurrir que las características de la materia prima alimentada tenga valores correctos de pH pero los componentes orgánicos al fermentarse den productos que acidifiquen excesivamente al medio e inhiban el proceso, en este caso se ha probado aumentar la alcalinidad agregando a la mezcla de alimentación ya sea hidróxido de calcio o amoníaco con los resultados más o menos favorables ya que se tienen inconvenientes.

Los ajustes en el valor de pH de la mezcla alimentada se practican usualmente cuando la materia prima entrante al digestor es de procedencia industrial o de una mezcla de desechos de procedencia diversa; en el caso del estiércol de vaca no es necesario hacerle ajustes al respecto, ya que una mezcla de alimentación con 7 % de sólidos totales promedio a la entrada, observa valores de pH entre 6 y 6.5 y su relación C-N permite que la transición de ácido a alcalino se efectúe en forma autorregulada obteniéndose valores de pH entre 7 y 7.5 en los lodos digeridos de la descarga. Ver figura 4-4.

#### 4.3. Tiempo de digestión.

Los períodos de digestión que se usaban en la práctica hasta 1942 variaban entre 30 y 60 días, bajo condiciones mesofílicas (25 a 30° C ) en tanques con temperaturas reguladas. Cuando no se regula la temperatura y puede bajar hasta la región psicrófila en tiempo frío (10° C), como en los tanques Imhoff, se han usado hasta períodos de 6 meses.

Ciertos ensayos y la experiencia limitada de la práctica, han mostrado que con una debida regulación de las condiciones del medio, el lodo puede quedar digerido en 10 días o menos. Tan corto período de digestión ha recibido el nombre de "digestión rápida". Esta digestión bajo condiciones termofílicas (40.5 a 53.3° C) no se ha difundido mucho debido a la incertidumbre en la regulación de los digestores bajo estas condiciones, y a causa de otros factores.

La digestión del lodo en 10 días o menos, se puede realizar hoy con éxito en instalaciones piloto. Su éxito en instalaciones de gran escala, depende de: 1) una mezcla continua, suficiente para sembrar el lodo entrante y para evitar la formación de espuma; 2) la posibilidad de hacer la alimentación tan continua como sea posible; 3) una temperatura de 53.3° C. Las cargas se recomiendan del orden de unos 0.24 a 0.4 kg. de sólidos volátiles por 100 litros de volumen del tanque y por día, con un lodo que contenga aproximadamente 8% de sólidos en un período de digestión de 10 días. Ver figura 4-5.

Se ha dicho que cuando la digestión del lodo se realiza rápidamente, las autoridades competentes de Ingeniería Sanitaria de ciertas localidades, son un obstáculo para su adopción, debido a que según las normas sanitarias, el período de digestión tiene que tener un límite mínimo de duración.

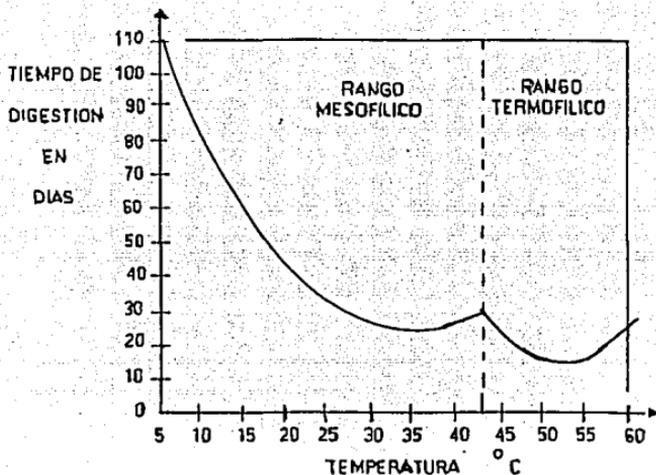


Figura 4-5. Tiempos de digestión-temperaturas.

En los proyectos prudentes se sigue admitiendo un plazo mínimo de 30 días y la tendencia en las instalaciones grandes es el uso de períodos variables de 10 a 15 días.

Se sabe que en el proceso de digestión del lodo se producen sustancias en las primeras fases que inhiben la actividad en las subsiguientes. Separando la digestión en dos o más fases, se pueden vencer algunas de estas dificultades y lograr algunas de las ventajas de una remoción o agitación ligera, realizando ésta únicamente en la primera fase, con un mejoramiento en la calidad del líquido que sobrenada en la segunda fase, y ausencia de espumas en ambas. La acción digestiva es más rápida durante la primera fase, desprendiéndose más de la mitad de los gases totales durante las primeras 24 horas; la primera fase de digestión se completa en un corto número de días.

Se ha comprobado que se obtienen buenos resultados con períodos de 6 a 8

días para la primera fase y de 22 a 25 para la fase secundaria. En algunas instalaciones se ha considerado conveniente usar el digestor de la segunda fase como tanque de almacenamiento sin regulación especial de calor. La digestión en dos fases se ha llevado a cabo bombeando el lodo del tanque de la primera fase a un tanque para la segunda, estableciéndose rara vez más de dos fases. Se han hecho ensayos satisfactorios realizando la primera fase bajo condiciones termofílicas y la segunda en un tanque sin calentar. Con este sistema casi las dos terceras partes del gas total se obtienen en unos cinco días, y el período de digestión se reduce a 12 días.

Entre las ventajas de la digestión en dos fases, en tanques independientes, puede incluirse un menor costo en equipo para el tanque, pues sólo el tanque para la primera fase necesita estar regulado en su temperatura y equipado para agitar el contenido y recoger el gas.

#### **4.4. Índices de acción digestiva.**

Los índices de acción digestiva que pudieran llamarse medidas de la digestión son:

- 1) Producción de gases en cantidad y calidad.
- 2) Sólidos totales volátiles y fijos.
- 3) Demanda bioquímica de oxígeno.
- 4) Acidez y pH.
- 5) Ácidos volátiles.
- 6) Grasas.
- 7) Características del lodo.
- 8) Olor.

La cuantía de la digestión puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$P = 1 \frac{(100 - R)}{(100 - D) R} \times 100 \dots\dots\dots(4-3)$$

en la que:

- P = Reducción en por ciento de la materia volátil.
- R = Tanto por ciento de la materia volátil en el lodo bruto.
- D = Tanto por ciento de la materia volátil en el lodo digerido.

Se puede considerar que son satisfactorias las condiciones existentes en un tanque de digestión, cuándo:

- a) El contenido de metano del gas del digestor está entre el 55 y 75 %, y la suma de metano y el anhídrido carbónico constituye el 95 % del gas producido.
- b) Los sólidos representan un 15 %, siendo óptimo un contenido del 8 % aproximadamente y la materia volátil es un 50 % de los sólidos.
- c) El pH del lodo digerido está entre 7.0 y 8.0. Con un pH entre 6.0 y 6.5 se inhibe la digestión. Por debajo de 4.5 y 4.0, cesa la digestión efectiva.
- d) Ácidos volátiles por debajo de unos 2000 mg./lt. Pueden considerarse normales unos 300 mg./lt.
- e) Alcalinidad superior a unos 2500 mg./lt.
- f) Grasa prácticamente ausente en el lodo digerido.
- g) Lodo digerido negro rápidamente drenable, definitivamente viscoso, y con olor inofensivo más que putrescible.

El nitrógeno del lodo digerido, de las aguas negras, será como promedio de 1.5 a 2.0 %, según su composición original. El contenido de ácido fosfórico variará entre 0.3 y 1.5 %, con un promedio cercano a esta última cifra. No debe contener potasa. La presencia de ácido sulfhídrico, escatol, mercaptanos y otras sustancias de mal olor, indicará que la digestión no es satisfactoria, pues simples trazas de ellas, producen olores ofensivos característicos y muy desagradables.

# CAPITULO 5

## EVALUACION DE LOS DESECHOS ORGANICOS

### 5.1. Definiciones.

Para fines de cálculos prácticos se acostumbra a emplear los términos siguientes:

**Materia prima:** cualquier desecho en las condiciones que presenta después de haber sido recolectado.

**Estiércol fresco (E.F.):** el recolectado poco tiempo después de producido. En el caso de ganado confinado incluye restos de alimentos, parte de la orina, cama estabular y agua de aseo.

**Estiércol seco (E.S.):** al que se le ha eliminado toda la humedad.

**Lodos:** Material en suspensión que procesado sale del digestor.

**Sólidos totales (S.T.):** los contenidos en el desecho después de extraída toda la humedad; normalmente se obtienen a 100 ° C (durante varias horas) hasta lograr un peso constante.

**Sólidos volátiles (S.V.):** se obtienen por diferencia entre el peso de sólidos totales y el de los sólidos inertes (cenizas) que quedan después de calcinar a 600 ° C durante 30 minutos. Están constituidos por materiales orgánicos tanto indigestibles como digestibles (total o parcialmente).

La caracterización de los desechos se logra determinándoles ciertas propiedades que permitan (establecidos los demás parámetros de operación) el control del proceso. A partir de esta caracterización se hace posible calcular con cierta aproximación el potencial energético y fertilizante de la materia prima disponible.

### 5.2. Determinación de humedad y sólidos.

El agua se encuentra formando parte de la materia prima en diferentes

relaciones con los sólidos (en el estiércol fresco E.F. esta relación es de aproximadamente de 4 a 1). Se cuantifica mediante la diferencia entre el peso fresco y su peso en base seca. Esta determinación es importante porque permite calcular la cantidad de agua que debe agregarse para obtener el grado de dilución deseado en la mezcla; la humedad de un material depende estrechamente de su procedencia, del sistema de recolección y almacenaje.

Se definen las siguientes variables como:

$\rho_m$  = Densidad de la mezcla.

$W_m$  = Peso de la mezcla.

$V_m$  = Volumen de la mezcla.

(S.T.)<sub>r</sub> = Sólidos totales requeridos.

(S.T.) (E.F.) = Sólidos totales del estiércol fresco

El porcentaje de contenido de humedad (P) de un material que contiene un peso  $W_s$  de sólidos secos y un peso  $W$  de agua se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{100 W}{W + W_s} \dots\dots\dots(5-1)$$

y la concentración de sólidos es:

$$100 - P = \frac{100 W_s}{W + W_s} \dots\dots\dots(5-2)$$

Ver cuadro 5-1.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas se experimentó en 6 digestores tipo batch (régimen intermitente), alimentados con 180 lts. de mezcla inoculada con lodos digeridos, conteniendo: 4.1, 5.7, 8.5, 7.5, 13.0 y 15.3 por ciento de S.T., calculados con base en el volumen total de la mezcla y contenido de humedad del estiércol fresco.

Dentro de este rango de porcentajes de S.T. en la mezcla alimentada, el valor de la densidad  $\rho_m$  de la mezcla es aproximadamente igual a 1.05 kg/dm<sup>3</sup>, por lo tanto:

$$\rho_m = \frac{W_m}{V_m} = 1.05 \text{ kg/dm}^3 \dots\dots\dots(5-3)$$

$$W_m = \rho_m V_m \dots\dots\dots(5-4)$$

| CUADRO 5-1                    | CANTIDADES DE HUMEDAD, S.T. Y S.V. DE ALGUNOS MATERIALES DIGESTIBLES |           |        |
|-------------------------------|--|-----------|--------|
|                               | MATERIAL   | HUMEDAD % | S.T. % |
| PLANTAS Y FLORES SECAS        | 1.0  | 99.0      | 77.8   |
| PAPEL ESTRASA                 | 6.0  | 94.0      | 99.6   |
| PAPEL PERIODICO               | 7.0  | 93.0      | 97.1   |
| DESPERDICIOS DE JARDIN        | 24.8   | 75.2      | 87.0   |
| EXCREMENTO DE GALLINA AIREADO | 9.8  | 90.2      | 56.2   |
| EXCREMENTO DE RES O TORO      | 82.0   | 14.0      | 80.0   |
| EXCREMENTO DE CERDO           | 87.0   | 13.0      | 85.0   |
| EXCREMENTO DE BORREGO         | 89.0   | 11.0      | 80.0   |
| HECES FECALES                 | 73.0   | 27.0      | 92.0   |
| EXCREMENTO DE GALLINA FRESCO  | 65.0   | 35.0      | 65.0   |
| EXCREMENTO DE CABALLO         | 84.0   | 16.0      | 80.0   |

$$\frac{W(E.F.)}{W_m} = \frac{\% (S.T.)_r}{\% (S.T.) (E.F.)} \dots\dots\dots(5-5)$$

$$W(E.F.) = W_m \frac{\% (S.T.)_r}{\% (S.T.) (E.F.)} \dots\dots\dots(5-6)$$

La ecuación 5-5 nos resuelve la cantidad necesaria en peso del E.F. para un volumen determinado de mezcla entre los valores de 4.1 a 15.3 por ciento de S.T.

Cuando se tiene una cantidad específica de estiércol fresco y se desea conocer el peso de la mezcla requerido, la ecuación 5-6 puede resolverse de la siguiente manera:

$$W_m = \frac{W(E.F.) [ \% (S.T.) (E.F.) ]}{(\% S.T.)_r} \dots\dots\dots(5-7)$$

El agua requerida se obtiene por diferencia:

$$W(H_2O) = W_m - W(E.F.) \dots\dots\dots(5-8)$$

La máxima producción de gas ( en las 7 semanas del experimento), se obtuvo en los digestores cargados con 4.1 y 5.7 % de sólidos totales; con cargas de 7.5 y 8.5 % de S.T. la producción de gas fue el 72.3 % de la obtenida en los dos primeros y en los dos últimos con 13.0 y 15.3 % de S.T. fue el 46.8 % de la máxima obtenida.

La figura 5-1 muestra la producción de gas correspondiente a los S.T. ensayados. En la práctica, como se mencionó anteriormente, se ha encontrado que el porcentaje óptimo de sólidos está alrededor del 7 % para digestores de flujo continuo y de hasta un 25 % de S.T. para los digestores batch (régimen intermitente).

Los datos registrados en el cuadro 5-2 se obtuvieron en la operación del digestor familiar del I.I.E. (tipo Hindú-régimen continuo). En ella se asientan los porcentajes de S.T. y S.V. estando implícitos los de humedad. De los valores medios se tiene una eficiencia de conversión del 36.82 % ya que entra el 5.92 % y sale el 3.74 % de los S.V. Constituyendo éstos el 86.5 % de los sólidos totales y se observa que de un 7 % deseado se logró un 6.84 % de S.T. en la mezcla.

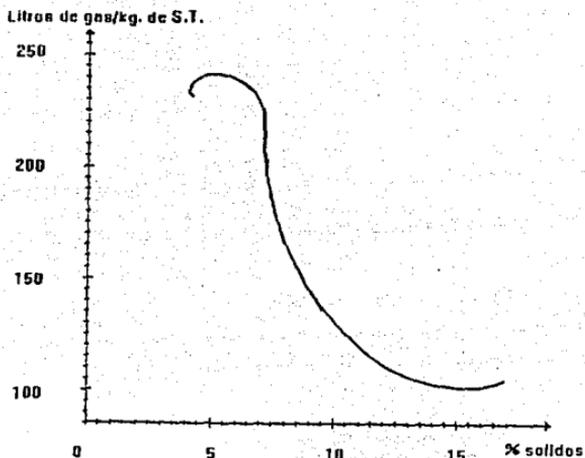


Figura 5-1. Producción de gas vs. % de sólidos.

### 5.3. Determinación de la relación Carbono-Nitrógeno.

Existen ciertos tipos de desechos en los que la relación C:N está naturalmente equilibrada ( como se mencionaba en el capítulo anterior los rangos satisfactorios se encuentran entre 20:1 y 30:1). Tal es el caso del estiércol de vacas lecheras en donde fluctúa entre 18:1 y 25:1, pero deberán ser controlados algunos factores (principalmente la alimentación, el sistema de recolección y manejo y el tipo de cama estabular), que al variar desplazan el equilibrio fuera del rango óptimo. En la mayor parte de los desechos la relación C:N no es la conveniente, se hace entonces necesario mezclar uno con alto contenido de carbono con otro que tenga nitrógeno en exceso a fin de balancear la mezcla. El mezclado puede ser en forma binaria o múltiple.

| CUADRO 5-2         |      | PORCENTAJE DE SOLIDOS OBTENIDO EN LA OPERACION DEL DIGESTOR DEL I.I.E. |       |                   |      |                  |      |
|--------------------|------|--|-------|-------------------|------|------------------|------|
| NUMERO DE MUESTREO |      | MATERIA PRIMA (ESTIERCOL)  |       | MEZCLA ALIMENTADA |      | Lodos DIGESTADOS |      |
|                    |      | A  | B     | A                 | B    | A                | B    |
| 1                  | S.T. | 20.06  | 19.25 | 7.79              | 7.39 | 4.65             | 4.71 |
|                    | S.V. | 17.18  | 16.94 | 6.97              | 6.59 | 3.55             | 3.61 |
| 2                  | S.T. | 20.62  | 20.72 | 7.15              | 8.83 | 4.93             | 4.98 |
|                    | S.V. | 18.25  | 18.34 | 6.28              | 7.85 | 3.79             | 3.80 |
| 3                  | S.T. | 18.55  | 18.89 | 7.16              | 6.68 | 4.82             | 4.57 |
|                    | S.V. | 16.96  | 16.49 | 6.34              | 5.91 | 3.71             | 3.86 |
| 4                  | S.T. | 18.05  | 18.23 | 6.92              | 5.95 | 4.96             | 5.03 |
|                    | S.V. | 15.32  | 15.93 | 6.08              | 5.23 | 3.84             | 3.92 |
| 5                  | S.T. | 18.14  | 17.72 | 8.42              | 6.34 | 6.37             | 5.34 |
|                    | S.V. | 15.80  | 15.63 | 6.24              | 5.27 | 4.98             | 3.08 |
| 6                  | S.T. | 19.47  | 17.35 | 7.78              | 7.14 | 6.13             | 5.47 |
|                    | S.V. | 17.52  | 15.37 | 6.92              | 6.35 | 3.11             | 4.33 |
| 7                  | S.T. | 18.58  | 17.89 | 6.27              | 5.15 | 4.92             | 4.76 |
|                    | S.V. | 15.55  | 15.33 | 5.42              | 4.41 | 3.81             | 4.00 |
| 8                  | S.T. | 18.64  | 18.76 | 6.39              | 7.09 | 4.70             | 4.53 |
|                    | S.V. | 15.53  | 15.51 | 4.61              | 5.82 | 3.75             | 3.99 |
| 9                  | S.T. | 20.27  | 19.41 | 7.26              | 6.94 | 5.30             | 4.72 |
|                    | S.V. | 18.00  | 17.10 | 6.28              | 6.01 | 4.17             | 3.71 |
| 10                 | S.T. | 19.14  | 18.13 | 6.98              | 6.54 | 4.93             | 4.81 |
|                    | S.V. | 16.77  | 15.79 | 6.16              | 5.74 | 3.90             | 3.77 |
| 11                 | S.T. | 17.85  | 16.96 | 7.07              | 6.11 | 4.77             | 4.68 |
|                    | S.V. | 15.48  | 14.69 | 6.27              | 5.39 | 3.76             | 3.69 |
| 12                 | S.T. | 17.64  | 17.39 | 5.80              | 6.91 | 4.52             | 4.76 |
|                    | S.V. | 14.87  | 15.30 | 5.05              | 6.14 | 3.56             | 3.75 |
| 13                 | S.T. | 16.84  | 19.00 | 5.63              | 6.06 | 4.64             | 4.75 |
|                    | S.V. | 13.84  | 13.53 | 4.93              | 5.34 | 3.65             | 3.75 |

| CUADRO 5-2<br>(CONT.)   |      | PORCENTAJE DE SOLIDOS OBTENIDO EN LA<br>OPERACION DEL DIGESTOR DEL I.I.E. |       |                      |      |                     |      |
|---|------|---|-------|----------------------|------|---------------------|------|
| NUMERO<br>DE<br>MUESTREO  |      | MATERIA PRIMA<br>(ESTIERCOL)  |       | MEZCLA<br>ALIMENTADA |      | LIDOS<br>DIGESTADOS |      |
|   |      | A   | B     | A                    | B    | A                   | B    |
| 14  | S.T. | 18.21   | 17.37 | 6.70                 | 6.78 | 4.65                | 4.77 |
|   | S.V. | 15.34   | 14.85 | 5.90                 | 6.00 | 3.66                | 3.79 |
| 15  | S.T. | 17.96   | 18.04 | 6.68                 | 7.18 | 3.85                | 4.72 |
|   | S.V. | 14.70   | 14.65 | 5.78                 | 6.19 | 2.99                | 3.77 |
| VALORES   | S.T. | 19.68 %   |       | 6.84 %               |      | 4.89 %              |      |
| MEDIOS  | S.V. | 15.87 %   |       | 5.92 %               |      | 3.74 %              |      |
| HUMEDAD   |      | 80.32 %   |       |                      |      |                     |      |
| PROMEDIO DE S.V. CONVERTIDOS A BIODIGAS   |      | 36.82 %   |       |                      |      |                     |      |
| NOTA: COMO LA CARGA SE REALIZO EN DOS PASOS, LOS VALORES A, B CORRESPONDEN A MUESTRAS TOMADAS EN CADA UNO RESPECTIVAMENTE |      |   |       |                      |      |                     |      |

Los cuadros 5-3 y 5-4 dan valores de la relación C:N para hacer cálculos preliminares con relativa aproximación como sigue:

La relación (Rx) entre la cantidad de carbono (Cx) y la de nitrógeno (Nx) de un material dado puede escribirse:

$$R_x = \frac{C_x}{N_x} \dots\dots\dots (5-9)$$

La cantidad total de nitrógeno (Nt) es la suma del contenido en los diferentes desechos, así:

$$N_{tx} = \sum N_x = N_1 + N_2 + N_3 + \dots\dots + N_n \dots\dots(5-10)$$

Lo mismo procede para el carbono total:

$$C_{tx} = \Sigma C_x = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \dots\dots(5-11)$$

Expresando las cantidades de cada uno de los diferentes tipos de desecho en base seca y designando la cantidad de un material por  $W_{mx}$  (peso bruto), y su contenido de humedad por  $P_x$ , el peso seco  $W_{sx}$  será:

$$W_{sx} = W_{mx} - W_{mx} P_x \dots\dots\dots(5-12)$$

$$W_{sx} = W_{mx} (1 - P_x) \dots\dots\dots(5-13)$$

Una vez determinado el peso seco del material su contenido de nitrógeno será:

$$N_x = W_{sx} (\% N_x) \dots\dots\dots(5-14)$$

donde  $(\% N_x)$  es el porcentaje de nitrógeno en base seca.

Combinando las ecuaciones 5-9, 5-13, y 5-14 se puede resolver para  $C_x$  (contenido de carbón) como sigue:

$$R_x = \frac{C_x}{(\%N_x)(W_{mx})(1-P_x)} \dots\dots\dots(5-15)$$

Despejando  $C_x$  tenemos:

$$C_x = R_x (\%N) (W_{mx}) (1 - P_x) \dots\dots\dots(5-16)$$

| CUADRO 5-3      |                            | VALORES PARA LA RELACION C:N DE DESECHOS ORGANICOS (* SIN LIGNINAS) |              |
|-----------------|----------------------------|---|--------------|
| TIPO DE DESECHO |                            | % N TOTAL BASE SECA   | RELACION C:N |
| ANIMAL          | ORINA                      | 16  | 0.8          |
|                 | SANGRE                     | 12  | 3.5          |
|                 | HARINA DE HUESO            |   | 3.5          |
|                 | SEBO                       |   | 4.1 *        |
|                 | RETACERIA DE PES-CADO SECO |   | 5.1          |
| HECES           | HUMANAS SOLIDAS            | 6   | 6 a 10       |
|                 | ORINA                      | 18  |              |
|                 | DE POLLO                   | 6.3   | 15           |
|                 | DE OVEJA                   | 3.8   |              |
|                 | DE CERDO                   | 3.8   |              |
|                 | DE CABALLO                 | 2.3   | 25 *         |
| LODO            | DE VACA                    | 1.7   | 18 *         |
|                 | MILORGANITA                |   | 5.4 *        |
|                 | MILORGANITA ACTI-VADA      | 5   | 6            |
| VEGETAL         | DE ALBANAL                 |   | 11 *         |
|                 | FRIJOL SOYA                |   | 5            |
|                 | SEMILLA DE ALGODON         |   | 5 *          |
|                 | CASCARA DE CACA-HUATE      |   | 36 *         |
|                 | PASTO YOUNG GRASS          | 4   | 12           |
|                 | ALFALFA                    | 2.8   | 17 *         |
|                 | PASTO BLUE GRASS           | 2.5   | 19           |
|                 | ALGA MARINA                | 1.9   | 19           |
|                 | NO LEGUMINOSOS             | 2.5 a 4   | 11 a 19      |
|                 | ASERRIN                    | 0.1   | 200 a 500    |
| S               | PAJA DE AVENA              | 1.1   | 48           |
|                 | PAJA DE TRIGO              | 0.5   | 150          |

| CUADRO 5-4                        |        | VALORES PARA LA RELACION C:N DE DESECHOS ORGANICOS COMUNES |  |     |      |              |
|-----------------------------------|--------|--|--|-----|------|--------------|
| TIPO DE DESECHO ORGANICO          | KG/DIA | HUMEDAD %  | NUTRIENTES PARA VEGETALES % EN PESOS SECOS |     |      | RELACION C:N |
|                                   |        |  | N  | P   | K    |              |
| HECES HUMANAS                     | 0.2    | 73   | 6  | 4.2 | 1.9  | 8.0          |
| ORINA SECA                        | 0.06   | 94   | 17   | 3.7 | 3.7  | 0.8          |
| VACA LECHERA                      | 32.7   | 80   | 1.7  | 1.1 | 0.56 | 25           |
| GANADO DE ENGORDA ALIMENTADO CON: |        |  |  |     |      |              |
| ALFALFA                           | 40.6   | 80   | 2.6  | --  | --   | 16           |
| GRAND                             | --     | 78   | 2.0  | --  | --   | 21.4         |
| CABALLOS BUENES MULAS             | 27.2   | 75   | 2.3  | 1.3 | 1.4  | 25.0         |
| CERDOS                            | 4.1    | 82   | 3.8  | 3.1 | 2.5  | 14.4         |
| OVEJAS CHIVOS                     | 1.5    | 68   | 3.8  | 1.9 | 1.3  | 20.1         |
| CONEJOS                           | --     | --   | 1.7  | --  | --   | --           |
| PAVOS                             | --     | 75   | 4.2  | --  | --   | 8.3          |
| POLLOS                            | 0.16   | 56   | 6.3  | --  | --   | 5.2          |
| ASERRIN                           | --     | --   | 0.11                                       | --  | --   | 511          |
| HIERBA MOLIDA                     | --     | 6.5  | 2.2  | --  | --   | 19           |
| PAJA DE AVENA                     | --     | --   | 0.52                                       | --  | --   | 83           |
| HOJAS SECAS                       | --     | --   | 0.20                                       | --  | --   | 203          |
| SANGRE                            | --     | --   | 12   | --  | --   | 3            |
| CARNE                             | --     | --   | 5.1  | --  | --   | --           |
| DESECHOS DE POLLO:                |        |  |  |     |      |              |
| VISCERAS                          | --     | 72   | 3.3  | --  | --   | 16           |
| GRASA                             | --     | 0.0  | 0.0  | --  | --   | 76           |
| TRAPOS                            | --     | 10   | 4.6  | --  | --   | 12           |
| DESECHOS DOMESTICOS               | --     | 3.2  | 0.5  | --  | --   | 41           |

| TIPO DE DESECHO ORGANICO | KG/DIA | HUMEDAD % | VALORES PARA LA RELACION C:N DE DESECHOS ORGANICOS COMUNES |   |   | RELACION C:N |
|--------------------------|--------|-----------|--|---|---|--------------|
|                          |        |           | NUTRIENTES PARA VEGETALES % EN PESOS SECOS                 |   |   |              |
|                          |        |           | N  | P | K |              |
| PUNTAS DE CAÑA DE AZUCAR |        |           | 0.35   |   |   | 113          |
| PAJA DE TRIGO            |        |           | 0.33   |   |   | 124          |
| RASTROJO Y HOJAS DE MAIZ |        |           | 0.84   |   |   | 53           |

Quando el contenido de carbón del material es conocido y la cantidad de material que deberá combinarse desconocida, la ecuación anterior podrá resolverse para  $W_m$  como sigue:

$$W_{mx} = \frac{C_x}{(R_x) (\%N) (1 - P_x)} \dots \dots \dots (5-17)$$

Para una producción óptima de gas cuando se tienen (x) tipos de materiales orgánicos, disponibles en cantidades limitadas y un desecho moderador (y) en abundancia (generalmente de naturaleza vegetal con carbono en exceso), la cantidad de este último  $W_{my}$  que deberá ser agregada puede ser calculada como sigue:

$$R_{xy} = \frac{C_x + C_y}{N_x + N_y} \dots \dots \dots (5-18)$$

Para una relación  $R_{xy} = 30$

$$30 = \frac{C_x + R_y N_y}{N_x + \% N_y W_{ay}} = \frac{C_x + R_y (\% N_y) (W_{ay})}{N_x + \% N_y W_{ay}}$$

La cantidad de material en peso seco será:

$$W_{wy} = \frac{Cx - 30 Nx}{\% Ny (30 - Ry)} \dots\dots\dots(5-19)$$

El peso del material húmedo será:

$$W_{wy} = W_{my} (1 - P_y)$$

despejando:

$$W_{my} = \frac{W_{wy}}{(1 - P_y)}$$

sustituyendo el valor de  $W_{wy}$  de la ecuación 5-19, tenemos:

$$W_{my} = \frac{Cx - 30 Nx}{\% Ny (30 - Ry) (1 - P_y)} \dots\dots\dots(5-20)$$

#### 5-4. Valor del pH del estérco de vaca.

En el caso del estérco de vaca normalmente no es necesario hacerle ajustes al respecto ya que una mezcla de alimentación con 7 % de S.T. promedio a la entrada observa valores entre 6 y 6.5 y su relación C:N permite que la transición de ácido a alcalino se efectúe en forma autorregulada obteniéndose valores de pH entre 7 y 7.5 en los lodos digeridos de la descarga. Lo anterior puede observarse en los datos presentados en el cuadro 5-5.

#### 5.5. Gas producido según las diferentes bases unitarias tomadas en la digestión del estérco de vaca.

Los datos presentados en los cuadros 5-2 y 5-5 fueron obtenidos a lo largo de 40 días de trabajo experimental en el digestor familiar del I.I.E. que tiene capacidad para

10 metros cúbicos de retención de mezcla. Las condiciones de operación fueron:

Temperatura media de alimentación 40.18 °C

Temperatura media de operación 30.00 °C

Tiempo de residencia 30 días

Porcentaje de S.T. en la mezcla 6.84 %

Porcentaje de S.V. en la mezcla 5.94 %

El digestor se cargó diariamente con 140 kg. de estiércol fresco de vaca (materia prima) y 210 kg de agua para hacer un total de 350 kg. de mezcla alimentada. En estas condiciones se obtuvieron las siguientes cantidades de gas por kg. de E.F. por kg. de S.T. y por kg. de S.V. para una cantidad media de gas de 7.192 M<sup>3</sup>/día.

Gas producido por kg. de E.F.:

$$Q(E.F.) = \frac{7.19 \text{ M}^3/\text{día}}{140 \text{ kg./día}} = 0.051 \text{ M}^3/\text{kg.}$$

Gas producido por kg. de S.T.

$$Q(S.T.) = \frac{7.19 \text{ M}^3/\text{día}}{350 \text{ kg/día (0.0684)}} = 0.300 \text{ M}^3/\text{kg (S.T.)}$$

Gas producido por kg. de S.V. :

$$Q(S.V.) = \frac{7.19 \text{ M}^3/\text{ día}}{350 \text{ kg/día (0.0592)}} = 0.347 \text{ M}^3/\text{kg(S.V.)}$$

La caracterización del gas proveniente de la fermentación del estiércol de vacas lecheras se realizó usando técnicas de cromatografía de gases y Orsat. El cuadro 5-6 nos muestra los resultados de una serie de determinaciones en la composición del gas que en general puede encontrarse dentro del siguiente rango:

Metano \_\_\_\_\_ 50 - 70 %

Bióxido de carbono \_\_\_\_\_ 30 - 44 %

Nitrógeno \_\_\_\_\_ 4 - 6 %

Acido sulfhídrico \_\_\_\_\_ trazas

Considerando un contenido de metano entre el 60 y 70 %, del total del gas, el cual tiene un poder calorífico neto de 9,014 K cal./M<sup>3</sup>, la mezcla de gas producida estará entre los valores 5,408 y 6,310 K cal./M<sup>3</sup>. Comparado con el del gas natural que es de 9,348 K cal./M<sup>3</sup> puede decirse que el gas de los digestores es un combustible apreciable, tanto en el ámbito doméstico (calefacción, alumbrado y cocción de alimentos), como en la industria para la generación de energía calorífica, mecánica o eléctrica (al ser usado en calderas o en motores de combustión interna).

El gas biológico es incoloro e insípido y puede tener el olor del ácido sulfhídrico (que es uno de sus componentes). La temperatura crítica del metano es de -82 °C (-115.6 °F) y una presión crítica de 45.8 kg/cm<sup>2</sup> (673 psi). Características que obligan a utilizar el gas en estado natural, ya que el equipo para licuarlo consume demasiada energía y lo hace incosteable en unidades de poca producción.

Un metro cúbico de gas biológico de 6,000 kilocalorías equivale a:

- 1.1 litros de alcohol.
- 0.8 litros de gasolina.
- 2.0 kilogramos de carburo de calcio.
- 0.6 litros de diesel.
- 1.5 metros cúbicos de gas de ciudad.
- 1.4 kilogramos de carbón vegetal.
- 2.2 kilowatts hora de energía eléctrica.

| CUADRO 5-5  |                      | TEMPERATURAS DE OPERACION VALORES DE pH Y PRODUCCION DE GAS EN EL "DIGESTOR FAMILIAR DEL I.I.E. |               |                      |              |               |   |
|-------------|----------------------|---|---------------|----------------------|--------------|---------------|---|
| D<br>I<br>A | TEMPERATURA °C       |   |               | VALORES DE pH        |              |               | GAS PRO-<br>DUCIDO<br>M <sup>3</sup> /DIA |
|             | ALI-<br>MEN-<br>TADA | INTER-<br>NA  | DESCAR-<br>GA | ALI-<br>MEN-<br>TADA | IN-<br>TERNA | DES-<br>CARGA |   |
| 1           | 37                   | 28  | 28            | 7.5                  | 7.5          | 7.5           | 7.060                                     |
| 2           | 40                   | 29  | 29            | 6.5                  | 7.0          | 7.5           | 6.103                                     |
| 3           | 41                   | 29  | 29            | 5.5                  | 6.0          | 6.0           | 7.412                                     |
| 4           | 43                   | 29  | 29            | 5.7                  | 6.0          | 6.0           | 7.492                                     |
| 5           | --                   | --  | --            | --                   | --           | --            | 8.947                                     |
| 6           | --                   | --  | --            | --                   | --           | --            | 5.549                                     |
| 7           | 41                   | 29  | 29            | 6.3                  | 6.8          | 6.8           | 6.319                                     |
| 8           | 39                   | 29  | 30            | 6.45                 | 7.15         | 7.15          | 6.360                                     |
| 9           | 39                   | 30  | 30            | 6.3                  | 7.15         | 7.15          | 8.615                                     |
| 10          | 42                   | 30  | 29            | 5.6                  | 7.15         | 7.15          | 7.473                                     |
| 11          | 40                   | 30  | 30            | 6.4                  | 7.15         | 7.15          | 5.145                                     |
| 12          | --                   | --  | --            | --                   | --           | --            | 7.131                                     |
| 13          | --                   | --  | --            | --                   | --           | --            | 6.142                                     |
| 14          | 42                   | 30  | 30            | 5.85                 | 7.1          | 7.1           | 6.434                                     |
| 15          | 37                   | 30  | 30            | 5.5                  | 6.0          | 6.0           | 7.260                                     |
| 16          | 42                   | 30  | 31            | 6.03                 | 7.1          | 7.1           | 7.830                                     |
| 17          | 39                   | 31  | 31            | 6.15                 | 6.99         | 6.99          | 5.733                                     |
| 18          | 39                   | 30  | 30            | 5.9                  | 7.16         | 7.16          | 1.858                                     |
| 19          | 36                   | 30  | 30            | --                   | --           | --            | 1.580                                     |
| 20          | 39                   | 30  | 30            | --                   | --           | --            | 1.473                                     |
| 21          | 41                   | 30  | 30            | 5.9                  | 7.5          | 7.5           | 5.415                                     |
| 22          | 43                   | 31  | 31            | 6.0                  | 7.1          | 7.1           | 7.451                                     |
| 23          | 42                   | 31  | 31            | 6.15                 | 7.2          | 7.2           | 8.896                                     |
| 24          | 43                   | 31  | 31            | 6.0                  | 7.2          | 7.2           | 9.656                                     |
| 25          | 37                   | 31  | 31            | 6.0                  | 7.0          | 7.0           | 7.115                                     |

Además el gas biológico posee propiedades muy especiales con respecto a los demás gases de uso doméstico; por no ser dotante, no es tan tóxico. Puede ser usado en todo tipo de motores de combustión interna con sencillas adaptaciones. Su índice elevado de octanaje (110 a 120 octanos contra la gasolina de 70), hace posible una tasa de compresión reducida a 15, contra 7 de la gasolina. Este gas no produce jamás la carbonización de los motores ni ahumado de los escapes.

| CUADRO 5-6                |                    | COMPOSICION DEL BIOGAS PROMEDIO EN EL<br>"DIGESTOR FAMILIAR" DEL I. I. E. |                     |                     |                     |
|---------------------------|--------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| C R O M A T O G R A F I A |                    |   |                     |                     | ORSAT               |
| MUESTRA                   | O <sub>2</sub> (%) | N <sub>2</sub> (%)  | CH <sub>4</sub> (%) | CO <sub>2</sub> (%) | CO <sub>2</sub> (%) |
| 1                         | 0.30               | 0.90  | 49.38               | 49.42               |                     |
| 2                         |                    |   |                     |                     | 44.70               |
| 3                         |                    |   |                     |                     | 44.00               |
| 4                         | 0.30               | 0.63  | 49.15               | 49.82               | 48.10               |
| 5                         |                    |   |                     |                     | 34.50               |
| 6                         |                    |   |                     |                     | 45.10               |
| 7                         |                    |   |                     |                     | 43.5                |
| 8                         | 0.19               | 0.76  | 56.20               | 42.78               |                     |
| 9                         |                    |   |                     |                     | 48.20               |
| 10                        | 0.15               | 0.57  | 52.61               | 46.61               | 43.20               |
| 11                        |                    |   |                     |                     | 44.90               |
| PROME-<br>DIO             | 0.24               | 0.72  | 51.86               | 47.18               | 44.00               |

## **5-6. Gases de las aguas negras.**

Las previsiones para la utilización del gas de la digestión del lodo, constituyen una práctica casi universal en el proyecto de instalaciones para tratamiento de aguas negras. El gas se emplea para calefacción y para generación de energía en la propia instalación de tratamiento donde se produce. En lo que se refiere a valor calorífico, 28.3 M<sup>3</sup> de gas procedente de la digestión del lodo equivalen a 17 M<sup>3</sup> de gas natural, a 24.2 litros de butano, a 19.7 litros de gasolina, o a 17.4 litros de diesel. Debido a la naturaleza del gas del lodo, los motores que hayan de emplearlo tienen que estar especialmente adaptados para su uso. El gas del lodo se emplea para accionar bombas, ventiladores y generadores. Se puede considerar a este gas con un contenido térmico de 21 B.T.U./ft. El cuadro 5-7 nos muestra un análisis de gases de las aguas negras y otros gases:

## **5-7. Utilidad práctica del gas biológico.**

El gas producido en los digestores ha tenido actualmente bastante diversificación de usos en los países en los que se ha generalizado su producción. En la India existen industrias proveedoras de estufas para uso doméstico, cocinas de hoteles y hospitales diseñadas en hierro fundido con inyectores de metal y tienen una eficiencia técnica del orden del 60 %. Cuando el surtidor de gas se ajusta debidamente, la llama es azul y sin humo, con una temperatura de 800 °C aproximadamente.

También se utiliza en lámparas para alumbrado que proporcionan una incandescencia similar a la proporcionada por las "Coleman" o de una lámpara de gas propano. Las lámparas consumen casi siempre 1.1 M<sup>3</sup> de gas por hora y poseen una intensidad de luz de 100 bujías.

Para utilizarlo como fuerza motriz los motores de kerosen y de gasolina pueden ser convertidos para uso parcial o total con gas biológico. Sin embargo, este tiene que ser refinado primero, eliminándole el vapor de agua, el bióxido de carbono y el ácido sulfhídrico que contiene.

El ácido sulfhídrico puede eliminarse pasando el gas a través de una cámara llena de esponja de óxido férrico y proteger los cilindros del motor de gas contra la corrosión. El contenido de humedad del gas se elimina pasando el gas por un tubo que contenga cloruro de calcio. La figura 5-2 representa un diagrama esquemático de un sistema de producción de energía con motor de gas y utilización de calor.

Muchos otros aparatos caseros e industriales pueden convertirse para ser usados con gas biológico. Estos incluyen planchas (de carbón) para la ropa, calentadores de gallineros, incubadoras y refrigeradores. Actualmente se está investigando una variedad de otros usos para este gas.

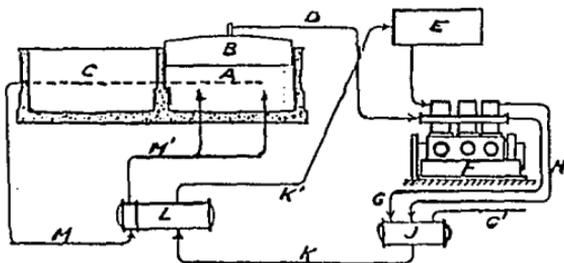


Figura 5-2. Diagrama de un sistema de producción de energía con motor de gas y utilización del calor. (Water Works and Sewage, noviembre de 1937). A) tanque de digestión primaria; B) colector; C) tanque de digestión secundaria; D) gas del lodo; E) tanque de enfriamiento por agua; F) motor; G) conducción de gas agotado al refrigerador; H) enfriamiento por agua; K) conducción de agua calentada; K') retorno de agua caliente; L) calentador de agua; M) conducción de agua; N') agua alcalina caliente; G') alimentación de agua.

### 5.8. Valor fertilizante del estiércol de vaca.

Se ha descubierto que la descomposición anaeróbica de los desechos orgánicos en una planta digestora es mucho más eficiente conservando nitrógeno que cuando la descomposición ocurre cuando hay oxígeno presente. Aproximadamente un 18 % del nitrógeno de los estiércoles se pierde cuando éste se expone al aire durante la descomposición.

| CUADRO 5-7                            |      | ANALISIS DE GASES DE AGUAS NEGRAS Y OTROS GASES<br>(segun W.H. Fuiweiler, Sewage Works, Jour, julio<br>de 1930, Pag. 424) |                 |                 |                |                |                                       |   |                             |  |  |
|---------------------------------------|------|---|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|---|-----------------------------|--|--|
| TIPO Y<br>ORIGEN<br>DEL<br>GAS        | CO   | H <sub>2</sub>  | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub><br>+<br>N <sub>2</sub> | A<br>L<br>U<br>M<br>B<br>R<br>A<br>D<br>O | BTU.<br>POR<br>1000<br>LTS. | PESO<br>ESPE-<br>CIFI-<br>CO<br>CON<br>RELA-<br>CION<br>AL<br>AIRE |  |
| DECATUR, III<br>IMHOFF                | ..   | ..  | 69.0            | 16.8            | 0.1            | 14.1           | ..                                    | ..  | 241.5                       | ..   |  |
| CALUMET CHI-<br>CAGO, IMHOFF          | ..   | ..  | 76.0            | 14.7            | 0.5            | 8.2            | ..                                    | ..  | 273.0                       | ..   |  |
| STUTTGART<br>GERMANY,<br>IMHOFF       | ..   | ..  | 4.7             | 75.5            | 14.0           | ..             | 4.7                                   | ..  | 269.5                       | ..   |  |
| DIGESTION<br>INDEPENDIENTE            |      |   |                 |                 |                |                |                                       |   |                             |  |  |
| MILWAKEE, WIS.                        | 0.6  | ..  | 67.5            | 30.0            | 0.2            | 1.7            | ..                                    | ..  | 237.0                       | ..   |  |
| HALLE, GERMANY                        | ..   | ..  | 72.9            | 24.0            | 0.6            | 1.6            | ..                                    | ..  | 255.2                       | ..   |  |
| BIRMINGHAM,<br>ENGLAND                | ..   | ..  | 77.0            | 18.1            | 0.4            | 3.2            | ..                                    | ..  | 245.0                       | ..   |  |
| BALTIMORE, MD.                        | ..   | ..  | 70.5            | 26.5            | 0.2            | 2.8            | ..                                    | ..  | 247.5                       | ..   |  |
| GAS DEL ALUM-<br>BRADO                |      |   |                 |                 |                |                |                                       |   |                             |  |  |
| ESTUFA CARBON                         | 7.3  | 50.9  | 29.2            | 2.8             | ..             | ..             | 6.9                                   | 2.9                                       | 189.4                       | 0.44   |  |
| GAS DE PETRO-<br>LEO RECTIFI-<br>CADO | 18.2 | 52.1  | 16.7            | 4.0             | ..             | ..             | 5.4                                   | 3.6                                       | 182.0                       | 0.47   |  |
| GAS CARBURADO                         | 29.5 | 37.6  | 11.4            | 5.9             | ..             | ..             | 5.1                                   | 9.8                                       | 188.3                       | 0.69   |  |
| GAS DE AGUAS<br>NEGRAS PROH.          | ..   | ..  | 75.0            | 20.0            | ..             | ..             | 5.0                                   | ..  | 262.5                       | 0.77   |  |
| GAS DE AGUAS<br>NEGRAS + GAS<br>AZUL  | 18.2 | 24.0  | 39.1            | 13.0            | ..             | ..             | 5.5                                   | ..  | 185.5                       | 0.66   |  |
| GAS NATURAL *                         | ..   | ..  | 85.6            | 0.0             | ..             | 2.4            | ..                                    | 12.1                                      | 350.0                       | 0.63   |  |

\* W. W. ODELL. "HECHOS RELATIVOS A LA PRODUCCION Y SUSTITUCION DEL GAS NATURAL POR GAS FABRICADO". BOLETIN 301, OFICINA DE MINAS DE LOS ESTADOS UNIDOS, 1929.

La pérdida de nitrógeno en la planta de digestión se puede reducir aproximadamente a un 7 % y no hay pérdida apreciable de fósforo, potasio y calcio. La reducción en la pérdida de minerales hace de los materiales digeridos al final del proceso un fertilizante muy útil.

El cuadro 5-8 expresa las diferencias existentes entre los abonos producidos del estiércol de vaca según el procedimiento usado.

Con esto se demuestra que el sistema biológico por medios anaeróbicos es tres veces más rico, en elementos fertilizantes, que el mejor sistema de compost usado hasta la fecha.

Por otra parte, en el medio anaeróbico se destruyen la germinación de las malas semillas acarreadas de los rastrojos, destruyéndose además los huevos, larvas, pupas, esporas, etc., de insectos perjudiciales, de bacterias patógenas y de gusanos parásitos. Esto es debido al alto poder selectivo y dominante de los microorganismos metanogénicos.

| S I S T E M A                             | PRODUCCION DE NUTRIENTES PRINCIPALES<br>SEGUN EL TRATAMIENTO USADO PARA EL<br>ESTIERCOL DE VACA (BASE SECA) |   |                                 |
|---|---|---|---------------------------------|
|   | NITROGENO %<br>(N)  | FOSFORO %<br>(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | POTASIO %<br>(K <sub>2</sub> O) |
| ESTIERCOL AMON-<br>TONADO                 | 0.50  | 0.30  | 0.60                            |
| COMPOST SISTEMA<br>INDORE                 | 1.25  | 0.95  | 0.94                            |
| OTROS SISTEMAS<br>DE COMPOST              | 1.90  | 0.80  | 0.80                            |
| EL SISTEMA BIO-<br>LOGICO ANAEROBI-<br>CO | 3.80  | 2.00  | 6.40                            |

### 6.9. Constituyentes químicos de los lodos de las aguas negras.

Los cuadros 5-9 y 5-10 nos muestran algunos de los constituyentes químicos de los lodos de las aguas negras.

| CONSTITUYENTE                         | LODO BRUTO | LODO DIGERIDO | LODO ACTIVO | TORTA DE FILTRO* |          |
|---------------------------------------|------------|---------------|-------------|------------------|----------|
|                                       |            |               |             | BRUTO            | DIGERIDO |
| MATERIA VOLATIL                       | 60-80      | 45-60         | 62-75       | 55-75            | 40-60    |
| CENIZAS                               | 20-40      | 40-55         | 25-38       | 25-45            | 40-60    |
| CENIZAS INSOLUBLES                    | 17-35      | 35-50         | 22-30       | 15-30            | 30-45    |
| GRASAS                                | 7-35       | 3-17          | 5-12        | 5-30             | 2-15     |
| PROTEINAS                             | 22-28      | 16-21         | 32-41       | 20-25            | 14-30    |
| NITRATO AMONICO                       | 1-3.5      | 1-4           | 4-7         | 1-3              | 1.3-1.6  |
| FOSFORO P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 1-1.5      | 0.5-3.7       | 3-4         | 1.4              | 0.5-3.5  |
| K <sub>2</sub> O                      |            | 0.4           | 0.86        |                  |          |
| CELULOSA, ETC.                        | 10-13      | 10-13         | 7.8         | 8-10             | 8-12     |
| SiO                                   |            | 15-16         | 8.5         |                  |          |
| HIERRO                                |            | 5.4           | 7.1         |                  |          |

\* EL PROMEDIO ANUAL DE LODO SECO PRODUCIDO EN 7 CIUDADES DESDE 1949 A 1953 FUE 14.5 KG. POR CABEZA

| CUADRO 5-10                             | ALGUNOS CONSTITUYENTES QUIMICOS DEL LODO DE AGUAS NEGRAS. (W. RUDOLFS, WATER WORKS AND SEWAGE, - DICIEMBRE DE 1940, PAG. 257) |                 |                   |
|---|---|-----------------|-------------------|
| CONSTITUYENTE                           | SOLIDOS EN LAS AGUAS NEGRAS   | Lodos DIGERIDOS | Lodos ACTIVADOS * |
| NITROGENO TOTAL N                       | 4.50  | 2.25            | 6.20              |
| FOSFORICO P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 2.25  | 1.50            | 2.50              |
| POTASA K <sub>2</sub> O                 | 0.50  | 0.50            | 0.75              |
| SILICE SiO <sub>2</sub>                 | 13.80   | 27.60           | 8.50              |
| HIERRO Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3.20  | 6.00            | 7.20              |
| ALUMINIO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.10  | 4.30            | 3.20              |
| CALCIO Ca O                             | 2.70  | 5.70            | 1.70              |
| MAGNESIO MgO                            | 0.60  | 1.00            | 1.40              |
| AZUFRE SO <sub>2</sub>                  | 1.2   | 2.5             | 2.9               |
| CLORURO Cl                              | 0.50  | 0.50            | 0.50              |
| SODIO Na <sub>2</sub> O                 | 0.80  | 1.50            | 1.00              |
| PLOMO PbO                               | 0.10  | 0.20            | 0.20              |
| * TANTO POR CIENTO EN LA MATERIA SECA   |   |                 |                   |

## CAPITULO 6

### DISEÑO DEL DIGESTOR

#### 6.1. Ubicación y objetivos del proyecto.

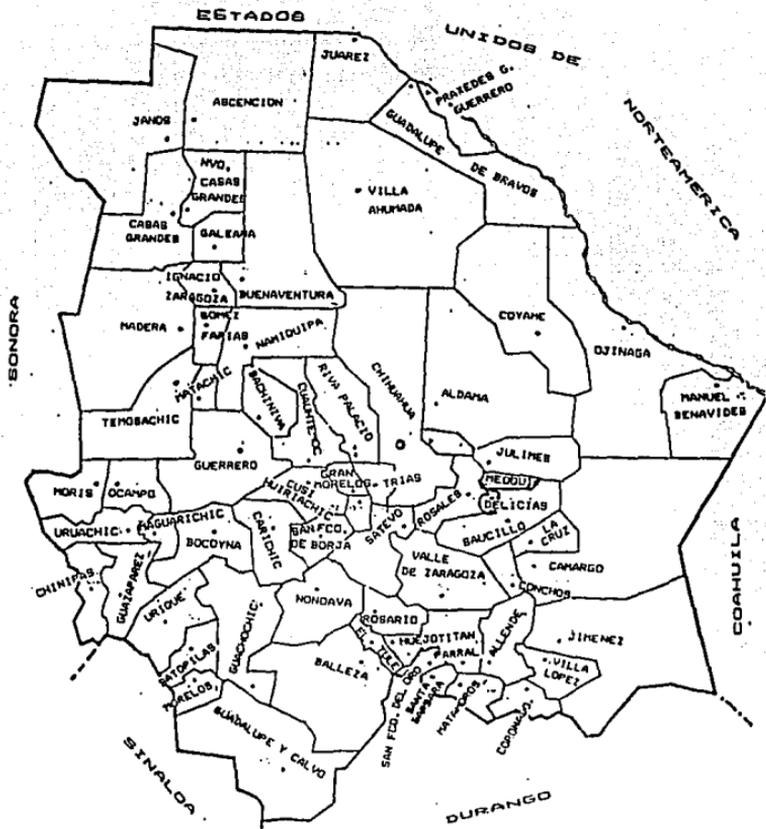
El 30 de Julio de 1920, ante la Secretaría de Agricultura y Fomento, se presenta a nombre del Estado de Chihuahua la solicitud de concesión del aprovechamiento de las aguas descargadas por la Presa La Boquilla, construida sobre el río Conchos y con una capacidad útil de 2,485 millones de metros cúbicos. Con esto se pretendía cubrir el riego de 150 mil hectáreas.

El 30 de Noviembre de ese año, fue tramitada ante la misma Secretaría de Estado, otra solicitud para el aprovechamiento de las aguas del río San Pedro con la finalidad de agregar otras 100 mil hectáreas de tierras regables.

Este organismo gubernamental federal, otorgó la anuencia para la construcción de diversas obras de infraestructura en la región. Entre algunas de ellas se pueden mencionar la Presa de Almacenamiento Fco. I. Madero, construida sobre el río San Pedro, con una capacidad útil de 340 millones de metros cúbicos, obra que fue concluida en el año de 1949; la construcción del canal principal del río Conchos, que cuenta con un desarrollo de 105 kilómetros, partiendo de la presa derivadora Ojo Caliente y terminando en la boca-toma de la presa Fco. I. Madero; la construcción del canal principal San Pedro que se extiende 48 kilómetros en la dirección Nor-Este de esta presa almacenadora; y paralelamente una serie de obras complementarias como son los canales laterales y auxiliares, presas derivadoras, drenes, caminos vecinales, etc..

De esta manera se conformó el Distrito Nacional de Riego 005 (hoy, Distrito de Desarrollo Rural 013 de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), que inicia sus operaciones en el año de 1932. Ocupa una faja comprendida entre los meridianos 105° 10' y 105° 30' de longitud, y entre los paralelos 27° 30' y 28° 20' de latitud Norte. Actualmente la superficie regable del Distrito es de 101,390 hectáreas, abarcando parte de los municipios de San Francisco de Conchos, Camargo, La Cruz, Saucillo, Julimes, Meoqui, Delicias, y Rosales; su altitud media es de 1,200 metros sobre el nivel del mar. Ver planos 6-1 y 6-2.

En el año de 1933, el panorama prometedor que a nivel nacional ofrecía al sector agrícola el mercado del algodón, fue el factor determinante para que en el Distrito



|   |
|---|
| <p style="text-align: center;">PLANO 6-1</p>                                      |
| <p style="text-align: center;">DIVISION POLITICA DEL ESTADO;<br/>DE CHIHUAHUA</p> |
| <p style="text-align: center;">ESC. APROXIMADA 1:3750000</p>                      |

Nacional de Riego 005 se iniciara el refaccionamiento de créditos para este cultivo.

Después del auge logrado desde 1951 a 1970, años en que el cultivo del algodón representó para México el primer renglón de nuestras exportaciones ( arriba del 20 % del total de las mismas), y máximo productor de divisas, la zona se convierte en monocultivadora de algodón con los consiguientes riesgos que esto acarrearba.

Los resultados no se hicieron esperar. Los cambios de la política hacendaria (creación del impuesto Ad-Valorem del algodón), y la política proteccionista de los Estados Unidos De Norteamérica hacia sus productores, convierte en leyenda negra el mito del "oro blanco".

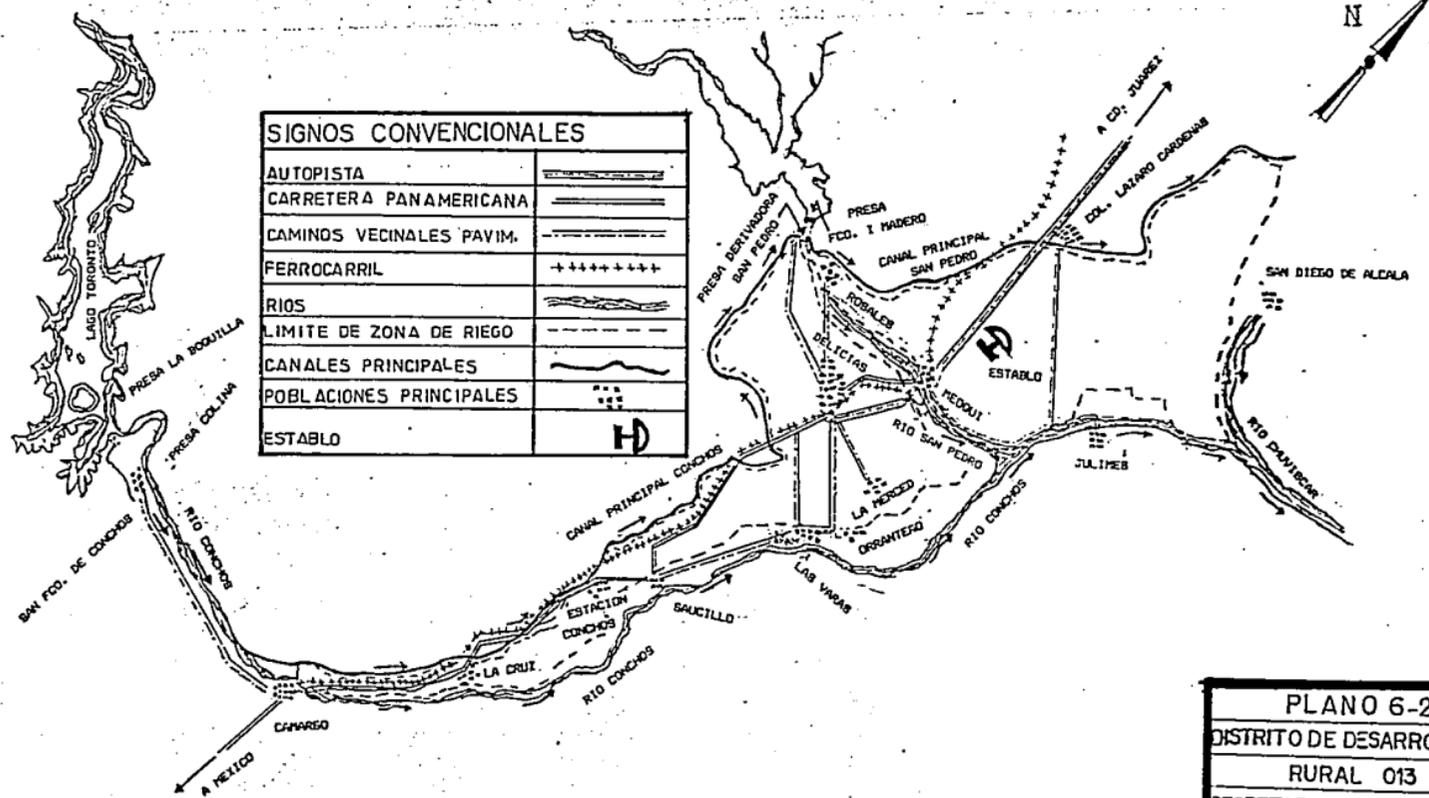
Este gravamen resultó en exceso perjudicial a los agricultores del Distrito 005. Fue la puntilla que acabó en buena hora con el mito del algodón, y de esta manera se abandonara el perjudicial monocultivo, adoptándose la siempre benéfica diversificación de cultivos, actualmente en vigor desde hace aproximadamente poco más de dos decenios.

La diversificación de cultivos, para consumo humano y forrajeros, propició la formación de diversas empresas agrícolas y pecuarias. Destacando por su importancia relativa las explotaciones lecheras que se han venido desarrollando, tanto en lo correspondiente a la pequeña propiedad como al sector ejidal, satisfactoriamente.

En los sistemas operativos de los establos, el manejo de los estiércoles se relega a un segundo plano de importancia. El aumento de trabajo para un mejor saneamiento y funcionamiento del lugar, no significaría, en un plazo inmediato, ningún beneficio sustancial para la empresa, en lo correspondiente a ingresos económicos.

Sin embargo, con las prácticas actuales de manejo, (extracciones periódicas cada 15 ó 20 días), se propician algunos problemas que son perjudiciales en cierta medida para el establo y la mayoría se agudizan en épocas de lluvias, tales como:

- a) Proliferación de plagas y mosquitos.
- b) Malos olores.
- c) Mayor posibilidad de contacto del ganado con elementos patógenos.
- d) Mayor dificultad de maniobras dentro de los corrales.



| SIGNOS CONVENCIONALES    |  |
|--------------------------|--|
| AUTOPISTA                |  |
| CARRETERA PANAMERICANA   |  |
| CAMINOS VECINALES PAVIM. |  |
| FERROCARRIL              |  |
| RIOS                     |  |
| LIMITE DE ZONA DE RIEGO  |  |
| CANALES PRINCIPALES      |  |
| POBLACIONES PRINCIPALES  |  |
| ESTABLO                  |  |

PLANO 6-2  
 DISTRITO DE DESARROLLO  
 RURAL 013  
 SECRETARIA DE AGRICULTURA  
 Y RECURSOS HIDRAULICOS  
 ESCALA 1 : 300,000

e) Disminución de la capacidad especificada para los corrales.

f) Subutilización de los desechos.

**La configuración de un sistema de digestión que evite estos problemas y pueda ser una inversión productiva que coadyuve al fortalecimiento económico de los establos, son los objetivos primordiales que se proponen alcanzar con estos métodos de tratamiento de estiércoles de ganado estabulado.**

Para el diseño del sistema de digestión, se ha tomado como base un establo lechero de propiedad ejidal localizado en el municipio de Meoquí ( ver el plano 6-3). Esta unidad es operada por el sector de trabajo colectivo denominado "Ing. Enrique Rubio Castañeda", perteneciente al Ejido Meoquí.

El establo se construyó y se puso en operación mediante un crédito refaccionario otorgado por el Banco de Crédito Rural del Norte en el año de 1982. El monto total del crédito fue de \$50'742,000.00 (CINCUENTA MILLONES SETECIENTOS CUARENTA Y DOS MIL PESOS M.N.), de los cuales se utilizaron \$10'043,000.00 (DIEZ MILLONES CUARENTA Y TRES MIL PESOS M.N.) en la construcción civil. Convirtiendo esta última cantidad a precios actuales mediante la aplicación de un costo promedio de \$500,000.00 por metro cuadrado de construcción, y teniendo una superficie de construcción de 2000 M<sup>2</sup>, aproximadamente, tenemos un monto de \$1000'000,000.00 (MIL MILLONES DE PESOS M.N.), en lo que respecta al costo de la obra civil. Convirtiendo estas cantidades a Nuevos Pesos, equivaldrían a N.P. \$ 50,742.00 en lo que respecta al financiamiento inicial; N.P. \$ 10,043.00 lo correspondiente a la obra civil; N.P. \$ 500.00 al costo por metro cuadrado de construcción; y N.P. \$ 1,00.000.00 al monto actual de la obra.

El tipo de instalación es la denominada "Establo en Abanico" diseñado para una capacidad de 300 reses mayores (ganado Holstein), con un promedio de peso vivo de 550 kg/cabeza. Cuenta con 7 corrales comunicados a una sala de espera y a una sala de ordeño con sus dos retornos a los corrales; oficina, baño, cuarto de leche y cuarto de máquinas, enfermería, becerrerías y separos, bodega para almacén de alimento concentrado, depósito de agua para 131,000 lts., dos almacenes para forraje y 7 sombreaderos en los corrales; cuenta además con una subestación de 45 K.V.A.

El clima en esta zona se considera semi-árido extremo. Su precipitación media anual es de 300 mm., con un promedio anual de 89 días lluvia y una humedad relativa del 45 %.

Por considerarse a la temperatura una variable de suma importancia, que influye determinantemente en el comportamiento del proceso de digestión, se presenta en el cuadro 6-1, una serie estadística de datos de temperaturas medias mensuales durante el transcurso de 29 años; y, en la figura 6-1, se presenta la gráfica de las temperaturas medias mensuales. Estos datos fueron tomados del Servicio Meteorológico del I.N.I.A. (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas)-S.A.R.H., ubicado en la Cd. de Delicias, 15 kilómetros al SW del establo.

## **6-2. Sistema propuesto de operación.**

El plano 6-3, muestra la planta de digestión integrada al establo. El plano 6-4 "Diagrama de Flujo del Proceso", indica la secuencia de las actividades principales en el funcionamiento operacional.

### **Descripción de las actividades principales:**

**Actividad 1-2.** Recolección del E.F.(estércole fresco) a través del drenaje de la sala de espera y la sala de ordeño. Se realiza dos veces por día (por la mañana y por la tarde). Después de cada actividad de ordeño se lavan las dos salas conectadas al tanque dosificador mediante un drenaje.

**Actividad 1-3.** Recolección mecánica y muestreo del E.F.(estércole fresco). Esta actividad se puede realizar una vez al día utilizando la maquinaria normal de limpia que posee el establo para estos movimientos: un tractor agrícola de 60 H.P., al cual se le ha adaptado un "fresno" (escrepa trasera) y una pala mecánica delantera; y un camión de carga con capacidad para 4 toneladas. Se tomarán muestras sistemáticamente durante la recolección.

**Actividad 2-4.** Medición y muestreo del E.F. (estércole fresco) drenado. La medición de los lodos drenados al tanque dosificador, se podrá realizar mediante una barra graduada (como la usada en los depósitos de gasolina); podrán extraerse muestras para conocer la dilución existente.

CUADRO  
4-1

CONCENTRACIONES DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES EN GRADOS  
CENTIGRADOS DE 29 AÑOS DE REGISTRO. CD. DELICIAS, CHIHUAHUA

| A<br>Ñ<br>O | E<br>N<br>E | F<br>E<br>B | M<br>A<br>R | A<br>B<br>R | M<br>A<br>Y | J<br>U<br>N | J<br>U<br>L | A<br>G<br>O | S<br>E<br>P | O<br>C<br>T | N<br>O<br>V | D<br>I<br>C | T<br>O<br>T | X    |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 57          | 12.5        | 16.4        | 15.3        | 21.2        | 24.1        | 28.4        | 28.5        | 26.4        | 24.6        | 19.4        | 12.2        | 10.3        | 239.3       | 19.9 |
| 58          | 7.1         | 12.1        | 14.6        | 21.4        | 27.0        | 30.5        | 29.4        | 27.8        | 24.0        | 17.7        | 14.0        | 9.5         | 235.1       | 19.6 |
| 59          | 11.6        | 13.6        | 14.9        | 20.7        | 26.2        | 29.9        | 27.3        | 26.5        | 26.0        | 21.3        | 13.6        | 9.0         | 240.6       | 20.1 |
| 60          | 7.2         | 10.0        | 17.8        | 21.2        | 25.1        | 29.2        | 25.9        | 25.5        | 23.4        | 21.4        | 16.0        | 8.5         | 231.2       | 19.3 |
| 61          | 7.2         | 9.7         | 14.9        | 21.0        | 24.4        | 25.8        | 26.1        | 23.2        | 24.3        | 19.8        | 12.6        | 12.2        | 221.2       | 18.4 |
| 62          | 8.3         | 11.2        | 14.7        | 21.5        | 26.4        | 28.5        | 25.7        | 27.0        | 22.9        | 19.9        | 14.4        | 10.6        | 231.1       | 19.3 |
| 63          | 9.8         | 12.2        | 15.5        | 21.1        | 24.5        | 25.8        | 25.7        | 23.7        | 21.9        | 18.2        | 13.3        | 8.7         | 220.4       | 18.4 |
| 64          | 6.7         | 9.1         | 13.4        | 18.7        | 23.0        | 24.7        | 22.8        | 22.1        | 20.3        | 16.4        | 13.3        | 7.8         | 198.3       | 16.5 |
| 65          | 9.5         | 9.7         | 13.5        | 19.9        | 22.5        | 25.2        | 26.1        | 24.4        | 23.0        | 16.5        | 15.7        | 9.6         | 215.6       | 18.0 |
| 66          | 7.2         | 8.4         | 14.6        | 18.8        | 22.9        | 25.4        | 26.1        | 25.3        | 22.6        | 18.6        | 15.4        | 9.3         | 214.6       | 18.0 |
| 67          | 9.6         | 12.1        | 18.4        | 22.3        | 22.8        | 26.2        | 26.3        | 24.0        | 21.8        | 18.2        | 15.0        | 10.7        | 227.4       | 19.0 |
| 68          | 10.0        | 12.1        | 13.3        | 18.3        | 22.5        | 25.8        | 23.1        | 23.0        | 21.5        | 19.5        | 13.1        | 10.4        | 212.6       | 17.7 |
| 69          | 11.9        | 6.5         | 12.2        | 18.6        | 21.7        | 26.6        | 26.4        | 26.3        | 23.4        | 19.6        | 13.1        | 11.7        | 218.0       | 18.2 |
| 70          | 9.8         | 12.1        | 15.3        | 19.4        | 22.4        | 26.7        | 26.5        | 26.0        | 22.1        | 16.3        | 13.5        | 13.7        | 223.8       | 18.7 |
| 71          | 11.6        | 11.7        | 10.8        | 17.8        | 22.2        | 24.7        | 25.6        | 22.5        | 22.9        | 12.7        | 14.7        | 11.5        | 208.7       | 17.4 |
| 72          | 12.1        | 12.9        | 18.1        | 19.8        | 24.8        | 25.2        | 24.9        | 24.2        | 23.5        | 22.5        | 13.1        | 12.0        | 233.1       | 19.4 |
| 73          | 9.1         | 11.8        | 15.2        | 17.7        | 22.8        | 25.4        | 25.9        | 23.7        | 24.1        | 19.9        | 15.8        | 11.0        | 222.4       | 18.5 |
| 74          | 12.8        | 12.6        | 18.8        | 21.0        | 25.1        | 27.1        | 25.8        | 24.1        | 20.7        | 18.2        | 13.2        | 9.4         | 228.8       | 19.0 |
| 75          | 11.1        | 12.2        | 15.8        | 18.3        | 22.1        | 26.7        | 23.9        | 23.9        | 21.1        | 17.9        | 14.3        | 8.9         | 216.2       | 18.0 |
| 76          | 8.8         | 13.7        | 15.5        | 17.2        | 20.6        | 26.1        | 22.7        | 24.0        | 21.3        | 16.0        | 10.8        | 8.2         | 204.9       | 17.1 |
| 77          | 10.6        | 11.2        | 13.6        | 17.5        | 21.4        | 25.5        | 24.7        | 25.9        | 25.3        | 19.9        | 14.7        | 9.6         | 219.9       | 18.3 |
| 78          | 11.9        | 11.6        | 17.3        | 21.4        | 24.5        | 28.4        | 28.0        | 24.9        | 21.4        | 16.1        | 16.2        | 11.1        | 232.8       | 19.4 |
| 79          | 9.4         | 13.5        | 16.1        | 20.6        | 22.6        | 26.1        | 28.5        | 24.5        | 22.4        | 21.5        | 13.6        | 11.8        | 230.6       | 19.2 |
| 80          | 12.9        | 14.3        | 16.4        | 19.1        | 24.3        | 30.5        | 29.1        | 26.3        | 23.9        | 12.8        | 13.3        | 12.3        | 240.2       | 20.0 |
| 81          | 10.8        | 14.1        | 15.0        | 19.2        | 23.9        | 28.0        | 27.5        | 25.0        | 23.6        | 19.6        | 16.5        | 13.7        | 236.9       | 19.7 |
| 82          | 12.8        | 14.9        | 19.5        | 21.5        | 23.4        | 29.1        | 27.6        | 26.1        | 25.6        | 21.5        | 13.7        | 10.9        | 246.6       | 20.5 |

| CUADRO 6-1                     |       | CONCENTRACIONES DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES EN GRADOS CENTIGRADOS DE 29 AÑOS DE REGISTRO, CD. DELICIAS, CHIHUAHUA |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AÑOS                           | ENE   | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEPT  | OCT   | NOV   | DIC   | TOT   | X     |
| 83                             | 10.3  | 13.5   | 15.4  | 17.8  | 23.7  | 27.5  | 27.9  | 24.8  | 25.1  | 20.5  | 14.6  | 12.4  | 235.5 | 19.4  |
| 84                             | 10.2  | 11.2   | 16.0  | 18.8  | 23.5  | 25.4  | 24.8  | 24.4  | 23.0  | 19.5  | 14.7  | 13.9  | 225.4 | 18.7  |
| 85                             | 7.8   | 12.3   | 16.7  | 19.0  | 24.7  | 26.3  | 25.2  | 25.7  | 22.5  | 19.3  | 15.5  | 11.9  | 226.9 | 18.9  |
| SUMA                           | 290.6 | 346.7  | 448.6 | 570.8 | 685.1 | 780.7 | 758.0 | 721.2 | 668.2 | 547.7 | 409.9 | 310.6 |       | 544.6 |
| PROM                           | 10.0  | 11.9   | 15.5  | 19.7  | 23.6  | 26.9  | 26.1  | 24.9  | 23.0  | 18.8  | 14.1  | 10.7  |       | 18.6  |
| TEMPERATURA MEDIA ANUAL 18.6 C |       |  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

**Actividad 3-5.** Pesado del E.F. (estiércol fresco) recolectado mecánicamente. El pesado se realizará en la báscula (de 30 toneladas) del mismo establo, pesando y destarando el camión de carga.

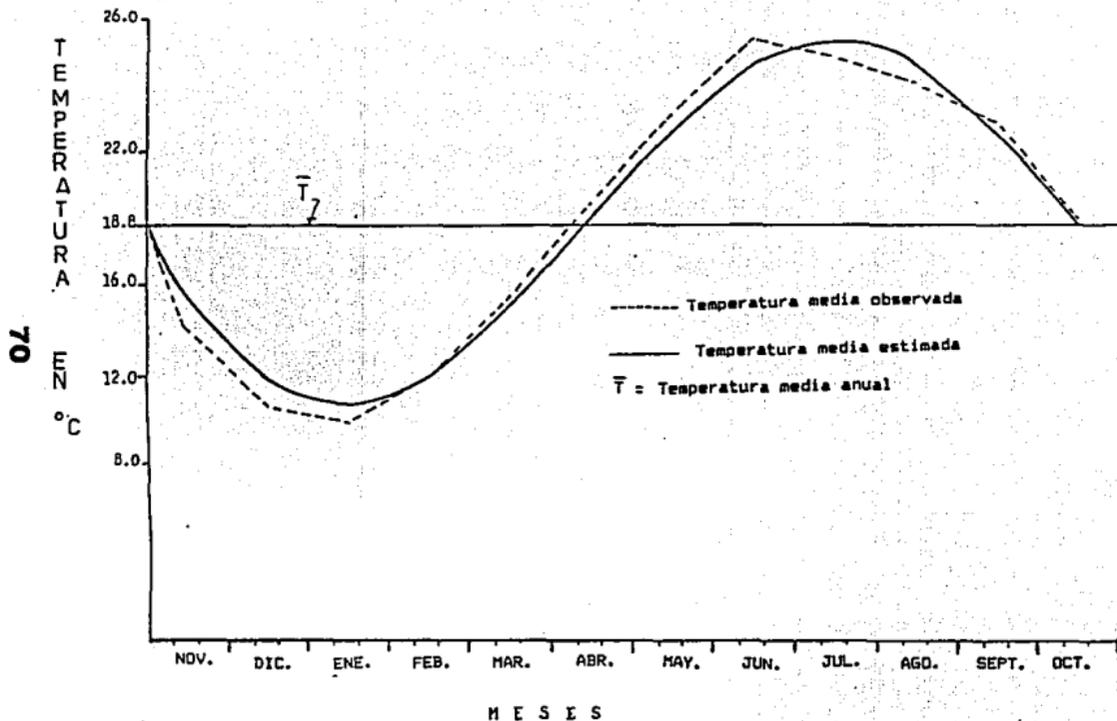


FIGURA 7.1 GRAFICA DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS

**Actividad 5-6.** Carga al tanque dosificador del E.F. recolectado mecánicamente. Del camión recolector se introduce el E.F. directamente al tanque dosificador a través de la tolva de carga.

**Actividad 4-6.** Determinación de humedad en el E.F. Se determinará la humedad en el E.F., drenado y recolectado mecánicamente, mediante el pesado y secado de las muestras extraídas.

Los muestreos y mediciones se realizarán según se cumpla con los requerimientos de una digestión satisfactoria. Deberán ser instalados un horno de gas y una báscula de laboratorio para su secado y pesado.

**Actividad 6-7.** Dosificación de agua. Una vez medido el peso de los lodos dentro del tanque dosificador y habiéndose determinado su porcentaje de humedad, se determina la cantidad de agua que es necesaria para obtener la dilución requerida. El abastecimiento se realizará mediante la red de agua conectada al tanque de almacenamiento.

**Actividad 6-8.** Calentamiento de los lodos entrantes. El calentamiento de la mezcla en el tanque dosificador se realizará mediante la circulación de agua, calentada por una caldera, a través serpentines. Las temperaturas de entrada del agua en los serpentines deberá ser entre 48.8 y 54.4 °C saliendo a unos 37.7° C

**Actividad 7-8.** Mezclado en el tanque dosificador. Se proponen tres horas de mezclado con un motorreductor de 20 H.P., conectado al sistema de aspas del tanque dosificador.

**Actividad 8-9.** Alimentación de lodos al tanque digestor. Serán introducidos mediante una bomba de 8" accionada con un motor de 30 H.P. del tanque dosificador al tanque digestor (1/2 hora).

**Actividad 9-11.** Temperatura del tanque digestor. El calentamiento se realizará con la misma caldera utilizada para el calentamiento del tanque dosificador y con el mismo método de serpentines. Las tuberías serán de fierro galvanizado e irán adosadas a las paredes del depósito.

**Actividad 9-10.** Recirculación de lodos. Se propone una recirculación de la mezcla de 2 horas cuatro veces por día. Se utilizará la misma bomba de 8" que se usará en el bombeo de lodos.

**Actividad 9-12.** Digestión de lodos. El proceso de digestión es permanente controlando las variables de operación.

**Actividad 12-14.** Recolección de bioabono. La recolección de efluentes se realizará automáticamente al estarse cargando el tanque de digestión y estando abierta la válvula de descarga de 8". Los lodos digeridos, fluirán hacia un registro que tiene esta válvula colocada en el nivel deseado de carga máxima dentro del digestor. Los abonos líquidos pasarán a un tercer tanque de almacenamiento y oxidación. Ver planos 6-5 y 6-6.

**Actividad 14-15.** Distribución de bioabono. Después de haberse recolectado el bioabono en el tanque de almacenamiento y oxidación, la distribución se realizará mediante la válvula de distribución indicada en el plano 6-6. que suministrará el efluente a los camiones pipa.

**Actividad 12-13.** Recolección del gas. El almacenamiento de gas se realizará dentro del mismo tanque de digestión. El mecanismo propuesto se puede observar en el plano 6-6. La producción de gas dentro del digestor, al sobrepasar la presión atmosférica, hace fluir, a través del registro, los lodos al tanque regulador de presiones construido en la parte alta del tanque de digestión, almacenándose el gas en el espacio cedido por los lodos. De esta manera se evitan sobrepresiones internas.

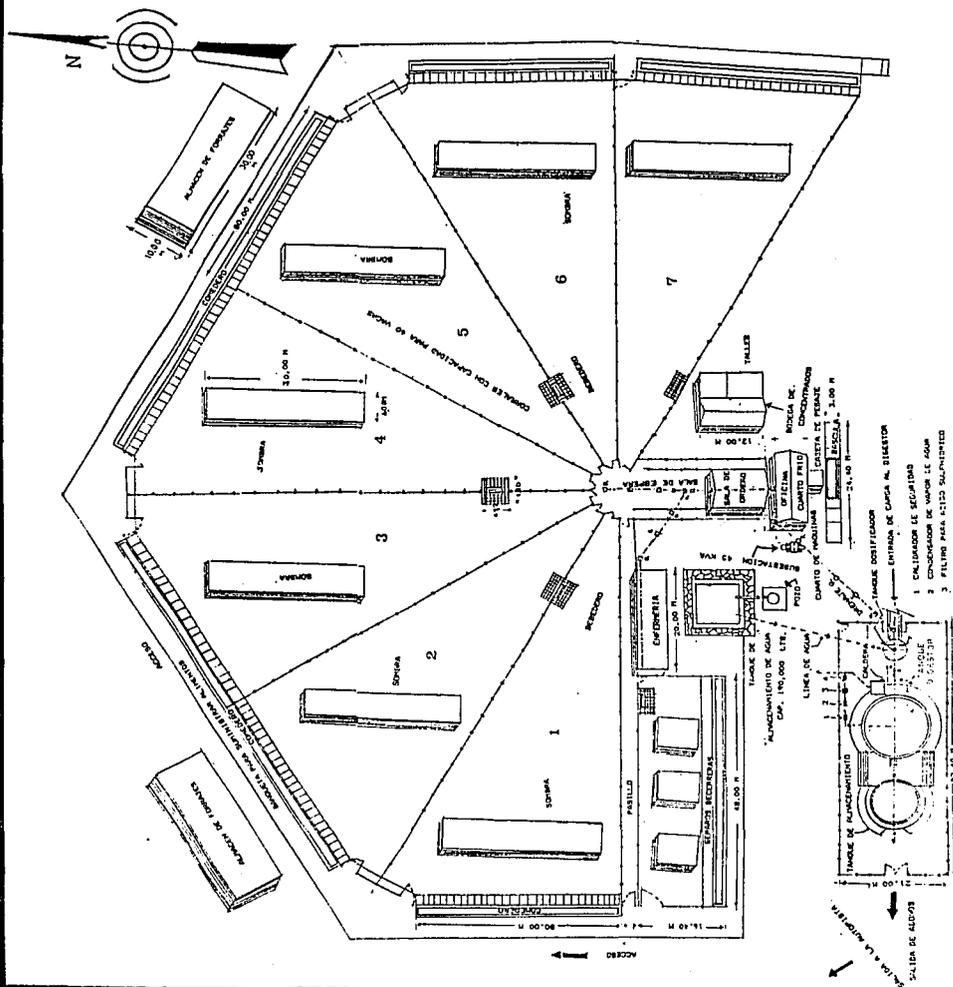
**Actividad 13-15.** Distribución de gas. La distribución de gas se llevará a cabo mediante la tubería indicada en el plano 6-6. Después será pasado por un condensador para abstraerle el vapor de agua; seguidamente se llevará a un filtro de limaduras de fierro (óxido férrico), para limpiarlo de ácido sulfhídrico con el fin de evitar corrosiones en las tuberías y motores. De esta manera podrá distribuirse para consumo del mismo establo o fuera de sus instalaciones.

### **6.3. Dimensionamiento del sistema.**

Los tanques para digestión de lodos pueden ser de la forma que se estime más conveniente. Se construyen cubiertos o no cubiertos, calentados o no calentados, y con limpieza manual o mecánica. Muchos tanques son de forma cilíndrica, cubiertos, calentados y con limpia o agitación mecánica. Los aspectos principales que hay que tener en cuenta al diseñar un tanque de digestión son:

- a) El volumen de lodo que se desea someter a digestión.

PLANO 6 - 3  
 ESTABLO Y SISTEMA  
 DE DIGESTION  
 ESCALADO



N

1:13

D R E N

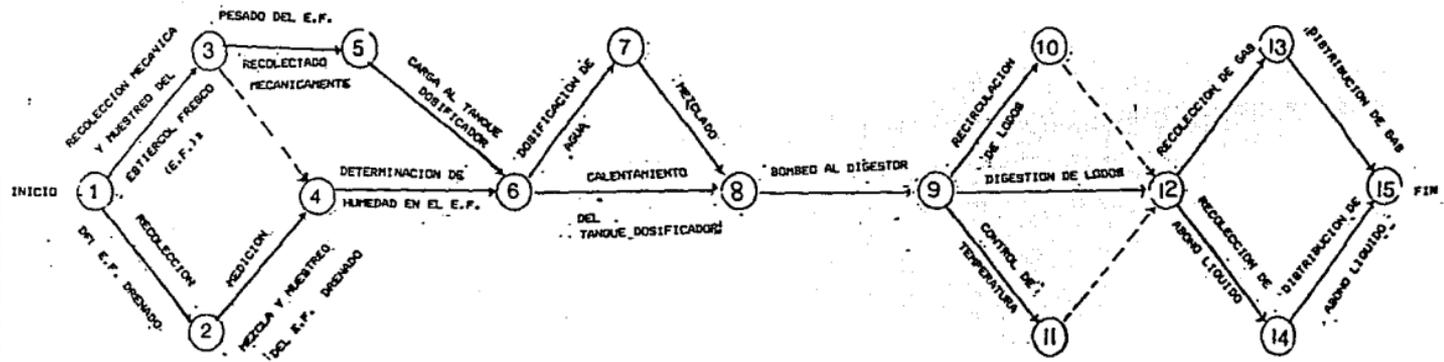
- LEGENDA DEL SISTEMA DE DIGESTION
- 1 CALIDADOR DE SECADORAS
  - 2 CONDENSADOR DE VAPOR DE AGUA
  - 3 FILTRO PARA LECHE SULFONADA
  - 4 TRAMPA DE FLUMES

SISTEMA DE DIGESTION

ACCESO

SAIDA DE ALBORNOS

ACCESO



E.F. = ESTIERCO FRESCO

|                   |
|-------------------|
| PLANO 6-4         |
| DIAGRAMA DE FLUJO |
| DEL PROCESO       |
| SIN ESCALA        |

- b) El período de digestión.
- c) El método de calefacción.
- d) La forma de agregar y quitar el lodo, y la manera de extraer el líquido que sobrenada.
- f) El tipo de cubierta.
- g) El modo de recoger el gas.

La capacidad de un tanque de digestión puede calcularse aproximadamente por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad (C)} = \frac{V1 + V2}{2} \cdot t \dots\dots\dots(6-1)$$

en donde:

**V1** = Volumen de la dosis diaria.

**V2** = Volumen de la dosis después del período de permanencia en el tanque.

**t** = Período de digestión.

Como el valor de V2 no puede preverse exactamente, se suele recurrir a la experiencia para determinar la capacidad del tanque.

**6.3.1. Tanque de digestión y cámara de gases.** El volumen de la mezcla diaria se obtiene partiendo de la disponibilidad de E.F. diario. El establo cuenta con un promedio de 300 cabezas de ganado mayor (Holstein), y con un peso promedio de 550 kg por animal en pie. Se sabe por experiencia que el E.F. producido por estos animales, es aproximadamente igual al 9 % de su peso.

De esta manera podemos calcular el peso total del E.F. producido diariamente como sigue:

$$W(E.F.) = 300 \times 550 \times 0.09 = 14,850 \text{ kg/día}$$

$$W(E.F.) = 14.85 \text{ T/día.}$$

Si consideramos una eficiencia de recolección del 85% (debido a pérdidas por escurrimientos, evaporación, lixiviación y otros desperdicios), tenemos que:

$$W(E.F.) = 14.85 \times 0.85 = 12.622 \text{ T/día.}$$

Tomando los datos de operación del digestor del I.I.E. (ver datos de las condiciones de operación presentados en la pag. 58 del capítulo 5), podemos obtener la relación agua-E.F., para obtener un promedio de 6.84 % de S.T.:

$$\frac{W(\text{agua})}{W(E.F.)} = \frac{210}{140} = 1.5$$

Por lo tanto el peso diario del agua requerida para la dilución del E.F. será:

$$W(\text{agua})_r = 12.622 \times 1.5 = 18,933 \text{ kg} \approx 18.95 \text{ T}$$

Tomando la densidad del agua igual a 1.00 tenemos que el volumen diario de agua requerido será:

$$V(\text{agua})_r = 18.95 \text{ M}^3/\text{día.}$$

El volumen total de la mezcla diaria será:

$$V_t = [W(\text{agua})_r + W(E.F.)] \times \frac{1}{\rho}$$

$$V_t = \frac{18.95 + 12.622}{1.05} = 30.07 \text{ M}^3/\text{día.}$$

Por no contar con los datos experimentales para poder determinar  $V_2$ , se supone igual a  $V_1$ , (lo que le da una mayor capacidad al tanque).

Sustituyendo los valores en la ecuación 6-1, tenemos que el primer valor ( $C_1$ )

para la capacidad del tanque de digestión es:

$$C1 = \frac{V1 + V2}{2} t = \frac{30 + 30}{2} 25$$

resolviendo:

$$C1 = 751.75 \text{ M}^3$$

El tiempo de residencia (t), se propone de 25 días y una temperatura de operación de 35°C. Ver diagrama de la figura 4-5.

Esta capacidad del tanque de digestión debe modificarse debido al sistema que se propone para regular y almacenar el gas.

Al iniciarse el flujo de los lodos hacia el tanque regulador de presiones, estos toman contacto con la atmósfera, por lo que el volumen máximo de lodos que pueda contener este tanque deberá estar satisfactoriamente digerido. De esta manera se evita que haya desprendimientos de gases tóxicos en el tanque regulador que puedan contaminar el medio ambiente.

Para corregir el volumen, se procede a calcular el gas producido diariamente.

El volumen de gas producido, a 30°C y 30 días de permanencia por kg. de S.V. fue de 0.347 M<sup>3</sup>/kg. (ver datos de producción de gas por kg de S.V. pag. 57 del capítulo 5).

Según las pruebas de laboratorio, el volumen de gas producido a 35°C y 25 días de residencia, deberá ser mayor. Tomando los valores de residencia prácticos que nos da la gráfica de la figura 4-2, tenemos que:

**G1 (gas producido en 25 días) = 800 lta/kg de S.V.**

**G2 (gas producido en 30 días) = 733 lta/ kg de S.V.**

Relacionando los dos volúmenes de producción:

$$\begin{array}{r} G1 \quad 800 \\ \hline G2 \quad 733 \\ \hline \end{array} = 1.0914$$

Por lo tanto la producción de gas esperada diariamente será:

$$G3 = \text{Volumen producido en 30 días} \times 1.0914$$

$$G3 = W (\text{carga diaria}) \times \% \text{ S.V.} \times 0.347 \times 1.0914$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$G3 = 710 \text{ M}^3$$

Si consideramos un volumen total del tanque de 1,000 M<sup>3</sup> se puede decir, prácticamente, que un volumen de 248.25 M<sup>3</sup> de lodos se desplazan (debido a la presión interna del tanque digester), hacia el tanque regulador de presiones. Una capacidad de almacenaje de gas un poco mayor a la tercera parte producida diariamente. Esto queda sujeto a que el consumo de gas sea regulado evitando una acumulación de gas mayor a este volumen.

En la práctica, esta capacidad de almacenamiento de gas se verá aumentada debido a dos variables: un mayor aumento en la presión interna del digester provocará una disminución del volumen del gas; y por la disminución del volumen de lodos al digerirse.

Si denominamos por C<sub>2</sub> la capacidad final del tanque digester tenemos:

$$C_2 = 751.75 + 248.25 = 1000 \text{ M}^3$$

Considerando la forma cilíndrica para la construcción del tanque digester, podemos iniciar los cálculos, minimizando para ese volumen la superficie del tanque.

De la fórmula para el volumen de un cilindro,

$$V = \pi r^2 h \dots\dots\dots(6-2)$$

despejando h,

$$h = \frac{V}{\pi r^2} \dots \dots \dots (6-3)$$

para la superficie del cilindro considerando fondo y tapa tenemos:

$$S = 2\pi r^2 + 2\pi rh \dots \dots \dots (6-4)$$

sustituyendo el valor de h en la ecuación 6-4,

$$S = 2\pi r^2 + \frac{2V}{r} \dots \dots \dots (6-5)$$

derivando S con respecto a r tenemos,

$$\frac{ds}{dr} = \frac{2(-V + 2\pi r^3)^2}{r^2} \dots \dots \dots (6-6)$$

igualando a ceros y despejando r tenemos

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}} \dots \dots \dots (6-7)$$

sustituyendo valores en la ecuación. 6-7

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{1000}{6.2832}} = 5.42 \text{ m.}$$

sustituyendo el valor de r1 en la ecuación. 6-3

$$h_1 = \frac{1000}{92.28} = 10.83 \text{ m}$$

Se sugiere disminuir la altura del cilindro con el fin de reducir el grado de dificultad de construcción. Si consideramos el tanque digestor como un cilindro sin tapa, su superficie mínima se puede obtener de manera similar al caso anterior, deduciéndose

que:

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \dots \dots \dots (6-8)$$

sustituyendo valores,

$$r_2 = 6.83 \text{ m}$$

$$h_2 = 6.82 \text{ m}$$

si se toma un valor medio de h,

$$hm = \frac{10.83 + 6.82}{2} = 8.83 \text{ m}$$

$$rm = 6.00 \text{ m}$$

Se propone una altura  $h^3$  de 8.00 m y cuyo radio tiene un valor  $r^3 = 6.30$  m.

En cada caso las dimensiones de los cilindros obtenidos, arrojaron los siguientes resultados para las superficies ( $S_x$ ):

$$S1 = 553.4 \text{ m}^2$$

$$S2 = 585.8 \text{ m}^2$$

$$Sm = 559.1 \text{ m}^2$$

$$S3 = 566.1 \text{ m}^2$$

**6.3.2. Tanque regulador de presiones.** Se propone, en sustitución de una tapa flotante, un tanque regulador de presiones. Este se desplazará en la parte superior del digestor prosiguiendo la forma cilíndrica.

La tapa del digestor será un segmento esférico, cuyas medidas se señalan en la fig. 6-2. El radio  $R = 17.30$  m de la esfera, se obtuvo gráficamente. El radio  $r = 6.30$  m del círculo menor, que determina el segmento, es el propuesto para el cilindro del

digestor. Por lo tanto la altura del segmento será:

$$h = 17.30 - 17.302 - 6.302 = 1.19 \text{ m.}$$

$$h = 1.19 \text{ m.}$$

Se tiene entonces que el volumen del segmento se obtiene de:

$$V = 1/2 \pi h \left( r^2 + \frac{h^2}{3} \right) \dots \dots \dots (6-9)$$

Sustituyendo y resolviendo tenemos:

$$V = \frac{1}{2} \times 3.1416 \times 1.19 \left( 6.30^2 + \frac{1.42^2}{3} \right)$$

$$V = 75.5 \text{ m}^3$$

El volumen restante del segmento cilíndrico con una altura de 1.19 m será:

$$V = \pi \times (6.30)^2 \times 1.19 - 75.5 = 72.88 \text{ m}^3$$

Tomando el valor de 250 m<sup>3</sup>, aproximadamente igual a 248.5 m<sup>3</sup> de lodos desalojados, como la capacidad del tanque regulador de presiones, el volumen que ocuparán los lodos a partir de la altura máxima de la cúpula (1.19 m), se obtiene restando al volumen total desalojado el volumen alojado hasta la altura máxima del segmento esférico, de donde:

$$V = 250 - 72.88 = 177.12 \text{ m}^3$$

De la fórmula 6-3 se obtiene la altura h del segmento cilíndrico

$$h = \frac{177.12}{3.1416 \times 6.30^2} = 1.42 \text{ m}$$

Por lo tanto la altura total h que adquirirá la mezcla desde la parte más baja

del tanque regulador de presiones será:

$$h_t = h_1 + h_2 = 1.19 + 1.42 = 2.61 \text{ m}$$

Se propone un 15 % de holgura por lo que la altura total sería de:

$$h_f = 3.00 \text{ m}$$

Estas dimensiones se corregirán al determinarse el espesor de las paredes y tapa del tanque.

**6.3.3. Tanque dosificador.** El volumen del tanque dosificador debe ser igual al de la alimentación diaria más un 10 % por instalaciones internas y holgura.

$$\text{Volumen del tanque dosificador} = 30 + 3 = 33 \text{ m}^3$$

Se calculan las dimensiones minimizando su superficie para un cilindro sin considerar la tapa. Resultando,

$$r = \sqrt[3]{\frac{33}{\pi}} = 2.20 \text{ m}$$

de donde

$$h = 2.20 \text{ m}$$

**6.3.4. Tanque de almacenamiento de efluentes.** Se propone que la capacidad de este tanque sea igual a dos descargas de efluentes del digestor.

Suponiendo una altura de 1 m, su radio será:

$$r = 4.40 \text{ m}$$

Los planos 6-5 y 6-6, nos muestran la planta arquitectónica y un corte longitudinal, respectivamente, del sistema de digestión.

**6.4. Balance energético del sistema.**

**6.4.1. Superficies y coeficientes de transmisión de calor de las fronteras del tanque digestor.** La profundidad a la que se pretende desplantar el tanque digestor, el terraplén circundante (formado con el material producto de excavación), la fibra de vidrio de la techumbre superior, y un recubrimiento de ladrillo para el resto de las paredes del tanque que queden sin cubrir, forman las fronteras con la superficie del tanque digestor.

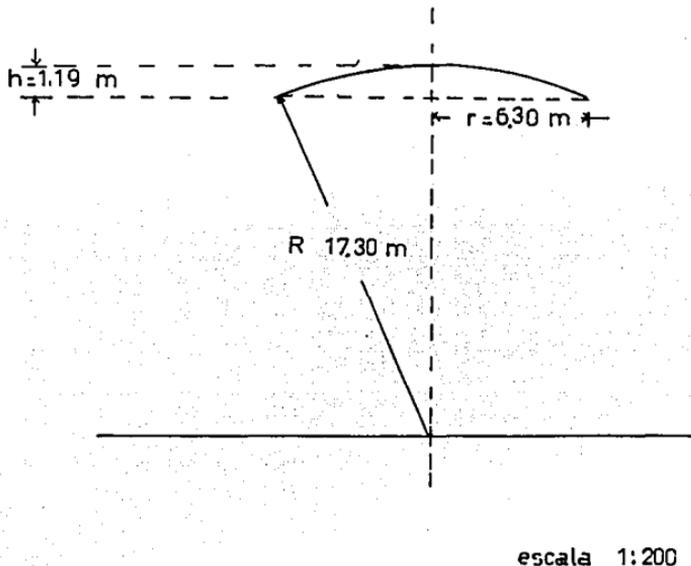
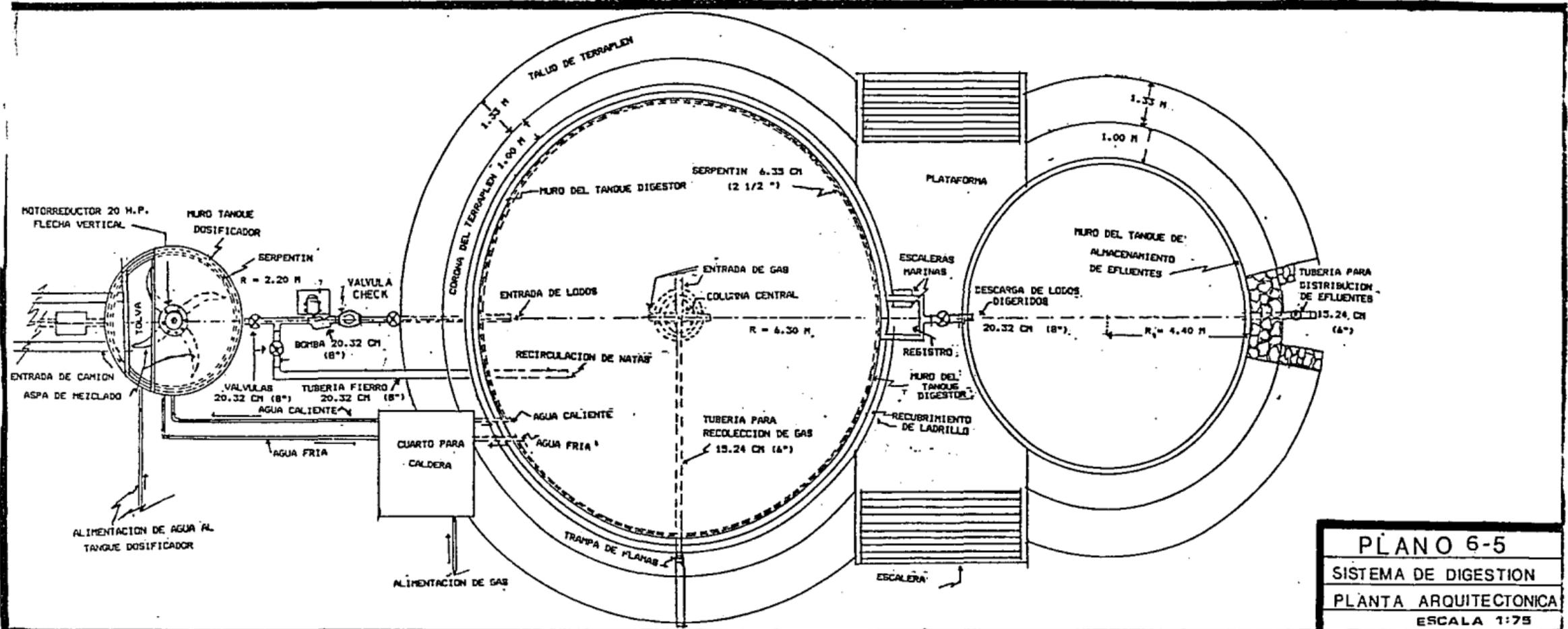
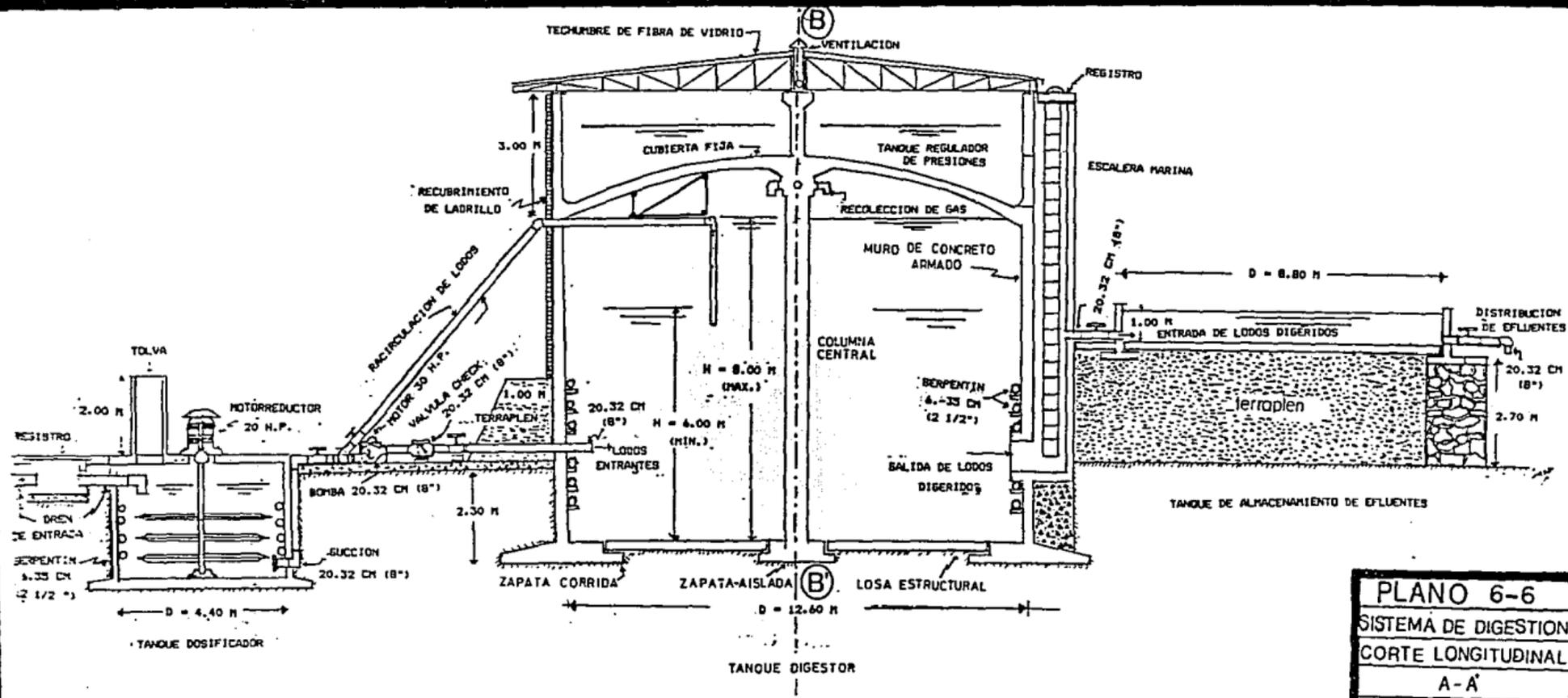


Figura 6-2. Segmento esférico de la tapa del tanque de digestión.

Para valorizar los factores "C" de transmisión de calor, del tanque al exterior, supondremos su construcción de concreto armado. Debiéndose definir entonces, las superficies de sus diferentes fronteras.



**PLANO 6-5**  
 SISTEMA DE DIGESTION  
 PLANTA ARQUITECTONICA  
 ESCALA 1:75



**PLANO 6-6**  
**SISTEMA DE DIGESTION**  
**CORTE LONGITUDINAL**  
**A-A**  
**ESCALA 1:75**

La superficie expuesta a tierra húmeda será la de la excavación. Por tanto,

$$S_1 = 2\pi \times 6.30 \times 2.00 + \pi \times 6.30^2$$

$$S_1 = 204 \text{ m}^2$$

Superficie expuesta a tierra seca:

$$S_2 = 2\pi \times 6.30 \times 2$$

$$S_2 = 79 \text{ m}^2$$

Superficie expuesta al revestimiento de ladrillo:

$$S_3 = 2\pi \times 6.3 \times 4.00 = 158 \text{ m}^2$$

La superficie expuesta a la cubierta de fibra de vidrio, será la superficie del segmento de esfera que forma la tapa fija del tanque digestor, calculándose mediante la siguiente fórmula:

$$S_4 = 2\pi Rh = 2\pi \times 17.30 \times 1.19 = 129 \text{ m}^2$$

La superficie total será:

$$S_t = 204 + 79 + 158 + 129 = 562 \text{ m}^2$$

Para efectos de cálculo, consideraremos el coeficiente "C" del revestimiento de ladrillo igual al de la tierra seca, es decir 0.10.

**6.4.2. Capacidad de la caldera en B.T.U. y en c.c.**(caballos caldera). En los países de habla inglesa se usa ordinariamente para medir las cantidades de calor la British Thermal Unit o B.T.U., que es la cantidad de calor necesaria para elevar en 1° F la temperatura de una libra de agua destilada.

$$1 \text{ B.T.U.} = 252.22 \text{ calorías.}$$

Transformando las diferentes superficies de  $\text{m}^2$  a  $\text{ft}^2$ , tenemos,

$$S1 = 10.7639 \times 204 = 2186 \text{ ft}^2$$

$$S2 = 10.7639 \times 79 = 850 \text{ ft}^2$$

$$S3 = 10.7639 \times 158 = 1701 \text{ ft}^2$$

$$S4 = 10.7639 \times 129 = 1389 \text{ ft}^2$$

Del cuadro 6-1, se puede deducir que la temperatura crítica para el proceso de digestión, se presenta en el mes de Enero. El valor de la temperatura media más baja en este mes es de 6.7°C. Se supone también que el agua de alimentación tendrá una temperatura media igual a la ambiental.

Los requerimientos de calor de los lodos entrantes se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$Q = m (\Delta T) \dots\dots\dots(6-11)$$

donde

Q = Cantidad de calor en B.T.U.

m = Peso de la mezcla en libras.

$\Delta T$  = Incremento de temperatura en °F.

$$\text{Peso de los lodos entrantes} = \frac{1.05 \times 31,500}{0.454}$$

Peso de los lodos entrantes = 72,852 lb.

Temperatura de los lodos entrantes = 6.7 °C = 43.06 °F

Temperatura deseada en los lodos entrantes = 40° C

Temperatura deseada en los lodos entrantes = 104° F

Sustituyendo:

$$Q_1 = 72,852 \times (104 - 43) \text{ B.T.U./día (mes crítico)}$$

$$Q_1 = 4'439,600 \text{ B.T.U./día (mes crítico)}$$

Suponiendo que el calentamiento de los lodos entrantes se realiza en un tiempo de 4 horas, tendremos que las B.T.U. requeridas por hora durante ese lapso serán:

$$Q_r/\text{hora} = \frac{4'439,600}{4} = 1'109,900 \text{ B.T.U./hora}$$

Pérdidas de calor por exposición del tanque:

Sustituyendo valores en la ecuación 4-2 tenemos:

$$Q_2 = 0.30 \times 24 \times 2,186 (95 - 43) + 0.10 \times 24 \times 3,940 (95 - 43)$$

$$Q_2 = 818,438 + 491,712 = 1'310,150 \text{ B.T.U./día}$$

$$Q_2/\text{hora} = \frac{1'310,150}{24} = 54,590 \text{ B.T.U./hora}$$

$$Q_t/\text{hora (mes crítico y máximo consumo)} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_t/\text{hora} = 1'164,490 \text{ B.T.U. (por hora en el mes crítico y en el lapso de máximo consumo).}$$

Considerando una eficiencia del 55% por pérdidas de calor por conducción, eficiencia de transmisión de las tuberías y eficiencia de la caldera tenemos:

$$Q_t/\text{hora} = 1.45 \times 1'164,490 \text{ B.T.U./hora}$$

$$Q_t/\text{hora} = 1'688,510.5 \text{ B.T.U./hora}$$

Se puede transformar esta capacidad a caballos caldera (C.C.), de la siguiente

manera:

$$\begin{aligned} \text{Caballos caldera} &= \text{C.C.} = \frac{\text{B.T.U./Hr.}}{33,520} \\ \text{Capacidad de la caldera} &= \frac{1'688,510}{33,520} = 50.37 \text{ C.C.} \end{aligned}$$

**6.4.3. Requerimientos de calor anual.** Del cuadro 6-1, tomamos el valor de la temperatura media anual:

$$T_m = 18.6^\circ\text{C} = 65.5^\circ\text{F}$$

de donde,

$$Q_m = [72,852 \times (104 - 65.5)] + [0.30 \times 24 \times 2186 \times (95 - 65.5)] + [0.10 \times 24 \times 4,058 \times (95 - 65.5)]$$

$$Q_m (\text{diaria}) = 3'785,720 \text{ B.T.U./día}$$

$$Q_m (\text{anual}) = 1.38 \times 10^9 \text{ B.T.U./año}$$

$$Q_m (\text{anual}) \text{ en calorías} = 1.38 \times 10^9 \times 252.22$$

$$Q_m (\text{anual}) \text{ en calorías} = 3.48 \times 10^8 \text{ Kcal.}$$

Los requerimientos calculados de calor no consideran las posibles pérdidas entre la fuente de calor y el digestor.

**6.4.4. Producción energética del digestor.** La producción diaria esperada de gas del digestor es de 710 m<sup>3</sup>, que con un poder calorífico medio de 25.7 B.T.U./lit nos daría un total de :

$$\text{Producción de B.T.U./día} = 710 \times 25.7 \times 1000$$

$$\text{Producción de B.T.U./día} = 18.25 \times 10^6 \text{ B.T.U./día}$$

$$\text{Producción de B.T.U./hr} = \frac{18.25 \times 10^5}{24}$$

**Producción de B.T.U./hr = 760,291 B.T.U./hr**

**Producción de B.T.U. (anual) = 6.66 x 10<sup>9</sup> B.T.U.**

La producción calorífica del digestor se puede obtener también con base en los siguientes datos:

1 B.T.U. = 252.22 calorías

1 M<sup>3</sup> de gas de digestores = 5,859 Kcal/M<sup>3</sup> (promedio)

Producción diaria de gas = 710 m<sup>3</sup>

Producción de calorías/día = 5,859 x 710

Producción de calorías/día = 4'159,890 Kcal/día

Producción de calorías/hora = 173,328.75 Kcal/h

Producción de calorías/minuto = 2,888 Kcal/m

$$\text{Producción en B.T.U./día} = \frac{4'159,890}{252.22}$$

Producción en B.T.U./día = 16'493,101 B.T.U./día

Producción en B.T.U./ hora = 687,213 B.T.U./hora

Producción en B.T.U./min. = 11,453.54 B.T.U./ min.

Tomando un valor promedio de la producción en B.T.U. por hora de los dos resultados obtenidos tenemos:

$$\begin{aligned} \text{B.T.U./hora (promedio)} &= 723,752 \text{ B.T.U./hora (prom.)} \\ & \qquad \qquad \qquad 723,752 \times 24 \\ \text{Producción promedio diaria/m}^3 \text{ de gas} &= \frac{\text{-----}}{710} \end{aligned}$$

$$\text{Producción promedio diaria/m}^3 \text{ de gas} = 24,465 \text{ B.T.U.}$$

#### 6.4.5 Relación de la producción y el consumo de calor.

Producción

$$\text{B.T.U./hora (valor medio)} = 723,752 \text{ B.T.U./hora}$$

Requerimientos para calentamiento

$$\text{B.T.U./hora (valor medio)} = 157,738 \text{ B.T.U./hora}$$

Esta cantidad, es el valor neto requerido para el calentamiento del sistema.

La relación entre las necesidades energéticas y la capacidad de producción en el mes crítico y dentro de las cuatro horas de máximo consumo se calculan como sigue:

$$\text{B.T.U. requeridas en 4 horas} = 1'688,510 \times 4$$

$$\text{B.T.U. requeridas en 4 horas} = 6'754,040 \text{ B.T.U.}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de gas/hora} &= \frac{710}{24} = 29.58 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Capacidad de producción de gas en un lapso de 4 horas} = 250 \text{ (capacidad de almacenaje)} + 29.58 \times 4$$

$$= 368.32 \text{ m}^3$$

$$\text{Producción de B.T.U./4 horas} = 368.32 \times 24,4654 = 9'010,949 \text{ B.T.U.}$$

9'010,949 B.T.U. > 6'754,042 B.T.U.

La producción energética es mayor que las necesidades para calentamiento en el mes crítico y en el lapso de las cuatro horas de mayor requerimiento calorífico. Se considera, por lo tanto, adecuadas la capacidad de almacenaje de gas y la producción por hora.

#### 6.5. Producción de fertilizantes.

Tomando como base los datos establecidos en el cuadro 5-8, se pueden calcular los pesos de los principales nutrientes, Nitrógeno (N), Fósforo ( $P_2O_5$ ) y Potasio ( $K_2O$ ), producidos en el digestor.

El valor de los sólidos totales promedio es de 6.84 % (ver cuadro 5-2). La alimentación diaria de lodos es de 30.07  $M^3$ , por lo tanto:

$$\text{Peso de la mezcla/día} = 1.05 \times 30.07 = 31.57 \text{ T.}$$

$$\text{Peso de Nitrógeno/día} = 31.57 \times 0.0684 \times 0.038 \times 1000$$

$$\text{Peso de Nitrógeno/día} = 82.056 \text{ kg de Nitrógeno ( N )}$$

$$\text{Peso del Fósforo/día} = 31.57 \times 0.0684 \times 0.02 \times 1000$$

$$\text{Peso del Fósforo/día} = 43.198 \text{ kg de Fósforo ( } P_2O_5 \text{ )}$$

$$\text{Peso del Potasio/día} = 31.57 \times 0.0684 \times 0.064 \times 1000$$

$$\text{Peso del Potasio/día} = 138.20 \text{ kg de Potasio ( } K_2O \text{ )}$$

Producción mensual:

$$\text{Nitrógeno ( N )} = 82.056 \times 30 = 2,462 \text{ kg}$$

$$\text{Fósforo ( } P_2O_5 \text{ )} = 43.198 \text{ kg} \times 30 = 1,296 \text{ kg}$$

$$\text{Potasio ( } K_2O \text{ )} = 138.2 \times 30 = 4,146 \text{ Kg}$$

6.25 Unidades de N = 305 kg de sulfato de amonio al 20.5 % de N

6.25 Unidades de  $P_2O_5$  = 347 kg de superfosfato al 18% de  $P_2O_5$

9.4 Unidades de  $K_2O$  = 157 kg de muriato de potasa al 60% de  $K_2O$

Tomando como ejemplo el cultivo de la papa, una recomendación -muy particular- de fertilización por hectárea, en condiciones promedio, es la siguiente:

N -- 12.5 Unidades x 48.8 kg/U = 610 kg

$P_2O_5$  -- 12.5 " x 55.5 kg/U = 694 kg

$K_2O$  -- 18.75 " x 16.7 kg/U = 313 kg

Aproximadamente tendremos entonces que la cobertura de fertilización, ciclo anual, por hectárea y de cada elemento será:

$$N = \frac{2,462 \times 12}{610} = 48 \text{ hectáreas}$$

$$P_2O_5 = \frac{1,296 \times 12}{694} = 22 \text{ hectáreas}$$

$$K_2O = \frac{4,146 \times 12}{313} = 158 \text{ hectáreas}$$

#### 6.6. Recomendaciones normativas de construcción para depósitos de concreto armado.

**Generalidades.** Los tanques de concreto reforzado se analizarán suponiendo comportamiento elástico. Las paredes y el fondo se dimensionarán sobre la base de

esfuerzos admisibles en condiciones de servicio (ver cuadro 6-2). Las estructuras de soporte pueden dimensionarse por resistencia y servicio de acuerdo con el Reglamento de Construcciones vigente.

**Concreto.** En particular se tendrán en cuenta las disposiciones siguientes:

Se revisará la posible reacción entre el concreto y líquido contenido en el tanque.

El proporcionamiento del concreto de las paredes y del fondo de un tanque debe dar lugar a una mezcla bien graduada, de alta densidad y máxima trabajabilidad. La resistencia especificada a los 28 días de fraguado,  $f'c$ , no debe ser menor que 250 kg/cm<sup>2</sup>. Se recomienda usar un aditivo inclusor de aire ( ver cuadro 6-2.)

**Curado.** Se recomienda que el curado del concreto sea húmedo continuo durante siete días, si el cemento es normal, y tres si es de resistencia rápida; el curado posterior puede ser mediante compuestos que forman membrana impermeable. El curado debe iniciarse inmediatamente después del fraguado primario, o tan pronto como se realice el acabado de la superficie. Sin embargo, debe evitarse rociar con agua fría superficies de concreto que aún estén calientes por la hidratación del cemento. En general, durante los primeros días debe protegerse el concreto contra cambios bruscos de temperatura.

**Juntas.** Para reducir al mínimo el agrietamiento del concreto debido a cambios volumétricos y movimientos del elemento o de la estructura, el proyectista debe considerar la posibilidad de especificar el uso de juntas de contracción o de expansión. Asimismo, debe señalar las etapas constructivas y la localización de las juntas de construcción.

**Esfuerzos por cambios volumétricos.** A menos que se justifique el uso de cantidades menores, el refuerzo por cambios volumétricos debe cumplir con los requisitos siguientes:

a) **Losas no estructurales apoyadas sobre el terreno.** En cada una de las dos direcciones perpendiculares entre sí, el refuerzo por cambios volumétricos no será menor que 0.0025 veces el área bruta de la sección transversal de la losa. Este refuerzo irá en una capa, aproximadamente 6 cm. abajo de la superficie de la losa.

b) **Losas y muros estructurales.** Se revisará en cada cara y en cada una de las dos direcciones normales entre sí. El área de refuerzo, incluyendo el de flexión, debe ser

| CUADRO 6-2   |  |                             |
|--|--|-----------------------------|
| ESFUERZOS ADMISIBLES EN CONDICIONES DE SERVICIO, EN PAREDES Y FONDO (KG/CM <sup>2</sup> ) (*)                                    |  |                             |
| MATERIAL   | TIPO DE ESFUERZO Y ELEMENTO  | ESFUERZO KG/CM <sup>2</sup> |
| C<br>O<br>N<br>C<br>R<br>E<br>T<br>O<br>(**)   | TENSION DIRECTA  | 20                          |
|  | FLEXION (FIBRA EXTREMA EN COMPRESION)                                      | 95                          |
|  | ESFUERZO CORTANTE:   |                             |
|  | VIGAS Y NERVADURAS SIN REFUERZO TRANSVERSAL                                | 4                           |
|  | VIGAS Y NERVADURAS CON REFUERZO TRANSVERSAL (ESFUERZO MEDIO EN LA SECCION) | 20                          |
|  | EN LOSAS Y ZAPATAS ALREDEDOR DE CARGAS O REACCIONES CONCENTRADAS           | 7                           |
| A<br>C<br>E<br>R<br>O<br>D<br>E<br>R<br>E<br>F<br>U<br>E<br>R<br>Z<br>O<br>(***)   | MIEMBROS A TENSION DIRECTA   | 950                         |
|  | TENSION POR FLEXION:   |                             |
|  | REFUERZO ADYACENTE A LA CARA EN CONTACTO CON EL LIQUIDO                    | 1,100                       |
|  | REFUERZO ADYACENTE A LA CARA NO EN CONTACTO CON EL LIQUIDO:                |                             |
|  | SI EL ESPESOR DEL ELEMENTO ES POR LO MENOS DE 30 CM                        | 1,400                       |
|  | SI EL ESPESOR ES MENOR DE 30 CM  | 1,100                       |
| * BAJO LA COMBINACION DE CARGA MUERTA, VIVA Y SISMO O VIENTO, LOS ESFUERZOS ADMISIBLES PUEDEN INCREMENTARSE 25 %                 |  |                             |
| ** ESTOS VALORES SE APLICAN INDEPENDIEMENTE DEL $f_c$ , VALOR QUE NO DEBE SER MENOR DE 250 KG/CM <sup>2</sup>                    |  |                             |
| *** ESTOS VALORES SE APLICAN INDEPENDIEMENTE DEL GRADO DEL ACERO, EL CUAL NO DEBE SER MENOR QUE, $f_y = 3000$ KG/CM <sup>2</sup> |  |                             |

por lo menos 0.0020 veces el área bruta de la sección transversal de la losa o muro. En tanques rectangulares, el refuerzo necesario por tensión axial no se incluirá en esta revisión. En elementos que trabajan en una dirección, como los muros en voladizo, el refuerzo por cambios volumétricos se colocará en contacto con el refuerzo principal, entre éste y la superficie más próxima.

Se recomienda que el refuerzo por cambios volumétricos se suministre con barras delgadas, espaciadas a no más de 15 cm.

En ningún caso la separación del refuerzo por cambios volumétricos será mayor de 30 cm.

**Tanques circulares.** En el diseño de las paredes de tanques circulares, generalmente se tomarán en cuenta las tensiones horizontales y las flexiones verticales causadas por el empuje del líquido. La importancia relativa, de estas acciones internas, dependerá fundamentalmente de la relación altura a diámetro del tanque, y de la forma de unión de la pared con el fondo y con la tapa.

El espesor  $h$ , de la pared, se determinará mediante la expresión siguiente:

$$h = \frac{CEa + fa - nfct}{100 fa fct} Tm \dots\dots\dots(6-12)$$

donde,

**C** = deformación unitaria del concreto por contracción (puede tomarse igual a 0.0003)

**Ea** = módulo de elasticidad del acero, en kg/cm<sup>2</sup>

**Ec** = módulo de elasticidad del concreto, en kg/cm<sup>2</sup>

**fct** = esfuerzo admisible de tensión en el concreto, en kg/cm<sup>2</sup>

**fa** = esfuerzo admisible de tensión en el acero, en kg/cm<sup>2</sup>

**n** = Es/Ec

**Tm** = tensión máxima por metro de altura (cada 100 cm.), en kg.

El espesor viene dado en centímetros.

El refuerzo horizontal constará de barras en forma de anillos, y se dimensionará para que tome la tensión horizontal total al esfuerzo admisible,  $f_s$ . Si  $T$  y  $A_s$  son la tensión y el área de refuerzo por metro de altura, se tiene

$$A_s = \frac{T}{f_s} \dots \dots \dots (6-13)$$

El refuerzo horizontal se colocará en dos capas próximas a las caras de las paredes del tanque, y, su valor podrá variar con la altura, de acuerdo con la variación de la tensión horizontal. Los traslapes de los distintos anillos deben quedar lo más lejanos que sea posible unos de otros.

Tanques circulares sobre el terreno. Básicamente se tienen dos tipos estructurales.

a) **Pared sobre zapata corrida y losa de fondo no estructural.** Esta forma sólo se recomienda en terreno firme donde no haya hundimientos diferenciales entre la zapata de la pared y la losa de fondo. La pared es siempre continua con la zapata (fig. 6-3). Entre la losa de fondo y la zapata del muro deben preverse juntas de expansión, así como entre dicha losa y las columnas interiores que pueda haber.

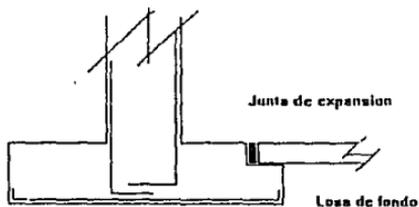


Figure 7 3. Union de pared sobre zapata con losa de fondo no estructural.

b) **Pared sobre fondo formado por una losa estructural.** Esta solución se aplica si los

hundimientos diferenciales esperados no son excesivos, o cuando el tanque se apoya sobre pilotes. La unión de la pared con la losa de fondo puede ser continua, puede permitir movimientos radiales de la pared, o puede ser articulada (ver fig. 6-4).

Recomendaciones diversas. Si la pared descansa sobre zapata continua, se recomienda calcular el refuerzo horizontal de la pared como si su base se deslizara libremente en direcciones radiales. El refuerzo vertical puede ser el necesario por cambios volumétricos, con la condición de que el de la capa próxima a la cara interior debe prolongarse hasta la zona baja de la zapata. La tensión horizontal por unidad de altura debida a una presión interior, P, está dada por la expresión,

$$T = \frac{D}{2} P \dots\dots\dots(6-14)$$

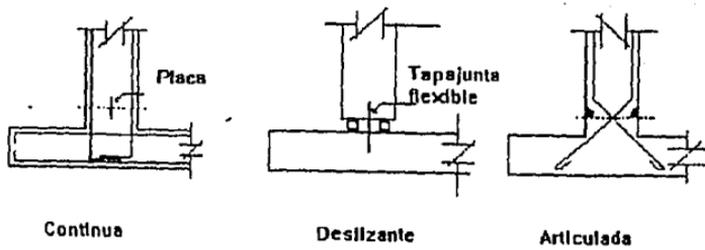


Figura 7 4 . Uniones de pared y losa estructural.

donde:

**D** = diámetro del tanque en cm.

**P** = presión interna en kg/cm<sup>2</sup>.

**T** = tensión por unidad de altura en kg.

Si la pared es continua con la losa de fondo, debe tomarse en cuenta esta condición al valuar las tensiones horizontales y los momentos verticales de las paredes. No debe suponerse que la pared está empotrada o articulada, sin investigar los efectos con la losa de fondo.

Se recomienda que tanques cilíndricos hasta de 45 metros de diámetro, con paredes continuas con la losa de fondo, lleven sólo juntas de construcción. Se muestra en la figura 6-5, una distribución conveniente de esas juntas en la losa de fondo, así como el orden en que han de realizarse los colados para disminuir el efecto de contracción.

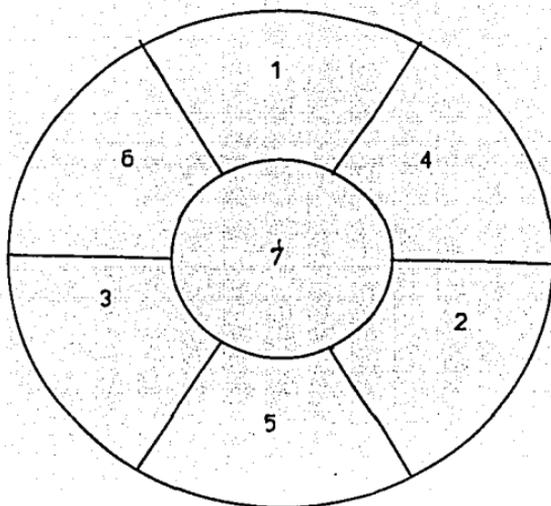
#### **6.7. Medidas de seguridad para el uso del gas de los digestores.**

El gas crudo producido por la digestión anaeróbica es llamado bajo diferentes nombres: gases de las aguas negras, sludge gas, biogás, gas de los estiércoles, gas gobar (en la India), y también gas de los pantanos. En éstos últimos y en las ciénegas, se elevan llamaradas naturales llamadas "will of the wisp"; fenómeno debido no únicamente al gas producido por la digestión, el cual puede ser encendido para hacer llamas, sino también de otro gas llamado fosfino ( $H_2P$ ) producido por la materia orgánica que contiene fósforo. Si el compuesto de gas y el fosfino se combinan en el aire el resultado es una combustión espontánea originando flama. Este hecho es de interés como factor en las medidas de seguridad en los alrededores de las plantas de metano.

A continuación se enumeran algunos aspectos sobre la prevención de

**accidentes.**

- 1. Asegurar que el gas y el aire no se mezclen antes de su uso.**
- 2. Proveer de ventilación adecuada alrededor de todas las líneas de gas.**
- 3. Mantener siempre las líneas de gas con presión positiva.**
- 4. Los pisos que se vayan a utilizar, para las máquinas, no deberán estar en subterráneos para evitar la acumulación de gases pesados.**
- 5. Los cuartos de máquinas deberán estar siempre ventilados al nivel del techo para permitir el escape de gases ligeros.**
- 6. Las trampas para llamas deberán estar provistas cerca del punto de combustión.**
- 7. Todas las ventilas de los digestores y los gasómetros deberán abrirse a la atmósfera.**
- 8. Las líneas de conducción de gas deberán protegerse contra las heladas.**
- 9. Tomar medidas para proteger las plantas productoras de gas metano de los vandallismos y de las quemas de pastos.**
- 10. Los montones de compost, pilas de basura o cuerpos de animales muertos deberán ser colocados a una distancia tal, que se evite una posible combustión espontánea mediante la generación de gas fosfíno.**
- 11. Las líneas de gas deberán drenarse con una trampa de condensación.**



**Figura 6-6. Localización de las juntas de construcción en una losa de fondo, y orden de los colados.**

12. No fumar o encender cerillos cerca de las plantas de metano.

13. Los extinguidores de fuego deben colocarse en lugares estratégicos y de fácil alcance para los operadores de las plantas.

Las mezclas de gas crudo y aire son explosivos en rangos de 1:4, hasta de 1:14. La ignición puede tener lugar con una simple luz de un foco, una chispa de un switch, chispas de los clavos de los zapatos o herramientas, flama de cerillos, cigarros encendidos e igualmente la iluminación de linternas.

Cuando las plantas motrices son puestas en servicio por primera vez, todo el aire deberá ser extraído de las líneas de gas. Si a un digestor se le remueven las natas o es limpiado, allí tiene lugar un corto período de tiempo en donde el gas y el aire se presentan mezclados en las proporciones peligrosas mencionadas, por lo que deberán tomarse en ese momento todas las medidas vitales de seguridad.

Siempre debemos tener en cuenta el peligro de las mezclas de aire y gas. Para seguirle la huella a un problema de fugas es recomendable el uso de agua jabonosa y no guiarnos por el olfato.

En cualquier sitio, deberán estar disponibles agua, jabón, y toallas limpias para el aseo posterior al turno de trabajo, ya que, la piel del operador siempre se contamina en cierta medida.

Como se asienta en el New York Manual of Instruction for Sewage Treatment Plant Operators, "la mezcla de gas puede contener concentraciones tóxicas de hidrógeno sulfhídrico, pudiendo causar asfixia debido a la falta de oxígeno, es flamable y explota violentamente cuando es mezclado con aire; posiblemente no tenga olor y no se pueda detectar rápidamente mediante el olfato. Si contiene ácido sulfhídrico, presenta un olor característico de huevo podrido que se sensibiliza en concentraciones del 0.001 %. Sin embargo, en altas concentraciones, la sensibilidad del olfato puede disminuir y breves exposiciones a concentraciones tan bajas como 0.1 %, pueden ser fatales. El ácido sulfhídrico en mezclas húmedas de gas son corrosivas y abollan los metales. Cuando estas concentraciones en el gas son mayores que 0.25 %, deben tomarse medidas preventivas para removerlo hacia afuera de la mezcla".

## CONCLUSIONES

La energía solar almacenada en los desechos orgánicos (biomasa residual), no solamente es importante como fuente de energía sino también como fuente esencial de alimentos, productos químicos y fertilizantes. Presentando la ventaja adicional de ser un recurso renovable.

La utilización de la biomasa residual, tratada a través de digestores, dependerá de las características del contexto socioeconómico y ambiental en el que se genera, de su disponibilidad, de la utilización de sus subproductos y que rara vez se le considera como un energético puro, similar a la biomasa fósil (petróleo, gas natural o carbón), pues sólo en el caso de Brasil se tienen indicaciones de usarla como energético aislado.

A continuación se describen algunos criterios para la evaluación de un proyecto.

**Nivel y estructura del consumo energético del usuario.** En el cuadro 1, vemos el nivel y estructura del consumo energético diario "per cápita", para poblaciones de bajo consumo (India) y de alto consumo (Estados Unidos o Gran Bretaña). Ahí podemos apreciar que para el habitante campesino, el nivel de consumo energético es 75 veces menor que para el habitante industrializado. También podemos apreciar que el campesino invierte 66.6 % de su presupuesto energético en el renglón alimentario y sólo el 3.3 % en la industria y los servicios modernos. En cambio el habitante de Estados Unidos o Gran Bretaña invierte 98.6 % de sus recursos energéticos en la industria y servicios y sólo 1.4 % en alimentación.

| CUADRO 7-1                            | MONTO Y ESTRUCTURA DEL CONSUMO DIARIO PER CAPITA EN SOCIEDADES RURAL E INDUSTRIAL |       |                     |       |
|---------------------------------------|---|-------|---------------------|-------|
|                                       | SOCIEDAD RURAL  |       | SOCIEDAD INDUSTRIAL |       |
|                                       | MJ/persona-día  | %     | \$ MJ/persona-día   | %     |
| ALIMENTACION                          | 8.0   | 66.7  | 13.0                | 1.4   |
| COMBUSTIBLE FOSIL                     | 4.0   | 33.3  | 887.7               | 98.6  |
| A) DOMESTICO                          | 2.0   | 16.7  | 30.0                | 3.4   |
| B) AGRICOLA                           | 1.6   | 13.3  | 22.7                | 2.5   |
| C) INDUSTRIAL                         | 0.4   | 3.3   | 300.0               | 33.3  |
| D) TRANSPORTE CALEFACCION Y SERVICIOS | 0.0   | 0.0   | 535.0               | 59.4  |
| TOTAL                                 | 12.0  | 100.0 | 900.7               | 100.0 |

\* MJ = 10<sup>6</sup> Joules

En el sistema internacional (SI) la unidad de trabajo es:  
1 Joule = 1 Newton x 1 metro

La disparidad en la disponibilidad porcentual de combustibles fósiles es evidente, pues el campesino de un país subdesarrollado sólo requiere 33 % de energéticos fósiles y el habitante industrializado utiliza 98,6 % de esta forma. Estas grandes diferencias entre la sociedad campesina de subsistencia y la sociedad industrializada, sugieren que la biomasa como energético asociado a los productos agrícolas sea más importante en las sociedades campesinas que en las industriales, puesto que la utilización energética de biomasa proveniente del desperdicio agrícola y ganadero, será más valiosa para grupos con poco acceso al petróleo y sus formas de utilización energética a través de la industria y los servicios, que para las sociedades en donde la situación energética es el inverso de la del campesino. Queda por cuestionarse el uso de la biomasa en condiciones futuras en donde escasee el petróleo, pero para México, en donde cerca del 45 % de la población vive en áreas rurales y en donde varios millones de mexicanos no tienen acceso a la electricidad y al petróleo de bajo costo, a pesar de su abundancia, podría decirse que existe un campo sin explorarse para nuevos usos energéticos de la biomasa residual.

**Disponibilidad y situación de las concentraciones de biomasa.** El cuadro 2, nos muestra la productividad energética anual de México para algunos cultivos vegetales. Subrayándose, la importancia que tiene en este caso la alfalfa como alimento base de los establos lecheros.

| C U L T I V O  | PRODUCTIVIDAD ENERGETICA ANUAL ESTIMADA PARA ALGUNOS CULTIVOS VEGETALES * |                                 |
|----------------|---|---------------------------------|
|                | BIOMASA (T/ha)  | ENERGIA ACUMULADA (G cal/ha) ** |
| ALGAS          | 50 - 100  | 225 - 450                       |
| CANA DE AZUCAR | 30 - 112  | 135 - 504                       |
| EUCALIPTO      | 54  | 243                             |
| PASTO BUDAN    | 36  | 162                             |
| REMOLACHA      | 15 - 33   | 68 - 148                        |
| ALFALFA        | 29  | 130                             |
| MAIZ           | 4 - 13  | 18 - 58                         |
| ARROZ          | 8   | 36                              |
| SOYA           | 6   | 27                              |

\* SE TOMO EL VALOR ENERGETICO COMO  $4.5 \times 10^6$  CAL/KG Y SE ESTIMO LA BIOMASA TOTAL EN CONDICIONES DE ALTA PRODUCTIVIDAD.

\*\* 1 Gcal =  $10^9$  cal que equivalen a 90.91 lts. de combustóleo.

**Desarrollo organizativo y tecnológico del usuario.** En el cuadro 3, se muestran las diferencias de las relaciones energéticas para la producción malmcera en diversas naciones. En general, los países en desarrollo tienen un bajo nivel de insumos energéticos (menor a 2 Gcal/ha) y en consecuencia su producción no excede a las 4 Gcal/ha (menos de 1,000 kg. de grano por hectárea; 1 kg. equivale a 3.62 Mcal). Gcal = 109 cal que equivalen a 90.91 litros de combustóleo.

| CUADRO 7-3   | INSUMOS<br>Gcal/ha-año | PRODUCCION<br>Gcal/ha-año | PRODUCTO/<br>INSUMO | PRODUC-<br>TIVIDAD<br>HUMANA<br>Gcal/<br>hora-<br>hombre |
|--|------------------------|---------------------------|---------------------|--|
| GUATEMALA  |                        |                           |                     |  |
| NIVEL BAJO   | 0.07                   | 3.8                       | 13.6                | 2.6  |
| NIVEL MEDIO  | 0.97                   | 3.8                       | 4.0                 | 5.5  |
| FILIPINAS  | 0.67                   | 3.4                       | 5.1                 | 11.4   |
| MEXICO   | 0.69                   | 3.4                       | 4.9                 | 8.8  |
| NIGERIA  | 0.36                   | 3.6                       | 10.5                | 5.7  |
| CHINA  | 2.19                   | 8.96                      | 4.1                 | -.-  |
| E.U.A. (1945)  | 2.27                   | 7.7                       | 3.4                 | 136  |
| E.U.A. (1970)  | 7.09                   | 18.3                      | 2.6                 | 8.33   |
| CALCULADA CON BASE EN LA RELACION : 3.735 Mcal/kg de grano |                        |                           |                     |  |

Concluyendo, se puede afirmar que: los sistemas de fermentación anaeróbica presentan bastantes posibilidades para solucionar problemas de grandes grupos poblacionales rurales de nuestro país, obteniendo los combustibles y fertilizantes que tanto necesitan. A nivel agroindustrial también representa una posibilidad sumamente interesante para resolver problemas de contaminación, autosuficiencia de energía, y obtención de proteína para alimento de ganado. En conjunto repercutiría en mejorar la economía rural, reduciendo además el problema de polución.

Las posibilidades de utilización de la biomasa como energético son prácticamente ilimitadas.

## BIBLIOGRAFIA

1. UNDA OPAZO FRANCISCO Y SALINAS CORDERO.  
**"INGENIERIA SANITARIA APLICADA AL SANEAMIENTO  
Y A LA SALUD PUBLICA".**  
Centro Regional de Ayuda Técnica.  
A.I.D. México/Buenos Aires.
2. JACOB A. Y VON VEXKÜL.  
**"NUTRICION Y ABONADO DE LOS CULTIVOS TROPICALES  
Y SUBTROPICALES  
DE MEXICO".**  
Ediciones Euroamericanas, EURAM 4ª Edición, 1973.
3. FAIR J.M. Y GEYER J.C.  
**"PURIFICACION DE AGUAS Y TRATAMIENTO  
Y REMOCION DE AGUAS RESIDUALES".**  
Editorial LIMUSA, México 1979.
4. BABBITT H.E. Y BAUMAN E.R.  
**"ALCANTARILLADO Y TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS".**  
Editorial C.E.C.S.A. México D.F. 1977.
5. LINSLEY Y FRANZINI.  
**"INGENIERIA DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS".**  
Editorial C.E.C.S.A. México 1970.
6. COOKE.  
**"FERTILIZANTES Y SUS USOS".**  
C.E.C.S.A. 1981.

7. **PENAGOS MARIO.**  
**"PLANTAS BIOLÓGICAS".**  
Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Apropriada.  
Guatemala C.A. 1967.
  
8. **VINIEGRA GUSTAVO Y FELIX ALFONSO.**  
**"LA BIOMASA COMO ENERGÉTICO".**  
Boletín Informativo del Instituto de Investigaciones Eléctricas de Cuernavaca, Mor.  
Junio de 1978.
  
9. **FRY L. JOHN.**  
**"PRACTICAL BUILDING OF METHANE POWER PLANTS  
FOR RURAL ENERGY INDEPENDENCE".**  
Publicado por D.A. Knox. Gran Bretaña, 1975.
  
10. **PLANTA DE BIOGAS A PEQUEÑA ESCALA DE LA INDIA.**  
"Hand Book of Appropriate Technology of The Canadian Hunger Foundation".
  
11. **SANCHEZ S. FELIX A.**  
**"TECNOLOGÍA DEL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS".**  
Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor.,  
1977.
  
12. **JOWELL J. WILLIAM.**  
**"ENERGY, AGRICULTURE AND WASTE MANAGEMENT".**
  
13. **COMITE DE LA PROVINCIA DE SZECHAN.**  
**"PLANTA CONTINUA DE BIOGAS DE CHINA".**  
**REPUBLICA POPULAR CHINA.**  
Adaptación de Roberto Cáceres, Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Apropriada. Guatemala, C.A. 1977.

14. FELIX A., SANCHEZ S., MARTINEZ ANA MARIA  
**"DETERMINACION DEL PORCENTAJE OPTIMO DE SOLIDOS  
PARA DIGESTORES DE DESECHOS ORGANICOS"**.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
Cuernavaca, Mor. 1977.
  
15. TAKATA EJO Y LOPEZ ALEJANDRO  
**"INFORME SOBRE LOS TRABAJOS PRACTICOS DE  
PRODUCCION DE BIOGAS EN DIGESTORES BATCH"**.  
Boletín Informativo del Centro de Convivencia Campesino A.C. (C.C.C.).  
Amecameca, Mex., 1977.
  
16. **"AZOLLA PROPAGATION AND SMALL SCALE BIOGAS TECHNOLOGY"**.  
China Popular.