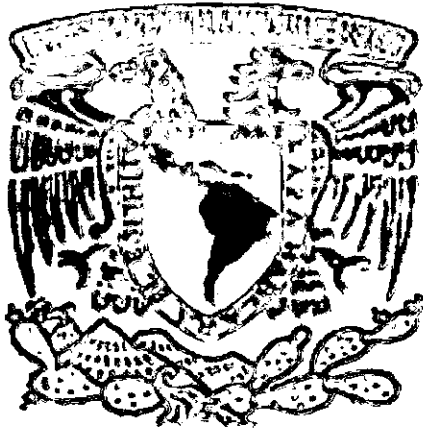


115



**Campus**  
**IZTACALA**

**Remoción de Patógenos y Parásitos  
(Coliformes fecales y huevos de helmintos)  
Durante el Tratamiento de Lodos por  
Digestión Anaerobia Bajo Condiciones de  
Mesofilia y Termofilia.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**B I O L Ó G O**  
**P R E S E N T A**  
**MARCELO ROJAS OROPEZA**

**PROYECTO REALIZADO EN LA COORDINACIÓN DE BIOPROCESOS  
AMBIENTALES DEL INSTITUTO DE INGENIERIA DE LA UNAM.**

**México D. F.**

293781

**2001**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNAM IZTACALA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
IZTACALA  
JEFATURA DE LA CARRERA DE BIOLOGIA



IZTACALA

2001.

**DR. FELIPE TIRADO SEGURA**  
**DIRECTOR**  
**PRESENTE.**

Atención Lic. América Landa Romero  
Jefa de la Unidad de Administración Escolar.

Los abajo firmantes, miembros de la Comisión Dictaminadora del trabajo de  
(X) Tesis de Investigación Tesis de experiencia Profesional ( )  
Titulado "Remoción de patógenos y parásitos (coliformes fecales y huevos de helmintos) durante el  
tratamiento de lodos por digestión anaerobia bajo condiciones de mesofilia y termofilia"

Que presenta el pasante de Biología **MARCELO ROJAS OROPEZA**

Para obtener el título de Biólogo.

Informan que después de haber revisado cuidadosamente el trabajo, consideramos que reúne las  
características de calidad académica que se requieren para aspirar a la obtención del título citado, razón por la  
cual otorgamos nuestros votos aprobatorios para la presentación del examen profesional correspondiente.

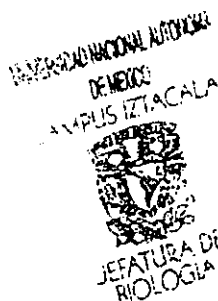
| GRADO | NOMBRE                               | FIRMA | CARGO      |
|-------|--------------------------------------|-------|------------|
| DRA.  | MA. DEL ROSARIO SANCHEZ<br>RODRIGUEZ |       | Presidente |
| DR.   | ADALBERTO NOYOLA ROBLES              |       | Vocal      |
| DR.   | ALFONSO LUGO VAZQUEZ                 |       | Secretario |
| BIOL. | MARIO CHAVEZ ARTEAGA                 |       | Suplente   |
| BIOL. | ANGEL MORAN SILVA                    |       | Suplente   |

Con base en lo anterior solicito su autorización para que los profesores que otorgan los votos aprobatorios  
funjan como sinodales del examen profesional en el cargo anotado, y a la Administración Escolar otorgue la  
fecha para la Réplica Oral del trabajo presentado.

Atentamente

"Por mi raza hablará el espíritu"

Dr. Sergio Vaca Pacheco  
Jefe de la Carrera



VoBo Dr Felipe Tirado Segura  
Director

# D

## EDICATORIAS

A mi esposa e hijos

Compañera inseparable en todo momento, te agradezco por ser tan mía como yo lo soy para ti. Tu amor dio a nuestras vidas la mayor bendición, Marco Ulises y Brian Jair nuestro mayor tesoro.

A mis padres

Por su infinito amor, paciencia, y deseo de brindarme su apoyo en todo momento de mi vida. Gracias por mostrarme el valor de enfrentar la vida con la verdad y la sabiduría para regocijarme de ella a cada instante con sus maravillas, aun cuando no lo parezcan.

A mis hermanos

Por compartir sus vidas tan llenas conmigo, aprendiendo a crecer cada día y proporcionando ese valor ante cada adversidad vivida.

A mis abuelos

Pilares de comprensión, bondad, ternura y el más reconfortante amor paternal.

# A GRADECIMIENTOS

Al Dr. Adalberto Noyola Robles

Por brindarme la oportunidad de realizar atinadamente un trabajo de investigación original y de actualidad. Agradezco su valiosa dirección en la ejecución de este trabajo.

A la Dra. Nathalie Cabirol

Le agradezco su muy oportuna intervención y firme confianza en la feliz conclusión del proyecto, sus invaluable intervenciones académicas y por su espíritu perseverante que contagia.

Al Ing. Luis Santiago Ortega Charleston

A quien mucho le debo por su invaluable apoyo, por su amistad y por su siempre bien intencionado consejo. Gracias compayin.

A Todos Mis Colegas

A quienes con encuentros y desencuentros pude llevar una vida mas completa, a todos quienes ya no están y los que apenas se han incorporado.

A la Universidad

Por ser el espacio vital en donde he sido tan feliz. Sus jardines, edificios, horas de cine, de tiempos compartidos con los amigos en horas poco sobrias y muy alegres. He crecido en ella.

# INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| LISTA DE TABLAS.....  | III       |
| LISTA DE FIGURAS.....   | IV        |
| RESUMEN .....   | 1         |
| INTRODUCCIÓN.....   | 2         |
| <b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1. ASPECTOS SANITARIOS DE LOS LODOS RESIDUALES.....   | 4         |
| 1.1.1. <i>Generalidades microbiológicas</i> .....   | 4         |
| 1.1.2. <i>Microorganismos patógenos en los lodos</i> .....  | 6         |
| 1.1.2.1. Aspectos biológicos de los microorganismos patógenos.....  | 6         |
| 1.1.2.2. Aspectos ecológicos de los patógenos.....  | 6         |
| 1.1.3. <i>Microorganismos parásitos en los lodos</i> .....  | 8         |
| 1.1.3.1. Aspectos biológicos de los helmintos.....  | 8         |
| 1.1.3.2. Aspectos ecológicos de los helmintos.....  | 13        |
| 1.1.4. <i>Interacción lodos de desecho y medio ambiente</i> .....   | 15        |
| 1.2. TRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES.....  | 17        |
| 1.2.1. <i>Definición y metodos de tratamiento de lodos residuales</i> .....   | 17        |
| 1.2.2. <i>Legislación para el manejo y aplicación de biosólidos</i> .....   | 18        |
| 1.2.3. <i>Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia</i> .....  | 20        |
| 1.3. GENERALIDADES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....   | 21        |
| 1.3.1. <i>Aspectos Bioquímicos</i> .....  | 22        |
| 1.3.1.1. Bioquímica de la Hidrólisis.....   | 23        |
| 1.3.1.2. Bioquímica de la Fermentación y la $\beta$ -Oxidación.....   | 24        |
| 1.3.1.3. Bioquímica de la Metanogénesis.....  | 26        |
| 1.3.2. <i>Efecto de la Temperatura en la Digestión Anaerobia</i> .....  | 29        |
| 1.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS, OPCIÓN DE ESTABILIZACIÓN.....  | 31        |
| 1.4.1. <i>Aspectos de ingeniería</i> .....  | 31        |
| 1.4.1.1. Digestores de Baja Tasa.....   | 31        |
| 1.4.1.2. Digestores de Alta Tasa.....   | 31        |
| 1.4.1.3. Diseño.....  | 32        |
| 1.4.2. <i>Digestión Anaerobia termofílica de Lodos</i> .....  | 34        |
| <b>2. OBJETIVOS Y ALCANCES.....</b>   | <b>40</b> |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL.....  | 40        |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....   | 40        |
| 2.3. ALCANCES.....  | 40        |
| <b>3. MÉTODO EXPERIMENTAL.....</b>  | <b>41</b> |
| 3.1. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....  | 41        |
| 3.2. CRITERIOS DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DIGESTORES.....   | 43        |
| 3.3. INÓCULO Y LODOS DE ALIMENTACIÓN.....   | 44        |
| 3.3.1. <i>Preparación del inóculo</i> .....   | 44        |
| 3.3.2. <i>Preparación de lodo del tratamiento primario avanzado (TPA) para alimentación de los digestores</i> ..... | 44        |
| 3.3.3. <i>Preparación de lodo tratamiento primario avanzado (TPA) para alimentación de los digestores</i> .....     | 45        |
| 3.3.4. <i>Preparación de lodo anaerobio para alimentación de los digestores</i> .....                               | 45        |
| 3.4. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS.....  | 46        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>   | <b>47</b> |
| 4.1. REMOCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS PATÓGENOS Y PARÁSITOS .....   | 47        |
| 4.1.1. <i>Cuantificación de los huevos de helminto en los lodos de alimentación y los biosólidos</i> .....         | 47        |
| 4.1.1.1. <i>Cuantificación de huevos de helminto por la técnica de concentración por filtro de membrana</i> .....  | 47        |
| 4.1.1.2. <i>Cuantificación de huevos de helminto por la técnica Norma Mexicana</i> .....                           | 48        |
| 4.1.2. <i>Cuantificación de los coliformes fecales en los lodos de alimentación y los biosólidos</i> .....         | 49        |
| 4.1.3. <i>Condiciones sanitarias de los lodos de alimentación</i> .....  | 50        |
| 4.1.4. <i>Eficiencia en la remoción de parásitos de helminto en los digestores medida por ambas técnicas</i> ..... | 51        |
| 4.1.5. <i>Comparación de la técnica concentración por membrana y técnica Norma</i> .....                           | 52        |
| 4.1.6. <i>Eficiencia en la remoción de patógenos en los digestores</i> .....                                       | 53        |
| 4.1.7. <i>Conclusiones</i> .....   | 54        |
| 4.2. ARRANQUE Y ESTABILIZACIÓN DE LOS DIGESTORES .....   | 55        |
| 4.2.1. <i>Caracterización de los lodos de alimentación</i> .....   | 55        |
| 4.2.2. <i>Seguimiento del funcionamiento de los digestores</i> .....   | 57        |
| 4.2.2.1. <i>Biodigestor M1</i> .....   | 57        |
| 4.2.2.2. <i>Biodigestor M2</i> .....   | 59        |
| 4.2.2.3. <i>Biodigestor T1</i> .....   | 60        |
| 4.2.2.4. <i>Biodigestor T2</i> .....   | 62        |
| 4.2.3. <i>Comparación de los biodigestores M1 y M2</i> .....   | 63        |
| 4.2.4. <i>Comparación de los biodigestores T1 y T2</i> .....   | 64        |
| 4.2.5. <i>Comparación de los biodigestores mesófilos y termófilos</i> .....  | 65        |
| 4.2.6. <i>Conclusiones de la etapa de estabilización del proceso anaerobio</i> .....                               | 68        |
| <b>5. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>   | <b>69</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAFIA .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>7. GLOSARIO.....</b>  | <b>74</b> |
| <b>8. ANEXOS.....</b>  | <b>76</b> |
| Microfotografías de Huevos de Helminto .....   | 77        |
| Resultados experimentales del Digestor M1 .....  | 80        |
| Resultados experimentales del Digestor M2 .....  | 83        |
| Resultados experimentales del Digestor T1 .....  | 86        |
| Resultados experimentales del Digestor T2 .....  | 89        |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1. Principales microorganismos patógenos y parásitos presentes en aguas y lodos residuales.....  | 5  |
| Tabla 1.2. Gastroenteritis causada por <i>Escherichia coli</i> (Murray <i>et al.</i> , 1997).....  | 8  |
| Tabla 1.3. Comparación de los filas de helmintos parásitos más importantes (Ville <i>et al.</i> , 1998).....   | 9  |
| Tabla 1.4. Clasificación de los principales helmintos entéricos en México (Lamothe, 1998; Tay <i>et al.</i> , 1995; Schmidt, 1981).....  | 9  |
| Tabla 1.5. Frecuencia de Helmintiasis en México, 1960 – 1992 (Tay <i>et al.</i> , 1995).....   | 15 |
| Tabla 1.6. Límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en biosólidos .....  | 19 |
| Tabla 1.7. Límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en biosólidos .....  | 19 |
| Tabla 1.8. Ventajas y desventajas del proceso de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales y lodos de desecho .....   | 21 |
| Tabla 1.9. Tiempos de retención celular para el diseño de digestores de lodos completamente mezclados (Metcalf and Eddy, 1996).....  | 32 |
| Tabla 1.10. Efecto de la concentración de sólidos y el tiempo de retención sobre la carga orgánica en digestores anaerobios (Metcalf and Eddy, 1996).....  | 33 |
| Tabla 1.11. Condiciones óptimas ambientales y de operación durante la digestión anaerobia de lodos de purga (Malina and Pohland, 1992) .....   | 33 |
| Tabla 1.12. Archeobacterias anaerobias termofílicas .....  | 35 |
| Tabla 1.13. Eubacterias presentes en procesos anaerobios termofílicos .....  | 36 |
| Tabla 1.14. Digestión Anaerobia Termofílica en Lodos.....  | 38 |
| Tabla 1.15. Experiencias de Digestión en 2 Etapas. ....  | 39 |
| Tabla 3.1. Condiciones de operación.....   | 42 |
| Tabla 3.2. Parámetros y análisis evaluados en el presente estudio .....  | 44 |
| Tabla 4.1. Resultados promedio del número de HH en las purgas de cada digestor y en los lodos de alimentación (LB, TPA) con la técnica de concentración y tinción por filtro de membrana .....                     | 48 |
| Tabla 4.2. Resultados promedio en el número de HH en purgas de cada digestor y en los lodos de alimentación (LB, TPA) con la técnica Norma.....  | 49 |
| Tabla 4.3. Síntesis del efecto de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica sobre la remoción de los huevos de helminto, según los valores promedio de ambas técnicas de concentración y cuantificación..... | 51 |
| Tabla 4.4. Caracterización de los lodos anaerobios para alimentación de los digestores M1 y T1.....  | 55 |
| Tabla 4.5. Caracterización de los lodos físicoquímicos para alimentación de los digestores M2 y T2 .....   | 56 |
| Tabla 4.6. Parámetros promedio de operación de los digestores .....  | 65 |
| Tabla 4.7. Elementos de balance de masa en las condiciones promedio de operación de los digestores.....  | 66 |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Ciclo vital de <i>Fasciola hepática</i> .....  | 10 |
| Figura 1.2. Ciclo vital de <i>Taenia solium</i> .....  | 11 |
| Figura 1.3. Ciclo vital de <i>Hymenolepis nana</i> .....   | 11 |
| Figura 1.4. Desarrollo de la cisticercosis humana .....  | 12 |
| Figura 1.5. Ciclo vital de <i>Ascaris lumbricoides</i> .....   | 13 |
| Figura 1.6. Ciclo vital de <i>Trichuris trichiura</i> .....  | 13 |
| Figura 1.7. Ruta metabólica de la digestión anaerobia adaptada de Gujer and Zehnder (1983) .....                                       | 23 |
| Figura 1.8. Estructura molecular de la celobiosa .....   | 23 |
| Figura 1.9. Principales rutas de formación de producto por las bacterias acetógenas .....  | 25 |
| Figura 1.10. Metanogénesis acetoclástica (Brock and Madigan, 1991) .....   | 27 |
| Figura 3.1. Configuración de los digestores: A) termofilicos; B) mesofilicos .....   | 41 |
| Figura 3.2. Diagrama del Intercambiador de calor en los digestores termófilos .....  | 42 |
| Figura 4.1. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor mesofilico M1. Límite clase "B", según EPA (1996) ..... | 50 |
| Figura 4.2. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor T1. Límite clase "B", según EPA (1996) .....            | 50 |
| Figura 4.3. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor mesofilico M2. Límite clase "B", según EPA(1996) .....  | 50 |
| Figura 4.4. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor T2. Límite clase "B", según EPA(1996) .....             | 50 |
| Figura 4.5. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor M1 .....  | 58 |
| Figura 4.6. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor M1 .....   | 58 |
| Figura 4.7. Composición y producción del biogás en el digestor M1 .....  | 58 |
| Figura 4.8. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor M2 .....  | 60 |
| Figura 4.9. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor M2 .....   | 60 |
| Figura 4.10. Composición y producción del biogás en el digestor M2 .....   | 60 |
| Figura 4.11. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor T1 .....   | 61 |
| Figura 4.12. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor T1 .....  | 61 |
| Figura 4.13. Composición y producción del biogás en el digestor T1 .....   | 61 |
| Figura 4.14. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor T2 .....   | 62 |
| Figura 4.15. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor T2 .....  | 62 |
| Figura 4.16. Composición y producción del biogás en el digestor T2 .....   | 63 |

## RESUMEN

Se acondicionaron 4 digestores anaerobios con capacidad para 5 litros de lodo de desecho, 2 de ellos en condiciones mesofílicas (35°C) designados como M1 y M2, y otros 2 en condiciones termofílicas (55°C), T1 y T2, los cuales trataron lodo de purga proveniente de una planta de tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales municipales de Tlaxcala, y de la planta de tratamiento de aguas residuales que opera mediante tratamiento primario avanzado (TPA) en Atocpan, D.F.. El objetivo del estudio fue evaluar y establecer comparativamente, la eficiencia en la remoción de patógenos y parásitos (coliformes fecales y huevos de helmintos) durante el tratamiento de lodos de purga, por digestión anaerobia bajo condiciones de mesofilia y termofilia, así como el establecer una metodología de operación estable de los digestores, a las condiciones antes mencionadas. La técnica de concentración y cuantificación de huevos de helmintos propuesta en la NOM-001-ECOL-1996 se mostró como el método más factible para análisis parasitológicos rutinarios de lodos, aún cuando el método de incubación es muy largo. Los resultados obtenidos permiten establecer que durante el tratamiento de lodos residuales, mediante digestión anaerobia termofílica, se logra eliminar parásitos. Se alcanzó una eficiencia que cumpliría con los límites máximos permitidos de contaminantes en lodos y biosólidos "Clase B" (< a 35HH/g en base seca), considerados en el anteproyecto de norma mexicana Proy-NOM-004-ECOL-2000; sin embargo, es posible alcanzar los límites recomendados por la EPA para biosólidos "Clase A" (0.25 HH/gST). No se logró una remoción real de los patógenos debido probablemente a la débil actividad metanogénica termofílica y a condiciones inadecuadas en el mezclado. Finalmente, se comprobó que la digestión anaerobia mesofílica puede alcanzar la estabilidad del proceso en menor tiempo y dificultad que la digestión anaerobia termofílica. La mineralización de la fracción volátil hasta CH<sub>4</sub> obtenida en el presente estudio puede incrementarse si se logra la estabilidad del proceso termofílico, lo cual permitiría digerir los lodos de desecho y producir biosólidos del tipo "Clase A".

## INTRODUCCIÓN

En fechas recientes, se ha reforzado el interés por reducir la morbilidad y mortalidad, principalmente de la población infantil, en los países en desarrollo. En particular, en nuestro país es un hecho preocupante que las aguas residuales municipales sean en su gran mayoría, aún descargadas al medio sin tratamiento previo. Un caso claro de esto lo constituye el Área Metropolitana de la Ciudad de México, cuyas descargas se conducen hacia la cuenca del río Tula, donde son reutilizadas principalmente con fines agrícolas. Esta situación involucra además de cuerpos de agua superficial y subterránea, la restricción productiva de cultivos, así como daños a la salud de la población rural asentada en las zonas de riego beneficiadas, la cual presenta altos índices de infección parasitaria (Cifuentes, 1993; CNA, 1995; EPA, 1996, a).

Lo anterior ha conducido a las autoridades gubernamentales responsables de la salud y de la protección del ambiente hacia la adopción de reglamentos y normas que controlen los vectores de enfermedades de tipo gastrointestinal, uno de los principales problemas de salud pública en nuestro país y en el resto de los países en desarrollo. Concretamente en México, la normatividad ambiental (NOM-001-ECOL-1996 y NOM-003-ECOL-1997) especifica para el caso de aguas residuales un límite máximo de coliformes fecales de 1000 NPM/100 ml (promedio mensual), y en caso de que el agua tratada sea reusada en riego o en servicios urbanos, una presencia de huevos de helmintos menor a 5 por litro (riego restringido y reuso sin riesgo de contacto humano) y a 1 por litro (riego sin restricciones y reusos definidos en la norma). Adicionalmente, ambos contaminantes serán regulados en la futura norma oficial mexicana relativa al aprovechamiento y disposición de lodos (biosólidos) en terrenos con fines agrícolas (NOM-004-ECOL, en preparación).

Para enfrentar este problema, el proyecto de Saneamiento del Valle de México (CNA, 1995), actualmente en revisión, incluye la construcción de cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México con el proceso denominado tratamiento primario avanzado. De llevarse a cabo, la planta Texcoco Norte trataría 44 metros cúbicos por segundo de agua residual proveniente del Dren General del Valle. Esta alternativa de tratamiento tiene como fundamento las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el cumplimiento a la Norma Oficial Mexicana correspondiente (NOM-001-ECOL-1996). El sistema se complementará con la estabilización de los lodos de desecho, los cuales se pretende depositarlos finalmente en los terrenos del Ex-Lago de Texcoco, lo que representaría un impacto ambiental muy importante y aún no seriamente evaluado.

Los objetivos del tratamiento de lodos de desecho son reducir su volumen de vertido y modificar la naturaleza del lodo con el fin de volverlo inofensivo para el ambiente. Esto implica separar las fases agua-sólido para hacer su transporte más económico, estabilizar la materia orgánica, destruir los microorganismos patógenos, incluidos microorganismos del tipo protozoos y huevos de helminto, controlar el problema de malos olores y de

atracción de vectores de enfermedades, así como remover compuestos tóxicos si los hubiere (EPA, 1996a).

Entre las alternativas para la estabilización de los lodos de desecho, existen métodos cuyos resultados en términos de calidad física, química y biológica cumplen satisfactoriamente con los parámetros recomendados por la OMS, y aún por lo establecido en los criterios de regulación en materia de generación, tratamiento y disposición de lodos de desecho de la *US Environmental Protection Agency* (EPA, 40 CFR Part 503, 1996, a), la cual es una de las normativas más avanzadas y exigentes en materia de manejo y disposición de lodos y biosólidos.

En este sentido, la digestión anaerobia puede ser una buena opción para la estabilización de lodos. Este es un método basado en un proceso de fermentación y mineralización mediante el cual la materia orgánica biodegradable es convertida en ausencia de oxígeno en metano y bióxido de carbono, principalmente. Este proceso es atractivo, ya que logra estabilizar la materia orgánica que contienen los lodos, a un pH neutro entre 7 y 7.4, y a costos de operación reducidos. Sin embargo, la aplicación de procesos anaerobios tradicionales no logra la destrucción de los microorganismos patógenos y parásitos a niveles adecuados para permitir el reuso de los biosólidos en actividades agrícolas en donde exista el contacto humano con el material digerido (WEF, 1993; Bruce, 1984).

Para lograr la destrucción de microorganismos patógenos se puede utilizar la variante de la digestión anaerobia en condiciones termofílicas (Krugel *et al.*, 1998), en donde el proceso se lleva a cabo a 55°C, a diferencia de la más común, denominada mesofílica, la cual se desarrolla a 35°C. La exposición de los microorganismos patógenos y parásitos a 55°C por 10 días (Tiempo de Retención Celular (TRC) para estabilización de materia orgánica), aseguraría su destrucción o inactivación (Hays, 1976), lo cual eliminaría el riesgo que representa su manejo para reuso en aplicación agrícola como mejorador de suelos. De esta manera, la producción de biosólidos a partir de lodos municipales vía digestión anaerobia termofílica se podría convertir en una alternativa atractiva, ya que las características de los biosólidos producidos por digestión anaerobia son mejores significativamente en relación con los producidos por medio de la estabilización con cal, tanto en sus características físicas, químicas y biológicas como en sus posibilidades de disposición y reuso. De este modo la aportación de biosólidos como abonos naturales para su incorporación al suelo, puede aliviar la carencia de nutrientes para una vida vegetal diversa que permita recuperar, por ejemplo, los suelos salinos del Ex-Lago de Texcoco (Arana, 1990). Los abonos naturales pueden provenir de distintas fuentes y en este sentido los biosólidos generados mediante digestión anaerobia termofílica pueden ser una buena opción técnica y económica (Bruce, 1984; EPA, 1996 a).

Con base en lo anterior, el presente estudio se propuso evaluar, comparativamente, la factibilidad técnica de remover microorganismos patógenos y parásitos de los lodos de desecho, a partir de un tratamiento anaerobio a condición mesofílica y termofílica. Se usaron dos tipos de lodo, tanto en origen como en sus características físicas, químicas y biológicas; uno proveniente de un tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales municipales y otro proveniente de un proceso fisicoquímico, conocido como tratamiento primario avanzado (TPA).

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. ASPECTOS SANITARIOS DE LOS LODOS RESIDUALES

### 1.1.1. GENERALIDADES MICROBIOLÓGICAS

Los lodos producidos en la depuración de las aguas residuales constituyen una suspensión concentrada de los contaminantes presentes en el agua residual cruda y en consecuencia, contienen microorganismos patógenos y parásitos, así como una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos, algunos de ellos tóxicos en mayor o menor grado. Los lodos resultan ya sea de la simple separación de la fase sólida de la líquida (procesos de sedimentación y flotación), conocidos como lodos primarios, o bien los formados a partir de procesos biológicos, identificados como lodos secundarios (Ramalho, 1991).

El grado de contaminación de los lodos puede variar en relación a su origen. Generalmente los lodos provenientes de aguas de desecho municipales típicas no presentan problemas de contaminación por metales, aunque se de el caso, pero se caracterizan por presentar problemas de malos olores y atracción de vectores debidos a la presencia de componentes orgánicos, nutrientes orgánicos tales como carbón, nitrógeno y fósforo, elementos traza, y componentes tóxicos inorgánicos y orgánicos. Entre los problemas más graves, se encuentra la presencia de microorganismos patógenos y parásitos (Lue-Hing *et al.*, 1998).

Los microorganismos presentes en los lodos residuales son en general virus, bacterias, hongos, algas y protozoarios cuya presencia se puede ir modificando según las características propias del lodo y el tratamiento que estos reciban. La sucesión de especies fluctúa de acuerdo a las condiciones ambientales en que se encuentra el lodo; pH, temperatura, fuerzas iónicas, salinidad y, limite y tipo de nutrientes. Estos se pueden clasificar en tres principales categorías: 1) microorganismos que generalmente participan en el proceso de depuración de los lodos, formando la biopelícula ó biofloc; 2) aquellos que pueden causar problemas en el proceso, y 3) los que no participan a lo largo de todo el proceso. En esta última categoría, se ubican virus, microorganismos patógenos y parásitos (Lue-Hing *et al.*, 1998).

Gran parte del porcentaje del lodo esta conformado por biomasa de los tres tipos de microorganismos, y su concentración es la que se ha acumulado durante el proceso del tratamiento de las aguas residuales. De tal forma que en el momento de la purga de los lodos, la concentración de patógenos y parásitos es mayor a la registrada en las aguas residuales. Se puede observar un decaimiento en los patógenos, pero se debe considerar que presentan recrecimiento; mientras que comúnmente los parásitos mantienen una concentración constante (Lue-Hing *et al.*, 1998). A continuación se presenta una lista de los patógenos y parásitos comúnmente presentes en lodos residuales y relacionados a enfermedades de importancia para la salud pública (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Principales microorganismos patógenos y parásitos presentes en aguas y lodos residuales.

| AGENTE  | ENFERMEDAD / SINTOMAS   |
|---|---|
| <b>VIRUS</b>                                  |   |
| Poliovirus                                    | Poliomelitis  |
| Echovirus                                     | Meningitis, neumonía, encefalitis, fiebre, resfriado común, diarrea.  |
| Coxsackievirus A y B                          | Encefalitis, meningitis, conjuntivitis, neumonía, hepatitis, fiebre, resfriado común  |
| Virus de la hepatitis A                       | Hepatitis infecciosa  |
| Rotavirus                                     | Gastroenteritis aguda con severa diarrea  |
| Agente Norwalk                                | Gastroenteritis epidémica con severa diarrea  |
| Reovirus                                      | Infecciones respiratorias y gastroenteritis   |
| <b>BACTERIAS</b>                              |   |
| <i>Salmonella spp</i>                         | Salmonelosis, fiebre tifoidea   |
| <i>Shigella spp</i>                           | Shigelosis (disenteria bacilar)   |
| <i>Yersinia spp</i>                           | Gastroenteritis (diarrea y dolor abdominal)   |
| <i>Vibrio cholera</i>                         | Cólera  |
| <i>Campylobacter jejuni</i>                   | Gastroenteritis (diarrea)   |
| <i>Escherichia coli</i> (linajes patógenicos) | Gastroenteritis (diarrea)   |
| <b>PROTOZOARIOS</b>                           |   |
| <i>Cryptosporidium</i>                        | Gastroenteritis   |
| <i>Entamoeba histolytica</i>                  | Enteritis aguda, infecciones en el intestino delgado  |
| <i>Giardia lamblia</i>                        | Giardiasis. Calambres abdominales, pérdida de peso  |
| <i>Balantidium coli</i>                       | Diarrea y disentería  |
| <i>Toxoplasma gondii</i>                      | Toxoplasmosis   |
| <b>HELMINTOS</b>                              |   |
| <i>Ascaris lumbricoides</i>                   | Disturbios abdominales y nutricionales, dolores abdominal, vomito, inquietud, síntomas neurológicos, obstrucción intestinal |
| <i>Ascaris suum</i>                           | Puede producir síntomas tales como abscesos de tos, dolor en el pecho y fiebre  |
| <i>Trichuris trichiura</i>                    | Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso   |
| <i>Toxocara canis</i>                         | Fiebre, disconformidad abdominal, dolores musculares, síntomas neurológicos   |
| <i>Taenia saginata</i>                        | Nerviosismo, insomnio, anorexia, disturbios digestivos, dolor abdominal   |
| <i>Taenia solium</i>                          | Nerviosismo, insomnio, anorexia, disturbios digestivos, dolor abdominal   |
| <i>Necator americanus</i>                     | Enfermedades por uncinarias   |
| <i>Hymenolepis nana</i>                       | Teniasis, cisticercosis (perturbaciones oculares, cardíacas, del sistema nervioso central, o digestivas)                    |

EPA/G25/10-89/006

Como se puede ver en la tabla, la mayoría de las enfermedades son de tipo gastrointestinal aunque se pueden presentar excepcionalmente otras muy diversas, dependiendo de su grado de endemismo. Tal es el caso de las micosis de presencia cosmopolita; ó por ejemplo la histoplasmosis, afín a áreas templadas-tropicales y relacionándose a la presencia de grandes poblaciones de aves silvestres, murciélagos, ó otros mamíferos; ó por ejemplo también, enfermedades originadas por poblaciones hacinadas como lo son las granjas avícolas (Murray *et al.*, 1997).

En general las enfermedades son parte de las *interrelaciones* entre los seres vivos y para el ser humano, significa un impacto brutal global sobre la salud, las esperanzas de vida y productividad de los individuos. Su prevalencia se relaciona directamente a la diversidad y variabilidad climática, fenómenos demográficos y al desarrollo socioeconómico de las diferentes áreas del planeta (Tay *et al.*, 1995).

## **1.1.2. MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN LOS LODOS**

### **1.1.2.1. Aspectos biológicos de los microorganismos patógenos**

La concentración y la diversidad de los patógenos contenidos en los lodos de desecho son efecto directo de las características y origen de la fuente contaminante (Tabla 1.1). Por esto, es esencial examinar con detenimiento que los distintos procesos de tratamiento de los lodos produzcan una fuerte remoción en los niveles de microorganismos patógenos.

Para determinar el nivel de contaminación por patógenos en los lodos de desecho y tratados, se determina la presencia de microorganismos coliformes, específicamente *Escherichia coli*. Se utilizan estas bacterias como indicadores de contaminación fecal ya que *E. coli* es habitante natural y representativamente cuantitativamente de la flora del intestino (enteron) situada específicamente en el colon (intestino grueso). Además *E. coli* es el único habitante intestinal que se puede mantener estable fuera del intestino, y por tanto es fácilmente demostrable. Por lo cual, su presencia y concentración se interpreta como indicador potencial de contaminación por bacterias causantes de enfermedad (Schlegel, 1997; Metcalf and Eddy; 1996; Ramalho, 1991).

Este grupo de coliformes fecales como habitantes del intestino poseen algunas de sus formas más representativas y por tanto se reúnen en la familia de las enterobacteriáceas. Este es el grupo más grande y heterogéneo de bacilos gramnegativos de tamaño moderado (0.3-1.0 X 1.0-6.0  $\mu\text{m}$ ), generalmente móviles por flagelos de inserción peritrica y no formadores de esporas. Todos ellos crecen en aerobiosis y anaerobiosis (anaerobios facultativos), disponen de hemina (citocromo y *catalasa*), y de modo habitual se observa crecimiento tras 18 a 24 horas de incubación en una variedad de medios no selectivos (p. ej., agar sangre) y selectivos (p. ej., agar McConkey). Sus requerimientos nutricionales son simples; crecen sobre medios de cultivo sintéticos sencillos que contienen sales minerales, hidratos de carbono y sales de amonio. Fermentan la glucosa y reducen el nitrato, son catalasas positivas y oxidasa negativas. La ausencia de actividad citocromo oxidasa es una característica importante, puesto que se puede determinar con rapidez y se usa para diferenciar las enterobacteriáceas de otros muchos bacilos gramnegativos fermentativos y no fermentativos. Por lo tanto, las características antes descritas enmarcan la importancia de las enterobacteriáceas para la salud pública e investigación experimental es fundamental (Murray *et al.*, 1997, Schlegel, 1997).

### **1.1.2.2. Aspectos ecológicos de los patógenos**

Los microorganismos de la familia de las enterobacteriáceas se encuentran en el suelo, agua, vegetación y forman parte de la flora intestinal normal de la mayoría de los animales, incluido el hombre. Algunos miembros de la familia (p. ej., *Shigella*, *Salmonella*, *Yersinia pestis*) se asocian siempre con enfermedad cuando se aísla en seres humanos

(patógenos estrictos), mientras que otros (p. ej., *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Proteus mirabilis*) forman parte de la flora intestinal normal y pueden causar enfermedad oportunista (patógenos oportunistas y/o facultativos). Las enterobacteriáceas son responsables del 30 al 35% de las septicemias, más del 70% de las infecciones del tracto urinario y muchas de las enfermedades intestinales, que afectan principalmente a las poblaciones menos favorecidas (Murray *et al.*, 1997; Black, 1996).

Necesariamente la producción de la mayoría de las enfermedades requiere exposición al microorganismo patógeno y la subsecuente colonización del huésped. La capacidad para desencadenar enfermedad en los microorganismos está determinada por la virulencia de los gérmenes, así como por factores específicos del huésped. De esta manera, se espera que individuos no inmunes expuestos a cepas con alta virulencia potencial enfermen; y que individuos inmunodeprimidos puedan enfermar aun frente a cepas con poca virulencia (Murray *et al.*, 1997). De modo que la vía de exposición y el tamaño del inóculo (dosis infectiva) son factores determinantes en la interacción entre patógeno y huésped. Las bacterias patógenas estrictamente productoras de enfermedad, pueden actuar aún a bajas dosis infectivas inoculadas; por ejemplo, son necesarias menos de 200 células *Shigella* para producir shigellosis; aunque puede requerirse de  $10^8$  células *Vibrio Cholerae* o *Campylobacter* para originar la gastroenteritis correspondiente (Murray *et al.*, 1997; Brock *et al.*, 1997).

En general, las bacterias patógenas presentes en el huésped están sujetas a condiciones que limitan, condicionan y controlan su capacidad de acción. De este modo, la enfermedad es resultado del desequilibrio en la relación huésped-patógeno. Por otra parte, se debe considerar que la incidencia y la frecuencia de exposición al contagio es crucial para la existencia y permanencia de la especie patógena en cuestión. Estos dos factores dependen directamente de las condiciones ambientales y sanitarias generales del hábitat del huésped y conforman así el ciclo de vida de cualquier microorganismo patógeno (Murray *et al.*, 1997; Brock *et al.*, 1997; Schlegel, 1997).

Los microorganismos estrictamente patógenos al no poder sobrevivir fuera del huésped necesitan mantener con él una interacción de tipo comensal, sobre todo para que éste no muera. La razón es que en condiciones naturales están expuestos y susceptibles a las condiciones de estrés, por ejemplo, temperatura, pH, presión, el tipo de atmósfera, carencia de nutrientes, depredación, competencia, largos periodos de latencia y otras desventajas cualidades que han obligado tanto a huésped y patógeno a evolucionar conjuntamente (Schlegel, 1997).

Un claro ejemplo de esto es la presencia ocasional de *Salmonella*, que aún cuando es la causa más frecuente de gastroenteritis después de *E. coli* (patógena facultativa) se puede encontrar en calidad de comensal junto a la flora intestinal normal. Lo relevante es que *Salmonella* (patógena estricta) puede establecerse en el huésped asintóticamente, sin llegar a desarrollar un cuadro clínico infeccioso de la enfermedad. De este modo, su presencia es continua y favorece a su especie si se compara con las patógenas, estrictas *Shigela* y *Yersinia* las cuales por su virulencia desarrollan enfermedad fácilmente aun con pocas células (Murray *et al.*, 1997; Brock *et al.*, 1997; Schlegel, 1997). Así, la evolución de las estrategias del género *Salmonella* y de *E. coli*, les ha permitido asegurar su hábitat en la especie humana, aunque parcialmente para *Salmonella* evita las condiciones de estrés fuera del huésped beneficiándose del mismo modo que lo realizan las comensales no



patógenas. Sin embargo, *Salmonella* es un problema de salud pública desde un punto de vista epidemiológico.

El género *Escherichia* se conforma de 5 especies de las cuales *E. coli* es la aislada más frecuentemente gracias a que su virulencia se puede o no reactivar, reconociéndose entonces como: *E. coli* enterotoxigénico; *E. coli* enteroinvasivo; *E. coli* enteropatogénico; *E. coli* enterohemorrágico y *E. coli* enteroagregativo (Tabla 1.2). De esta forma la relación ecológica del patógeno, *E. coli* con su huésped, se cumple, se encuentra limitada y controlada en el intestino, sujeta a las fuerzas selectivas que opone su huésped y viceversa, en una coevolución determinada por las necesidades de uno y otro.

Tabla 1.2. Gastroenteritis causada por *Escherichia coli* (Murray et al., 1997)

| Microorganismo                                | Lugar de Acción   | Enfermedad  | Patogenia   |
|---|-------------------|---|---|
| <i>E. coli</i><br>Enterotoxigénico<br>(ECET)  | Intestino delgado | Diarrea del viajero; diarrea infantil en países subdesarrollados; diarrea acuosa, retortijones, náuseas, febrícula.   | Enterotoxinas termoestables y/o termolábiles; estimula la actividad guanilato o adenilatociclasa con pérdida de líquidos y electrolitos |
| <i>E. coli</i><br>Enteroinvasivo<br>(ECEI)    | Intestino grueso  | Fiebre retortijones, diarrea acuosa, seguida por cuadro disentérico con heces sanguinolentas escasas  | Invasión y destrucción de las células epiteliales que tapizan el colon mediadas por plásmidos   |
| <i>E. coli</i><br>Enteropatogénico<br>(ECEP)  | Intestino delgado | Diarrea infantil con fiebre, náuseas, vomito, heces sin sangre  | Adherencia y destrucción de las células epiteliales mediadas por plásmidos  |
| <i>E. coli</i><br>Enterohemorrágico<br>(ECEH) | Intestino grueso  | Colitis hemorrágica con retortijones intensos, diarrea acuosa al principio, seguida por heces teñidas con sangre, fiebre escasa o nula; síndrome urémico hemolítico (SUH) | Mediada por «verotoxina» citotóxica   |
| <i>E. coli</i><br>Enteroagregativo<br>(ECEAg) | Intestino delgado | Diarrea infantil persistente, a veces teñida con sangre, fiebre ligera  | Adherencia agregativa mediada por plásmido 60 MDa   |

### 1.1.3. MICROORGANISMOS PARÁSITOS EN LOS LODOS

#### 1.1.3.1. Aspectos biológicos de los helmintos

La helmintología es la ciencia encargada del estudio de los gusanos miembros de los fila (*phyla*) Platyhelminthes y Nematoda que reúnen a los microorganismos parásitos del hombre y animales; a continuación se presentan las características comparativas más importantes entre estos fila (Tabla 1.3) así como la clasificación de los principales helmintos entéricos (Tabla 1.4) (Ville et al., 1998; Schmidt, 1981).

A continuación se presenta una breve descripción de los aspectos más relevantes del ciclo biológico de los helmintos de mayor importancia en nuestro país.

Tabla 1.3. Comparación de los filos de helmintos parásitos más importantes (Ville *et al.*, 1998)

|                                 | PLATYHELMINTHE<br>(gusanos planos)  | NEMATODA<br>(gusanos redondos)  |
|---------------------------------|---|---|
| <b>Animales representativos</b> | Planarias<br>Duelas<br>Tenias   | Ascaris<br>Uncinarias<br>Nematodos  |
| <b>Nivel de organización</b>    | Organos   | Aparatos y sistemas   |
| <b>Simetría</b>                 | Bilateral, cabeza rudimentaria  | Bilateral   |
| <b>Digestión</b>                | Cavidad gastrovascular con una sola abertura  | Tubo digestivo completo con boca y ano  |
| <b>Circulación</b>              | Difusión  | Difusión  |
| <b>Intercambio gaseosos</b>     | Difusión<br>protonefridios; celulas flamígeras y conductos  | Difusión<br>Canales excretorios   |
| <b>Sistema nervioso</b>         | Cerebro sencillo; dos cordones nerviosos; Sistema tipo escalera; órganos sensoriales sencillos                            | Cerebro sencillo; cordones nervioso dorsal y ventral; órganos sensoriales sencillos   |
| <b>Reproducción</b>             | Asexual por fisión; en la sexual, los microorganismos son hermafroditas, pero hay fecundación cruzada en algunas especies | Sexual, sexos separados   |
| <b>Sostén y movimiento</b>      | Sostén por los tejidos; tejido muscular bien desarrollado   | Sostén por cutícula bien resistente; el líquido contenido en el seudoceloma actúa como esqueleto hidrostático; músculo longitudinal en la pared corporal. |
| <b>Ambiente y modo de vida</b>  | Acuáticos, algunos terrestres en zonas húmedas; muchos son carnívoros; algunos parásitos.                                 | Ampliamente distribuidos en suelo, mar y agua dulce; carnívoros, descomponedores, parásitos   |
| <b>Otras características</b>    | Tres capas de tejido bien definidas; sin cavidad corporal   | Seudoceloma (espacio entre los órganos internos y la pared corporal)  |

Tabla 1.4. Clasificación de los principales helmintos entéricos en México (Lamothe, 1998; Tay *et al.*, 1995; Schmidt, 1981)

| PHYLUM                             | CLASE      | SUBCLASE  | ORDEN          | FAMILIA          | ESPECIE   |  |
|------------------------------------|------------|-----------|----------------|------------------|---|--|
| Platyhelminthe<br>(gusanos planos) | Trematoda  |           | Echinostomata  | Fasciolidae      | <i>Fasciola hepática</i>                                  |  |
|                                    |            |           | Plagiorchiata  | Paragonimidae    | <i>Paragonimus mexicanus</i>                              |  |
|                                    | Cestoidea  | Eucestoda | Cyclophyllidea |                  | Taeniidae   | <i>Taenia solium</i><br><i>Taenia saginata</i>         |
|                                    |            |           |                |                  | Hymenolepididae   | <i>Hymenolepis diminuta</i><br><i>Hymenolepis nana</i> |
|                                    |            |           |                |                  | Dilepididae   | <i>Diphyllobothrium latum</i>                          |
|                                    |            |           |                |                  |   |  |
| Nematoda<br>(gusanos redondos)     | Aphasmidea |           | Trichurata     | Trichuridae      | <i>Trichuris trichuria</i>                                |  |
|                                    | Phasmidea  |           | Rhabdiata      | Strongyloididae  | <i>Strongyloides stercoralis</i>                          |  |
|                                    |            |           | Strongylata    | Ancylostomatidae | <i>Ancylostoma duodenale</i><br><i>Necator americanus</i> |  |
|                                    |            |           | Ascaridiata    | Ascaridae        | <i>Ascaris lumbricoides</i>                               |  |
|                                    |            |           |                | Toxocaridae      | <i>Toxocara canis</i>                                     |  |
|                                    |            |           |                | Oxyuridae        | <i>Enterobius vermicularis</i>                            |  |

### 1.1.3.1.1. Trematodos

Termino propuesto por Rudolphi en 1808, deriva del griego *trema* ("agujero") y *trao* ("atravesar"), y hace referencia a los órganos de fijación (ventosas) que comúnmente se presentan situados: uno en el extremo anterior, donde por lo general se abre la boca y otro en el centro de la región ventral, llamado acetábulo. Los trematodos (duelas) son gusanos planos, carnosos con forma de hoja. Suelen estar equipados con dos ventosas musculares: una oral que constituye el comienzo de un sistema digestivo incompleto, y otra ventral que es un órgano de adherencia.

La mayoría de las duelas son hermafroditas. Los eschistosomas constituyen la excepción, son gusanos cilíndricos (como los nematodos) y pueden presentar sexos separados. Todas las duelas requieren huéspedes intermediarios, algunas varios, para completar su ciclo vital antes de alcanzar su huésped final en etapa adulta. Sin excepción su primer huésped intermediario son moluscos (caracoles y almejas), en el cual, presentan reproducción asexual, que representa un tipo de propagación de las células germinales. Los huevos de las duelas están equipados con una tapadera superior de la cáscara, llamada opérculo, que se abre para permitir la salida de la larva en busca del caracol huésped adecuado. Los huevos de los eschistosomas no tienen opérculo, sino que la cáscara del huevo se rompe para liberar la larva (Murray *et al.*, 1997; Schlegel, 1997). En México se han descrito dos especies autóctonas: la *Fasciola hepática* (Figura 1.1) o duela hepática causante de la fasciolosis y muy frecuente en animales domésticos y, la *Paragonimus mexicanus*, causante de la paragonimiasis (Lamothe and García, 1988).

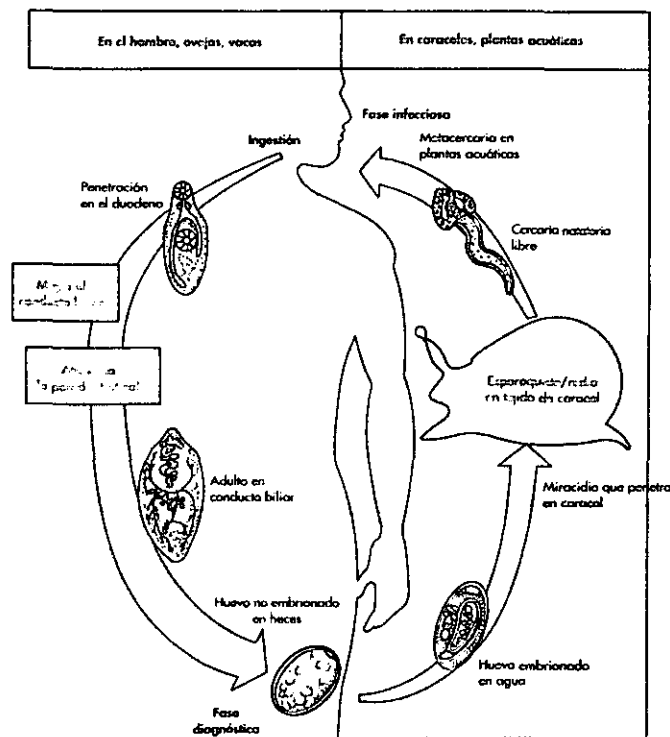


Figura 1.1. Ciclo vital de *Fasciola hepática*

### 1.1.3.1.2. Cestodos

Termino propuesto por Rudolphi, deriva del latín *cestus* ("cinta"). Los cestodos o tenias tienen un cuerpo plano similar a una cinta, y la cabeza provista de órganos de adherencia. La cabeza o escólex suele poseer cuatro ventosas musculares con forma de copa y una corona de ganchos. Encontramos una excepción en *Diphyllobothrium latum*, la tenia de los peces, cuyo escólex esta equipado con una serie de surcos musculares largos y carece de ganchos. Los segmentos individuales de las tenias se llaman proglótides, y la cadena de proglótides se conoce como estróbilo. El estróbilo de la mayoría de los cestodos es de tipo polizoico, es decir, está constituido por un tipo variable de segmentos que aumentan su grado de madurez a medida de que se alejan del cuello (Lamothe and García, 1988). Para el caso de México, los cestodos más representativos son *Taenia solium* (Figura 1.2) e *Hymenolepis nana* (Figura 1.3).

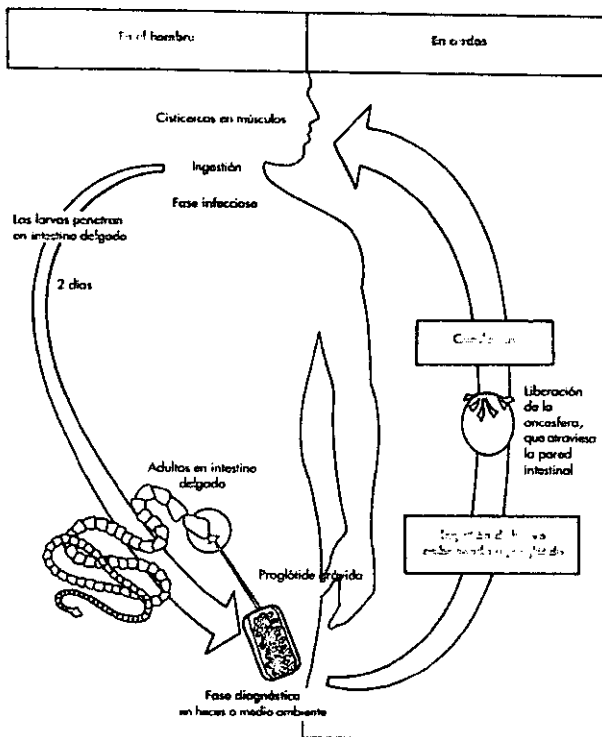


Figura 1.2. Ciclo vital de *Taenia solium*

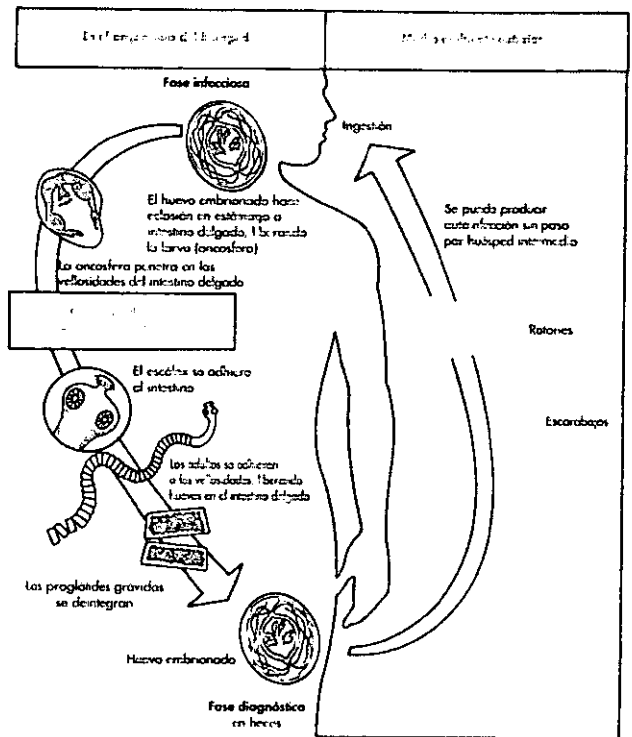


Figura 1.3. Ciclo vital de *Hymenolepis nana*

Todas las tenias son hermafroditas, con ambos órganos reproductores en cada proglótide madura. Los huevos de la mayoría de las tenias carece de opérculo y contienen un embrión con seis ganchos (hexacantos); la excepción es *Diphyllobothrium latum* tiene huevos con opérculo no embrionados, similares a los de las duelas. Las tenias no tienen aparato digestivo y absorben los nutrimentos desde el intestino del huésped a través de la pared corporal blanda. La mayoría de las tenias encontradas en el intestino humano tienen ciclos de vida complejos, con participación de huéspedes intermediarios, y en algunos casos (cisticercosis, equinococosis, esparganosis) son los humanos los que a veces actúan como huéspedes intermediarios (Figura 1.4). En este caso las infecciones son extraintestinales pues se pueden transportar por el torrente sanguíneo e instalarse en cualquier parte del cuerpo en forma de quistes; éstas son las que a veces resultan más graves que las infecciones con gusanos parásitos adultos (Murray *et al.*, 1997; Schlegel, 1997).

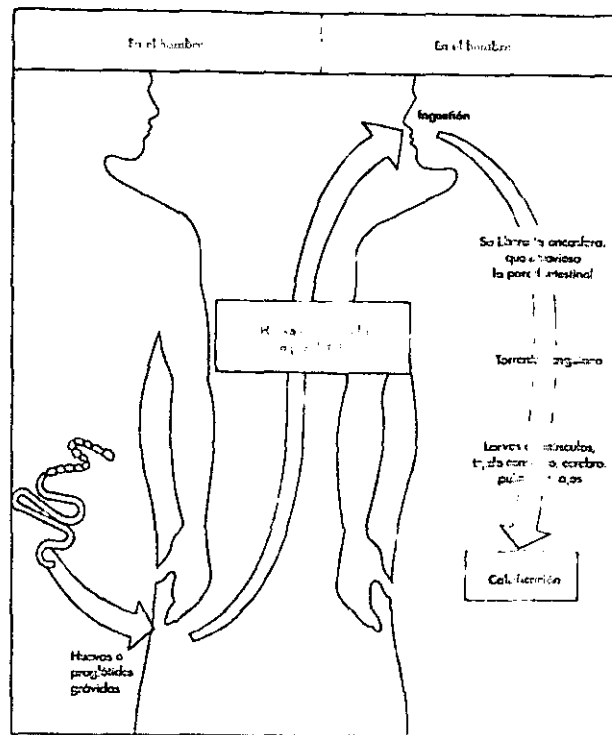


Figura 1.4. Desarrollo de la cisticercosis humana

#### 1.1.3.1.3. Nematodos

Su nombre proviene del latín *nema* ("hilo"). Son los helmintos parásitos más comunes en el mundo. Estos, aunque son causantes de infecciones de la sangre y de los tejidos y por tanto de enfermedades devastadoras en países pobres, son los nematodos más fáciles de reconocer, por su gran tamaño y cuerpo cilíndrico no segmentado, que justifica su nombre de gusanos redondos. Estos microorganismos vermiformes pueden presentar varias formas: fusiforme (como *Ascaris*) (Figura 1.5), filiforme (como *Onchocerca*), con el extremo anterior fusiforme y el posterior filiforme (como *Rhabditis*) y con el extremo anterior filiforme y el posterior fusiforme (como *Trichuris*) (Figura 1.6). Viven principalmente como adultos en el tracto intestinal, y su infección se confirma mediante la detección de los huevos característicos en las heces. La identificación de los huevos se debe realizar mediante una metodología sistemática, teniendo en consideración el tamaño y la forma, el grosor de la cáscara, así como la presencia o ausencia de estructuras especializadas, como tapones polares, protuberancias, espinas u opérculos. También son datos útiles la presencia de larvas dentro de los huevos y sus características.

*Ascaris lumbricoides* es el gusano más común del grupo; es rosado y mide entre 20 y 30 cm de longitud. Su ciclo vital es de los más complejos. El huevo infeccioso ingerido libera una larva que atraviesa la pared duodenal, entra en el torrente sanguíneo, es transportada hasta el hígado y corazón, y después pasa a la circulación pulmonar. Las larvas quedan libres en los alvéolos del pulmón, donde crecen y experimentan mudas. Al cabo de unas tres semanas son expulsadas al sistema respiratorio con la tos y son deglutidas para volver otra vez al intestino delgado. Cuando los gusanos machos y hembras maduran en el intestino delgado (sobre todo yeyuno), la fertilización de las hembras por los machos llega a producir hasta 200,000 huevos diarios durante todo un año. Las hembras también pueden producir huevos no fertilizados en ausencia de

machos. Los huevos se pueden encontrar en heces 60-75 días después de la infección inicial. Los huevos fertilizados adquieren capacidad infecciosa aproximadamente dos semanas después de permanecer en el suelo (Figura 1.5). La ascariasis es la infección por helmintos más común a nivel mundial y se estima que existen unos mil millones de personas infectadas en todo el mundo (Murray et al., 1997).

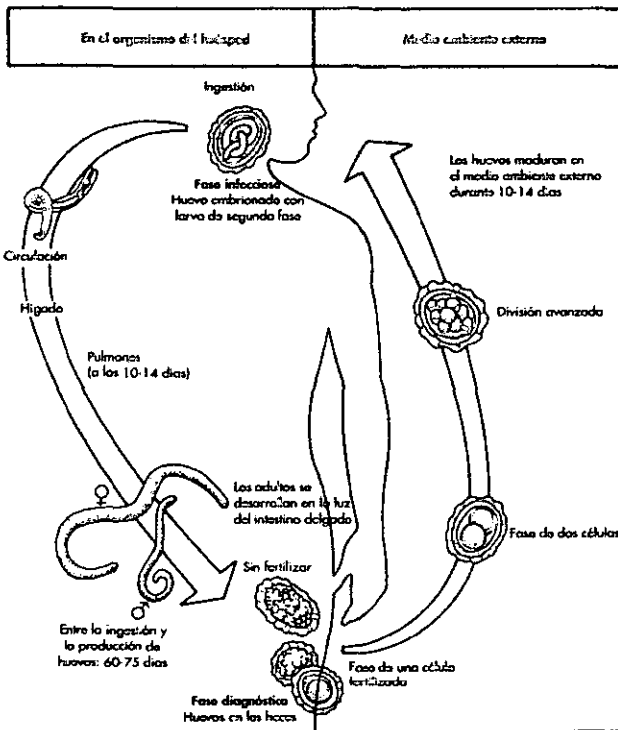


Figura 1.5. Ciclo vital de *Ascaris lumbricoides*

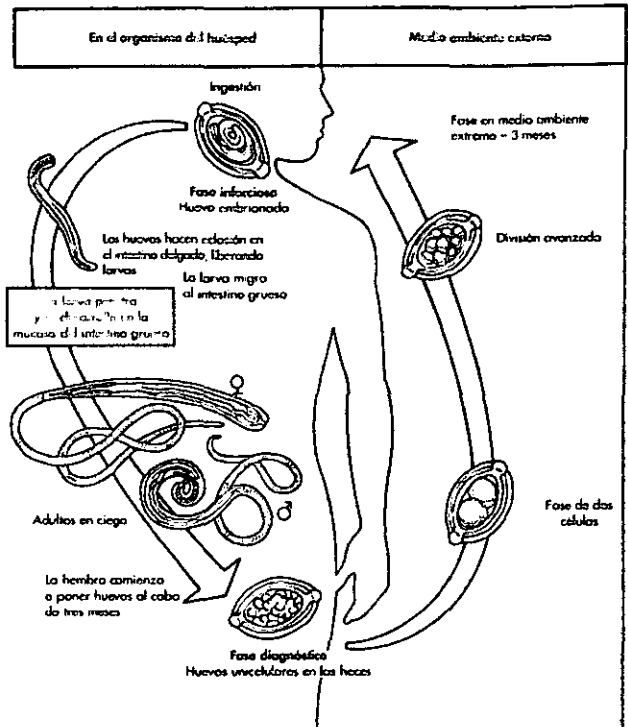


Figura 1.6. Ciclo vital de *Trichuris trichiura*

Las filarias son nematodos finos y largos, parásitos de la sangre, la linfa, tejido subcutáneo y conectivo. Todos ellos son transmitidos por mosquitos y moscas picadoras. La mayoría produce larvas llamadas microfilarias, que se demuestran en la sangre, el tejido subcutáneo o las biopsias cutáneas (Murray et al., 1997; Schlegel, 1997).

### 1.1.3.2. Aspectos ecológicos de los helmintos

El parasitismo se puede definir como una modalidad de vida que ha evolucionado con éxito, en donde un organismo heterótrofo de cierta especie (parásito) se beneficia nutriéndose del tejido vivo del organismo de otra especie (huésped), el cual generalmente resulta perjudicado. El parásito vive dentro o sobre su huésped, del cual obtiene nutrientes; pero aunque suele debilitarlo, rara vez lo mata. Cuando el parásito causa enfermedad y ocasionalmente su muerte, entonces se le denomina patógeno. Generalmente el daño que ocasiona el parásito a su huésped, se debe a:

- ✗ competencia nutricional,
- ✗ acción mecánica (por ejemplo, oclusión intestinal por *Ascaris lumbricoides*, o

- producción de sustancias tóxicas),
- ✗ acción directa del parásito mismo que produce la destrucción del tejido (Ville *et al.*, 1998; Tay *et al.*, 1995).

Esta evolución es el resultado de las interrelaciones entre los distintos seres vivos, y según afirman algunos autores, surge en el momento mismo del origen de la vida. Se conjetura que este tipo de asociación emerge a partir de una adaptación de microorganismos de vida libre, los cuales sufrieron drásticas modificaciones de su medio ambiente forzándose a distintas adaptaciones con microorganismos autótrofos. Estas relaciones parásito-huésped se confirman en registros fósiles de foraminíferos y algas de 530 millones de antigüedad (Ville *et al.*, 1998; Tay *et al.*, 1995).

La asociación parásita es muy diversa y podemos mencionar que una parasitosis puede ser estricta, oportunista o facultativa de la misma forma en que se ha descrito para los patógenos. También puede describirse como temporal ó intermitente, y permanente. La primera se aplica a los parásitos como mosquitos o chinches y la segunda a parásitos que se establecen como adultos en el huésped, llevando a cabo su reproducción exitosamente, como en el caso de las zoonosis, amibiasis, helmintiasis y cestodos (Schmidt *et al.*, 1981).

Ecológicamente, esta asociación es benéfica para los parásitos, pero a escala global supone un grave problema sanitario para el hombre y su estructura social. El parasitismo y las enfermedades infecciosas se encuentran entre las principales causas de morbilidad y mortalidad en el mundo, afectando al 75% de la población establecida en países en desarrollo, de la cual el 50% tiene menos de 15 años siendo la población más susceptible (Tay *et al.*, 1995). Al respecto, Klein (1974) menciona que cuándo una población alcanza el límite de carga que ofrece su ecosistema, su número se debe estabilizar mediante hambre, enfermedad o violencia.

En México, las enfermedades parasitarias constituyen un fuerte impacto sobre la salud pública. Su frecuencia es tan variable, como diversa es su geografía y desigual el desarrollo económico. Ante estas diferencias socioeconómicas, dos son los principales indicadores: la deficiencia sanitaria y una baja escolaridad. La primera es debida a la carencia de servicios básicos, y la segunda es muy contrastante entre el medio rural y urbano. Esto se acentúa en las localidades rurales, en donde por demás es más grave el hacinamiento, el fecalismo al aire libre y una marcada coexistencia con todo tipo de animales. Así, las insuficiencias sanitarias, educativas y nutricionales, aunadas al deterioro ecológico, favorecen las parasitosis debido a la creación de microambientes. Esto repercute en un efecto de circulo vicioso que se refleja en gastos médicos, hospitalización, intervenciones quirúrgicas, ausentismo en el trabajo, incapacidades otorgadas, medicinas, pérdida de salarío y defunción. Otro factor de influencia, es el hábito alimenticio de ciertos grupos con predilección por la ingesta de carnes semicrudas (zoonosis), o carnes con quistes de origen parasitario conocidos como "zahuate", "granillo" ó "tomatillo" (cisticercosis), predilección que resulta en cuadros endémicos de alta incidencia (Tay *et al.*, 1995).

A partir del punto de vista epidemiológico y tomando en cuenta los factores ecológicos, el ciclo vital del parásito y su relación con el huésped, así como cada uno de los componentes para el desarrollo y transmisión del mismo, se puede definir la dinámica del

período prepatogénico de la historia natural de una enfermedad; esto nos puede indicar una posibilidad de romper la cadena en la transmisión de una enfermedad bloqueando uno o varios eslabones (Tay *et al.*, 1995).

A este respecto, los trabajos de Bruce-Schwatt (1965) se complementan con el pensamiento de Klein (1974): en su contexto histórico, el ecosistema se relaciona con su pasado, y su futuro con el presente; pues el ecosistema conjunta sus componentes bióticos y abióticos en la dinámica de su desarrollo y evolución (Tay *et al.*, 1995; Bustamante, 1994). El Valle de México es un ejemplo suficiente en su contexto histórico, ecológico y epidemiológico. La atmósfera del valle era limpia, transparente, húmeda y templada, sin contaminación. En el presente, la desecación de los lagos, la deforestación de los bosques de las sierras circunvecinas y de Chapultepec han causado una fuerte y diversa contaminación del aire que ha resultado en una atmósfera seca y de temperatura extremosa. La flora y fauna han sido reducidas en sus poblaciones y en biodiversidad. La población sufre de distintas enfermedades oculares, respiratorias y gastroentericas. El cambio de uso de suelo por la demanda de vivienda e industria, origina la pérdida de tierras fértiles y de recarga a los acuíferos y a su vez provoca insuficiencia de agua para uso potable y agrícola (Bustamante, 1994; Cifuentes *et al.*, 1994). Este fenómeno, obviamente también se aplica a los microorganismos patógenos.

Al resolver el problema del abastecimiento de productos agrícolas a nuestra ciudad y reutilizar el agua residual, valorando solamente los aspectos benéficos inmediatos sin evaluar su calidad microbiológica y el riesgo sanitario que esto implicaba, se generó un fenómeno de círculo epidemiológico de infecciones por nematodos intestinales en trabajadores agrícolas y consumidores asociado a la producción y consumo de verduras (Cifuentes *et al.*, 1993; Cifuentes *et al.*, 1994). En México, las aguas residuales crudas, ó bien los lodos no tratados, contienen una gran cantidad de huevos de helmintos entéricos en su fase infecciosa (huevos embrionados o larvados) capaces de infectar un huésped intermedio o definitivo, entre ellos el hombre, y completar su desarrollo. A continuación se presenta una tabla de las parasitosis por helmintos más frecuentes en nuestro país (Tabla 1.5).

Tabla 1.5. Frecuencia de Helminiasis en México, 1960 – 1992 (Tay *et al.*, 1995)

| Parasitosis      | Porcentaje de la Población con Parasitosis por Helmintos | Número de Personas Infectadas |
|------------------|--|-------------------------------|
| Ascariasis       | 29.6   | 24'136,172                    |
| Tricocefalosis   | 21.0   | 16'883,657                    |
| Enterobiasis     | 19.0   | 15'259,087                    |
| Uncinariiasis    | 17.3   | 14'016,583                    |
| Himenolepiasis   | 14.5   | 11'797,886                    |
| Estrongiloidosis | 6.5  | 5'272,910                     |
| Teniasis         | 1.5  | 1'197,842                     |

#### 1.1.4. INTERACCIÓN Lodos DE DESECHO Y MEDIO AMBIENTE

Como se mencionó anteriormente, los lodos generados durante el tratamiento de las aguas domésticas en México, generalmente contienen gran cantidad de microorganismos patógenos y parásitos causantes de enfermedades gastrointestinales en el hombre y en animales de importancia socioeconómica. La fuente de microorganismos patógenos y



parásitos es la materia fecal de individuos enfermos y portadores asintomáticos y eventualmente de excretas de portadores intermediarios, o también de algunas otras vías alternativas e indirectas como lo es el caso de productos agropecuarios contaminados y microorganismos vectores. Los huevos de helmintos y los quistes de protozoarios, son estructuras de alta resistencia a condiciones adversas del medio que los parásitos han desarrollado en función de su ciclo de vida. Es por eso necesario romper este ciclo durante el proceso de estabilización del lodo, destruyendo ó inactivando estas estructuras (EPA, 1992; Tay *et al.*, 1995). Aún cuando la mayoría de los microorganismos patógenos de origen viral y bacterial, así como los parásitos protozoarios o helmintos son destruidos durante la exposición al medio natural, muchos de ellos son resistentes y sobreviven en el suelo durante varios meses, incluso años y por lo tanto pueden servir de fuente potencial de enfermedades (EPA, 1996,a).

Los patógenos y parásitos presentes en las aguas residuales son primeramente relacionados con los sólidos insolubles. Los procesos de tratamiento concentran los sólidos en los lodos de desecho y esto causa una elevación en la densidad de microorganismos patógenos, en comparación a los que ingresan a las aguas residuales. Sin embargo, los lodos deben contener niveles suficientes de patógenos para afectar la salud pública y el medio ambiente. Estos patógenos pueden causar infección o enfermedad si los humanos y animales se exponen a niveles lo suficientemente altos. Los niveles causantes de infección –dosis infecciosas– varían según la relación biológica hospedero-huesped (Schmidt and Roberts,1981).

El contacto con los microorganismos patógenos y parásitos presentes en los lodos puede ser por dos vías, contacto directo y contacto indirecto; ambas, son potenciales rutas de exposición:

**Contacto directo:** a) Contacto inadvertido con el lodo de desecho; b) Por encontrarse en un área en donde el lodo de desecho ha sido aplicado (campo abierto, área forestal, recreativa); c) Por utilizar suelo, en donde se ha aplicado el lodo de desecho, como fertilizante en jardines, o como material de relleno; d) Por inhalación de los microbios que son transportados por el aire al momento de aplicar el lodo de desecho al sitio de disposición, ó por causa de polvos levantados en época de vientos.

**Contacto indirecto:** a) Consumo de alimentos agrícolas, contaminados por los lodos de desecho usados como abono en los campos; b) Consumo de leche o productos animales contaminados, en donde los animales se han infectado al comer pastos, ó alimentos provenientes de campos en donde fueron aplicados lodos de desecho; c) Ingestión de agua en áreas recreativas, que han sido contaminadas por disposición de lodos de desecho en zonas cercanas; d) Consumo de pescado con insuficiente cocción, que ha sido infectado por encontrarse en un área cercana a un sitio de aplicación del lodo de desecho; e) Infección causada por vectores que han tenido contacto directo ó indirecto con el lodo de desecho, y que pueden ser insectos, roedores, aves y otros.

Muchos de los parásitos han desarrollado estrategias y estructuras especializadas que les permiten resolver sus problemas de sobrevivencia. En general, los platelmintos tienen que pasar un tiempo fuera del huésped, su hábitat natural y definitivo, ante lo cual han desarrollado huevos resistentes que pueden soportar periodos largos en condiciones adversas (temperatura, humedad, pH, tensión, depredación). Los tratamientos de

estabilización de los lodos de desecho, incluyen métodos que permiten superar estas estrategias naturales de los helmintos y de otros patógenos.

## **1.2. TRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES**

### **1.2.1. DEFINICIÓN Y METODOS DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES**

La estabilización de los lodos residuales se entiende como el proceso mediante el cual se busca eliminar los microorganismos patógenos y parásitos, disminuir la fracción volátil, reducir o eliminar el potencial de putrefacción del lodo y consecutivamente, eliminar los problemas de malos olores y atracción de vectores. Son varios los tipos de procesos para tratar lodos de desecho que permiten su estabilización adecuada aún cuando sean de distinto origen. El tratamiento pueden ser físico como en el caso de la incineración; químico como la estabilización con cal; ó bien, biológicos como el composteo, la digestión aerobia y anaerobia. Cada tipo de estabilización posee características metodológicas y técnicas muy específicas que las distingue (Lue-Hing *et al.*, 1998; Ramalho, 1991)

La temperatura es un parámetro íntimamente ligado a la eliminación de los microorganismos patógenos y parásitos, por lo que se encuentra presente en la fase final de algunos de los distintos procesos en que se alcanza la estabilización. Biológicamente, la temperatura afecta directamente el equilibrio de la vida de los microorganismos en dos vías opuestas. Incrementa o decrece el desarrollo de las reacciones químicas y enzimáticas de los procesos celulares, alterando y afectando diferencialmente los distintos organelos celulares y por tanto el metabolismo, hasta llegar a un punto crítico de inactivación de las reacciones. Se reconoce que cada tipo de microorganismos tiene tres fases principales, aún cuando éstas sean muy variables entre las especies: temperatura mínima, en donde comúnmente se presenta un crecimiento lento en los microorganismos; temperatura óptima en la cual se presenta un crecimiento rápido y una temperatura máxima en donde ya no es posible el crecimiento (Brock *et al.*, 1997).

El pH es también fundamental como parámetro de control en los procesos de tratamiento de los lodos. Su influencia sobre los microorganismos ocurre de forma similar a como afecta la temperatura, de modo que se tiene un intervalo óptimo en donde los microorganismos se desarrollan y crecen, y tienen un límite mínimo y otro máximo (Brock *et al.*, 1997). Sin embargo, su aplicación extrema ácida o básica puede resultar en beneficio de la eliminación de parásitos y patógenos, tal y como se utiliza en la estabilización con cal, y más aun en tratamientos poco convencionales y no bien estudiados, como la estabilización ácida (Fraser *et al.*, 1984; Godfree *et al.*, 1984).

Finalmente, para lograr la estabilización del lodo es importante el tiempo de retención de éste, dentro del proceso de tratamiento. El tiempo de retención celular (TRC) hace referencia al tiempo durante el cual el lodo de desecho es sometido a la presión de las condiciones físicas, químicas y biológicas que prevalecen en cualquiera de los procesos de tratamiento. Se necesita un largo tiempo si el lodo es sometido a desecación, mucha energía si es incinerado, mucho reactivo si se estabiliza con cal o cloro, o bien, el tiempo y el gasto energético dependerá del tipo de tratamiento biológico al cual se recurra: meses si se trata de composteo, digestión aerobia o anaerobia a condiciones ambientales. Sin embargo, el tiempo se puede disminuir considerablemente si las condiciones son

extremas como en el caso de la termofilia anaerobia y aerobia, con las distintas ventajas y desventajas que uno y otro proceso presenta (Bruce, 1984; Lue-Hing *et al.*, 1998). Por lo tanto, los distintos microorganismos presentes en el lodo, podrán realizar la degradación de los distintos compuestos dentro de un proceso biológico, o bien, deshidratar los lodos mediante un proceso fisicoquímico dentro de cierto límite de tiempo óptimo; en el cual los microorganismos patógenos y parásitos no logren resistir la presión de las fuerzas ambientales adversas que en cada proceso prevale (Brock *et al.*, 1997; Lue-Hing *et al.*, 1998).

A continuación se comentan los procesos más comúnmente usados en el tratamiento de los lodos de desecho:

En la **digestión anaerobia** los intervalos de temperatura que se emplean pueden ser mesofílicos y termofílicos. La condición termófila requiere tiempos de retención hidráulica menores, 8 ó 10 días, ofrece mayores ventajas para la estabilización de lodos que se deseen reusar como mejoradores de suelos. Los beneficios obtenidos son un lodo libre de olores y patógenos, biológicamente estable y en menor volumen, además de la recuperación de energía en forma de gas metano (Lue-Hing *et al.*, 1998; Metcalf and Eddy, 1996; Bruce, 1984).

En el caso de la **digestión aerobia**, también se puede desarrollar en un intervalo mesófilo o termofílico de temperatura. En esta segunda variante, el incremento de la temperatura se da por efectos oxidativos lo que se logra con oxígeno puro o aireación con aire. El tiempo de retención necesario para la inactivación de los patógenos puede ser de hasta 30 días y es menor cuando se usa oxígeno puro. El producto final (lodo clase "A") es inodoro, parecido al humus, biológicamente estable y con valor fertilizante; sin embargo, el costo energético es elevado (Lue-Hing *et al.*, 1998; Metcalf and Eddy, 1996; Bruce, 1984).

El **composteo** es un proceso aerobio, en el cual la materia orgánica experimenta una degradación biológica hasta dar un producto final estable sin problemas de carácter sanitario, exento de olores y similar al humus. Por efecto de una reacción exotérmica natural, alcanza niveles termofílicos de temperatura, y aproximadamente del 20 al 30% de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono y agua (Lue-Hing *et al.*, 1998; Metcalf and Eddy, 1996; Bruce, 1984).

En el tratamiento químico de **estabilización con cal**, al saturar el lodo con cal hidratada éste reacciona y se alcanza un pH entre 11 y 14, con un aumento en la temperatura hasta 65 y 70°C, dependiendo de la proporción de cal utilizada por unidad de peso de lodo. En consecuencia el lodo no se pudre, es inodoro, y se destruyen los patógenos; sin embargo, estas condiciones se mantendrán mientras el pH no disminuya (Lue-Hing *et al.*, 1998; Metcalf and Eddy, 1996; Bruce, 1984).

### 1.2.2. LEGISLACIÓN PARA EL MANEJO Y APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Una vez que los lodos han sido tratados pueden ser aprovechados según los preceptos del desarrollo sustentable, el cual accede al libre intercambio de materia y energía necesarios para mantener en equilibrio dinámico al sistema a través de los ciclos biogeoquímicos. De este modo se asegura la disminución de la sobrecarga del medio, al

retener y circular los nutrientes necesarios para cubrir las necesidades energéticas del desarrollo. En este contexto, los lodos de desecho que ya han sido tratados reciben el nombre de biosólidos. La EPA (1996, b) en su apartado 503 establece los requerimientos para el reuso y disposición de los biosólidos cuando:

- Son aplicados como fertilizantes para cultivos agrícolas u otro tipo de vegetación,
- Se descargan en un sitio de disposición final,
- Son incinerados.

Adicionalmente, la regla 503 indica que los biosólidos podrán ser dispuestos en sitios de relleno sanitario municipal si se encuentran en las condiciones que indica la parte 40 CFR en el artículo 258. La regla 503, que clasifica los biosólidos en clase "A" y "B" (Tabla 1.6), de acuerdo a los requerimientos de eliminación de patógenos y parásitos, se aplicará al parecer con menores modificaciones en México (Tabla 1.7).

Tabla 1.6. Límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en biosólidos

| CLASE | PATÓGENOS                       |                             | PARÁSITOS                             |
|-------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
|       | Coliformes fecales<br>NMP/gr ST | Salmonella sp<br>NMP/4gr ST | Huevos de Helmintos<br>viables/4gr ST |
| A     | Menos de 1,000                  | Menor de 3                  | Menor de 1                            |
| B     | Menor de 2,000,000              | ND                          | ND                                    |

Fuente: EPA Apartado 503 Norma para el uso y disposición de los lodos de desecho, 1996, b

Tabla 1.7. Límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en biosólidos

| CLASE | PATÓGENOS                       |                            | PARÁSITOS                                      |
|-------|---------------------------------|----------------------------|--|
|       | Coliformes fecales<br>NMP/gr ST | Salmonella sp<br>NMP/gr ST | Huevos de Helmintos<br>viables/gr en base seca |
| A     | Menos de 1,000                  | Menor de 3                 | Menor de 10                                    |
| B     | Menor de 2,000,000              | Menor de 300               | Menor de 35                                    |

Fuente: Proyecto de Norma Oficial Mexicana Proy-Nom-004-Ecol-2000.-

Adicionalmente, la norma 503 fija límites para 10 metales y para la atracción de vectores. Varios procesos son aceptados por la regla 503 para la producción de biosólidos clase "A" o "B". Para la clase "A", los requerimientos de eliminación de patógenos se pueden obtener con una de las siguientes opciones:

- Tratamiento térmico de biosólidos
- Tratamiento de biosólidos en procesos con pH alto, temperatura alta y secado por aire
- Tratamiento de biosólidos con procesos de reducción adicional de patógenos (PFRP)
- Tratamiento de biosólidos en procesos equivalentes a PFRP, previo permiso de las autoridades sanitarias
- Tratamiento de biosólidos con otros procesos, previa demostración de reducir virus entéricos a un nivel menor a una unidad formadora de placa (UFP) por 4 gramos de sólidos totales de peso seco y huevos de helminto

viabiles a nivel menor de 1 por 4 gramos de sólidos totales de peso seco, en adición a los límites de coliformes fecales o *Salmonella* sp (Tabla 1.6).

- Tratamiento de biosólidos en procesos desconocidos o en condiciones de operación menos estrictas. En ese caso la determinación de coliformes fecales o *Salmonella* sp, virus entéricos y huevos de helminto viables podría darse en el momento de disposición o aplicación final. Los requerimientos de la opción previa deben ser conocidos.

Para la clase "B", los requerimientos de eliminación de patógenos se pueden obtener con una de las siguientes opciones:

- Monitoreo de microorganismos indicadores por dos semanas antes de su disposición. Los coliformes fecales deben estar en niveles menores a dos millones NMP por gramo de sólidos totales por peso seco.
- Tratamiento de biosólidos en procesos de reducción significativa de patógenos (PSRP).
- Tratamiento de biosólidos en procesos equivalentes a un PSRP, si es aprobado por las autoridades competentes.

Adicionalmente, hay restricciones de sitio para los biosólidos de clase "B" cuando son aplicados al suelo dependiendo del tipo de cultivos o exposición pública. Los tiempos permitidos para cosechas ó acceso al público varían de treinta días a dos años después de la aplicación de los biosólidos.

Los procesos aceptados para la producción de biosólidos clase "A" (PFRP) son: composteo, secado por calor, tratamiento por calor, digestión aerobia termofílica, irradiación con rayos beta, irradiación con rayos gamma y pasteurización. Para biosólidos de la clase "B", los PSRP son: digestión aerobia, secado por aire, digestión anaerobia, composteo sin un estricto control de la temperatura, y estabilización con cal. La digestión anaerobia termofílica no esta considerada en la lista de la EPA; sin embargo una instalación específica puede ser aprobada si cumple con los criterios antes mencionados, de acuerdo con de un programa de monitoreo aceptado por las autoridades pertinentes (EPA, 1996, a).

### **1.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia ofrece ventajas que no pueden ser ignoradas: el lodo se puede estabilizar a altas temperaturas; tiene bajos requerimientos energéticos, puede generar energía metano, reduce la masa de lodos, y por ser producto de un proceso biológico, es un mejorador del suelo al que se integra. Un inconveniente son los tiempos requeridos para que se desarrolle el proceso, mayores a 8 días.

En comparación con otros métodos de estabilización de lodos, la vía anaerobia presenta las siguientes ventajas y desventajas como se ilustra en la tabla 1.8.

Tabla 1.8. Ventajas y desventajas del proceso de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales y lodos de desecho

| VENTAJAS  | DESVENTAJAS  |
|---|--|
| <p>Reducción de la masa y el volumen del lodo mediante su conversión a metano, dióxido de carbono y agua. Esta reducción se encuentra entre el 25 y 45% de los sólidos totales.</p> <p>El biogás producido (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) es un gas combustible que convierte a la digestión anaerobia en un proceso productor neto de energía. Es así que esta energía se utiliza para mantener el digestor a 35°C o 55°C. El biogás puede suministrar los requerimientos de calor del digestor y hasta 60% de la energía eléctrica para los aeradores del sistema de lodos activados correspondiente</p> <p>Los lodos digeridos, por su estabilidad y características fisicoquímicas, pueden ser aprovechados como mejoradores de suelos en una gran variedad de situaciones</p> | <p>Costos de inversión inicial altos. Tanques cubiertos, intercambiadores de calor, dispositivos para el manejo seguro del biogás son componentes necesarios en una planta de digestión de lodos.</p> <p>Largos tiempos de retención hidráulica para mantener a las bacterias metanogénicas dentro del sistema, aunado a un menor factor de sobrediseño para aceptar sobrecargas orgánicas.</p> <p>Características inadecuadas del sobrenadante, por lo que tiene que retornarse al inicio del proceso de tratamiento de agua, lo cual implica una carga adicional al sistema.</p> <p>En el caso particular de México, muy poca, ó prácticamente nula experiencia en el diseño, construcción y operación de digestores anaerobios para lodos de purga.</p> |

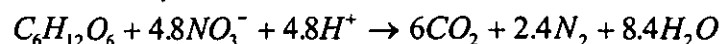
### 1.3. GENERALIDADES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso complejo desde el punto de vista bioquímico y microbiológico. Se trata de un proceso natural, enmarcado en el ciclo anaerobio del carbono por el cual es posible, en ausencia de oxígeno, transformar la materia orgánica en biomasa, metano (CH<sub>4</sub>) y compuestos inorgánicos en su mayoría volátiles: CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, y N<sub>2</sub> (Gottschalk and Peinemann, 1992).

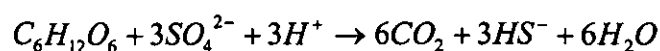
En forma natural, la digestión anaerobia se encuentra presente en lagunas, pantanos, el fondo marino con sedimentos orgánicos, el tracto gastrointestinal del hombre, el rumen de los herbívoros, y el estomago de termitas; también es aprovechado en ecosistemas artificiales como los rellenos sanitarios y los reactores anaerobios. La digestión anaerobia es resultado de la asociación sintrófica de diferentes tipos de microorganismos, cada uno de los cuales lleva a cabo el proceso bioquímico que le reporte el mayor rendimiento energético bajo estas condiciones (Brock *et al.*, 1997; Whitman *et al.*, 1992).

La digestión anaerobia es un proceso metabólico que comprende la degradación del material orgánico en la ausencia de oxígeno y que, si bien se ha utilizado ampliamente en el tratamiento de lodos, por su complejidad, no ha sido completamente esclarecido. El proceso global involucra reacciones en serie y en paralelo, teniendo como aceptor final de electrones a compuestos oxidados diferentes al oxígeno, tales como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono; de esta forma se tienen tres vías de degradación, que se representan con las siguientes reacciones globales:

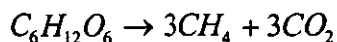
desnitrificación (medio anóxico):



sulfatorreducción:



metanogénesis:

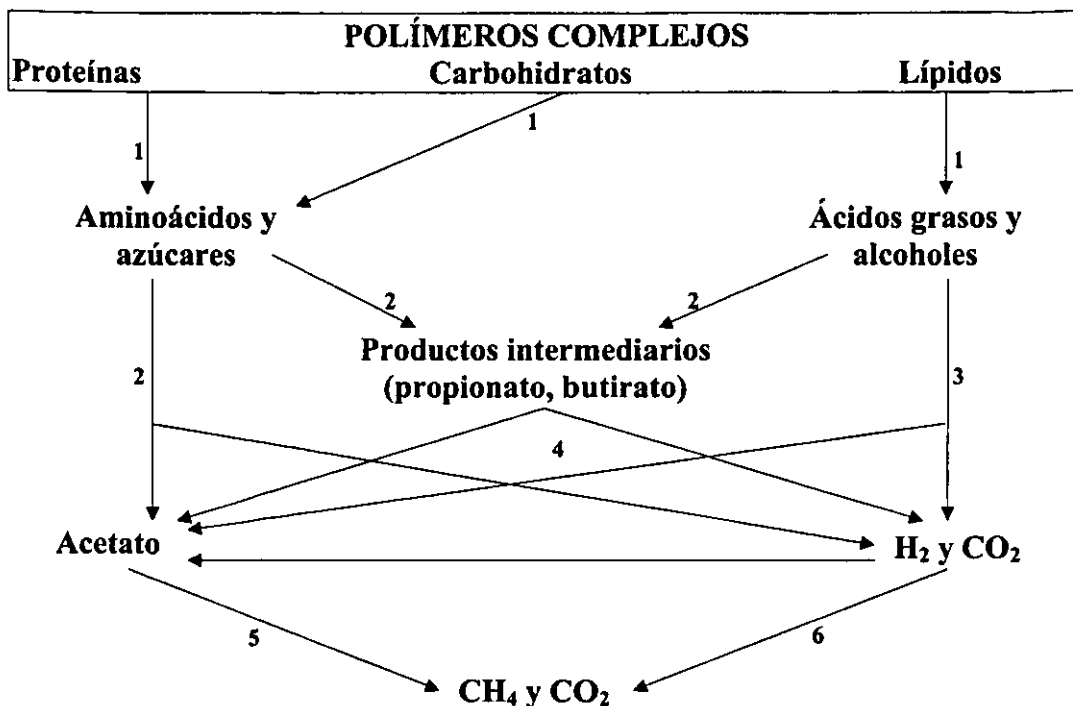


En los procesos anaerobios, el 90% de la energía contenida en el material orgánico, medida como demanda química de oxígeno (DQO), es convertida en biogás y el 10% restante es asimilado por las células. La baja producción celular representa para el proceso anaerobio una gran ventaja dado que se evita la necesidad de tratar importantes volúmenes de la biomasa generada antes de su disposición final. El proceso global de la digestión anaerobia también involucra la actividad metabólica combinada y coordinada de varios grupos de microorganismos anaerobios, facultativos o estrictos. Los substratos necesarios para ciertos microorganismos son producidos como consecuencia de la acción de otros, y constituye un ejemplo típico de un sistema multisustrato/multiorganismo, en el que las reacciones ocurren de manera secuenciada (Saval and Noyola, 1992; Whitman *et al.*, 1992).

### 1.3.1. ASPECTOS BIOQUÍMICOS

La conversión anaerobia global de sólidos orgánicos hasta sus productos finales, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, se lleva a cabo en cuatro pasos simultáneos o sucesivos: 1) hidrólisis de polímeros particulados biodegradables, 2) acidogénesis equivalente a la formación de ácidos a partir de moléculas orgánicas solubles, 3) acetogénesis formando acetato, formato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y 4) metanogénesis para la generación de CH<sub>4</sub>. Este esquema consideraba como la reacción limitante de la digestión la formación de CH<sub>4</sub> a partir de la degradación de ácidos grasos globales (Brock *et al.*, 1997; Lowe *et al.*, 1993; Whitman *et al.*, 1992). Gujer and Zehnder (1983), propusieron un mecanismo de seis pasos simultáneos para el proceso de conversión de materia orgánica de alto peso molecular (Figura 1.7), los cuales comprenden: 1) Hidrólisis de proteínas, carbohidratos y lípidos, 2) fermentación de azúcares y aminoácidos, 3) oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes, también conocida como β-oxidación, 4) oxidación anaerobia de ácidos grasos volátiles intermediarios (excepto acetato), 5) conversión de acetato a CH<sub>4</sub>, que es la metanogénesis acetoclástica y 6) conversión de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>, que se conoce como metanogénesis reductora o hidrogenófila.

Los principales gases formados en el proceso de degradación son CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y generalmente, el flujo de intermediarios o substratos diversos se expresa en términos de DQO. Si el principal aceptor de electrones es el CO<sub>2</sub>, en lugar de nitratos o sulfatos, la reducción neta en DQO resulta en la formación de CH<sub>4</sub>. El volumen de CO<sub>2</sub> formado es difícil de cuantificar, ya que se complica por la cantidad de bicarbonato formado. Si el sustrato es completamente mineralizado, el estado medio de oxidación del carbono en la materia orgánica presente definirá las porciones relativas de los componentes del biogás.



- 1) Hidrólisis
- 2) Fermentación
- 3)  $\beta$  Oxidación
- 4) Oxidación anaerobia
- 5) Metanogénesis acetoclástica
- 6) Metanogénesis reductora

Figura 1.7. Ruta metabólica de la digestión anaerobia adaptada de Gujer and Zehnder (1983)

### 1.3.1.1. Bioquímica de la Hidrólisis

Dado que las bacterias en general, sólo pueden disponer de la materia orgánica en forma soluble, la asimilación microbiana de biopolímeros particulados requiere su rompimiento o hidrólisis. Este proceso es realizado por enzimas extracelulares y la velocidad de reacción está influenciada por el pH, temperatura, tiempo de residencia celular y composición del residual.

El proceso de hidrólisis puede ser ejemplificado por la degradación de compuestos de celulosa, la cual es un polímero lineal formado por unidades de celobiosa, conectadas por enlaces  $\beta$ -1,4-glucosídicos. Dos moléculas de glucosa forman la unidad de celobiosa (Figura 1.8).

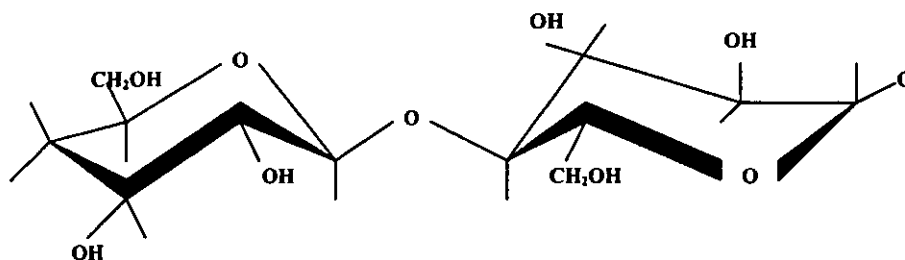


Figura 1.8. Estructura molecular de la celobiosa



El grado de polimerización (GP) de D-glucosa en la mayoría de las celulosas es del orden de 50 mil o más unidades. Celulodextrinas con GP de 1 a 6 unidades son solubles en agua, pero su solubilidad decrece al incrementar el GP. En tanto, la cadena celulósica se incrementa, los puentes de hidrógeno y las fuerzas de *van der Waals* se convierten en agentes de enlace lo suficientemente resistentes para unir cadenas adyacentes y formar regiones densamente empacadas de celulosa cristalina de la cual el agua es excluida.

La hidrólisis de la celulosa involucra el rompimiento de la cadena por la adición de una molécula de agua en el enlace  $\beta$ -1,4. La solubilización de la celulosa por medio de enzimas extracelulares procede por la lenta reducción del grado de polimerización y la conversión del sustrato en azúcar soluble. La velocidad de la reacción enzimática parece ser una función del área superficial de la celulosa accesible a la enzima. La hidrólisis completa de la celobiosa requiere la presencia de por lo menos tres enzimas conocidas como celobiosa  $C_1$ ,  $C_x$  y  $\beta$ -glucosidasa. En general, se cree que los componentes de  $C_1$  son exoenzimas que liberan unidades de celobiosa en forma terminal. Posteriormente, se realiza la acción aleatoria de  $C_x$  sobre los enlaces  $\beta$ -1,4-glucosídicos y finalmente, la  $\beta$ -glucosidasa cataliza la hidrólisis de la celobiosa a glucosa. La hidrólisis de las proteínas es llevada a cabo por proteasas extracelulares y el resultado de ésta son polipéptidos y aminoácidos. Los aminoácidos son posteriormente fermentados a ácidos grasos volátiles (AGV),  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $NH_4^+$  y  $S^{2-}$  (Brock *et al.*, 1997; Pelmont, 1993).

#### 1.3.1.2. Bioquímica de la Fermentación y la $\beta$ -Oxidación

Los productos del rompimiento de la fase de hidrólisis forman los sustratos de las etapas intermedias del proceso de digestión anaerobia. Las bacterias acetógenas son la principal microflora y la producción de acetato es el principal resultado de su actividad; no obstante, también existe la formación de AGV de mayor peso molecular como propionato, butirato, iso-buirato, valerato e iso-valerato. Las principales rutas de formación de productos son esquematizados en la figura 1.9, y proceden vía fermentación, ó  $\beta$ -oxidación (Brock *et al.*, 1997; Pelmont, 1993; Gujer and Zehnder, 1983).

Los microorganismos anaerobios obtienen su energía por medio de reacciones de oxidorreducción, en donde los electrones son transferidos desde un intermediario orgánico, producto del rompimiento de azúcares y que actúa como donador a otro intermediario que es el aceptor en el proceso de digestión anaerobia. Los azúcares en general, son los más comunes sustratos en la fermentación anaerobia; sin embargo, algunos microorganismos anaerobios pueden realizar la fermentación de ácidos grasos, aminoácidos y purinas o pirimidinas (Lehninger, 1983). Las rutas predominantes en el rompimiento de la glucosa son la glucólisis y la fermentación alcohólica.

El proceso de  $\beta$ -oxidación (oxidación del  $\beta$ -carbono para producir  $\beta$ -cetoácido), tiene como resultado el rompimiento hasta acetato a partir de ácidos grasos de cadena larga. El primer paso en la reacción es la activación del ácido graso mediante su transformación en el correspondiente tioéster de CoA y es un proceso dependiente del ATP. El proceso de  $\beta$ -oxidación es cíclico, con una molécula de acetyl-CoA liberada con cada vuelta completa (Pelmont, 1993; Gujer and Zehnder, 1983).

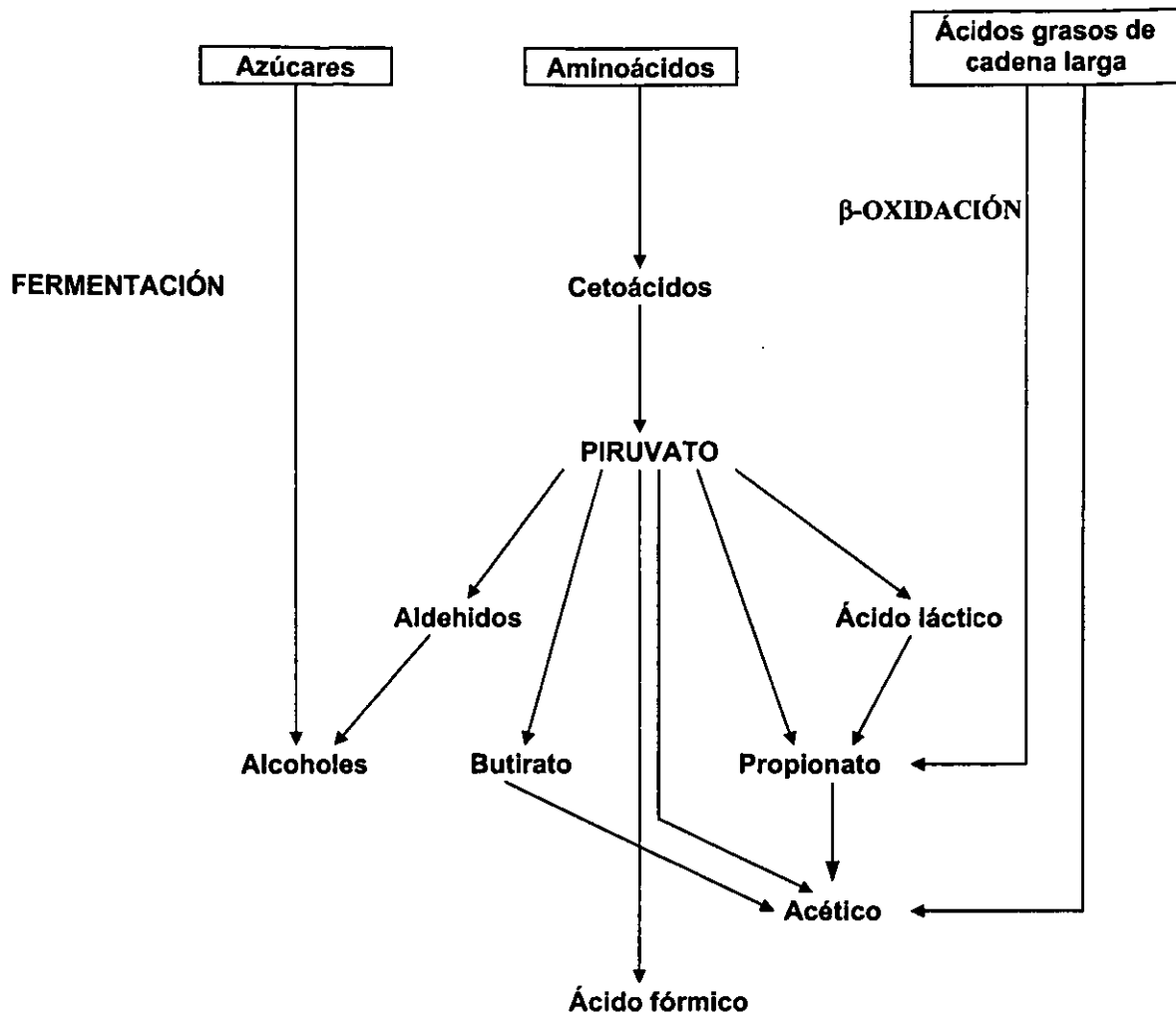


Figura 1.9. Principales rutas de formación de producto por las bacterias acetógenas

El proceso de  $\beta$ -oxidación (oxidación del  $\beta$ -carbono para producir  $\beta$ -cetoácido), tiene como resultado el rompimiento hasta acetato a partir de ácidos grasos de cadena larga. El primer paso en la reacción es la activación del ácido graso mediante su transformación en el correspondiente tioéster de CoA y es un proceso dependiente del ATP. El proceso de  $\beta$ -oxidación es cíclico, con una molécula de acetil-CoA liberada con cada vuelta completa (Pelmont, 1993).

De esta manera, la fermentación anaerobia puede describirse como una reacción microbiana en donde compuestos orgánicos actúan como donadores y aceptores de electrones, en tanto que en la  $\beta$ -oxidación, el principal donador de electrones es el  $H_2$ . Debe establecerse que la eliminación de electrones generados en la glucólisis durante el metabolismo formador de ácidos, puede ocurrir mediante el mecanismo de transferencia interespecie de hidrógeno, detallado más adelante.

El hidrógeno formado durante el proceso de fermentación se deriva de la deshidrogenación del piruvato (se desprenden dos átomos de hidrógeno), y es un mecanismo que no es inhibido por el incremento de la presión parcial de  $H_2$ . Durante el proceso de  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos, la oxidación de nucleótidos de pirimidina reducida y ferredoxina forman la fuente de  $H_2$ . La deshidrogenación del piruvato tiene un

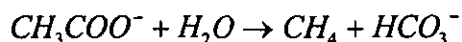
bajo potencial redox, en tanto que los valores más altos de la oxidación de NAD(P)H inhiben este proceso, ya que se incrementa la presión parcial de H<sub>2</sub>. La asimilación de H<sub>2</sub> por las bacterias metanógenas reductoras de CO<sub>2</sub> estimulan a los microorganismos acidógenos para utilizar la reacción de rompimiento de la ferredoxin-piruvato-liasa, en tanto que los electrones de potencial redox bajo permiten la reducción de protones a H<sub>2</sub> (Pelmont, 1993).

Se ha propuesto que las reacciones acopladas de oxidorreducción entre aminoácidos, actuando como donadores y aceptores de electrones, puede ser el mecanismo preferente en la digestión de proteínas o mezclas de aminoácidos. También se ha comprobado que la conversión de proteínas a AGV en un sistema de bacterias degradadoras de aminoácidos y metanógenas no se afecta por la inhibición de la metanogénesis con cloroformo. Esto es indicativo de que la degradación de los compuestos proteicos se lleva a cabo por procesos de oxidorreducción y que el rompimiento de proteínas es independiente de la actividad de bacterias metanógenas como aceptores de H<sub>2</sub> (Stronach *et al.*, 1986). El proceso de degradación de aminoácidos es realizado mediante la ruta Stickland, la cual requiere de una serie de reacciones. La primera de éstas requiere la participación de NAD<sup>+</sup> como aceptor primario de H<sub>2</sub> y un sistema de deshidrogenasas de aminoácidos. La segunda reacción comprende la reoxidación de NADPH<sub>2</sub> por el aminoácido aceptor. El ATP es generado durante la formación de ácido carboxílico (Brock and Madigan, 1991).

Se ha determinado que durante la degradación de ácidos grasos de cadena larga, la producción de H<sub>2</sub> inhibe la reacción misma. La formación de CH<sub>4</sub> a partir de H<sub>2</sub> es altamente dependiente del pH, y la acumulación de H<sub>2</sub> a bajos valores de pH inhibe la oxidación anaerobia. Cerca del 70% del CH<sub>4</sub> generado en la digestión se origina en el metabolismo del acetato e incluye el acetato formado por la degradación de AGV de mayor peso molecular. Se ha estimado que el 15% del CH<sub>4</sub> producido se origina a partir del propionato. La degradación del ácido butírico es similar a la degradación de AGV mayores, utilizando protones como único aceptor de electrones. La saturación de las rutas de reducción de protones o de transferencia de H<sub>2</sub> por incremento de los flujos glucolíticos, producen un incremento en el suministro de electrones. La adición excesiva de glucosa, induce la utilización de aceptores de electrones orgánicos en lugar de la reducción de protones, en consecuencia, se forman productos intermediarios donadores de electrones tales como propionato, butirato, etanol o lactato. Para el caso en que el acetato sea el principal intermediario durante el proceso de digestión, la microflora no será capaz de degradar otros productos orgánicos y por lo tanto de reducir el sobreflujo producto de la acidogénesis (Stronach *et al.*, 1986).

### 1.3.1.3. Bioquímica de la Metanogénesis

Como se ha mencionado, cerca del 70% del CH<sub>4</sub> producido en la digestión anaerobia es generado a partir del acetato. La reacción es una descarboxilación:



La metanogénesis ha sido descrita cinéticamente y se pueden observar 4 fases diferentes: 1) aceleración en la tasa metanógena aún con la adición de acetato, 2) crecimiento exponencial de las bacterias metanógenas, 3) tasa constante de producción de CH<sub>4</sub> y

4) un rápido descenso en la producción de  $\text{CH}_4$ , asociado a una reducción en la concentración de acetato. El principal organismo relacionado al rompimiento de acetato es *Methanosaeta soehngenii* (anteriormente *Methanothrix soehngenii*); esta especie ha sido reportada en varios tipos de reactores anaerobios en ausencia de *Methanosarcina*. Las reacciones de la vía de la acetil-CoA están íntimamente involucradas en la producción de  $\text{CH}_4$  a partir de compuestos metílicos y a partir de acetato. El desarrollo de metanógenos acetoclásticos está ligado también en las reacciones de la vía de la acetil-CoA. En estos microorganismos, el acetato se utiliza directamente para biosíntesis y producción de energía (Figura 1.10) (Daniels, 1993).

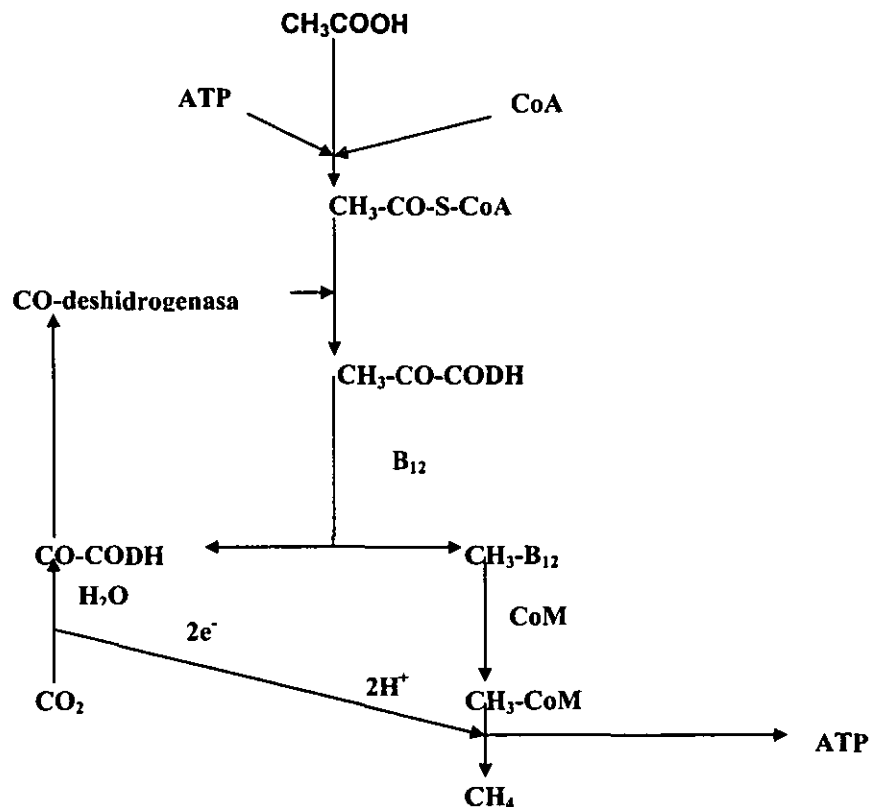
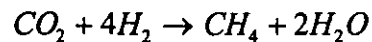


Figura 1.10. Metanogénesis acetoclástica (Brock and Madigan, 1991)

Se cree que el acetato activa la acetil-CoA, la cual interactúa con la monóxido de carbono deshidrogenasa, después de lo cual el grupo metilo del acetato se transfiere a la vitamina  $\text{B}_{12}$ , enzima de la vía de la acetil-CoA para producir  $\text{CH}_3\text{-B}_{12}$ . A partir de aquí, el grupo metilo se transfiere a la tetrahidrometanopterina y después a la CoM para dar  $\text{CH}_3\text{-CoM}$ . Este último se reduce a  $\text{CH}_4$  utilizando electrones generados por la oxidación del CO a  $\text{CO}_2$  por la acción de la CO-deshidrogenasa. Presumiblemente, la conversión de energía se logra en reacción acetoclástica por un gradiente de protones que se forma durante la etapa de la metil-reductasa. La síntesis de ATP se efectúa en las bacterias metanógenas por la vía de la fosforilación transportadora de electrones, dado que no hay un método conocido para el acoplamiento de la fosforilación a nivel substrato a la metanogénesis acetoclástica (Daniels, 1993; Whitman *et al.*, 1992; Bhatnagar *et al.*, 1991).

La producción de  $\text{CH}_4$  no sólo se lleva a cabo mediante el proceso de metanogénesis acetoclástica, también existe una ruta en la cual se produce  $\text{CH}_4$  a partir de la reducción

de CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> que es la metanogénesis reductora o hidrogenofila. Varios de los metanógenos examinados hasta la fecha son capaces de formar CH<sub>4</sub> mediante la oxidación del H<sub>2</sub> y la reducción del CO<sub>2</sub> y esta característica hace únicas a la gran variedad de bacterias metanógenas (Daniels, 1993; Bhatnagar *et al.*, 1991). Este proceso es altamente dependiente del pH del medio y se expresa por medio de la siguiente reacción:



En esta reacción, la CoM, presente sólo en metanógenos, realiza la transferencia de grupo metilo. La CoM es la enzima de menor peso molecular conocida, es excepcional por su alto contenido de azufre y es requerida por la metilcoenzima-M reductasa, una enzima universal para metanógenos y activa en la etapa final de la reducción del CO<sub>2</sub>. El proceso exacto de conversión de sustrato en esta reacción no ha sido esclarecido por completo; sin embargo, se sabe que los sustratos deben unirse a uno o más acarreadores antes de ser reducidos a CH<sub>4</sub> (Daniels, 1993; Whitman *et al.*, 1992; Bhatnagar *et al.*, 1991). El paso terminal en la reducción de CO<sub>2</sub> en *Methanobacterium* cepa MoH es como sigue:



En esta reacción, el ATP opera como el activador y la CoM como el acarreador. Se ha reportado que la formación de CH<sub>4</sub> por la vía del H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, es inhibida por la presencia de sulfatos en ambientes ricos en estos compuestos (Gottschalk and Peinemann, 1992).

De acuerdo con Gujer and Zehnder (1983), un sistema anaerobio termodinámicamente estable se produce únicamente si la oxidación de propionato, la descarboxilación de acetato y la oxidación de H<sub>2</sub>, están muy bien balanceadas. Estas reacciones deben ser exergónicas, pero el intervalo óptimo es extremadamente limitado y está gobernado por el acetato y propionato libres y las concentraciones de H<sub>2</sub>. La operación de sistemas de digestión anaerobia debe realizarse en un intervalo adecuado de estos compuestos, comúnmente, las concentraciones de acetato y de propionato no deben exceder de 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-3</sup> molar y la presión parcial de H<sub>2</sub> no mayor a 0.1 kN/m<sup>2</sup>.

La degradación de AGV (propiónico, butírico, valérico, caprónico, etc.) a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> es primero mediada por un grupo de bacterias anaerobias llamadas acetógenas productoras obligadas de H<sub>2</sub> (OPHA por sus siglas en inglés). Debido a que el H<sub>2</sub> inhibe las hidrogenasas de estas bacterias, se requiere que este producto sea removido del medio con ayuda de metanógenas o de otras consumidoras anaerobias de H<sub>2</sub>. Este mecanismo de transferencia de H<sub>2</sub> entre grupos bacterianos (relación sintrófica) es vital para la producción de CH<sub>4</sub> a partir de los productos intermedios que constituyen los AGV (Lowe *et al.*, 1993). Una falta implicaría la acumulación de AGV en el medio, con el consecuente consumo de alcalinidad y caída de pH.

### 1.3.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico, la temperatura es un parámetro importante que mejora ó inhibe a grupos microbianos específicos. Una razón son las muchas actividades que implican reacciones enzimáticas, y las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura en mayor o menos grado. Otra razón, son los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, y cada uno de esos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia (Lowe *et al.*, 1993).

La temperatura es sin duda el parámetro de control de mayor interés en el presente estudio por la influencia que ejerce en las constantes de equilibrio químico, produciendo desplazamientos en los valores de varios parámetros, como alcalinidad, pH, precipitaciones o redisoluciones de compuestos inorgánicos, cambios en la composición del gas por efecto de la diferente solubilidad, etc. Este parámetro también afecta a la actividad biológica, puede reducir e incluso llegar a remover especies microbianas completas.

En general, los lodos pueden ser tratados de manera más completa a temperaturas superiores a las del ambiente. De esta forma los microorganismos presentan dentro de ciertos límites, una tasa de mayor crecimiento poblacional, procesan mejor el lodo y más rápidamente entre más alta sea la temperatura, y dentro de ciertos límites óptimos (psicrofilia, mesofilia, termofilia e hipertermofilia).

Se ha estudiado la influencia de la temperatura en el grado de avance de la digestión anaerobia, presentándose resultados en función del grado de remoción de la materia orgánica con relación al tiempo de incubación del lodo primario, a varias temperaturas constantes. De estos resultados se observó (Catunda *et al.*, 1994) que a una temperatura de 35°C y con un tiempo de digestión de 10 a 20 días, se obtenía una remoción de la materia orgánica mayor del 60%. Sin embargo a temperaturas menores, los porcentajes de remoción máximos alcanzados eran inferiores a 60% y el tiempo de digestión necesario era mayor. Lo anterior se atribuye a una baja en la rapidez de la hidrólisis del material particulado.

Otro ejemplo es el estudio realizado por Rimkus *et al.* (1982), en un digester de lodos a escala piloto operado en el área de Chicago en donde se logró un decremento en el tiempo de retención hidráulico de 14 a 7 días sin pérdida en la eficiencia, con el incremento de la temperatura de operación de 37°C a 52 y 55°C. El digester fue autosuficiente en energía (produjo más CH<sub>4</sub> que el necesario para el calentamiento y mezclado). Un digester de doble capacidad representa obviamente un ahorro en los costos de construcción en un nuevo digester.

Es importante que la temperatura permanezca constante. Cada grupo de bacterias formadoras de CH<sub>4</sub> posee un grado de temperatura óptimo de crecimiento, que puede ser en un intervalo de mesofilia o termofilia. Si la temperatura fluctúa, no se pondrá mantener ninguna población metanógena de forma estable y una disminución en la población de este determinado grupo puede afectar al proceso de digestión anaerobia, reduciendo el grado de estabilización de lodos y por así, la formación de CH<sub>4</sub>.

Cuatro grupos generales son reconocidos, psicrófilos, mesófilos, termófilos e hipertermófilos:

**Psicrófilos:** Su intervalo de temperatura es de 5 a 20°C. Se desarrolla en procesos de operación a baja escala, como lo son los tanques sépticos y tanques Imhoff. A causa de su temperatura, los tiempos de retención de los lodos oscilan entre los 100 y 400 días (Bruce, 1984).

**Mesófilos:** Su intervalo de operación es de 20 a 40°C. Es el proceso más utilizado en las plantas de tratamiento anaerobias. El tiempo de retención de lodos se encuentran entre 15 y 20 días (Bruce, 1984).

**Termófilos:** Su intervalo de operación es de 50 a 60°C Es considerablemente más rápido que el sistema mesófilo. El control de la temperatura puede ser más difícil y costoso (Bruce, 1984).

**Hipertermófilos:** Su intervalo de temperatura esta más allá de los 80°C. Éste proceso únicamente se puede encontrar en la naturaleza, y realizarse de forma particular en estudios de laboratorio, sería muy difícil controlar el delicado equilibrio de un sistema así a gran escala (Brock *et al.*, 1997).

Las características del proceso anaerobio en un reactor mesofílico son similares a las presentes en su homólogo termofílico, excepto por que el segundo puede llegar a alcanzar un tiempo de retención celular hasta cuatro veces más corto. Este factor está determinado por la velocidad de crecimiento de las diferentes especies metanógenas, mesófilas y termófilas, frente a un mismo sustrato. Por otra parte, la digestión a altas temperaturas reduce la viscosidad del lodo y provoca la destrucción de patógenos (Zinder, 1990).

El efecto de la temperatura en microorganismos no adaptados a temperaturas superiores a las de su hábitat natural sufren un efecto de destrucción, tal y como ocurre con patógenos y parásitos. Hays (1976) asegura que la eficiencia en la destrucción de los huevos de helminto depende del tiempo (más de 30 minutos) y la temperatura (más de 60°C en anaerobiosis). Normalmente durante el arranque, las eficiencias de los digestores para alcanzar un alto porcentaje en la destrucción o inviabilidad de los huevos de helminto son bajas. Morris *et al.* (1986) reportan que en muestras extraídas con apenas 1 día de exposición en un proceso a condiciones de digestión anaerobia mesofílica a 35°C, no se reduce la infectividad, aunque decrece la viabilidad aproximadamente en un 60%. Por su parte, en digestión anaerobia mesofílica de una planta paquete operada a temperatura ambiente con un TRC de 16 días resultó un decremento de 83.4 y 73.1% en infectividad y viabilidad respectivamente.

La variación en la temperatura puede afectar directamente el funcionamiento del proceso termofílico que demuestra ser muy sensible a este efecto, como lo observó también Hamer *et al.* (1985). Se ha confirmado que una baja de temperatura en digestores termofílicos impide la destrucción y pérdida de viabilidad de los huevos de helminto. Morris *et al.* (1986) reportan que en pruebas de pasteurización durante tres horas a 60°C, se obtiene cero viabilidad e infectividad, demostrando el efecto que se tiene en la eficiencia del aumento de la temperatura. Finalmente, problemas de operación en digestores, como por ejemplo la falta de un mezclado eficiente, puede comprometer la eficiencia de la digestión anaerobia termofílica en la remoción y pérdida de la viabilidad potencial de los huevos de

helmintho y menos ser destruidos. Generalmente a temperaturas de 60°C por 30 minutos es suficiente para destruir huevos de *Ascaris* (Hays, 1976).

## **1.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS, OPCIÓN DE ESTABILIZACIÓN**

### **1.4.1. ASPECTOS DE INGENIERÍA**

La historia de los digestores anaerobios de lodos se inicia en la década de los cincuenta del siglo pasado con el desarrollo del primer tanque tipo fosa séptica diseñado para separar y retener los sólidos sedimentados del agua residual.

Posteriormente Donald Cameron construyó el primer tanque séptico en la ciudad de Exeter, Inglaterra, en 1895, del que recogió y utilizó el gas para el alumbrado de los alrededores de la planta. Entre 1909 y 1912 se llevaron a cabo experimentos en una instalación similar denominada tanque biolítico. Bajo un diseño semejante en 1940, Karl Imhoff patentó en Alemania un tanque de doble acción hoy día conocido como tanque Imhoff. En el periodo comprendido entre 1920 y 1935 se estudió ampliamente el proceso de digestión anaerobia y actualmente se puede considerar como una tecnología madura, con más de 50 años de aplicación en los lodos de aguas residuales municipales.

Existen básicamente dos variantes de digestores:

#### **1.4.1.1. Digestores de Baja Tasa**

Este proceso, conocido también como convencional, se lleva a cabo en un tanque sin calentamiento y sin mezclado. La estratificación del contenido del reactor hace que aproximadamente en el 50% del volumen se lleve a cabo la actividad biológica. Su aplicación es principalmente en plantas pequeñas. Una mejora consiste en la introducción de mezclado, lo que permite una mayor carga de alimentación, al favorecer la transferencia de masa en el digestor y emplear todo el volumen del líquido en la reacción.

En el caso de digestores convencionales (baja tasa), los tiempos de retención hidráulica se encuentran entre 30 y 90 días, con cargas recomendada entre 0.5 y 1.0 kgSSV/m<sup>3</sup>.d. Para digestores de baja tasa mezclados, las cargas son de 1.0 a 1.6 kgSSV/m<sup>3</sup>.d.

#### **1.4.1.2. Digestores de Alta Tasa**

En este caso, se aplica un mezclado al medio de reacción, ya sea mediante agitación mecánica, por la recirculación de gas o líquido, o una combinación de ambos. Además, esta variante cuenta con un sistema de calentamiento que lleva la temperatura del digestor entre 30 y 40°C. Por lo regular es seguido por un tanque, del mismo volumen, con objeto de separar los lodos digeridos evacuados en el efluente del primer reactor. En los digestores de alta tasa, las cargas van de 1.6 a 3.2 KgSSV/m<sup>3</sup>.d. con tiempos de retención hidráulica de 10 a 20 días.

Un desarrollo relativamente reciente en materia de digestión anaerobia de lodos es la introducción de los tanques de forma oval (reactores egg-shaped digester: ESD). Los ESD eliminan la formación de zonas muertas y promueven condiciones óptimas para la



circulación y mezclado de lodo, lo cual permite reducir significativamente los requerimientos energéticos para mezclado. La base cónica del digestor promueve la concentración del lodo en la parte inferior del mismo, por lo que éste es fácilmente mezclado o removido mediante un bombeo normal. De esta manera, prácticamente no existen problemas con lodos sedimentados y se asegura la utilización del volumen total del digestor, lo que permite la digestión completa de los lodos. Los digestores convencionales necesitan ser vaciados periódicamente para su limpieza, en tanto que los ESD pueden operar indefinidamente. Adicionalmente, esta característica permite también utilizar menos área para su construcción.

### 1.4.1.3. Diseño

Los métodos más utilizados para diseñar un digestor de lodos, son predominantemente empíricos. La mayoría se basan en el tiempo de retención celular o en la carga orgánica. Debido a que en un reactor completamente mezclado el tiempo de retención celular es igual al tiempo de retención hidráulico ( $\theta = \theta_c$ ), el volumen de un digestor de alta tasa puede ser calculado de la siguiente manera (Lettinga and Hulshoff pol, 1991):

$$V = Q \theta_c$$

donde:  $Q$  = gasto ( $m^3/d$ )  
 $\theta_c$  = tiempo de retención celular (d)  
 $V$  = Volumen ( $m^3$ )

Los valores de  $\theta_c$  recomendados se muestran en la tabla 1.9.

Tabla 1.9. Tiempos de retención celular para el diseño de digestores de lodos completamente mezclados (Metcalf and Eddy, 1996)

| TEMPERATURA, °C | $\theta_c$ PARA DISEÑO, (D) |
|-----------------|-----------------------------|
| 18              | 28                          |
| 24              | 20                          |
| 30              | 14                          |
| 35              | 10                          |
| 40              | 10                          |

Para el diseño con base en la carga orgánica, se acostumbra utilizar la carga orgánica volumétrica ( $kgSSV/m^3.d$ ). El tiempo de retención hidráulica debe ser siempre considerado para evitar el lavado de los microorganismos activos. La tabla 1.10 muestra la relación entre la concentración de sólidos en el influente y la carga orgánica a diferentes tiempos de retención.

De igual forma resume las condiciones ambientales y de operación para obtener la máxima producción de  $CH_4$  durante la digestión anaerobia de lodos de purga. La tabla 1.11 muestra las condiciones óptimas de operación.

La digestión anaerobia puede llevarse a cabo dentro de un intervalo de pH de 6.2 a 7.8, siendo el óptimo entre 7.0 y 7.2. Fuera de éste, la digestión puede continuar aunque en forma ineficiente hasta un pH de 6.2, en donde las bacterias metanogénicas son afectadas severamente. La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), producto de la fermentación, pueden llegar a acidificar el reactor provocando el deterioro del proceso. Su alta concentración provoca la destrucción de la capacidad amortiguadora del reactor. En

condiciones normales de operación, la concentración de AGV en el efluente debe ser muy baja o inapreciable, inferior a 100 mg/l. Su incremento puede deberse a una sobrecarga en la alimentación o una inhibición de las metanobacterias.

La alcalinidad representa la capacidad amortiguadora del sistema que lo mantiene en condiciones óptimas de pH; su acción amortiguadora frente a los cambios bruscos de pH se debe a las reacciones ácido-base. Es aquí en donde se hace importante, el conocer el valor de la relación de la alcalinidad del proceso. Este parámetro indica el nivel de equilibrio amortiguador de los bicarbonatos y los AGV presentes en el medio; puede de forma confiable y rápida indicar la capacidad del sistema anaerobio para autoregular su pH así como detectar desequilibrio entre las bacterias formadoras de ácidos y las metanogénicas

Tabla 1.10. Efecto de la concentración de sólidos y el tiempo de retención sobre la carga orgánica en digestores anaerobios (Metcalf and Eddy, 1996)

| % SST en el lodo | Carga orgánica (kgSSV/m <sup>3</sup> .d) |                  |                  |                  |
|------------------|--|------------------|------------------|------------------|
|                  | TRH:10 d (37°C)                          | TRH: 12 d (35°C) | TRH: 15 d (30°C) | TRH: 20 d (25°C) |
| 4                | 3.06                                     | 2.55             | 2.04             | 1.53             |
| 5                | 3.83                                     | 3.19             | 2.55             | 1.91             |
| 6                | 4.59                                     | 3.83             | 3.06             | 2.30             |
| (*)              |  |                  |                  |                  |
| 7                | 5.36                                     | 4.46             | 3.57             | 2.68             |
| 8                | 6.12                                     | 5.10             | 4.08             | 3.06             |
| 9                | 6.89                                     | 5.74             | 4.59             | 3.44             |
| 10               | 7.65                                     | 6.38             | 5.10             | 3.83             |

(\*) Límite recomendado para evitar problemas en el mezclado y en la operación de los equipos de bombeo   NOTA: Para SSV = 0.75 SST

Tabla 1.11. Condiciones óptimas ambientales y de operación durante la digestión anaerobia de lodos de purga (Malina and Pohland, 1992)

| VARIABLE                                  | ÓPTIMO        | INTERVALO     |
|---|---------------|---------------|
| pH  | 6.8 – 7.4     | 6.4 – 7.8     |
| Potencial oxido-reducción* (mV)           | -520 a -530   | -490 a -550   |
| Acidos volátiles (mg/l de ácido acético)  | 50 – 500      |               |
| Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)     | 1,500 – 3,000 | 1,000 – 5,000 |
| Temperatura:                              |               |               |
| Mesófila                                  | 32 – 38°C     | 20 – 40°C     |
| Termófila                                 | 50 – 56°C     | 45 – 60°C     |
| Tiempo de retención hidráulica (días)     | 10 – 15       | 7 – 30        |
| Composición del gas                       |               |               |
| Metano (CH <sub>4</sub> ) (%)             | 65 – 70       | 60 – 75       |
| Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (%) | 30 - 35       | 25 - 40       |

\* Lectura directa con el electrodo Ag/AgCl<sub>3</sub>

#### 1.4.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA TERMOFÍLICA DE LODOS

En temperaturas por arriba de 60°C causan un drástico decaimiento en la eficiencia de la digestión (Varel *et al.*, 1980). No se presentan metanógenas acetofílicas en temperaturas por arriba de 60-65°C (Zinder, 1990).

La ventaja fundamental de la digestión termofílica sobre la mesofílica son el: el incremento de las tasas de reacción o bien de la capacidad de tratamiento del lodo en un menor tiempo de retención, (por ejemplo, reducción de 14 a 7 días), debido a un rápido crecimiento de bacterias metanogénicas acetotróficas y otros microorganismos consumidores de ácidos como los sintróficos oxidadores de ácidos grasos (Ahring and Westermann, 1987). Por esta razón, el tamaño de los digestores se reduce, por lo que se requiere de una menor inversión para la construcción de la planta (Rimkus *et al.*, 1982). Por otro lado, se obtiene una mayor destrucción de patógenos ya que se presentan condiciones de pasteurización en el lodo; el lodo termofílico presenta una menor viscosidad con lo cual se facilitan las condiciones de operación y se obtiene una mejor deshidratación del lodo.

En diferentes países se considera al proceso anaerobio termofílico eficiente para lograr una buena estabilización y desinfección de lodos residuales, reduciendo su riesgo a la salud al ser aplicados a tierras de cultivo y de restauración.

Dicho proceso se ha aplicado a escala de laboratorio, piloto y a gran escala, obteniendo una alta remoción de Sólidos Volátiles entre 60 y 85% con un alto grado de desinfección. En tales casos se ha operado el proceso utilizando diferentes diseños como son 1) digestión anaerobia termofílica convencional, seguida por un proceso anaerobio termofílico extendido (en varias etapas) con flujo continuo mezclado completo y en cortos TRH, 2) tratamiento en dos etapas utilizando una digestión anaerobia termofílica más una mesofílica.

Los parámetros de operación para dichos procesos han sido los siguientes: Utilizan lodo espesado con los suficientes nutrientes, en la mayoría de los casos son mezclas de lodos primarios y secundarios; en algunos otros se ha adicionado un porcentaje de estiércol en la mezcla. Los intervalos para la temperatura van de 55 a 60°C, con un pH alrededor de 7.5, un TRH entre 10 y 21 d reduciéndose en la segunda etapa (en los sistema de dos etapas) entre 5.5 a 3 d, el intervalo de alcalinidad varía entre 1,500 y 3,700 mgCaCO<sub>3</sub>/L; el tipo de reactores que se utilizan son tanto de baja y alta tasa.

En la tabla 1.12, se mencionan algunas de las Archeobacterias hasta el momento reportadas en lodos en digestión. También se reportan microorganismos pertenecientes a las Eubacterias (Tabla 1.13) para ambos casos identificadas en digestión termofílica.

Tabla 1.12. Arqueobacterias anaerobias termofilicas

| Microorganismos                                  | Origen                   | Substratos   | pH      | Temperatura óptima (°C) |
|--|--------------------------|--|---------|-------------------------|
| <i>Methanobacterium</i> CB12                     | Biodigestor <sup>1</sup> | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> ,F                         | 7.4     | 56                      |
| <i>Methanobacterium</i> FTF                      | Biodigestor <sup>2</sup> | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> ,F                         | 7.5     | 55                      |
| <i>M. thermoaggregans</i> <sup>3</sup>           | Espuma                   | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                            | 7.0-7.5 | 65                      |
| <i>M. thermoalcaliphilum</i> <sup>3</sup>        | Biodigestor              | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                            | 7.5-8.5 | 60                      |
| <i>M. thermoautotrophicum</i> <sup>3</sup>       | Lodo de desecho          | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                            | 7.2-7.6 | 65-75                   |
| <i>M. thermoformicum</i>                         | Biodigestor <sup>2</sup> | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> ,F                         | 7.0-8.0 | 55                      |
| <i>M. wolfei</i> <sup>3</sup>                    | Lodo de desecho          | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                            | 7.0-7.5 | 55-65                   |
| <i>Methanogenium</i><br><i>thermophilum</i> UCLA | Biodigestor              | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> ,F                         | 7.2     | 55-60                   |
| <i>Methanosarcina</i> CHTI 55                    | Sedimentos               |  |         |                         |
| <i>Methanosarcina</i><br><i>thermophila</i>      | Biodigestor <sup>2</sup> | A, Met, Metil  | 6.8     | 57                      |
| <i>Methanothrix</i> <sup>4</sup>                 | Biodigestor <sup>2</sup> | A, Met, Metil,<br>Trimetil,H <sub>2</sub> /Co <sub>2</sub> |         |                         |
| <i>thermoacetophila</i>                          | Lodo                     | ND   | ND      | 62                      |
| <i>Methanothrix</i> CALS-1                       | Biodigestor <sup>2</sup> | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                            | 6.5     | 60-62                   |
| <i>Methanosaeta</i> PT                           | Biodigestor <sup>2</sup> | H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                            | 6.7     | 55                      |

Leyendas: <sup>1</sup>mesofilico, <sup>2</sup>termofilico, <sup>3</sup>Autotrófos obligatorios, <sup>4</sup>nueva denominación; A-Acetato, F-Formiato, Met-Metanol.

Tabla 1.13. Eubacterias presentes en procesos anaerobios termofílicos

| Microorganismos                        | Origen                                      | Substrato   | Productos  | pH      | Temperatura óptima °C |
|--|---|---|--|---------|-----------------------|
| <i>Acetobacterium fecalis</i>          | lodo de desecho                             | azúcares  | A, L, E, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                     | 6.5-7.0 | 70-73                 |
| <i>Acetomicrobium flavidum</i>         | biodigestor de lodo de desecho <sup>1</sup> | azúcares  | A, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                           | 6.2-8.0 | 58                    |
| <i>Acetothermus paucivorans</i>        | lodo de desecho                             | azúcares  | A, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                           | 7.0-8.0 | 58                    |
| <i>Clostridium stercorarium</i>        | composta                                    | celulosa, xilana, azúcares  | A, L, E, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                     | 7.3     | 65                    |
| <i>Cthermoaceticum</i>                 | espuma                                      | piruvato, glucosa   | A, CO <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , CO   | ND      | 55-60                 |
| <i>C. thermoautotrophicum</i>          | sedimentos                                  | azúcares  | A, H <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , CO    | 5.7     | 55-60                 |
| <i>C. thermobutyricum</i>              | espuma                                      | azúcares  | B, A, L, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                     | 6.8-7.1 | 55                    |
| <i>C thermocellum</i>                  | digestor de lodo de desecho                 | azúcar, metanol<br>celulosa,<br>hemicelulosa,<br>glicerato, formiato    | A, L, E, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                     | 7       | 60-64                 |
| <i>C. thermohydrosulfuricum</i>        | azúcar de plantas                           | almidón, azúcares,<br>sulfito,<br>Tiosulfato                            | A, L, E, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> S | 6.9-7.5 | 68                    |
| <i>C. thermolacticum</i>               | espuma de biodigestor <sup>1</sup>          | carbohidratos   | A, B, L, E, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                  | 7.0-7.2 | 60-65                 |
| <i>C. thermosaccharolyticum</i>        | azúcar de plantas                           | dextrina, pectina<br>sulfito, tiosulfato                                | A, B, L, E,<br>H <sub>2</sub> /Suc, H <sub>2</sub> S         | ND      | 55-62                 |
| <i>C. thermosuccinogenes</i>           | espuma                                      | azúcares,   | F, A, L, Suc, H <sub>2</sub>                                 | 7.6     | 58                    |
| <i>Desulfotomaculum nigrificans</i>    | biodigestor <sup>1</sup>                    | L, P, H <sub>2</sub> , sulfato  | H <sub>2</sub> S   | ND      | 55                    |
| <i>D. thermoacetoxidans</i>            | biodigestor <sup>1</sup>                    | L, P, A, E, sulfato<br>tiosulfato, S<br>H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> | A, H <sub>2</sub> S  | 6.5     | 55-60                 |
| <i>D. thermobenzoico</i>               | biodigestor <sup>1</sup>                    | Ben, a. grasos,<br>sulfato, sulfito<br>tiosulfato                       | A, CO <sub>2</sub>   | 7.2     | 6.2                   |
| <i>Desulfovibrio thermophilus</i>      | ND  | H <sub>2</sub> L, Pir   | ND   | ND      | 65                    |
| <i>Selenomonas acidominovorans</i>     | biodigestor                                 | Aminoácidos,<br>azúcares<br>glicerol                                    | ácidos grasos,<br>P  | ND      | 55                    |
| <i>Thermoanaerobacter ethanolicus</i>  | sedimentos                                  | Glucosa   | E, L, CO <sub>2</sub> ,<br>A, H <sub>2</sub> , i-But         | ND      | 69                    |
| <i>Thermobacteroides proteolyticus</i> | biodigestor                                 | proteínas,<br>peptidos,<br>extracto<br>de levadura                      | A, H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>                           | 7.5     | 63                    |

**Leyendas,**<sup>1</sup> termofílico A-Acetato, B-Butirato, Ben-Benzoato, E-Etanol, F-Formiato, hemicelulosa, i-But-isobutirato, L-Lactato, Pir-Piruvato, P-Propionato; Suc-Succinato.

En la tabla 1.14, se muestran algunas de las experiencias reportadas sobre digestión anaerobia termofílica de lodos, de entre las cuales destaca la planta a gran escala del distrito de Vancouver, USA, estudio en donde se pretende obtener biosólidos del tipo Clase "A". También se reportan experiencias sobre digestión anaerobia en procesos combinados como se muestran en la tabla 1.15. Este método combina 2 procesos diferentes de digestión para lograr la estabilización y desinfección de los lodos. Se ha visto que el utilizar pre-digestión termofílica, más post-digestión mesofílica logra buenos resultados.

Tabla 1.14. Digestión Anaerobia Termofílica en Lodos

| Diseño y tipo de proceso   | Volumen (m <sup>3</sup> )                       | TRH                              | Temperatura   | Alimento y/o inóculo  | Resultados  | Referencias                         |
|--|---|----------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|
| Planta Annacis Island, (Vancouver)<br>Proceso termofílico anaerobio convencional, seguido por un proceso termofílico extendido, (en 3 etapas, flujo continuo, mezclado completo) | 12,000 m <sup>3</sup><br>(en 4 reactores)       | 21.5-d<br>(para todo el proceso) | 54.6 °C   | Alimento: mezcla de lodo primario y secundario espesados, aplicado continuamente  | Gas prod 1.00m <sup>3</sup> /KgSVrem<br>E% (sv) 60%<br>AGV 452 mg/L<br>CO <sub>2</sub> 37.4%<br>Salmonella: No se detecto<br>C. fecales: < limite establecido para lodos Clase A    | Steve Krugel. <i>et al.</i> , 1998. |
| Planta Lions Gate. (Vancouver)<br>Proceso termofílico anaerobio, en 2 digestores en serie, con flujo continuo y mezcla completa  | 2 digestores de 3100 m <sup>3</sup> cada uno    | 44-d para todo el proceso        | 55.8 °C   | Inóculo: lodo digerido bajo mesofilia<br>Alimento: Lodo primario municipal.   | Gas prod 0.65 m <sup>3</sup> /KgSV des<br>E% (SV) 80%<br>AGV 567 mg/L<br>CO <sub>2</sub> 35.4%<br>Salmonella: No se detectó.<br>C. fecales: < limite establecido para lodos Clase A | Steve Krugel. <i>et al.</i> , 1998. |
| Escala piloto de mezcla completa   | 1 m <sup>3</sup>                                | 11.6-d                           | 55.5 °C   | Inóculo: Lodo municipal producido en una planta piloto anaerobia termofílica.<br>ST 150 g/l<br>STV 55%<br>Alimento: Lodo secundario municipal<br>ST 84.4 g/l<br>STV 65.1%<br>Carga Orgánica (condiciones de operación) 4.8 KgSTV/m <sup>3</sup> d   | AGVT: 159 mgHAc/L<br>Producción de gas: 0.9-1.3 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d<br>Prod. específica de Gas: 0.19 m <sup>3</sup> /Kg AGVT<br>CH <sub>4</sub> 65.4 %                 | Cecchi <i>et al.</i> , 1992.        |
| Escala de laboratorio dos reactores con flujo continuo   | Reactor-1<br>2.15 L<br><br>Reactor 2<br>2.075 L | 9.41 d                           | 55 °C   | Inóculo: lodos municipales mesofilos % SV 4.8<br>Alimento. 25% de peso húmedo, carga orgánica 6.8 KgSV/m <sup>3</sup> .d (el R-2 recibió 30g más que el R-1)  | Mayor eficiencia de estabilización en R-2 que en R-1  | Lepisto and Rintala, 1995           |
| Escala de laboratorio, 2 reactores tipo Batch y semicontinuo.  | 2-L para cada reactor                           | 10-d                             | Reactor Batch 57 ± 0.2 °C<br>Reactor semicontinuo 55.5 °C | Inoculo. Batch 1, 2/3 de lodo crudo primario y 1/3 de lodo digerido por mesofilia.<br>R. Semicontinuo lodo proveniente del reactor Batch 1.<br>Alimento lodo primario digerido en mesofilia anaerobia en dos fases, para ambos digestores.  | Remoción del reactor Bach 2: SV 43.6%<br>Gas/SVrem 0.89 m <sup>3</sup> /Kg<br>Nivel de coliformes fecales por abajo del limite de la Clase A  | Aitken and Mullennix, 1992.         |
| Escala de laboratorio, se utilizaron 4 reactores de mezclado completo  | 2.25 L<br>Biomasa activa entre 1800 y 2.000 Kg  | 25-d                             | 53 a 60 °C  | Inóculo Carga org. de 6 a 8.5 gBVS Kg/m.d<br>Alimento Carga org. de 65 a 85 Kg/d en una mezcla de papel-agua+nutrientes<br>R-1) Fracción orgánica biodegradable (BOF)/Sólidos municipales de aguas (MSW)<br>R-2) BOF/MSW y lodo de plantas de tratamiento<br>R-3) BOF/MSW más lodo y estiércol<br>R-4) BOF/MSW, lodo y solución de nutrientes | Se obtuvo la más alta eficiencia en R-3 con una producción de gas de 0.75 m <sup>3</sup> /kg BVS adicionado/d y una Remoción de sólidos del 85%                                     | Kayhanian and Rich 1995             |

Tabla 1.15. Experiencias de Digestión en 2 Etapas.

| Diseño y tipo de proceso   | Volumen (m <sup>3</sup> )                         |            | TRH (d)   |        | Temperatura | Alimento y/o inóculo |                      | Resultados                          |                                     |                                 | Cita |                            |
|--|---|------------|-----------|--------|-------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------|----------------------------|
|  | Total   | Termofilia | Mesofilia | Termof | Mesof       | Mesofilia            | ST kg/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> /d                   | Producción de Gas m <sup>3</sup> /d | Producción de CO <sub>2</sub> % |      | Degradación de ST%         |
| Diseño de 10 plantas a gran escala en Alemania                               | De 10 plantas, sólo 5 alcanzaron alta eficiencia. |            |           |        |             |                      |                      |                                     |                                     |                                 |      | Oles. <i>et al.</i> , 1997 |
| Altenmarkt   | 1x60  | 1x300      | 3.5       | 17     | 35 a 67 °C  | 49                   | 17                   | 233                                 | 32                                  | 54                              |      |                            |
| Auenheim   | 1x126   | 1x600      | 3         | 15     |             | 55-65                | 40                   | 450                                 | --                                  | 60                              |      |                            |
| Erkelenz   | 2x110   | 1x1600     | 2.6       | 19     |             | 35-50                | 84                   | 550                                 | 30                                  | 60                              |      |                            |
| Geseke   | 1x120   | 1x1650     | 4         | 55     | Termofilia  | 10                   | 30                   | 260                                 | 34                                  | 47                              |      |                            |
| Osterode   | 2x130   | 1x900      | 4         | 14     | 55 a 60 °C  | 25-35                | 63                   | 755                                 | 34                                  | 55                              |      |                            |
| Reactores Egg-Shaped (1 termófilo y 4 mesófilos) en la planta Köln-Stammheim | Termofilia  | Mesofilia  | Termof    | Mesof  | Termofilia  | Inóculo:             |                      | Producción de Gas m <sup>3</sup> /d | Producción de CO <sub>2</sub> %     | Degradación de ST%              |      | Oles. <i>et al.</i> , 1997 |
|  | 1x11,000  | 4x11,000   | 5.5       | 21     | 55 a 60 °C  | lodo crudo municipal |                      |                                     |                                     |                                 |      |                            |
|  |   |            |           |        | Mesofilia   |                      |                      |                                     |                                     |                                 |      |                            |
|  |   |            |           |        | 35 a 37 °C  | ST Kg/m <sup>3</sup> | 60                   | 32.106                              | 34                                  | 60                              |      |                            |
|  |   |            |           |        |             | V m <sup>3</sup> /d  | 2.01                 |                                     |                                     |                                 |      |                            |



## **2. OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eficiencia de remoción de los microorganismos patógenos y parásitos (coliformes fecales y huevos de helminto), mediante digestión anaerobia termofílica y mesofílica, usando dos tipos de lodos municipales de desecho.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Comparación de 2 técnicas de concentración y cuantificación de huevos de helmintos presentes en los lodos, con sus respectivos métodos para determinación de la viabilidad
- Evaluación del funcionamiento de digestores anaerobios para el tratamiento de ambos tipos de lodos de desecho bajo condiciones de termofilia (55°C) y mesofilia (35°C).
- Determinación de las características físicas, químicas y biológicas de ambos tipos de biosólidos generados a partir de la digestión anaerobia en condiciones de termofilia (55°C) y mesofilia (35°C).

### **2.3. ALCANCES**

El alcance del proyecto es el siguiente:

- Evaluar la factibilidad técnica de generar biosólidos libres de riesgos para la salud pública y el medio, mediante la digestión anaerobia termofílica.

### 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

El trabajo se divide en dos partes principales, la primera de ellas corresponde al **arranque** de los digestores. Esta comprende el montaje de los digestores y definición de los valores de los parámetros de control, en los cuales se inició cada digestor (establecimiento de los criterios de operación, y análisis del proceso de aclimatación; construcción de los digestores y pruebas hidráulicas y eléctricas, e inoculación y arranque). A su vez la segunda parte corresponde a determinar la **eficiencia en la remoción** de microorganismos patógenos y parásitos, principales parámetros de estudio en el presente trabajo, en donde se incluye la evaluación de una técnica de concentración/cuantificación de huevos de helmintos presentes en lodos.

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron digestores anaerobios para el tratamiento de lodos con una geometría oval (*Egg-Shaped Digesters*; ESD) (Bode and Klauwe, 1999; Dichtl, 1997), ya que ha sido demostrado que dicha geometría tiene ventajas operacionales y de mantenimiento importantes en relación con los digestores convencionales. Se operaron 4 reactores anaerobios a nivel laboratorio (Figura 3.1), de acuerdo con las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.1.

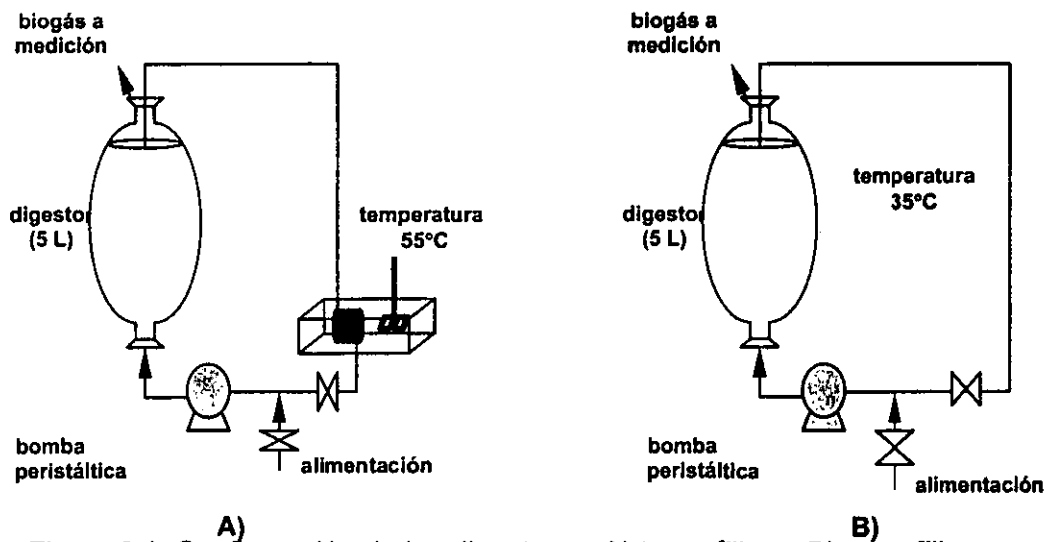


Figura 3.1. Configuración de los digestores: A) termofilicos; B) mesofilicos

Los digestores están construidos en pasta de cerámica con un vidriado interno como revestimiento. En la parte superior, cada digestor se encuentra sellado con un tapón de hule que tiene dos perforaciones; una de ella sirve para la evacuación del biogás hacia un dispositivo de medición y la segunda sirve para la recirculación del lodo hacia la bomba peristáltica. En la parte inferior presentan un juego de piezas de PVC conectados a una manguera que recicla el lodo a través de una bomba. Estas últimas son de tipo peristálticas de la marca Masterflex de 1/10 hp, y controlador independiente de 6 a 600 rpm. Los cabezales son del tipo de recambio fácil, con ajustador para manguera del

numero 13 al 18 (1/16 a 3/8 in) con rotor de acero inoxidable y capacidad para trabajo en continuo de presión máxima de 1.7 bar.

Tabla 3.1. Condiciones de operación.

| Clave de digestor | Alimentación | Temperatura (°C) |
|-------------------|--------------|------------------|
| M1                | LB           | 35               |
| M2                | LTPA         | 35               |
| T1                | LB           | 55               |
| T2                | LTPA         | 55               |

LTPA, Lodo de Tratamiento Primario Avanzado; LB, Lodo Biológico

La medición del biogás se hace con una probeta invertida sumergida en un recipiente con agua, en la cual es posible cuantificar el volumen de biogás capturado. Este sistema está precedido por una trampa de humedad que también funciona como sello hidráulico y un septo de hule para la toma de muestra del biogás, con el fin de conocer su composición por cromatografía de gases.

Todo el dispositivo se encuentra en un cuarto de temperatura controlada ( $35^{\circ}\text{C} \pm 3$ ); a su vez, los digestores termofílicos cuentan además con un sistema de calefacción desarrollado específicamente para este estudio. El equipo es electrónico autoajustable a posibles variaciones de temperatura ( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ) y cuenta con alarmas para indicar variaciones de temperatura, nivel del líquido de calentamiento (aceite mineral NF 55 de uso comercial), cambios de voltaje, funcionamiento de dos resistencias (de uso comercial, de 150 watts cada una) y del recirculador. El arreglo se muestra en la figura 3.2.

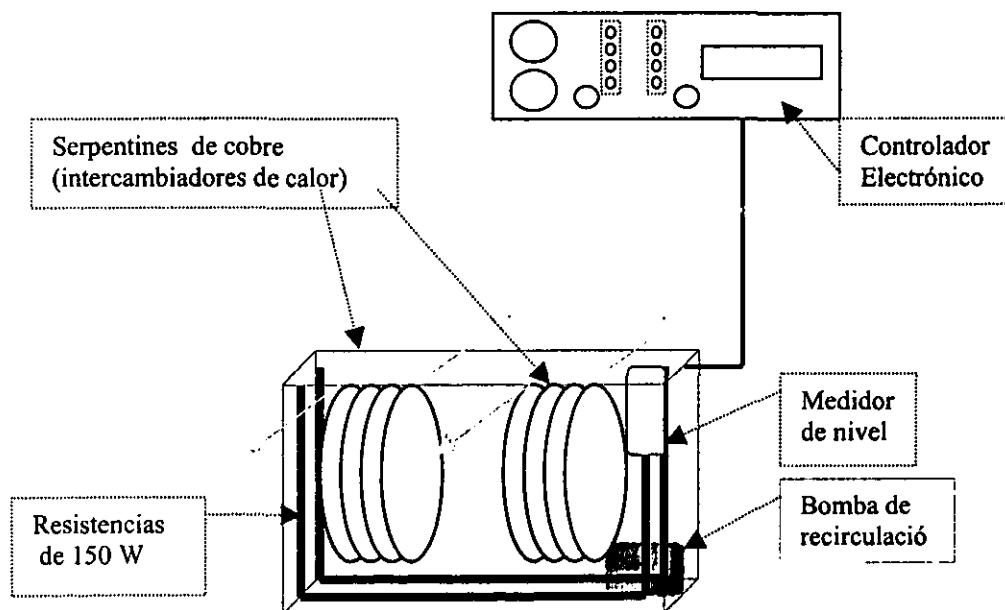


Figura 3.2. Diagrama del Intercambiador de calor en los digestores termófilos.

El equipo está integrado por un soporte de aluminio de forma rectangular, sobre el cual descansan dos serpentines de tubo de cobre de 1/2 in y 2.3 m de longitud, por debajo de

estos serpentines y a lo largo de la estructura atraviesan dos resistencias de 150 watts, las cuales se encuentran conectadas en paralelo y aisladas en los puntos en donde se unen a la estructura de aluminio. El medidor de nivel se ubica de forma que el líquido siempre cubre los serpentines. El motor de mezclado del baño por recirculación es una bomba sumergible estándar de uso comercial en los acuarios. El sistema funciona con 115 volts.

Los digestores termofílicos se encuentran aislados por un chaleco térmico hecho con papel, algodón y aluminio, y sus mangueras de recirculación con un tubo térmico de polietileno.

### **3.2. CRITERIOS DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DIGESTORES**

En esta etapa del estudio fue necesario conocer primero las particularidades de operación del sistema de digestores de manera general e individual. Se determinaron las principales anomalías de funcionamiento del sistema, ligadas o no a la operación y a la carga orgánica de alimento, para lo cual se realizaron pruebas hidráulicas y eléctricas. En especial, frente a la falla del equipo comercial, el sistema de calefacción tuvo que ser desarrollado para esta aplicación.

La temperatura es el principal parámetro de control de este estudio por su efecto directo sobre la actividad biológica, es por ello que en este punto es imprescindible la precisión del sistema de calefacción diseñado para este propósito.

Como se mencionó, la digestión anaerobia puede llevarse a cabo dentro de un intervalo de pH de 6.2 a 7.8, siendo el óptimo entre 7.0 y 7.2. Fuera de éste, la digestión puede continuar aunque en forma ineficiente hasta un pH de 6.2, en donde las bacterias metanogénicas son afectadas severamente. La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), producto de la fermentación, pueden llegar a acidificar el reactor provocando el deterioro del proceso. Su alta concentración provoca la destrucción de la capacidad amortiguadora del reactor. En condiciones normales de operación, la concentración de AGV en el efluente debe ser muy baja o inapreciable, inferior a 100 mg/l. Su incremento puede deberse a una sobrecarga en la alimentación o una inhibición de las metanobacterias.

La alcalinidad representa la capacidad amortiguadora del sistema que lo mantiene en condiciones óptimas de pH; su acción amortiguadora frente a los cambios bruscos de pH se debe a las reacciones ácido-base. Es aquí en donde se hace importante, el conocer el valor de la relación de la alcalinidad del proceso, valor alfa ( $\alpha$ ). Este parámetro indica el nivel de equilibrio amortiguador de los bicarbonatos y los AGV presentes en el medio; puede de forma confiable y rápida indicar la capacidad del sistema anaerobio para autoregular su pH así como detectar desequilibrio entre las bacterias formadoras de ácidos y las metanogénicas. Este valor de confianza se interpreta dentro de un intervalo de 0.0 a 1, indicando una mejor relación de alcalinidades mientras se establezca más cerca de 1, siendo un valor óptimo para la digestión anaerobia entre 0.6 y 0.8 (NOYOLA).

Los parámetros determinados para evaluar la operación de los digestores se presentan en la tabla 3.2. Estos parámetros se midieron principalmente en los lodos de purga de cada digestor; en el caso de los lodos de alimentación, su evaluación fue solo en cada cambio de lote de los lodos crudos.

Tabla 3.2. Parámetros y análisis evaluados en el presente estudio

| PARÁMETROS      | ANÁLISIS   | MEDICIÓN              |
|-----------------|--|-----------------------|
| <b>Físicos</b>  | Temperatura,   | Constante             |
|                 | pH,  | Diaria                |
|                 | Sólidos (Todo el grupo)  | Tres veces por semana |
| <b>Químicos</b> | Alcalinidad  | Diaria                |
|                 | Relación alcanidades   | Diaria                |
|                 | Producción y composición del biogás (CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> ) | Diaria                |

### 3.3. INÓCULO Y LODOS DE ALIMENTACIÓN

En esta primera parte del estudio era importante obtener un lodo que presentara las características microbiológicas adecuadas para operar a temperaturas de 35 y 55°C. El objetivo era asegurar la aportación de poblaciones microbianas anaerobias que permitieran reducir los tiempos de aclimatación de las bacterias involucradas, principalmente los grupos en asociación sintrófica, acetógenos y metanógenos.

#### 3.3.1. PREPARACIÓN DEL INÓCULO

Se obtuvo un lote de 200 litros de lodo anaerobio de una planta de tratamiento anaerobio de aguas residuales municipales de la población de Atlamaxac, (Tlaxcala), en botes de plástico a temperatura ambiente y posteriormente almacenados en frío. La planta cuenta con un reactor anaerobio de flujo ascendente, del cual se puede purgar lodo en cinco niveles. El punto de muestreo fue en el segundo nivel inferior, a 60 cm del fondo del reactor (nivel 4). El procedimiento para su preparación se describe a continuación:

1. De uno de los recipientes del mismo lote de muestra, se homogeneizó el lodo y fue cribado en 2 tamices de 4 y 2 mm de poro de malla, respectivamente.
2. Se dejó sedimentar por 6 horas, y se retiró el sobrenadante. El lodo se recuperó en cuatro recipientes de 8 litros y se tomó una muestra para la caracterización de los lodos. La operación se repitió hasta obtener un total de 28 litros.
3. El lodo contenido en 2 recipientes de 8 litros se almacenó en el cuarto caliente a una temperatura ambiente de 35°C y 2 se colocaron en la estufa a 55°C en batch durante 27 días, hasta el momento de ser inoculados los digestores.

#### 3.3.2. PREPARACIÓN DE LODO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO (TPA) PARA ALIMENTACIÓN DE LOS DIGESTORES

Para la alimentación de los digestores M2 y T2 al inicio del proyecto, fue necesario producir lodos fisicoquímicos del tratamiento primario avanzado, en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria.

1. La producción de lodos, se efectuó en una tolva de un metro cúbico instalada en la planta de Ciudad Universitaria.
2. La muestra de agua se tomó directamente del influente que llega a la planta, de donde fue bombeada hasta la tolva, en donde fue cribada con tamices de 4 y 2 mm de diámetro de la malla, respectivamente. Toda la operación del proceso se realizó manualmente.
3. Durante el proceso de precipitación del agua se añadió coagulante y floculante. En este caso se empleó  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (coagulante) y un polielectrólito aniónico (floculante).
4. El lodo fue almacenado en el cuarto frío y el sobrenadante fue retirado al día siguiente en 2 ocasiones, con el fin de lograr un espesamiento.
5. Este procedimiento suministró una cantidad total de tres litros de lodo por lote, el cual después de ser centrifugado era suficiente para dos días.

### **3.3.3. PREPARACIÓN DE LODO TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO (TPA) PARA ALIMENTACIÓN DE LOS DIGESTORES**

Se obtuvo cada semana un lote de 100 litros de lodo anaerobio de la planta de tratamiento primario avanzado (TPA) de aguas residuales municipales de la población de San Pedro Atocpan, de la Ciudad de México, en botes de plástico liso a temperatura ambiente y posteriormente almacenados en frío. El punto de muestreo fue del registro de la tubería de purga del sedimentador. Se realizó el mismo procedimiento hecho desde el primer muestreo.

1. En los recipientes la muestra se homogeneizó y después el lodo fue cribado en 2 tamices de 4 y 2 mm de poro de malla, respectivamente.
2. Se dejó sedimentar por 24 horas, y se retiró el sobrenadante. El sedimento se recuperó en recipientes de 20 litros y se tomó una muestra para la caracterización de los lodos. Este lote era suficiente para una semana de alimentación.
3. Para la alimentación de los digestores se tomó del lote de lodos refrigerados, una muestra diaria que se dejaba aclimatar a temperatura ambiente antes de ser introducido a los digestores para evitar un choque térmico en la biomasa.

### **3.3.4. PREPARACIÓN DE LODO ANAEROBIO PARA ALIMENTACIÓN DE LOS DIGESTORES**

Se obtuvo cada mes un lote de 200 litros de lodo anaerobio de la planta de tratamiento anaerobio de aguas residuales municipales de la población de Atlamaxac, Tlaxcala, en botes de plástico liso a temperatura ambiente y posteriormente almacenados en frío. El punto de muestreo fue en el segundo nivel inferior, a 60 cm del fondo del reactor (nivel 4). Se realizó el mismo procedimiento hecho desde el primer muestreo.

1. De uno de los recipientes del mismo lote de muestra, se homogeneizó el lodo y fue cribado en 2 tamices de 4 y 2 mm de poro de malla, respectivamente.
2. Se dejó sedimentar por 24 horas, y se retiró el sobrenadante. El sedimento se recuperó en recipientes de 25 litros y se tomó una muestra para la caracterización de los lodos. Este lote era suficiente para un mes de alimentación.
3. Para la alimentación de los digestores se tomó del lote de lodos refrigerados, una muestra diaria que se dejaba aclimatar a temperatura ambiente antes de ser introducido a los digestores para evitar un choque térmico en la biomasa.

### 3.4. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

Para evaluar las eficiencias de remoción de coliformes fecales y huevos de helmintos en la digestión anaerobia mesofílica y termofílica, se colectaron muestras cada tres días, en un periodo de tres semanas; la colecta se realizó previa a la alimentación de cada digestor. Las muestras de los lodos de alimentación se tomaron del mismo lote para alimentar los digestores. Para determinar Coliformes fecales se uso el método directo de número más probable (NMP) del *Standard Methods* (APHA. AWWA. WPCF, 1989).

La concentración y cuantificación de los huevos de helmintos se realizó de acuerdo con la técnica presentada en el anexo de la Norma (NOM-001-ECOL-1996), la cual se recomienda para análisis de aguas y lodos residuales y tratada(o)s; para las muestras de lodos se toma "X" gramos de lodo fresco (Humedo), equivalentes a 10g de materia seca. Esta técnica establece como criterio, que después de un periodo de incubación de 40 días, se cuantifican huevos de helminto con larva (viables) y sin larva (no viables).

Con el propósito de comparar la eficiencia de la técnica norma, también se utilizo la técnica de concentración y cuantificación por filtro de membrana (Galván *et al.*, 1998), la cual utiliza un método de tinción de los huevos de helminto con colorantes vitales (utilizando azul de tripan). Esta técnica establece que posterior a la tinción se cuantifican huevos no teñidos (viables) y huevos teñidos (no viables). Para propósitos de validar estadísticamente los resultados de los huevos de helminto, se aplicaron dos análisis: Fisher y t de Student.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. REMOCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS PATÓGENOS Y PARÁSITOS

El objetivo principal del presente trabajo, es evaluar la eficiencia de remoción de los microorganismos patógenos y parásitos por la digestión anaerobia termofílica en comparación a la mesofílica, usando dos tipos de lodos municipales de desecho. Para realizar los análisis de cuantificación de los huevos de helmintos, se abordó el problema que representa el factor tiempo y la confiabilidad en la reproducción de la técnica para disponer de resultados confiables y en un menor tiempo. Así, se consideró que la técnica propuesta en el anexo de la NOM-001-ECOL-1996 para la concentración y cuantificación de huevos de helmintos presentes en aguas residuales y tratadas, permite además, determinar la viabilidad de los huevos vía un periodo de incubación de 40 días. Sin embargo, esta técnica requiere de un tiempo mínimo entre 12 y 15 horas para procesar una sola muestra, sin determinar viabilidad; por otro lado, la manipulación de las muestras esta sujeta a la habilidad del técnico para llevar a cabo el análisis con resultados óptimos y el mínimo margen de error. Estas dos razones motivaron que se probara otra técnica para disminuir el tiempo y margen de error en los análisis, al mismo tiempo que se pudiera determinar la viabilidad de los huevos de helminto sin el largo periodo de incubación.

Con el propósito de comparar la eficiencia de la técnica norma, también se utilizó la técnica de concentración y cuantificación por filtro de membrana (Galván *et al.*, 1998), la cual utiliza un método de tinción de los huevos de helminto con colorantes vitales (utilizando azul de tripan), esta técnica establece como criterio, que posterior a la tinción se cuantifican huevos no teñidos (viables) y huevos teñidos (no viables). De este modo, se pretendió determinar la técnica de numeración de huevos de helmintos más apropiada para el análisis rutinario de lodos.

#### 4.1.1. CUANTIFICACIÓN DE LOS HUEVOS DE HELMINTO EN LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN Y LOS BIOSÓLIDOS

##### 4.1.1.1. Cuantificación de huevos de helminto por la técnica de concentración por filtro de membrana

Los resultados obtenidos con esta técnica se presentan en la tabla 4.1. Se observa que para cada par de digestores a la misma temperatura, no existe una diferencia significativa (Probabilidad de 0.01) en el número de  $HH_{\text{Totales}}/gST$  obtenidos de las purgas. En los digestores M1 y M2, se encontraron 81 y 79  $HH_{\text{Totales}}/gST$ , mientras que en los termofílicos T1 y T2, los valores fueron de 30 y 32  $HH_{\text{Totales}}/gST$  en promedio respectivamente. En los lodos de alimentación, se observa un mayor número promedio de huevos de helminto en el lodo biológico anaerobio con respecto del lodo químico, con 72.5 y 34  $HH_{\text{Totales}}/gST$ , respectivamente.



Tabla 4.1. Resultados promedio del número de HH en las purgas de cada digestor y en los lodos de alimentación (LB, TPA) con la técnica de concentración y tinción por filtro de membrana.

| Numero de muestras            | LB   |    | LTPA |    | M1   |    | M2   |    | T1   |    | T2   |    |
|-------------------------------|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|
|                               | 2    |    | 3    |    | 12   |    | 7    |    | 11   |    | 12   |    |
|                               | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  |
| HH <sub>no teñidos</sub> /gST | 37.5 | 52 | 13   | 37 | 20   | 25 | 23   | 29 | 9    | 30 | 6    | 18 |
| HH <sub>teñidos</sub> /ST     | 35.0 | 48 | 21.5 | 63 | 61   | 75 | 57   | 71 | 21   | 70 | 26   | 82 |
| HH <sub>Total</sub> /gST      | 72.5 |    | 34   |    | 81   |    | 79   |    | 30   |    | 32   |    |

Por otra parte, el efecto de tinción, relacionando de manera indirecta a la viabilidad de los huevos (es decir, el potencial biológico de cada huevo para poder desarrollar con éxito una larva infectiva), no muestra una variación notable en el porcentaje entre los diferentes tipos de lodos y tampoco en las dos condiciones de operación (mesofilia y termofilia). Así en el caso de los digestores M1, M2, T1 y T2, el porcentaje de huevos teñidos son de 75, 71, 70 y 80% respectivamente. Sin embargo los valores promedio si muestras diferencias.

De acuerdo con las condiciones de operación de los digestores (Tabla 3.1), los resultados promedio muestran que no existe un efecto de remoción de los huevos de helminto en los digestores mesofílicos. La diferencia del número total en M2 es significativa con respecto a los lodos fisicoquímicos (Probabilidad de 0.05), y aumenta considerablemente de la alimentación a la purga. Sin embargo, los valores de huevos teñidos y no teñidos en la purga de ambos digestores, así como el valor de huevos totales en M1 con respecto al lodo de alimentación correspondiente (LB) son iguales (Probabilidad de 0.01).

En los digestores T1 y T2, se observa un efecto de remoción en los números promedio. En el caso del digestor T1, los resultados de esta técnica muestran que mantuvo una remoción del 60%, pues de los 72.5 HH<sub>Totales</sub>/gST que ingresaron con la alimentación, sólo se cuantificaron 30 HH<sub>Totales</sub>/gST en la purga. El estudio estadístico permite confirmar esta diferencia significativa entre M1 y T1 con probabilidad de 0.05 pero no entre los lodos biológicos de alimentación y T1. Por lo tanto, el análisis estadístico indica que el número de huevos teñidos y totales son iguales entre T1 y los lodos biológicos aun cuando el número de huevos no teñidos presenta una diferencia significativa con probabilidad de 0.01.

Por lo tanto, con base en los resultados de esta técnica de cuantificación en esta etapa, se puede decir aunque en forma parcial, que la condición termofílica es más efectiva para remover (destruir) los huevos de helminto que la condición mesofilia, y también que logra un mayor porcentaje de huevos teñidos (no viables).

#### 4.1.1.2. Cuantificación de huevos de helminto por la técnica Norma Mexicana

La técnica para la determinación y cuantificación de huevos de helminto (anexa en la NOM-001-ECOL-1996) fue planteada para utilizarse en los análisis parasitológicos de aguas crudas y tratadas; sin embargo, también es usada para cuantificar parásitos helmintos en lodos crudos y tratados. La tabla 4.2 muestra los resultados promedio de la

cuantificación de huevos de helminto larvados y no larvados tras un periodo de incubación, de las purgas de cada digestor y de los lodos de alimentación.

Tabla 4.2. Resultados promedio en el número de HH en purgas de cada digestor y en los lodos de alimentación (LB, TPA) con la técnica Norma.

| Numero de muestras            | LB   |    | LTPA |    | M1   |    | M2   |    | T1   |    | T2   |      |
|-------------------------------|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|------|
|                               | 2    |    | 3    |    | 12   |    | 7    |    | 11   |    | 12   |      |
|                               | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %  | Prom | %    |
| HH <sub>no teñidos</sub> /gST | 3.0  | 5  | 0.5  | 2  | 8.5  | 12 | 4    | 6  | 1    | 4  | 0.5  | 0.5  |
| HH <sub>teñidos</sub> /ST     | 60.0 | 95 | 23.5 | 98 | 64.5 | 88 | 65   | 94 | 18   | 96 | 11.5 | 99.5 |
| HH <sub>Total</sub> /gST      | 63   |    | 24   |    | 73   |    | 69   |    | 19   |    | 12   |      |

Se observa que no existe una diferencia significativa (Probabilidad de 0.01) entre los valores obtenidos en los digestores de una misma temperatura de operación. Los resultados en mesofilia son de 73 y 69 HH<sub>Totales</sub>/gST en M1 y M2 y en termofilia de 19 y 12 HH<sub>Totales</sub>/gST en T1 y T2 respectivamente. En el caso de los lodos de alimento, los resultados fueron de 63 y 24 HH<sub>Totales</sub>/gST para el lodo biológico anaerobio y fisicoquímico, respectivamente, observándose una diferencia en el número promedio de HH<sub>Totales</sub>/gST que en cada caso ingresaron a los digestores.

Los resultados no indican un efecto de remoción de huevos de helminto en el digestor mesofílico M2 (Probabilidad de 0.05), sino más bien estos aumentan. Al igual que con la otra técnica, también se observa una diferencia significativa (Probabilidad de 0.01) en el número de HH<sub>Totales</sub>/gST entre los digestores mesofílicos y termofílicos. En el caso del digestor T1, el porcentaje de remoción es de 70.2%. En términos de viabilidad, de los digestores mesofílicos se obtiene más de un HH<sub>Total</sub>/gST larvado y en los digestores termofílicos menos de 1 HH<sub>Total</sub>/gST larvado. El estudio estadístico permite confirmar estas diferencias significativas, con probabilidad de 0.01, entre los mesofílicos y termofílicos, y también entre los lodos de alimentación y los termofílicos.

#### 4.1.2. CUANTIFICACIÓN DE LOS COLIFORMES FECALES EN LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN Y LOS BIOSÓLIDOS

Los resultados de los digestores M1 y T1, alimentados con lodo anaerobio se presentan en las figuras 4.1 y 4.2, así como los de M2 y T2, alimentados con lodo fisicoquímico en las figuras 4.3 y 4.4. En términos de remoción, no se nota ningún efecto de disminución del número total de coliformes fecales en cualquier digestor.

En ambos casos, se observa que los lodos de alimentación ingresan con un contenido de coliformes fecales inferior a  $10^6$  NMP/gST, valor que los ubica, en lo que respecta a este parámetro, dentro de los lodos clase B emitido por la EPA (1996).

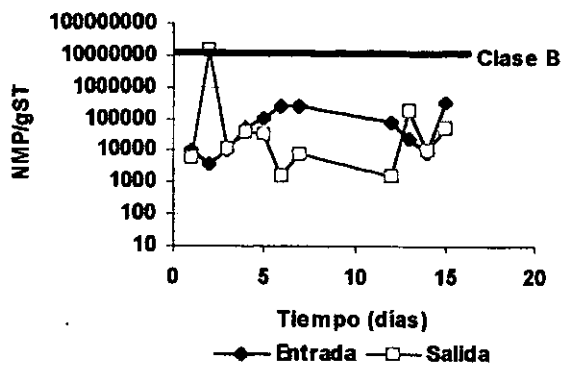


Figura 4.1. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor mesofílico M1. Límite clase "B", según EPA (1996).

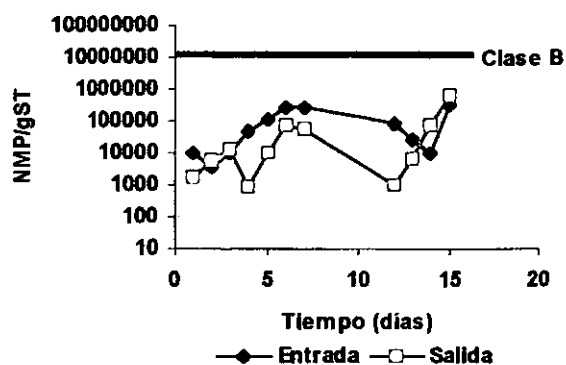


Figura 4.2. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor T1. Límite clase "B", según EPA (1996).

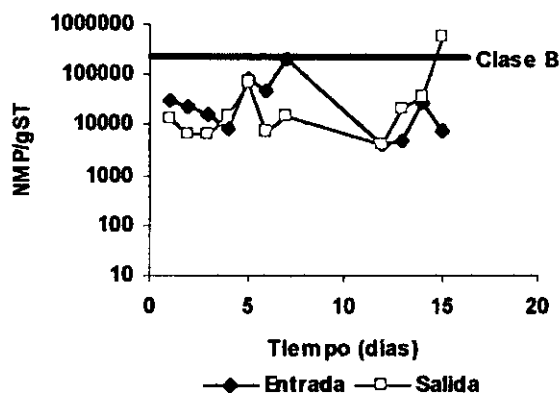


Figura 4.3. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor mesofílico M2. Límite clase "B", según EPA(1996).

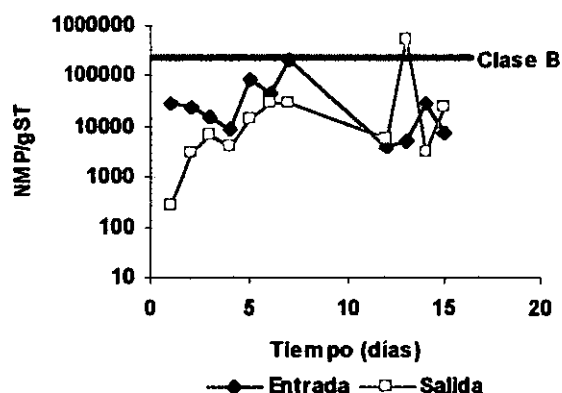


Figura 4.4. Número más probable de coliformes fecales presentes en el digestor T2. Límite clase "B", según EPA(1996).

#### 4.1.3. CONDICIONES SANITARIAS DE LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN

Para comprender la parte de la viabilidad de los huevos de helminto, se debe tomar en cuenta que los lodos de alimento provienen de procesos distintos y que sus características de origen pueden influir directamente sobre la viabilidad potencial de los helmintos. Los lodos biológicos provenientes de un reactor anaerobio tienen tiempos de retención celular mayores a 40 días, esto depende de las condiciones de operación en cada caso, pero se presenta un fenómeno de acumulación de biomasa en la cual la concentración de  $HH_{\text{Totales}}/gST$  puede ser alta en comparación a la aportación del influente. Adicionalmente, el largo TRC puede provocar la pérdida de viabilidad en los huevos de helminto (Hays, 1976).

Por su parte, la producción de lodos químicos por tratamiento primario avanzado (TPA) es rápida y en grandes volúmenes; por lo tanto, su corto TRH (de horas) no permite una concentración de  $HH_{\text{Totales}}/gST$  comparable a la de un lodo biológico anaerobio. En ambas técnicas, los resultados promedio de  $HH_{\text{Totales}}/gST$  en los lodos de alimentación corroboran esta hipótesis, el valor promedio del número de  $HH_{\text{Totales}}/gST$  siendo mayor en los lodos anaerobios y menor en los lodos TPA. Finalmente, como consecuencia de este efecto, el porcentaje de viabilidad de los huevos de helminto se espera que sea mayor en este último tipo de lodos en comparación a los lodos anaerobios. Sin embargo, los resultados en el presente estudio no confirman esta hipótesis. Posiblemente en la técnica de tinción, este resultado se deba a la dificultad de lograr una buena distribución del colorante en toda la muestra del lodo fisicoquímico, el cual forma gruesas capas de materia orgánica. Por otro lado, pensamos que la incubación (anexada en la técnica Norma) fue inhibida por algún factor externo e incluso inherente a la misma técnica de concentración. Posiblemente la solución de alcohol-ácido usada durante el último paso de esta técnica, tenga algún tipo de influencia sobre la viabilidad potencial de los huevos de helminto.

**4.1.4. EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE PARÁSITOS DE HELMINTO EN LOS DIGESTORES MEDIDA POR AMBAS TÉCNICAS**

La eficiencia de remoción de los huevos de helminto en las técnicas utilizadas guardan cierta correspondencia entre los resultados aun cuando la proporción no es la misma (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Síntesis del efecto de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica sobre la remoción de los huevos de helminto, según los valores promedio de ambas técnicas de concentración y cuantificación.

|                | TÉCNICA   |            |
|----------------|---|------------|
|                | FILTRO DE MEMBRANA  | NORMA      |
| Lodo biológico | Presentó un mayor número de $HH_{\text{Totales}}/gST$ que el lodo TPA |            |
| M1             | Sin efecto  | Sin efecto |
| M2             | Sin efecto  | Sin efecto |
| T1             | Remoción  | Remoción   |
| T2             | Sin efecto  | Remoción   |

En ambas técnicas de cuantificación, los valores promedio indican una tendencia de mayoría numérica de  $HH_{\text{Totales}}/gST$  en la purga de M2, que no es significativa (probabilidad de 0.01). También demuestran que los digestores termofílicos realizan una remoción efectiva: T1 respecto a los lodos de alimentación y respecto a los digestores mesofílicos. La correspondencia de los resultados también se puede ver de la siguiente forma: a) ningún efecto de remoción de huevos de helminto ocurre en el digestor M2, alimentado con un lodo que tiene menor número de huevos (lodo químico); y b) la remoción más efectiva se presenta en el digestor T1, alimentado con el lodo anaerobio que tiene el mayor número de huevos de helminto. El efecto de remoción se debe en parte a la temperatura de 55°C y al TRC de los reactores. Hays (1976) asegura que la eficiencia en la destrucción de los huevos de helminto depende del tiempo (más de 30 minutos) y la temperatura (más de 60°C en anaerobiosis).

Durante el arranque, las eficiencias de los digestores mesofílicos, para alcanzar un alto porcentaje en la destrucción o inviabilidad de los huevos de helminto, son bajas. Se deben considerar las condiciones de operación variables durante esta etapa de los digestores (fuga de lodo y biogás; variación de la temperatura, y muy posiblemente el mezclado deficiente de los lodos dentro del digestor) que pudieron afectar la eficiencia del proceso anaerobio para disminuir la viabilidad en huevos de helminto. Morris *et al.* (1986) reportan que en muestras extraídas con apenas 1 día de exposición en un proceso a condiciones de digestión anaerobia mesofílica a 35°C, no se reduce la infectividad, aunque decrece la viabilidad aproximadamente en un 60%. Por su parte, en digestión anaerobia mesofílica de una planta paquete operada a temperatura ambiente con un TRC de 16 días resultó un decremento de 83.4 y 73.1% en infectividad y viabilidad respectivamente.

En el arranque, los digestores termofílicos que presentaron eficiencia de remoción no disminuyeron en forma significativa el porcentaje de viabilidad. Así, la variación en la temperatura pudo afectar directamente el funcionamiento del proceso termofílico que demuestra ser muy sensible a este efecto, como lo observó también Hamer *et al.* (1985). Se confirma entonces que una baja de temperatura en los digestores termofílicos impide la destrucción y pérdida de viabilidad de los huevos de helminto. Morris *et al.* (1986) reportan que en pruebas de pasteurización durante tres horas a 60°C, se obtiene cero viabilidad e infectividad, demostrando la eficiencia del aumento de la temperatura. Sin embargo, estos porcentajes de viabilidad no se deben interpretar sin considerar el número real de los huevos de helmintos. Tampoco se debe olvidar que el arranque corresponde a la fase de formación del inoculo anaerobio termofílico eficiente, como lo observó también Van Lier (1996).

Por último, un mezclado incompleto puede favorecer zonas muertas en donde se da una mayor acumulación de sólidos. Esta acumulación permite dos cosas: los huevos que sedimentan en estos espacios tienen un tiempo de retención mayor dentro de los digestores y por otra parte, huevos que ingresaron con la última alimentación (24 horas antes) sin acceso a estas zonas, pueden ser extraídos del digestor con la siguiente purga. En consecuencia, estos últimos pueden no disminuir o perder su viabilidad potencial y menos ser destruidos; este fenómeno sumado a una falta de temperatura, el factor más importante, compromete la eficiencia de la digestión anaerobia termofílica en la remoción y pérdida de la viabilidad potencial de los huevos de helminto. Generalmente a temperaturas de 60°C por 30 minutos es suficiente para destruir huevos de *Ascaris* (Hays, 1976).

#### **4.1.5. COMPARACIÓN DE LA TÉCNICA CONCENTRACIÓN POR MEMBRANA Y TÉCNICA NORMA**

Desde el punto de vista técnico, la concentración por filtro de membrana representa un problema de manejo: dos gramos de sólidos suspendidos totales de lodos contienen demasiados coloides y materia, factor que influye sobre el lavado de la muestra. Esto es engorroso y también dificulta los trasvases de la muestra de un paso a otro. El tiempo normal de trabajo con muestras de agua es de 3 a 5 horas, trabajando tres muestras simultáneas; sin embargo, en muestras de lodos éste se incrementó hasta 48 y 72 horas por el número de veces necesario para realizar los lavados de muestra.

Pasar la muestra con la jeringa de filtración es difícil, dependiendo del tipo de muestra y de la eficiencia en el lavado realizado: así se corre el riesgo de romper el filtro y perder la muestra. En este punto se debe cuidar la presión ejercida. El taponamiento del filtro resultó frecuente, ante lo cual lo mejor fue dividir la muestra y repartirla hasta en cuatro filtros. Otro fenómeno, que se presentó con muestras de lodos fisicoquímicos, fue la formación de una capa muy gruesa de materia orgánica, que impedía la rápida difusión del colorante llegando a tardar tres horas e incluso a perder la muestra.

La técnica Norma es una técnica muy lenta que no permite tener resultados rápidos. Procesar una muestra con los tiempos mínimos de sedimentación y el tiempo de lectura al microscopio puede ocupar entre 12 y 15 horas, dependiendo del tipo de lodo y de la cantidad de sólidos sedimentados al final del proceso. Las muestras de lodos son a veces muy difíciles de leer por la gran cantidad de "basura" (sólidos suspendidos mayores a 500  $\mu\text{m}$ ) presente, ante lo cual es mejor diluir, pero esto significa multiplicar el número de lecturas por cada muestra. El tiempo máximo de procesamiento de muestras dejando sedimentar "Toda la Noche" significa 3 ó 4 días. A esto, se debe añadir el tiempo de incubación para determinar la eficiencia de destrucción o decremento de la viabilidad en los huevos de helminto de muestras de lodos.

Ambas técnicas tienen sensibilidad a la concentración y recuperación de los huevos de helminto. Según el estudio estadístico, se puede decir que la eficiencia en la técnica Norma fue mayor en términos de remoción y acumulación: las diferencias entre los valores promedio se confirmaron estadísticamente. Al contrario, con la técnica de concentración por filtro de membrana, estas diferencias no fueron significativas, excepto entre M1 y T1. Así, la técnica de concentración por filtro de membrana no parece adecuada al manejo de muestras de lodos. Galván *et al.* (1998) reportan que, en agua, la técnica cuantitativa resultó con una eficiencia promedio del 77.3%, y la técnica de tinción vital da resultados confiables dentro del intervalo del 95%.

Finalmente, se debe de tomar en cuenta que las muestras procesadas de lodo fueron de 2 y 4 gST para la técnica de concentración por filtro de membrana y técnica Norma respectivamente. Por lo tanto, la técnica Norma permite manejar muestras de lodos con volúmenes más grandes y en consecuencia más representativos, que la técnica de membrana, en la cual sería mejor también disminuir aun más el volumen de muestra con los problemas de confiabilidad que esto representa.

#### **4.1.6. EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE PATÓGENOS EN LOS DIGESTORES**

En cuanto a la remoción de coliformes fecales se puede decir que, según los parámetros de la clasificación de la EPA(1996), no se realizó una remoción real, aún en los digestores termofílicos. Así, no se pudo producir biosólidos de clase A, calidad que les permite ser utilizados como fertilizantes naturales sin tener ningún tipo de restricción.

Las condiciones anaerobias de los digestores por sí mismas no afectan significativamente a los coliformes fecales, bacterias anaerobias facultativas. En el caso de los digestores mesofílicos, los resultados están de acuerdo con la literatura, mencionando que la mesofilia no tiene ningún efecto sobre la remoción de los coliformes fecales y otros patógenos (Burtscher *et al.*, 1998; Watanabe *et al.*, 1997; Aitken and Mullennix, 1992; Hays, 1976). Burtscher *et al.* (1998) observó que *Salmonella typhimurium* y *Listeria*

*monocytogenes* pueden sobrevivir a una temperatura de 37°C en anaerobiosis, mientras que a 55°C no se detectaron células viables.

En el caso de los digestores termofílicos, la digestión anaerobia incompleta de los digestores, resultado de una insuficiencia en la metanogénesis por parte del consorcio anaerobio (como se ha mencionado en las partes 4.1 y 4.2), pudo influir sobre esta ineficiencia de los procesos. Una digestión anaerobia termofílica activa puede inhibir el crecimiento de los coliformes fecales por fenómeno de competición. Watanabe *et al.* (1997) observan una eficiencia del proceso anaerobio termofílico en la reducción del grupo de coliformes fecales, obteniendo un decaimiento a partir de  $10^2$  y  $10^4$  NMP/g de lodos de alimento hasta  $10^0$  NMP/g después del tratamiento por digestión anaerobia termofílica. También ha sido reportada la reducción en el contenido de bacterias patógenas durante el proceso de digestión anaerobia termofílica (Carrington *et al.*, 1982; Olsen and Larsen, 1987; Kearney *et al.*, 1993; Kunte *et al.*, 2000).

Finalmente, Krugel *et al.* (1998) proponen incrementar el TRC para optimizar la reducción de coliformes fecales, con una configuración en la cual el digestor termofílico principal esté seguido de digestores de menor tamaño, en serie.

#### 4.1.7. CONCLUSIONES

Ambas técnicas de cuantificación de los huevos de helminto son sensibles para concentrarlos tanto en muestras de lodo crudo ó tratado. Las observaciones técnicas de tiempo de realización y la dificultad de ejecución permiten concluir que la técnica de concentración por filtro de membrana no es apta para la realización de análisis rutinarios en laboratorio de muestras de lodo. Las lecturas al microscopio son más sencillas con la técnica Norma, aun cuando por muestra sea necesario realizar varias lecturas. La técnica de concentración por filtro de membrana presenta resultados menos confiables estadísticamente. Se sugiere realizar una combinación de los métodos para determinar la viabilidad potencial de los huevos en la técnica norma. Mediante la incubación y tinción de un número similar de muestras procesadas con esta técnica, se podría verificar la factibilidad de usar el método de tinción para hacer más rápida la prueba de viabilidad.

Ambas técnicas mostraron que, los digestores termofílicos pueden ser eficientes para remover los huevos de helminto (aún en el caso M2 el cual no mostró remoción alguna). Sin embargo, no hubo remoción de los coliformes fecales: se debe considerar que la baja actividad metabólica del consorcio anaerobio pudo influir sobre la ineficiencia de la termofilia en dicha remoción.

## 4.2. ARRANQUE Y ESTABILIZACIÓN DE LOS DIGESTORES

### 4.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN

Antes de abordar el análisis de los resultados, se presentan los datos obtenidos de las muestras caracterizadas de los lodos de alimentación (Tablas 4.4 y 4.5), estos datos permiten definir de manera precisa la estabilidad del proceso anaerobio a 35 y 55°C, a través del grado de estabilización del lodo de purga en cada digestor.

Tabla 4.4. Caracterización de los lodos anaerobios para alimentación de los digestores M1 y T1

| N° de Muestra       | pH   | Alcalinidad<br>mgCaCO <sub>3</sub> /L | Alfa | SST<br>g/L | SSV<br>g/L | SSF<br>g/L |
|---------------------|------|---------------------------------------|------|------------|------------|------------|
| 1                   | 6.95 | 1720                                  | 0.46 | 89.82      | 36.58      | 53.24      |
| 2                   | 7.05 | 1980                                  | 0.48 | 79.06      | 31.58      | 47.48      |
| 3                   | 6.78 | 1520                                  | 0.39 | 83.53      | 33.92      | 49.64      |
| 4                   | 6.79 | 1560                                  | 0.51 | 79.78      | 32.94      | 48.84      |
| 5                   | 7.06 | 1640                                  | 0.48 | 91.36      | 35.98      | 55.48      |
| 6                   | 6.80 | 1600                                  | 0.50 | 112.00     | 42.00      | 70.00      |
| 7                   | 6.71 | 2000                                  | 0.50 | 89.40      | 35.08      | 50.32      |
| 8                   | 6.78 | 1200                                  | 0.50 | 95.50      | 37.56      | 57.94      |
| 9                   | 6.85 | 2000                                  | 0.48 | 88.70      | 34.64      | 50.06      |
| 10                  | 6.98 | 1360                                  | 0.52 | 79.94      | 30.76      | 48.18      |
| 11                  | 6.74 | 2000                                  | 0.60 | 121.30     | 44.94      | 76.36      |
| 12                  | 6.96 | 1600                                  | 0.50 | 116.02     | 42.68      | 73.34      |
| 13                  | 6.99 | 1800                                  | 0.33 | 100.28     | 37.22      | 73.06      |
| 14                  | 6.66 | 1640                                  | 0.36 | 95.08      | 35.02      | 60.06      |
| 15                  | 6.96 | 1800                                  | 0.44 | 92.20      | 34.10      | 58.10      |
| 16                  | 6.56 | 2600                                  | 0.46 | 44.68      | 17.06      | 27.62      |
| 17                  | 6.40 | 1600                                  | 0.30 | 76.06      | 28.18      | 47.88      |
| 18                  | 6.58 | 1600                                  | 0.37 | 81.46      | 30.34      | 51.12      |
| 19                  | 6.38 | 1400                                  | 0.42 | 93.96      | 34.86      | 59.10      |
| 20                  | 7.18 | 2000                                  | 0.40 | 87.18      | 33.08      | 54.10      |
| 21                  | 6.90 | 1720                                  | 0.39 | 95.40      | 34.50      | 60.90      |
| 22                  | 6.52 | 1720                                  | 0.46 | 83.86      | 31.30      | 52.56      |
| 23                  | 6.63 | 1800                                  | 0.44 | 99.96      | 37.02      | 62.94      |
| 24                  | 6.70 | 2240                                  | 0.41 | 95.40      | 35.94      | 59.46      |
| 25                  | 6.37 | 1400                                  | 0.57 | 104.24     | 32.04      | 72.20      |
| 26                  | 6.30 | 1520                                  | 0.52 | 108.60     | 32.26      | 76.34      |
| 27                  | 6.36 | 1440                                  | 0.28 | 111.60     | 34.10      | 77.60      |
| 28                  | 6.32 | 1400                                  | 0.42 | 103.10     | 30.00      | 73.10      |
| 29                  | 6.38 | 800                                   | 0.40 | 113.60     | 33.86      | 79.74      |
| 30                  | 6.51 | 1400                                  | 0.28 | 121.20     | 36.98      | 84.22      |
| 31                  | 6.38 | 1400                                  | 0.42 | 116.58     | 35.88      | 80.70      |
| 32                  | 6.43 | 1600                                  | 0.37 | 134.78     | 40.20      | 94.58      |
| 33                  | 6.37 | 2400                                  | 0.50 | 128.00     | 37.92      | 90.08      |
| 34                  | 6.64 | 1640                                  | 0.48 | 41.58      | 17.32      | 24.26      |
| 35                  | 6.71 | 2000                                  | 0.56 | 91.64      | 36.68      | 54.96      |
| 36                  | 7.08 | 1800                                  | 0.53 | 42.78      | 18.64      | 24.14      |
| 37                  | 7.08 | 1720                                  | 0.67 | 92.18      | 41.44      | 50.74      |
| 38                  | 6.60 | 2120                                  | 0.34 | 91.64      | 36.84      | 54.80      |
| 39                  | 6.98 | 2480                                  | 0.53 | 96.44      | 40.76      | 55.68      |
| 40                  | 6.91 | 1720                                  | 0.42 | 96.16      | 38.48      | 57.68      |
| 41                  | 6.56 | 1000                                  | 0.48 | 62.28      | 18.92      | 45.36      |
| 42                  | 6.79 | 1200                                  | 0.40 | 55.38      | 16.60      | 38.78      |
| 43                  | 6.75 | 1760                                  | 0.40 | 91.24      | 27.16      | 73.80      |
| 44                  | 6.92 | 1760                                  | 0.32 |            |            |            |
| No de datos         | 44   | 44                                    | 44   | 43         | 43         | 43         |
| Promedio            | 6.71 | 1697                                  | 0.45 | 92.42      | 33.33      | 59.16      |
| Desviación estandar | 0.25 | 359                                   | 0.08 | 20.97      | 6.84       | 15.17      |



Tabla 4.5. Caracterización de los lodos fisicoquímicos para alimentación de los digestores M2 y T2

| Nº de Muestra       | pH   | Alcalinidad<br>mgCaCO <sub>3</sub> /L | Alfa | SST<br>g/L | SSV<br>g/L | SSF<br>g/L |
|---------------------|------|---------------------------------------|------|------------|------------|------------|
| 1                   | 5.23 | 1129                                  |      | 53.30      | 38.24      | 15.06      |
| 2                   | 5.00 | 1239                                  |      | 34.56      | 24.62      | 9.94       |
| 3                   | 5.44 | 760                                   |      | 56.36      | 41.56      | 14.80      |
| 4                   | 5.55 | 860                                   |      | 55.18      | 40.04      | 15.14      |
| 5                   | 5.50 | 980                                   |      | 39.42      | 28.40      | 11.02      |
| 6                   | 5.64 | 2400                                  |      | 767.08     | 48.34      | 18.74      |
| 7                   | 5.46 | 1440                                  |      |            |            |            |
| 8                   | 5.42 | 800                                   |      | 78.18      | 51.70      | 20.48      |
| 9                   | 5.40 | 1400                                  |      | 68.76      | 49.36      | 19.40      |
| 10                  | 5.53 | 1480                                  |      | 69.14      | 49.50      | 19.64      |
| 11                  | 5.86 | 1880                                  | 0.21 | 68.46      | 49.20      | 19.26      |
| 12                  | 5.65 | 1360                                  |      | 61.18      | 43.10      | 18.08      |
| 13                  | 5.56 | 1680                                  |      | 44.84      | 31.72      | 13.12      |
| 14                  | 5.43 | 1640                                  |      | 90.78      | 65.14      | 25.64      |
| 15                  | 5.64 | 1600                                  |      | 62.80      | 44.92      | 17.88      |
| 16                  | 5.18 | 1280                                  |      | 52.20      | 37.90      | 14.30      |
| 17                  | 5.12 | 1000                                  |      | 50.46      | 36.38      | 14.08      |
| 18                  | 5.15 | 960                                   |      | 50.58      | 36.54      | 14.04      |
| 19                  | 5.21 | 1080                                  |      | 50.72      | 36.68      | 14.04      |
| 20                  | 5.75 | 1600                                  |      | 51.88      | 37.48      | 14.40      |
| 21                  | 5.54 | 920                                   |      | 52.98      | 38.22      | 14.76      |
| 22                  | 5.14 | 1120                                  |      | 48.08      | 34.80      | 13.28      |
| 23                  | 5.17 | 1240                                  |      | 56.34      | 40.14      | 16.20      |
| 24                  | 5.19 | 1400                                  |      | 54.24      | 39.30      | 14.94      |
| 25                  | 5.17 | 1200                                  |      | 58.18      | 42.42      | 15.76      |
| 26                  | 5.14 | 1120                                  |      | 78.80      | 56.20      | 22.60      |
| 27                  | 5.27 | 1000                                  |      | 72.18      | 50.66      | 21.52      |
| 28                  | 5.18 | 1000                                  |      | 64.14      | 46.02      | 18.12      |
| 29                  | 5.16 | 1200                                  |      | 64.68      | 46.32      | 18.36      |
| 30                  | 5.37 | 1000                                  |      | 57.58      | 52.88      | 4.70       |
| 31                  | 5.28 | 1600                                  |      | 67.46      | 48.32      | 19.14      |
| 32                  | 5.30 | 1160                                  |      | 65.80      | 47.36      | 18.44      |
| 33                  | 5.39 | 1200                                  |      | 63.62      | 45.48      | 18.14      |
| 34                  | 4.99 | 800                                   |      | 52.36      | 38.14      | 14.22      |
| 35                  | 4.90 | 760                                   |      | 55.46      | 39.24      | 16.22      |
| 36                  | 5.06 | 800                                   |      | 52.34      | 38.34      | 14.00      |
| 37                  | 5.20 | 960                                   |      | 54.10      | 34.18      | 19.92      |
| 38                  | 4.93 | 640                                   |      | 50.86      | 36.92      | 13.94      |
| 39                  | 5.05 | 1400                                  |      | 51.72      | 37.28      | 14.94      |
| 40                  | 4.97 | 420                                   |      | 52.90      | 38.82      | 14.08      |
| 41                  | 5.09 | 960                                   |      | 50.88      | 37.02      | 13.86      |
| 42                  | 5.02 | 800                                   |      | 48.86      | 35.54      | 13.32      |
| 43                  | 5.11 | 1120                                  |      | 49.38      | 36.14      | 13.24      |
| 44                  | 5.26 | 1720                                  |      |            |            |            |
| No de datos         | 44   | 44                                    | 1    | 42         | 42         | 42         |
| Promedio            | 5.29 | 1184                                  | --   | 57.69      | 41.68      | 16.01      |
| Desviación estandar | 0.23 | 371                                   | --   | 10.50      | 7.68       | 3.66       |

El lodo anaerobio registro en promedio un pH cercano a la neutralidad, alcalinidad menor a los 2000 mgCaCO<sub>3</sub>/L y un valor alfa de 0.45 a 0.6. Los sólidos suspendidos totales por litro de lodo (SST/L), en ambos sustratos, muestran un buen espesamiento para ser tratados; a su vez, este valor es mayor en el lodo anaerobio que en el fisicoquímico. Estos últimos presentan como característica importante un pH ácido con promedio, de 5.29. Otro parámetro significativo es la fracción volátil del lodo (SSV/SST): el lodo biológico anaerobio registró como promedio un 36% mientras que para el lodo fisicoquímico fue de 72%.

Esta diferencia tiene su explicación en razones inherentes a cada proceso. La planta de tratamiento anaerobio de aguas residuales de donde fueron obtenidos los lodos de purga, el tiempo de retención celular (TRC) es mayor a los 40 días. De esta forma, se obtiene un buen espesamiento mientras que la permanencia de la cama de lodo dentro del reactor, permite digerir una mayor cantidad de la fracción volátil retenida del agua residual. Recordemos que es por este efecto, que el lodo anaerobio es un sustrato parcialmente

estabilizado y por ello su fracción volátil es menor a la esperada en lodos provenientes de otros procesos.

Se debe agregar que durante el periodo inicial de arranque se produjeron lodos en la planta de Ciudad Universitaria (CU), los cuales presentaron una concentración de SSV comparativamente baja y un pH en algunas muestras es cercano a la neutralidad; mientras que en los lodos procedentes de San Pedro Atocpan el pH es menor a 6 y con un mayor espesamiento.

El suministro del lodo de alimento a los digestores se inició con 200 ml en la primer semana para cada digestor y se incrementó en 100 ml para los digestores mesófilos en dos semanas más y luego en 50 ml cada semana durante un mes, hasta alcanzar 500 ml diarios. En el caso de los digestores termofílicos, la alimentación se incrementó en 50 ml cada semana durante un mes, al segundo mes la alimentación se incrementó gradualmente hasta llegar a alimentar con lotes diarios de 500 ml, para el resto de la operación. Sin embargo, posteriormente este volumen fue modificado en función de los resultados de pH, alcalinidad y alfa que se obtenían de los digestores.

Los resultados aquí presentados corresponden a los seis últimos meses de operación, los cuales son considerados como el periodo más estable, de mejor comportamiento de los parámetros de control. La totalidad del tiempo de operación de los digestores, a partir del momento de arranque, no es presentada debido a la gran dispersión ocurrida en los parámetros de control durante este periodo en todos los digestores. Como se abordará más tarde, esta dispersión fue efecto de los problemas de operación, fugas de biogás, diseño y materiales usados en el ensamblado de los digestores.

#### **4.2.2. SEGUIMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS DIGESTORES**

##### **4.2.2.1. Biodigestor M1**

El pH se situó en un valor promedio de 7.16 con fluctuaciones entre 6.78 y 7.68, con excepción de tres días consecutivos, con valores entre 5.08 y 5.91. La alcalinidad con un valor promedio de 2,909 mgCaCO<sub>3</sub>/L se mantuvo con fluctuaciones de 1,140 y 5,640 mgCaCO<sub>3</sub>/L. En la figura 4.23, se puede apreciar, poca variación en estos parámetros; el pH se situó dentro del valor óptimo de operación del proceso anaerobio entre 6.8–7.4, mientras que la alcalinidad se situó dentro del intervalo de valores óptimos de operación del proceso anaerobio, entre 1,000 y 5,000 mgCaCO<sub>3</sub>/L (Malina and Pohland, 1992).

La figura también muestra una falta de datos registrados entre los días 549 y 559, seguido de un incremento en la alcalinidad; está, debido a un agrietamiento en la estructura del digestor que obligó a realizar el cambio del mismo. Una vez reiniciada la operación del digestor, la carga orgánica (Bv) registrada fue de 0.4 gSSV/L\*d durante los dos primeros días, tiempo en el cual se incremento la alcalinidad alcanzando su valor máximo en 5,640 mgCaCO<sub>3</sub>/L al tercer día. Solo cuando la carga orgánica fue mayor a 2.5 gSSV/L\*d, a partir del cuarto día, se pudieron reestablecer los valores anteriores de alcalinidad (Figura 4.5).

Como lo mencionan Malina and Pohland, (1992), el pH no es en un momento temprano un parámetro sensible a las variaciones en la carga orgánica, mientras que la alcalinidad es

más representativa. En este periodo, a cargas menores de 2.6 gSSV/L\*d se presentó dispersión y los valores se elevaron. De modo que mientras la carga sea mayor a 2.6 gSSV/L\*d la biomasa del digester se encuentra adaptada al proceso de condiciones mesófilas y eventualmente se podría pensar en suministrar mayores cargas orgánicas. La carga orgánica promedio en este periodo fue de 2.57 gSSV/L\*d.

Otro parámetro que refuerza esta observación, es la relación de alcalinidades (alfa), el cual es el valor mas sensible a las variaciones de carga orgánica, porque detecta la relación de bicarbonatos con los ácidos grasos volátiles. Este parámetro se promedió en 0.55 y la mayoría presentó variaciones entre 0.38 y 0.74. El alfa reflejó correlación con el pH y la alcalinidad. En los días 518 y 520 cuando el pH desciende hasta 5.08, el valor alfa se registró con 0.15. Este comportamiento dentro de los valores mencionados se mantuvo aún cuando se reinició la operación del digester en los días 549 y 559 (Figura 4.6).

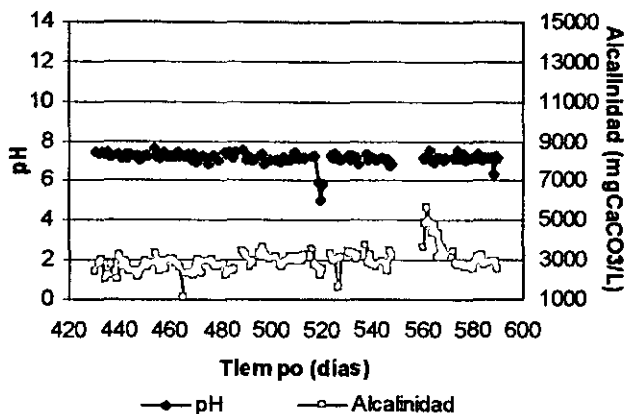


Figura 4.5. Evolución del pH y la alcalinidad en el digester M1.

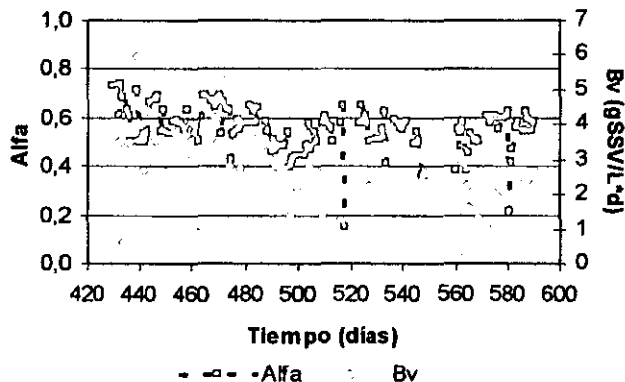


Figura 4.6. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digester M1.

La producción de biogás en este periodo se puede abordar en dos etapas. La primera se registra del día 430 al 461, y después de una larga etapa intermedia sin producción, se inicia la segunda el día 537 para interrumpirse brevemente 11 días y concluir hasta el final de las pruebas. En la primera etapa, la producción de biogás promedio fue de 443 ml por día, la cual fue mayor, constante y con un porcentaje de CH<sub>4</sub> del 47%. Mientras que en la segunda, la producción de biogás promedio fue de 250 ml por día, con un porcentaje promedio de CH<sub>4</sub> de 45% (Figura 4.7).

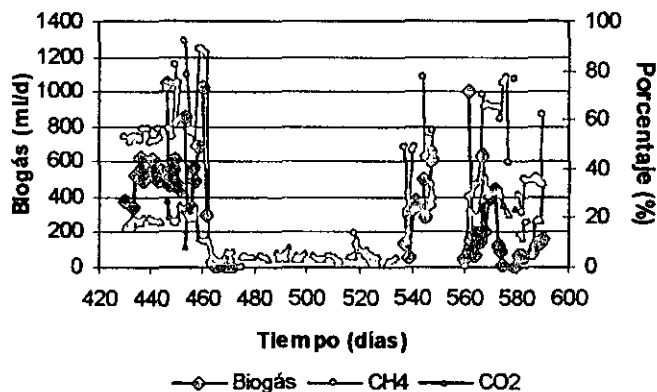


Figura 4.7. Composición y producción del biogás en el digester M1.

Se debe destacar que durante el tiempo de reinicio de operación del digestor, la producción de biogás se reestableció rápidamente, seguida de un incremento máximo del 76% de metano a los 576 días. La rápida actividad metanógena obtenida, refleja congruencia con los parámetros ya descritos, buen pH, poca variación de la alcalinidad, y estabilidad de la relación de alcalinidades con respecto a las cargas orgánicas; sin embargo, no se explica el descenso en la producción al final de esta etapa. El tiempo comprendido entre las etapas mencionadas, correspondiente a los días 472 y 532, la ausencia de biogás se debió a una fuga en la parte superior del digestor, la cual fue reparada y funcionó durante 11 días para posteriormente realizar el cambio del digestor.

Krugel *et al.* (1998) realizaron la producción de biosólidos clase "A", utilizando un sistema de digestores anaerobios acoplados, un digestor mesofílico seguido de un digestor termofílico. Obtuvieron en su digestor mesofílico con un TRC de 19 días, los siguientes resultados promedio: pH de 7.3, alcalinidad de 3,500 mgCaCO<sub>3</sub>/L, y una relación de alcalinidades de 0.12. Estos resultados, son muy semejantes a los obtenidos en el digestor M1, con excepción de la temperatura, ya que Krugel *et al.* (1998) mantuvieron una temperatura constante de 39°C. En el caso del valor alfa, su calculo parte de los valores reales de la concentración total de AGV entre la alcalinidad total, lo que en nuestro caso no permite una comparación exacta de nuestros resultados. De esta comparación, los resultados en M1 son alentadores pues reflejan el buen funcionamiento por parte de la biomasa.

#### 4.2.2.2. Biodigestor M2

El digestor M2 alimentado con el lodo fisicoquímico mostró un pH promedio de 6.75, con ligeras variaciones de 6.35 y 7.26. La alcalinidad se promedió en 4,332 mgCaCO<sub>3</sub>/L, con variaciones de 2,480 y 6,360 mgCaCO<sub>3</sub>/L. Estos resultados del digestor establecen al pH fuera del intervalo de valores óptimos de operación y muy de cerca a la alcalinidad (Malina and Pohland, 1992). En realidad al inicio de este periodo la alcalinidad mantuvo un mejor promedio, y como se aprecia en la grafica, se dio un incremento gradual de la alcalinidad la cual se ubico por encima de los 5,000 mgCaCO<sub>3</sub>/L a partir del día 559. Este cambio se efectuó a causa de un fuerte descenso en la carga orgánica, el cual fue menor a los 2 gSSV/L\*d, a partir del día 544 manteniéndose así hasta el final de las pruebas. La decisión de bajar las cargas orgánicas de alimentación obedece, a que se quiso mantener un valor alfa superior al 0.2 (Figura 4.8).

El alfa presentó variaciones entre 0.15 y 0.63 y un valor promedio de 0.27. Al inicio del periodo, el alfa se estableció en valores alrededor de 0.3, mientras que las cargas orgánicas suministradas fueron mayores a los 3 gSSV/L\*d. Se debe añadir que el desconocimiento de la influencia del aluminio sobre la biomasa y la decisión de mantener un valor alfa superior al 0.2 convergieron en la idea de disminuir a partir del día 482 la carga orgánica (Bv) de SSV de alimento al digestor. Decisión negativa y determinante que alteró la producción de biogás como se menciona posteriormente (Figura 4.9).

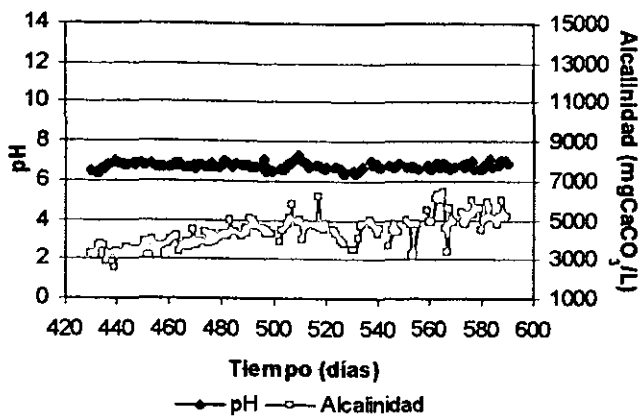


Figura 4.8. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor M2.

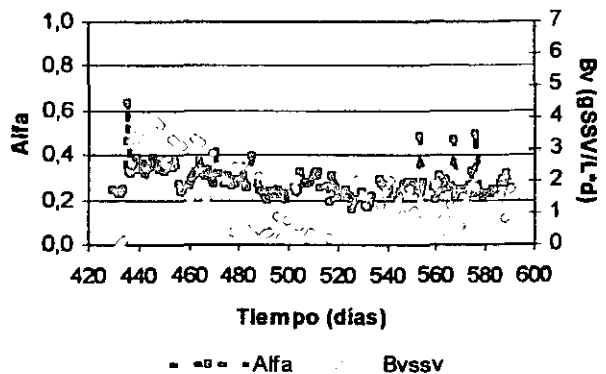


Figura 4.9. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor M2.

La producción del biogás se registró con los mismos resultados obtenidos en el digestor M1. La producción promedio fue de 463 ml por día con una variación entre los 7 y 1,144 ml por día (Figura 4.10). El valor promedio del porcentaje de CH<sub>4</sub> correspondiente a esta producción fue de 45.5%, y el mayor valor registrado para éste fue de 87%. Aun cuando la producción de biogás fue errática, fue más constante que en el caso de M1. Este efecto indica una actividad metanógena adaptada en el proceso. Dicha variación en la producción de biogás es efecto directo a la variación de la carga orgánica alimentada: a partir del día 482, ésta fue inferior a 2 gSSV/L\*d y se mantuvo así por un tiempo, luego se incrementó en los días 527 y 541 para posteriormente volver a disminuirla, obteniendo los resultados ya descritos en pH y alcalinidad. Es probable que la capacidad *buffer* de la biomasa anaerobia hubieran sido suficiente para soportar una carga orgánica mayor a los 2.5 gSSV/L\*d

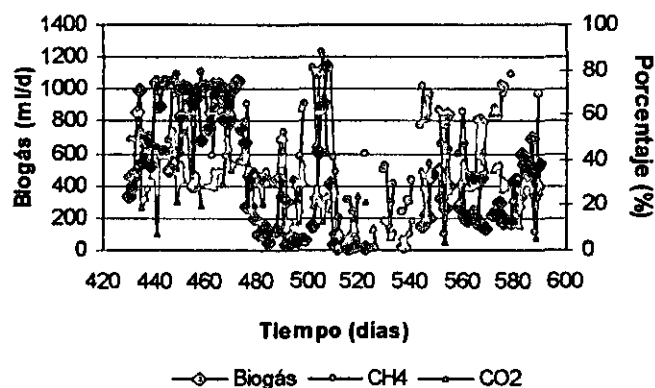


Figura 4.10. Composición y producción del biogás en el digestor M2.

#### 4.2.2.3. Biodigestor T1

El digestor presentó un pH cercano a la neutralidad con un promedio de 7.6 y valores extremos de 6.82 y 8.31. Su alcalinidad promedio fue de 3,409 mgCaCO<sub>3</sub>/L y sus variaciones se registraron entre los 2,400 y 4,880 mgCaCO<sub>3</sub>/L (Figura 4.11). Al final de las pruebas hubo variación en la carga orgánica de forma moderada entre 1.5 y 2.2 gSSV/L\*d

afectando al pH y la alcalinidad. Este último guarda correlación con lo observado en los digestores mesofílicos, ambos parámetros se establecen dentro de los valores de operación óptimos cuando las cargas son mayores a los 2 gSSV/L\*d. El valor alfa promedio se ubicó en un valor óptimo de 0.51. Sus variaciones, la más baja y la más alta fueron de 0.28 y 0.73 respectivamente. Es notorio el descenso gradual y moderado del alfa durante todo este periodo, para finalmente establecerse entre 0.32 y 0.45. Así, el descenso del alfa se correlaciona con el aumento de la carga de alimentación con valores entre 1.5 y 2.5 gSSV/L\*d (Figura 4.12).

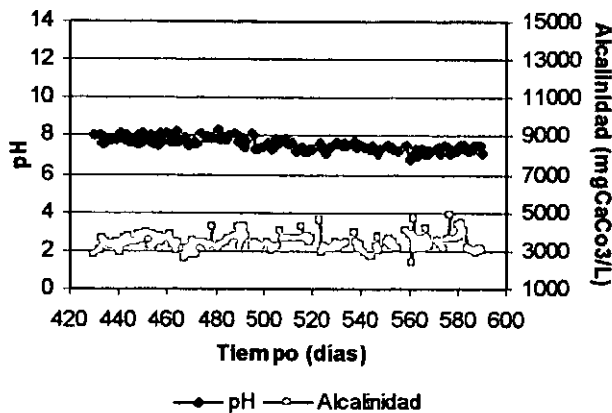


Figura 4.11. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor T1.

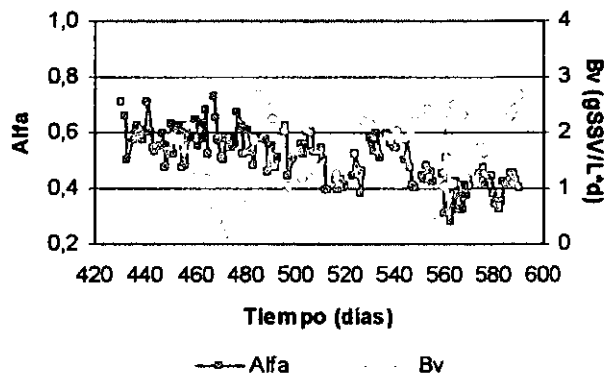


Figura 4.12. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor T1.

La producción del biogás sólo se pudo cuantificar con mayor importancia durante el último mes de pruebas. El valor promedio para este corto período de metanogénesis fue de 181 ml por día y el valor máximo registrado fue de 700 ml por día, al cual correspondió un 72% CH<sub>4</sub>. Este corto tiempo de producción con una carga orgánica de 1.7 gSSV/L\*d, correspondiente a los días 559 y 583, se correlaciona también con los parámetros ya descritos anteriormente, en donde el pH se establece más cerca de la neutralidad, la alcalinidad muestra ligera dispersión y el valor alfa se establece en valores menores a 0.5. También el porcentaje promedio de CH<sub>4</sub> durante este tiempo fue de 44%. Se debe añadir que al momento de incrementarse el volumen de biogás, el CH<sub>4</sub> asciende gradualmente hasta alcanzar su valor máximo, momento en el cual el volumen de biogás ya está en descenso hasta dejar de producirse (Figura 4.13). Esto indica que las poblaciones microbianas tardan en aclimatarse de manera estable a la temperatura de operación termofílica (Van Lier, 1996).

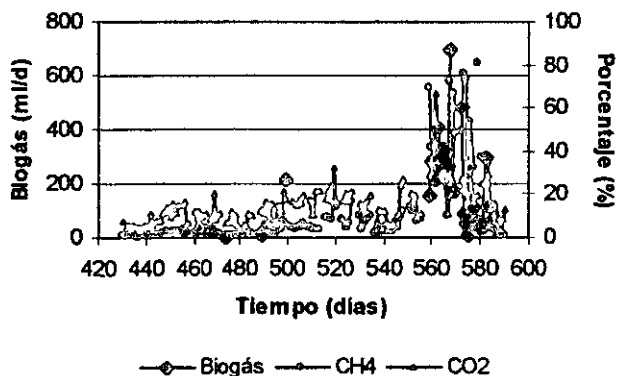


Figura 4.13. Composición y producción del biogás en el digestor T1.

#### 4.2.2.4. Biodigestor T2

El pH promedio fue de 7.46 y su intervalo fue entre 6.64 y 8.01. Este valor presentó un gradual descenso inicial, que se acompañó de variaciones muy notorias a partir de la mitad de este periodo, las cuales continuaron hasta el final de las pruebas. La alcalinidad también muestra un descenso en el transcurso de esta etapa; sin embargo, se establece dentro de los valores de operación óptima, menor a los 5,000 mgCaCO<sub>3</sub>/L, su valor promedio es de 3,402 mgCaCO<sub>3</sub>/L, mientras que la mayoría se ubico entro los 1,800 y 4,840 mgCaCO<sub>3</sub>/L. Se registraron valores extremos mínimo y máximo de 440 y 5,200 mgCaCO<sub>3</sub>/L, respectivamente. Este digestor aún presentaba problemas de inactividad metanogénica; sin embargo, no fue necesario recurrir a sustratos de fácil acceso (p ej., acetato de sodio) para las bacterias. Por el contrario, se usaron las purgas de los digestores M2 y T1 para mezclarlos con los lodos fisicoquímicos y poder alimentar el digestor, proveyéndole al mismo tiempo, de inóculo microbiano anaerobio de los digestores con mejores condiciones de operación (Figura 4.14).

El valor alfa se estableció con un promedio de 0.48, y presentó dispersión en un intervalo entre 0.23 y 0.6. Al inicio de esta etapa, la carga orgánica menor a 2 gSSV/L\*d no pareció afectar en forma precisa al valor alfa, el cual se mantuvo en valores superiores a 0.4. Sin embargo, al final cuando la carga orgánica fue mayor a los 2 gSSV/L\*d, el valor alfa se estableció en valores menores a 0.3. Esta dispersión se continuó hasta el fin de las pruebas. Es posible que de continuar las pruebas se pueda establecer en un valor mas constante, al equilibrarse la concentración de AGV en el digestor (Figura 4.15).

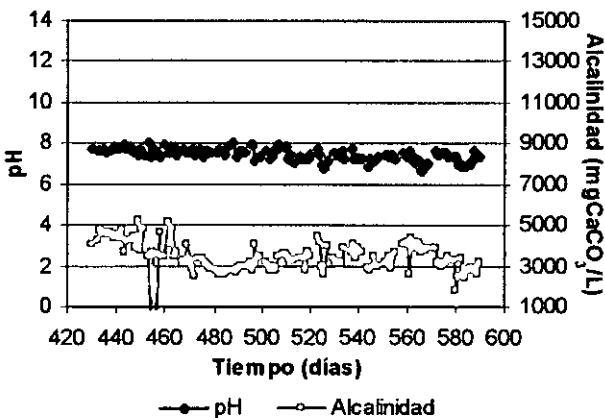


Figura 4.14. Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor T2.

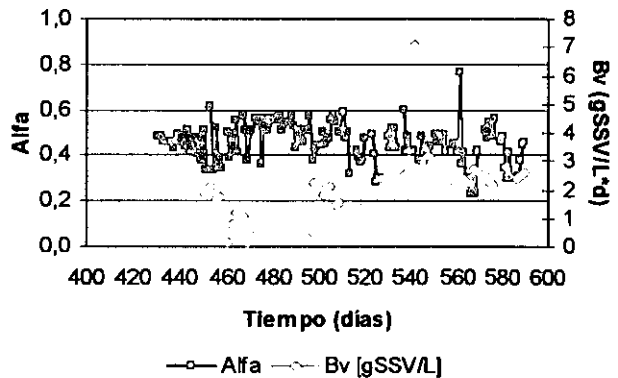


Figura 4.15. Evolución del alfa y la carga orgánica en el digestor T2.

Este digestor no presentó producción significativa de biogás; sin embargo, se pudo detectar un aumento del porcentaje de CH<sub>4</sub>, ya que se promedió 30% lo que confirma la presencia de una población metanógena. Esta presencia microbiana tan inhibida, se pretendió incrementar con la inoculación de los lodos de purga de los digestores M2 y T1; el primero por ser operado con lodo fisicoquímico y el segundo por ser termofílico con una población metanógena más activa, como lo demuestra su composición del biogás (Figura 4.16).

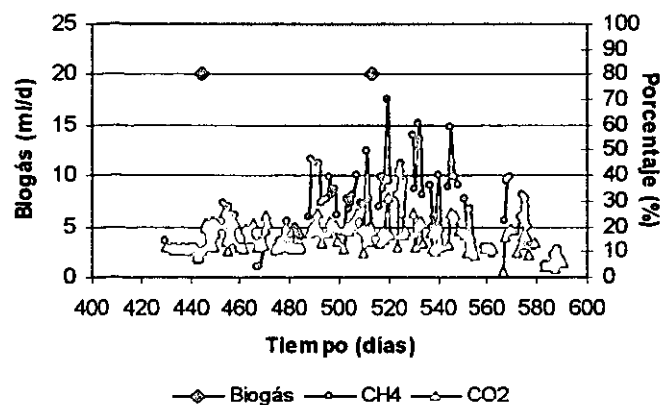


Figura 4.16. Composición y producción del biogás en el digestor T2.

#### 4.2.3. COMPARACIÓN DE LOS BIODIGESTORES M1 Y M2

En los digestores mesófilos, el pH se mantuvo dentro de los valores considerados óptimos (6.8-7.4). La alcalinidad por su parte, en M1 siempre se situó por debajo de los 5,000 mgCaCO<sub>3</sub>/L, con excepción de un punto, por lo cual se mantiene perfectamente dentro del valor óptimo de operación. En el digestor M2, este parámetro experimentó dispersión por encima de los 5,000 mgCaCO<sub>3</sub>/L, aunque se observa una tendencia a disminuir y colocarse en valores por debajo de este límite. En ambos casos, se contaba con una capacidad amortiguadora importante. El digestor M2, alimentado con lodo fisicoquímico, presenta dispersión en efecto directo a la variación de la carga orgánica, debida al origen de los substratos: el lodo fisicoquímico presenta mayor concentración de SSV que el lodo biológico anaerobio.

El valor alfa es un parámetro que se presenta como un dato de respuesta rápida y de sensibilidad confiable para conocer el estado del equilibrio químico dentro de la biomasa microbiana del digestor. Este valor fue muy desigual en ambos digestores: se establece dentro de un intervalo de 0.4 y 0.6 en M1, y entre 0.2 y 0.4 en M2. Esta diferencia refleja la dinámica particular del proceso anaerobio en cada digestor; es probable que esta condición sea determinada por las características de los substratos a digerir en cada caso. El digestor M2 es alimentado con un lodo fisicoquímico de pH ácido, lo que estresa la biomasa en cada alimentación. A su vez, esto refleja la limitada capacidad *buffer* para superar este choque fisicoquímico. Sin embargo, a pesar de este problema, el pH promedio se muestra muy próximo a alcanzar el valor óptimo de operación y los microorganismos se muestran muy activos en la producción de biogás, logrando incluso un buen porcentaje de CH<sub>4</sub>.

La producción de biogás fue ligeramente mayor en M2 que en M1; su obtención fue a partir de cargas de 1.1 gSSV/L\*d, mientras que M1 lo hizo a partir de 2.5 gSSV/L\*d. Además fue más constante, con mayor volumen de biogás y porcentaje de metano. Este comportamiento es evidencia de que la biomasa se puede establecer en las condiciones ácidas del lodo fisicoquímico y realizar una mineralización de los SSV. En cuanto al digestor M1, su buen funcionamiento observado a través del alfa, pH y alcalinidad, se corrobora con la producción del biogás obtenido a partir del día 537; a pesar de haber estado en batch durante 10 días, su rápida recuperación muestra en sí, un saludable estado de la biomasa mesofílica, lo que permite pensar en un problema de fuga del biogás



y de mantenimiento del reactor (durante este periodo de no-producción, el reactor se cambió, ya que presentó fisuras importantes). Es evidente que la actividad mesofílica en ambos digestores se pueda optimizar aun más. Se debe considerar que aún no se han alcanzado los TRC de 15 días y que aún se debieron resolver algunas anomalías respecto a la operación de los digestores. En el inciso 4.1.5 , se discutirán las eficiencias de estabilización de los SSV así como otros parámetros indicativos de la operación de estos digestores.

#### **4.2.4. COMPARACIÓN DE LOS BIODIGESTORES T1 Y T2**

El pH en ambos digestores no presentó dispersión importante durante este periodo; sólo el digester T1 obtuvo un valor promedio ligeramente más alcalino. Sus valores se situaron en un intervalo entre 6.3 y 8.3. De igual forma en ambos digestores, la alcalinidad se estabilizó en un intervalo entre 3,000 y 5,000 mgCaCO<sub>3</sub> /L mientras que sus valores promedio presentan similitud siendo de 3,409 y 3,402 mgCaCO<sub>3</sub> /L en T1 y T2, respectivamente.

El valor alfa muestra durante esta etapa un importante incremento en el digester T1 al pasar de 0.35 a 0.51 promedio, mientras que el digester T2 no presenta cambio alguno. Los digestores termofílicos en estos tres parámetros se sitúan dentro de los valores óptimos de operación (Metcalf and Eddy, 1996; Malina and Pohland, 1992), a pesar de la diferencia que existe entre los dos tipos de sustratos.

En cuanto a la producción de biogás, el digester T1 presenta un mayor volumen de biogás y porcentaje de metano que T2. La producción de biogás se estableció claramente en T1 al final de esta experimentación, mientras que en T2 sólo se obtuvieron dos registros de producción no mayor a los 20 ml/d, con 80% de CH<sub>4</sub>, lo que no representa un valor significativo. En ambos digestores, la producción de biogás se obtuvo a partir de los 2.5 gSSV/L\*d. Estos valores de producción de biogás son muy bajos, aún cuando la tendencia es a incrementarse, pero se debe considerar que la carga orgánica será difícil de incrementar sin afectar el frágil equilibrio alcanzado en el proceso anaerobio termofílico. Van Lier (1996) indica la susceptibilidad del proceso a variaciones en el medio (temperatura, AGV). Estos resultados no se pueden atribuir solamente a una falta de tiempo en el proceso de aclimatación. Una aseveración así es difícil de sostener frente al pH, alcalinidad y alfa obtenidos. La respuesta se tendrá que buscar en el proceso anaerobio mismo, es posible que la actividad microbiana existente se encuentra fuertemente inhibida en su último nivel, la metanogénesis (Bruce, 1984). O bien, en la operación de los digestores, una fuga de biogás en algún punto del sistema que no ha sido posible detectar, una falla de operación al momento de purgar y alimentar, ó, al purgar la trampa de biogás; cualquiera de estos casos supone una pérdida importante del biogás.

#### **4.2.5. COMPARACIÓN DE LOS BIODIGESTORES MESÓFILOS Y TERMÓFILOS**

A continuación se presentan los valores promedio de operación de los digestores dentro del periodo considerado estable (Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Parámetros promedio de operación de los digestores

| Digestor | No Muestras* | pH   | Alcalinidad mgCaCO <sub>3</sub> /L | Alfa | Biogás (ml/d) | CH <sub>4</sub> % | CO <sub>2</sub> % |
|----------|--------------|------|------------------------------------|------|---------------|-------------------|-------------------|
| M1       | 122          | 7.16 | 2909                               | 0.55 | 356.55        | 42.08             | 12.85             |
| M2       | 128          | 6.75 | 4332                               | 0.27 | 462.65        | 45.51             | 27.28             |
| T1       | 127          | 7.60 | 3409                               | 0.51 | 181.41        | 10.86             | 15.03             |
| T2       | 128          | 7.45 | 3402                               | 0.48 | 0.15          | 5.85              | 15.52             |

\* número de muestras consideradas para el promedio

Con base en estos promedios, al realizar la comparación del funcionamiento de cada digestor, se puede llegar a las siguientes afirmaciones:

- Los digestores mesofílicos tienen mayor producción de biogás y mejor comportamiento en sus parámetros de control (pH, alcalinidad y alfa) que los digestores termofílicos
- Todos los digestores inician la producción de biogás con cargas orgánicas mayores a 2 gSSV/L\*d
- Todos los digestores han alcanzado un comportamiento adecuado en sus diversos parámetros de control.

La alimentación de los digestores fue difícil de controlar y se realizó en función de los valores de pH, alcalinidad y alfa obtenidos de la purga de cada digestor procurando evitar una sobrecarga en la alimentación y con ello una acidificación del proceso anaerobio. En todos los casos, el pH se confirma como un parámetro de lenta respuesta a las variaciones de carga orgánica. La alcalinidad y principalmente el valor alfa son los parámetros que muestran mejor cualidad como indicadores del proceso, lo que permitiría tomar decisiones correctivas en caso necesario. La producción y composición del biogás son valores de respuesta que permiten conocer la eficiencia del proceso en cuanto al grado de estabilización logrado de los sólidos suspendidos volátiles por digestión anaerobia.

En todos los casos, el pH, la alcalinidad y el valor alfa se establecieron en valores óptimos e indican que el proceso anaerobio se ha equilibrado parcialmente. Estos resultados alentadores confirman que es posible alcanzar aún, una mayor estabilidad dentro de los TRC planteados como objetivos en el presente trabajo (Malina and Pohland, 1992).

El ligero aumento de la producción y composición del biogás son indicadores del incremento en la eficiencia del proceso metanógeno. Dicha mejora de la actividad metanogénica se puede atribuir al aumento del TRC (Tabla 4.7), que pudo permitir un incremento en la población de bacterias metanógenas. Se sabe que estas bacterias tienen un crecimiento lento (Whitman *et al.*, 1992).

En la tabla 4.7, se presentan los valores promedio que caracterizan el funcionamiento bajo las condiciones de operación de la tabla anterior. Se realizaron los análisis del balance de

masa en los reactores dentro del periodo estable ya mencionado. Antes de iniciar el análisis de la tabla 4.7, es conveniente insistir en que los lodos biológicos de alimentación, tal como se mencionó anteriormente, fueron un substrato con fracción de SSV baja, en comparación a la registrada en los lodos fisicoquímicos, con valores de 36 y 72%, respectivamente.

Tabla 4.7. Elementos de balance de masa en las condiciones promedio de operación de los digestores

| PARÁMETRO                      | M1<br>PROM | M2<br>PROM | T1<br>PROM | T2<br>PROM |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| TRH (d)                        | 13         | 24         | 18         | 21         |
| Bv (gSSV/L*d)                  | 2,57       | 1.60       | 1.80       | 1.84       |
| Alimento(gSSV/L)               | 32.65      | 38.96      | 32.65      | 38.96      |
| Alim. (gSSV/d)                 | 12.87      | 8.02       | 8.26       | 9.21       |
| Alim. SSV/SST (%)              | 35.3       | 67.5       | 35.3       | 67.5       |
| Purga(gSSV/L)                  | 25.9       | 27.01      | 19         | 21.21      |
| Purga (gSSV/d)                 | 9.62       | 5.53       | 4.24       | 4.53       |
| Purga SSV/SST (%)              | 42.4       | 60         | 38.2       | 38.7       |
| E <sub>Reactor</sub> (%)       | 25.2       | 31         | 48.6       | 50.8       |
| BV salida                      | 1.92       | 1.11       | 0.85       | 0.91       |
| BV eliminada                   | 0.65       | 0.5        | 0.96       | 0.94       |
| RSV (%)                        | -          | 27.7       | -          | 69.6       |
| mlCH <sub>4</sub> /d           | 150.03     | 210.53     | 19.86      | 1.17       |
| mlCH <sub>4</sub> TPN/d        | 102.26     | 143.5      | 13.54      | 0.8        |
| mlCH <sub>4</sub> TPN/gSSValim | 7.95       | 17.89      | 1.64       | -          |
| mlCH <sub>4</sub> TPN/gSSVelim | 31.51      | 57.81      | 3.37       | -          |

RSV (%) Porcentaje de reducción de la fracción de los sólidos volátiles

E<sub>Reactor</sub> (%) Eficiencia de eliminación de los SSV en el reactor

De acuerdo con lo anterior, el rendimiento de CH<sub>4</sub> para los digestores M1, M2 y T1 fue bajo con valores de 31.51, 57.81 y 3.37 mlCH<sub>4</sub>TPN/gSSV<sub>elim</sub>, respectivamente. La producción específica de CH<sub>4</sub> fue limitada teniendo en cuenta que se han reportado hasta 204 y 129 mlCH<sub>4</sub>/gSTV<sub>alim</sub> para digestores mesofílicos y termofílicos, respectivamente (Cecchi *et al.*, 1992).

De acuerdo con estos valores, se puede observar que los digestores mesofílicos tuvieron un mejor funcionamiento debido a su mayor capacidad de degradación de substrato en relación con la transformación en CH<sub>4</sub>. En efecto, M1 y M2 presentan una eficiencia de eliminación de los SSV (%E) respectivamente de 25.2 y 31% con una producción de 31.51 y 57.81 mlCH<sub>4</sub>TPN/gSSV<sub>elim</sub>, aunque T1 tiene un %E más elevado (48.6%) con menos producción de CH<sub>4</sub> (3.37 mlCH<sub>4</sub>TPN/gSSV<sub>elim</sub>). En el caso de T2, se observa también una eliminación de los SSV con una producción inexistente. Esto indica que en este periodo, no se logró una digestión anaerobia completa, pero sí una adaptación lenta del consorcio microbiano anaerobio, lo que se explica por una conversión incompleta de materia orgánica. Además, en el caso de los termofílicos, las poblaciones microbianas tienen que

aclimatarse a la temperatura de operación de estos digestores, lo cual aumenta el tiempo de aclimatación. Dicha adaptación lenta se ha reportado en experiencias con digestores mesofílicos y termofílicos (Krugel *et al.*, 1998; van Lier, 1996; Aitken and Mullennix, 1992; Cecchi *et al.*, 1992).

Dado que los digestores termofílicos han tardado sin alcanzar aún una buena actividad metabólica, se podría pensar que se debe a una baja actividad metanógena del inóculo anaerobio desde el inicio del arranque. Considerando que el digestor M1 podría equivaler al inóculo de inicio, ya que no tiene ninguna otra aportación, su actividad no presenta una metanogénesis alta. El aumento de la temperatura pudo estresar mucho más una biomasa que se encontraba con una débil actividad microbiológica. Este problema pudo aumentar el largo tiempo de adaptación de los inóculos anaerobios frecuentemente mencionado (Krugel *et al.*, 1998; van Lier, 1996; Aitken and Mullennix, 1992; Cecchi *et al.*, 1992).

En relación con dicha digestión anaerobia incompleta, se puede observar, por ejemplo en el caso de T1, que no obstante que se obtuvo una remoción de carga orgánica de 0.96 gSSV/L\*d, se registró una producción limitada de biogás, lo cual se puede explicar de tres formas: dado que la metanogénesis se mostró inhibida, la remoción de SSV se realizó parcialmente hasta el proceso de acidogénesis, o bien parcialmente hasta el proceso de hidrólisis, o bien existió una fuga de biogás, la cual no fue posible detectar en el sistema. La primera causa no parece ser plausible, ya que el digestor no mostró signos de acidificación o tendencia hacia el agotamiento de su capacidad *buffer*. Para verificar lo anterior, y a falta de análisis directos de AGV se recurrió a efectuar un calculo teórico, propuesto por Jenkins *et al.*(1983), el cual plantea la siguiente relación:

$$AGV = \frac{Alc_T - Alc_B}{(0.83)(0.85)}$$

donde

AGV= Concentración AGV, mg/L

Alc<sub>B</sub>= Alcalinidad de bicarbonatos (pH=5.75), mgCaCO<sub>3</sub>/L

Alc<sub>T</sub>= Alcalinidad total (pH=4.3), mgCaCO<sub>3</sub>/L

0.83= factor de conversión de acetato a CaCO<sub>3</sub>

0.85= fracción de AGV determinados por titulación

Al aplicar la anterior ecuación a los datos de la tabla 4.3, se obtienen las siguientes concentraciones de AGV en los lodos de purga, para los cuatro digestores: 1,855; 4,482; 2,367 y 2,507 mgAGV/L para M1, M2, T1 y T2, respectivamente. Las cuales son concentraciones relativamente elevadas y podrían explicar los valores encontrados de carga de SSV eliminada hasta la acidogénesis. La buena capacidad amortiguadora pudo proteger parte del consorcio microbiano de la tendencia a la acidificación del proceso. Sin embargo, se debe considerar el tipo de AGV acumulado, pues una concentración de 3 g/L de ácido propiónico puede inhibir parcialmente la digestión anaerobia, aún cuando el ácido acético sólo puede causar el mismo efecto a partir de 35 g/L (Ratajczyk, 1994).

En los mesofílicos y termofílicos, no se logra tampoco la estabilización de los lodos residuales. Los %RSV muestran que la estabilización fue limitada, ya que un lodo con un buen grado de estabilización, alcanza valores de 45-60% para casos de reactores mesofílicos y de 50-85% para el caso de reactores termofílicos (Krugel *et al.*, 1998; Aitken

and Mullennix, 1992; Kayhanian and Rich, 1992). Este porcentaje corresponde a la capacidad del consorcio microbiano anaerobio de disminuir la fracción en los sólidos volátiles, lo que representa la fracción putrescible de los lodos de desecho. En otros términos, el %RSV equivale a la facultad del proceso anaerobio de estabilizar los lodos de desecho. Sin embargo, el inóculo anaerobio debe lograr una buena actividad metabólica para poder estabilizar de manera eficaz los lodos residuales, lo que no se puede fácilmente obtener en una fase de arranque como se mencionó anteriormente.

#### **4.2.6. CONCLUSIONES DE LA ETAPA DE ESTABILIZACIÓN DEL PROCESO ANAEROBIO**

Se establece que los digestores mesofílicos tomaron menor tiempo en desarrollar condiciones cercanas a la estabilización del proceso, mientras que los digestores T1 y T2 tardan más en adaptarse a las condiciones del proceso termofílico.

Los lodos utilizados en los digestores, pueden considerarse atípicos, ya que por un lado, el lodo biológico proviene de un proceso anaerobio y por lo tanto ya está en cierto grado digerido, y por el otro, el lodo fisicoquímico tiene características muy particulares (pH ácido y alto contenido de Al). Lo anterior permite explicar, aunque parcialmente, la desviación de los resultados obtenidos en comparación con los encontrados en la literatura.

En general, los digestores desarrollaron un adecuado nivel de alcalinidad y una relación alfa aceptable, lo que indica que a las cargas orgánicas ensayadas, el proceso puede autoregular su pH. En esta etapa los digestores manifestaron ineficiencias debidas, parcialmente, a la poca rigurosidad con la que se realizó la alimentación, la cual nunca presentó una carga orgánica constante en su concentración, pero también se debió a los problemas inherentes al diseño, equipos y materiales usados, los cuales fueron parte de los problemas a superar, como la ineficiencia de mezclado de los reactores y el potencial presencia de fugas de biogás.

Dado que los digestores, tanto mesófilos como termófilos no alcanzaron condiciones estables de proceso, se obtuvo un rendimiento de  $\text{CH}_4$  ( $\text{mlCH}_4/\text{TPN/gSSV}_{\text{elim}}$ ) y una producción específica de  $\text{CH}_4$  ( $\text{mlCH}_4/\text{gSSV}_{\text{alim}}$ ) que continúan siendo bajos. Es posible alcanzar la adaptación del inóculo en cualquiera de estas dos condiciones en un menor tiempo, si se eliminan los problemas originados de las fugas de biogás, recirculación y eficiencia en el mezclado, así como principalmente la elección de un inóculo de mejores características microbiológicas.

## **5. CONCLUSIONES GENERALES**

La eliminación de parásitos durante la digestión anaerobia de lodos de desecho, bajo condiciones de termofilia, es un tratamiento tecnológicamente factible de realizar. Contrariamente a lo esperado, bajo estas condiciones no se obtuvo la remoción de indicadores patógenos (Coliformes fecales).

Se comprobó que la digestión anaerobia mesofílica puede alcanzar la estabilidad del proceso en menor tiempo y dificultad que la digestión anaerobia termofílica. La mineralización de la fracción volátil hasta  $\text{CH}_4$  obtenida en el presente estudio puede incrementarse si se logra la estabilidad del proceso termofílico, lo cual permitiría digerir los lodos de desecho y producir biosólidos del tipo "clase A".

El efecto de la temperatura sobre la estabilidad del proceso termofílico, involucra considerables repercusiones microbiológicas inherentes al proceso anaerobio. Esto hace necesaria la creación de un buen diseño de ingeniería que permita un buen control de la anaerobiosis y de cada uno de sus parámetros físicos, químicos, pero también microbiológicos que permitan establecer puntualmente las deficiencias de las distintas poblaciones presentes en el proceso de digestión anaerobia. Se considera que con un buen control y operación de un digester anaerobio a  $55^\circ\text{C}$ , se puede lograr la eliminación de microorganismos patógenos y parásitos así como la producción de biogás.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Ahring B.K. and Weatwerman P. (1984).** Isolation and characterization of a termophilic, acetate-utilizing methanogenic bacterium. *FEMS Microbiol. Lett.* 25:47-52.
- Aitken M.D. and Mullennix R.W. (1992).** Another Look at thermophilic Anaerobic Digestion of Wastewater Sludge. *Wat. Environ. Res.*, 64, 915-919.
- APHA. AWWA. WPCF. (1989).** Standard methods for the examination of water and wastewater. USA. 19ª Edición E.U.A.
- Arana M. O., (1990).** Efecto de la Aplicación de tres Ácidos Fuertes y Aguas Residuales Sobre Algunas Propiedades Físicas y Químicas de los suelos del Ex-Lago de Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo; México. pp.153.
- Bhatnagar L., Jain M.K. and Zeikus J.G. (1991).** Methanogenic bacteria. In: Variations in autotrophic life. ISBN 0-12-640360-0. Academic press. 251-270.
- Black J.G. (1996).** Microbiology, Principles and applications. Third edition. Prentice Hall. U.S.A., pp. 869.
- Bode H. and Klauwer E. (1999).** Advantages and disadvantages of different shapes in digester design. *WQI Casebook*, March/April, pp.35-40.
- Brock T. D., Madigan M. T., Martinko J.M. and Parker J. (1997).** Biology of Microorganisms. Prentice-Hall International, Inc., USA. 986.
- Brock T.D. and Madigan M.T. (1991).** Microbiología. Sexta Edición, Prentice Hall Edit., México, ISBN 968-880-325-1.
- Bruce A. (1984).** Sewage Sludge Stabilisation and Desinfection. WRC by Ellis Horwood Limited. England. Romental Microbiology. pp 813
- Burtscher C., Fall. P.A., Christ O., Wilderer P.A. and Wuertz S., (1998).** Detection and survival of pathogens during two-stage thermophilic/mesophilic anaerobic treatment of suspended organic waste. *Wat. Sci. Tech.* 38, 12,123-126.
- Bustamante M. E. (1994).** Pasado, presente y futuro de la epidemiología. *Salud Pública en México.* 36, 97-112
- Carrington E.G., Harman S.A., Pike E.B. (1982).** Inactivation of *Salmonella* during anaerobic digestion of sewage sludge. *J. Appl. Bacteriol.* 53, 331-334.
- Catunda, P.F.C., van Haandel, A.C. and Lettinga, G. (1994).** Influence of Retention Time on the Performance of the UASB Reactor for Sewage Treatment. *Poster Paper Preprints of the Seventh International Symposium on Anaerobic Digestion*, 23-27 January 1994, Cape Town South Africa: 206-210.
- Cecchi F., Pavan P., Musacco A., Mata-Alvarez J. and Sans C. (1992).** Comparison Between Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Coming From Urban Wastewater Treatment Plants. *Wat. Sci. Tech.*, 26, 9-11, 2409-2412.
- Cifuentes E., Blumenthal U., Ruiz-Palacios G. Bennett S., Peasey A. (1994).** Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual; El valle del Mezquital, México. *Salud Pública de México.* 36, 3-9.

- Cifuentes E., Blumenthal U., Ruiz-Palacios G., Bennett S., Quigley M., Peasey A., Romero Alvarez H. (1993).** Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México. *Salud Pública de México*. **35**, 614-619.
- Comisión Nacional del Agua (CNA, 1995).** Estudio del Impacto Ambiental asociado al Proyecto de Saneamiento de las aguas negras que se producen en el Valle de México. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA, 1995).** Feasibility study for the Sanitation of the Valley of México. México.
- Daniels L. (1993).** Biochemistry of methanogenesis. In: *The Biochemistry of Archaea (Archaeobacteria)*. Ed. Kates M., Kushner DJ and Matheson AT., 41-172.
- Dichtl N. (1997).** Thermophilic and mesophilic (two-stage) anaerobic digestion. *J. C. Innovative Technologies for Sludge Utilization and disposal*, **11**, 98-104.
- Environmental Protection Agency, a. (1996).** "A guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule". Estados Unidos de América.
- Environmental Protection Agency, b.(1996).** "A plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule". Estados Unidos de América.
- Environmental Protection Agency. (1992).** Environmental Regulations and Technology Control of pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (including domestic septage) under 40 CRF part 503, Appendix I, Analytical Method for Viable Helminth Ova, Washington, D.C.
- Fraser, J.A.L., Godfree A.F. and Jones F. (1984).** Use of paracetic acid in operational sewage sludge disposal to pasture. *Water Science and Technology*. Vol. 17, pp. 451-466.
- Galván G. M., De Victorica J. and Rojas N. (1998).** "Potential Viability of Helminth Egg in Waste Water Assessment by Vital Staining". *Producing IAWQ. 19 biennial International Conferens*, **10**, 32-36 Vancouver Canada. Junio.
- Godfree A.F., Jones F., Satchwell M. and Watson, D.C. (1984).** The effectiveness of chemical disinfection on faecal bacteria in sludge. In *sewage sludge stabilization and disinfections*. Bruce, A.M. Editor. Ellis Horwood Limited, pp. 412-425.
- Gottschalk G. and Peinemann S. (1992).** The anaerobic way of life. In: *The prokaryotes*. Springer&Verlag, New York, 300-311.
- Gujer W. and Zehnder J.B. (1983).** Conversion Processes in Anaerobic Digestion. *Wat. Sci. Technol.* **5**: 127-167.
- Hamer G., Bryers J. D. and Berger J. (1985).** Thermophilic anaerobic Digestion for Sewage Sludge Stabilization. *Acta Biotechnology*. **5**, 225-234.
- Hays B. D. (1976).** Potential for Parasitic Disease Transmission With Land Application of Sewage Plant Effluents and Sludge. *Wat. Res.* **11**, 583-595.
- Jenkins S.R., Morgan J.M., Zhang X.(1983).** Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *Res. J. WPCF*, **63**, 1, 28-34.
- Kayhanian M. and Rich D. (1995).** Pilot-scale high solid thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements. *Biomass and Bioenergy*. **8**, 6, 433-444.
- Kearney T.E., Larkin M.J., Levett P.N. (1993).** The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. *J. Appl. Bacteriol.* **74**, 86-93.
- Klein Laurence R., (1974)** *Ecology Encyclopedia* Britt G.: 15 Ed. Hemingway Benton. Chicago.



- Krugel S., Nemeth L. and Peddie C. (1998).** Extending thermophilic anaerobic digestion for producing class A biosolids at the Greater Vancouver Regional District's Anaacis Island wastewater treatment plant. *Water Sci. Tech.* **38**, 8-9, 409-416.
- Kunte D.P., Yeole T.Y. and Ranade D.R. (2000).** Inactivation of *Vibrio cholerae* during anaerobic digestion of human night soil. *Biores. Tech.* **75**, 149-151.
- Lamothe R.A. and García L.P. (1988).** Helmintiasis del hombre en México, tratamiento y profilaxis. AGT, editor. pp139.
- Lehninger A. (1983).** Bioquímica. Segunda Edición. Omega. ISBN 84-282-0211-7, Barcelona, España, pp950.
- Lepisto Satu S. and Rintala Jukka A. (1995).** Thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: start-up with digested material from a mesophilic process. *Environmental Technology.* **16**, 157-164.
- Lettinga G. and Hulshoff Pol L.W. (1991).** UASB-process design for various types of wastewater. *Wat. Sci. Tech.* **24**, **8**, 79-86.
- Lowe S.E., Jain M.K. and Zeikus J. G. (1993).** Biology, ecology, and biotechnological applications of anaerobic bacteria adapted to environmental stresses in temperature, ph, salinity, or substrates. *Microbiol. Rev.* **57**, 451-509.
- Lue-Hing C., Zens D. R., Tata P., Kuchenrither R., Malina Jr. J. F. and Sawyer B. (1998).** Municipal Sludge Management: A reference text on processing, utilization and disposal. *Second Edition. Technomic Publishing Co., Inc. U.S.A.* **4**, 790.
- Malina J F. and Pohland F. G. (1992).** Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. *Ed. Technomic, USA* pp 214
- Metcalf and Eddy (1996).** Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. 2º Tomo. McGraw-Hill. pp.753-1485
- Morris D.L., Huges D.L., Hewitt R.J. and Norrington I.J. (1986).** Pathogens in sewage sludge: (ii) effects of sludge of stabilization and treatment processes on viability and infectivity of beef tapeworm eggs. *Wat. Pollut. Control.* 476-481.
- Murray P.R., Kobayashi G.S., Pfaller M.A. and Rosenthal K.S. (1997).** Microbiología Médica. segunda edición. Harcourt Brace. España. pp 755.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, Diario Oficial, 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-003-ECOL-1997.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial, 21 de septiembre de 1998.
- Oles J., Dichtl N. and Niehoff H.-H. (1997).** Full Scale Experience of Two Stage Thermophilic/Mesophilic Sludge Digestion. *Wat. Sci. Tech.* **36**, 6-7, 449-456
- Olsen J.E. and Larsen H.E. (1987).** Bacterial decimation times in anaerobic digestion of animals slurries. *Biol. Wastes.* **21**, 153-168.
- Pelmont J. (1993).** Bactéries et environnement, adaptations physiologiques. PUG, Grenoble, pp 899.
- Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-004-ECOL-2000.** Protección Ambiental.- Lodos y biosólidos.- especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
- Ramalho R.S. (1991).** Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. España. pp. 705.

- Rimkus R.R., Ryan J.M. and Cook E.J. (1982).** Full-scale thermophilic digestion at the West-Southwest Sawage Treatment Works. Chicago, Illinois. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **54**, 1447.
- Saval S. and Noyola A. (1992).** Aportaciones de la biotecnología al tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Biotecnología*. **2**, 5-6, 155-172.
- Schlegel H.G. (1997).** Microbiología General. Ediciones Omega. España. pp.654.
- Schmidt G.D and Roberts L.S. (1981).** Foundations of Parasitology. 2 Edition. Mosby Company. St. Louis, Missouri, pp.791.
- Stronach SmM., Rudd T. and Lester J.N. (1986).** Anaerobic digestion processes in industrial wastewater treatment. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.
- Ratajczyk I. (1994).** Construction and start-up of a pilot-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor for wastewater and waste sludge treatment. Studienrichtung Umwelt- und Hygienetechnik Thesis, Fachhochschule Lübeck, México, pp. 141.
- Tay Z.G., Gutierrez Q.M., Rodriguez Q.M.A., Lopez M.R. C.R. (1995).** Microbiología y parasitología Medicas. Segunda edición. Méndez Ed. México. pp 3.1-3.33.
- Van Lier J.B. (1996).** Limitations of thermophilic anaerobic wastewater treatment and the consequences for process design. *Ant. Van Leeuwenhoek*. **69**.1-4.
- Varel V.H., Isaacsson H.R. and Briant M.P. (1997)** Thermophilic methane production from cattle waste. *Appl. Environ. Microbiol* **33**:298-307.
- Ville C., Solomon E.P., Berg L.R., Martin D.W. (1998).** Biología. Cuarta edición. McGraw-Hill Interamericana. México. pp 1305
- Watanabe H., Kitamura T., Ochi S. and Ozaki M. (1997).** Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions. *Wat. Sci. Tech.* **36**, 6-7, 25-32.
- Water Environmental Federation (1987).** Anaerobic sludge digestion. Manual of Practice N° 16. Second Edition. pp. 118.
- Whitman W. B., Bowen T.L. and Boone D.R. (1992).** The methanogenic bacteria. In: The prokaryotes. Springer&Verlag, New York, 719-767.
- Zinder SH (1990).** Conversion of acetic acid to methano by thermophiles. *FEMS Microbiol. Rev.* **75**, 125-138.

## 7. GLOSARIO

**Alcalinidad** La alcalinidad total y de los bicarbonatos fue determinada por titulación con 0.05 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a pH de 5.75 y subsecuentemente a pH 4.30. Mediante la titulación al punto de 5.75 se cuantifica la alcalinidad debida a bicarbonatos, mientras que el consumo de ácido al punto de 4.30, titula la alcalinidad total, incluyendo la debida a los ácidos grasos volátiles (APHA,1989). Ambos de acuerdo con la siguiente formula:

$$Alcalinidad(mgCaCO_3 / l) = \frac{(mlH_2SO_4)(N_{H_2SO_4})(5000)}{ml_{muestra}}$$

**Alfa (α)** La determinación se realizó de acuerdo a la relación de alcalinidad de bicarbonatos entre la alcalinidad total (APHA,1989), de acuerdo con la siguiente formula:

$$\alpha = \frac{Alcalinidad_{bicarbonatos\ pH\ 5.75}}{Alcalinidad_{total\ pH\ 4.30}}$$

**Mezclado** La operación del mezclado se usa principalmente para dos objetivos. 1° para mezclar una substancia con otra, y se clasifica como continuo rápido. 2° para mantener el contenido de un reactor o tanque de control en total estado de suspensión y se clasifica como mezclado continuo (Metcalf and Eddy, 1996).

**Sólidos** Es el parámetro físico más importante de las características del agua residual. Se compone de materia flotante, materia sedimentable, materia coloidal y materia en solución. Los sólidos pueden favorecer el desarrollo de lodos anaerobios, por sedimentación, condición por la cual se deben tratar antes de ser descargados al ambiente (Metcalf and Eddy, 1996).

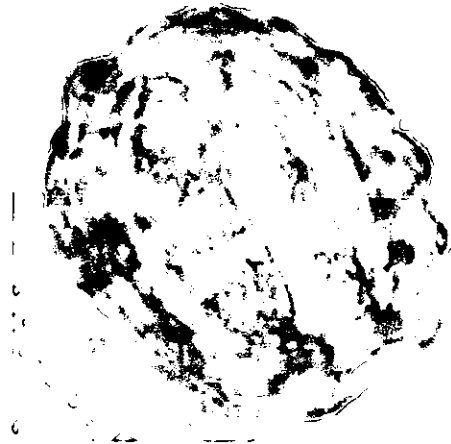
**ST** Los sólidos totales contenidos en el agua de desecho se definen por los residuos remanentes, posterior, a la evaporación del agua a 103 ó 105°C. Incluyen a los sólidos suspendidos totales (SST), aquellos que son retenidos por un filtro de 1.2 μm, y sólidos suspendidos fijos (SSF), son aquellos que atraviesan el filtro. También aquí se consideran los sólidos suspendidos volátiles, SSV, (APHA,1989).

- SF Los sólidos fijados es la expresión aplicada al residuo inorgánico de sólidos suspendidos totales, después de someterse a la ignición durante un tiempo determinado y a una temperatura específica (APHA,1989).
- SV Los sólidos volátiles son la expresión de la materia orgánica volatilizada por ignición a 550°C (APHA,1989).
- TRH El tiempo de retención hidráulica hace referencia al tiempo que tarda el agua dentro del reactor o tanque, desde el momento de su ingreso hasta que sale.
- TRC El tiempo de retención celular hace referencia al tiempo de permanencia de los microorganismos presentes en un proceso biológico, aerobio ó anaerobio, dentro de un reactor o tanque, hasta el momento de ser purgado del mismo para ser tratado como lodo de desecho.

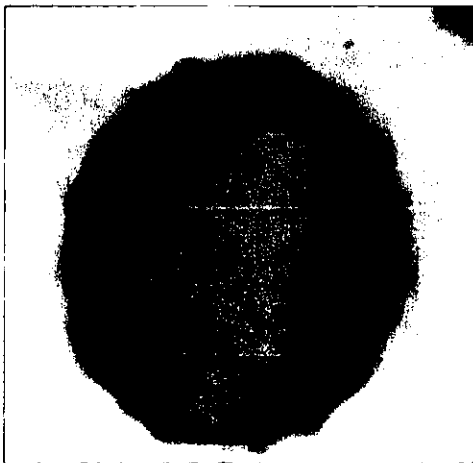
## **8. ANEXOS**



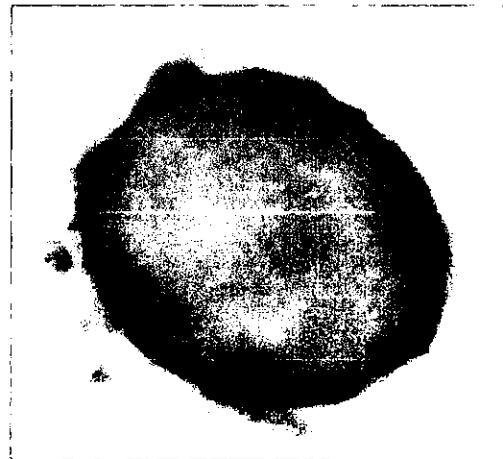
1. Huevo infértil de *Ascaris lumbricoides*. La forma del huevo es característica, las mamelas y su masa central son irregulares (85 a 95  $\mu\text{m}$  de longitud y 30 a 40  $\mu\text{m}$  de ancho).



2. Huevo con larva de *Ascaris lumbricoides*. La forma es ligeramente ovalada y presenta mamelas más suaves (45 a 75  $\mu\text{m}$  de longitud y 30 a 50  $\mu\text{m}$  de ancho).



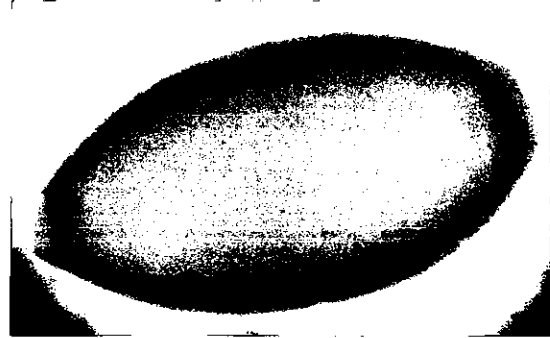
3. Huevo de *Ascaris lumbricoides* sin teñir (viable). Concentrado por la técnica de membrana (TM) y coloración vital.



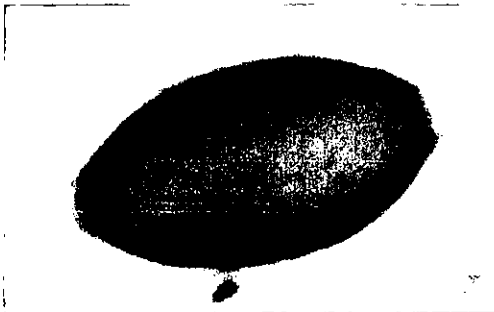
4. Huevo de *Ascaris lumbricoides* teñido con azul de tripan. La permeabilidad de la pared es un indicio de pérdida de la viabilidad.



5. Huevo de *Trichuris trichiura*. Ovalado ( $50\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ ) con una triple membrana, la exterior teñida por la bilis, una capa hialina, separando una zona interior granulosa. Presenta dos prominencias polares mucosas que rompen la continuidad de la membrana.



6. Huevo de *Trichuris trichiura* Concentrado por la técnica de membrana (TM) y coloración vital. Se observa que el colorante no penetró al interior de la célula.



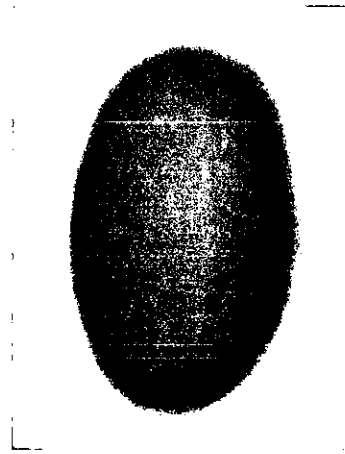
7. Huevo de *Trichuris trichiura* teñido con azul de tripan lo cual indica que la célula es inviable para producir una larva.



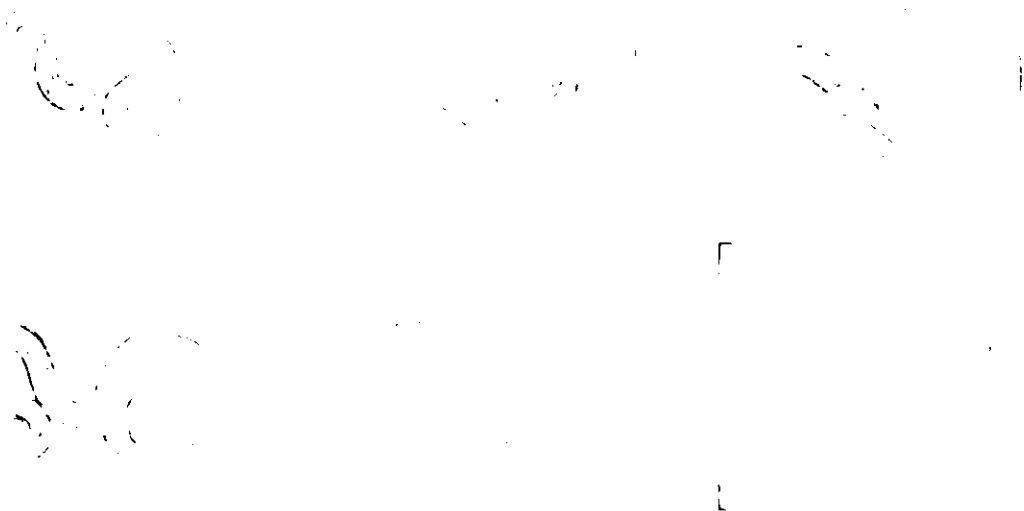
8. Huevo de *Trichuris trichiura* Sin teñir, al igual que en el caso anterior, el colorante no penetró al interior de la célula.



9. Huevo de *Taenia* sp. De forma esférica con 40  $\mu\text{m}$  diámetro y tiene tres parejas de ganchos internos.



10. Huevo de *Diphylobothrium* sp. Teñido con azul de tripan (aprox. 70  $\mu\text{m}$  de longitud y 45  $\mu\text{m}$  de ancho).



11. Huevo con larva de *Toxocara canis* en el momento de la eclosión. (huevo de 50 a 60  $\mu\text{m}$  de diámetro) Técnica Norma (NOM-001-ECOL-1996). Cortesía de la Dra. Nathalie Cabirol y Patricia Castro Ortiz del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para consulta, buscar en <http://www.cdfound.to.it/>, Atlas de Parasitología.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



**Resultados Experimentales del Digestor M1**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 430        | 7.43      | 2400                          | 0.73        | 372                      | 52.6                          | 16.5                          | 550                 |
| 432        | 7.33      | 2800                          | 0.61        | 235                      | 50.8                          | 16.5                          | 550                 |
| 433        | 7.43      | 3000                          | 0.74        | 342                      | 52.6                          | 19.5                          | 550                 |
| 434        | 7.36      | 2000                          | 0.68        | 525                      | 52.6                          | 19.5                          | 550                 |
| 435        | 7.42      | 2200                          | 0.63        | 545                      | 52.6                          | 19                            | 550                 |
| 436        | 7.24      | 2200                          | 0.61        | 626                      | 51.4                          | 18                            | 550                 |
| 437        | 7.26      | 2720                          | 0.5         | 490                      | 55.7                          | 20                            | 550                 |
| 439        | 7.4       | 1960                          | 0.71        | 521                      | 55.7                          | 20                            | 550                 |
| 440        | 7.21      | 3200                          | 0.5         | 542                      | 50.8                          | 19                            | 550                 |
| 441        | 7.2       | 2640                          | 0.53        | 615                      | 51.4                          | 19.5                          | 400                 |
| 442        | 7.4       | 2920                          | 0.5         | 532                      | 51.4                          | 18.5                          | 450                 |
| 443        | 7.16      | 2720                          | 0.54        | 490                      | 56.3                          | 19                            | 500                 |
| 444        | 7.33      | 2360                          | 0.66        | 542                      | 52                            | 18                            | 500                 |
| 446        | 7.26      | 2440                          | 0.67        | 1043                     | 72                            | 26.6                          | 500                 |
| 447        | 7.24      | 2080                          | 0.69        | 470                      | 56.3                          | 20                            | 500                 |
| 448        | 7.08      | 2200                          | 0.54        | 563                      | 53.2                          | 19                            | 400                 |
| 449        | 7.29      | 2600                          | 0.63        | 616                      | 82                            | 18                            | 400                 |
| 450        | 7.22      | 2880                          | 0.54        | 470                      | 58.8                          | 19.5                          | 400                 |
| 451        | 7.26      | 2640                          | 0.53        | 444                      | 74.8                          | 25.2                          | 400                 |
| 453        | 7.68      | 2800                          | 0.58        | 850                      | 91.8                          | 8                             | 500                 |
| 454        | 7.29      | 3360                          | 0.59        | 320                      | 78.4                          | 21.3                          | 450                 |
| 455        | 7.32      | 2800                          | 0.57        | 340                      | 55.1                          | 19.5                          | 400                 |
| 456        | 7.18      | 2440                          | 0.57        | 573                      | 54.4                          | 20.6                          | 500                 |
| 457        | 7.45      | 2880                          | 0.55        | 490                      | 48.5                          | 23.8                          | 500                 |
| 458        | 7.29      | 2520                          | 0.63        | 680                      | 88.7                          | 11                            | 500                 |
| 460        | 7.25      | 3000                          | 0.57        | 1021                     | 88.7                          | 10.5                          | 500                 |
| 461        | 7.29      | 3000                          | 0.53        | 292                      | 87.2                          | 11                            | 500                 |
| 462        | 7.3       | 2800                          | 0.57        |                          | 10.1                          | 10.3                          | 125                 |
| 463        | 7.47      | 2800                          | 0.5         |                          | 2                             | 8                             | 300                 |
| 464        | 7.29      | 2600                          | 0.69        |                          | 1.6                           | 4.6                           | 500                 |
| 465        | 7.3       | 1140                          | 0.69        | 5                        | 1                             | 3.3                           | 500                 |
| 467        | 7.37      | 2260                          | 0.66        |                          |                               | 2.5                           | 500                 |
| 468        | 7.06      | 2270                          | 0.67        | 31                       | 1.5                           | 2.9                           | 500                 |
| 469        | 7.31      | 2160                          | 0.64        | 5                        | 3.6                           | 6.3                           | 500                 |
| 470        | 6.98      | 2600                          | 0.69        | 20                       | 2.7                           | 5.9                           | 500                 |
| 471        | 7.05      | 3000                          | 0.53        | 3                        | 2.7                           | 6.3                           | 800                 |
| 472        | 7.26      | 2280                          | 0.66        |                          |                               |                               | 500                 |
| 474        | 7.19      | 2880                          | 0.63        |                          |                               | 4.1                           | 400                 |
| 475        | 6.85      | 2960                          | 0.43        |                          | 0.3                           | 5                             | 400                 |
| 476        | 7.28      | 3000                          | 0.53        |                          |                               | 5                             | 400                 |
| 477        | 7.22      | 2680                          | 0.59        |                          |                               | 3.7                           | 400                 |
| 478        | 7.14      | 2600                          | 0.55        |                          |                               | 3.7                           | 400                 |
| 479        | 7.08      | 2640                          | 0.57        |                          |                               | 3.7                           | 400                 |
| 481        | 7.46      | 2800                          | 0.57        |                          |                               | 4.5                           | 400                 |
| 482        | 7.33      | 2200                          | 0.65        |                          |                               | 4.5                           | 400                 |
| 483        | 7.41      | 2440                          | 0.62        |                          |                               | 3.7                           | 400                 |
| 484        | 7.14      | 2360                          | 0.57        |                          |                               | 3.7                           | 400                 |
| 485        | 7.45      | 2480                          | 0.64        |                          |                               | 3.3                           | 400                 |

**Resultados Experimentales del Digestor M1**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 486        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 488        | 7.58      | 3440                          | 0.58        |                          |                               | 5.9                           | 400                 |
| 489        | 7.44      | 3320                          | 0.54        |                          |                               | 3.3                           | 400                 |
| 490        | 7.06      | 3200                          | 0.46        |                          |                               | 4.1                           | 400                 |
| 491        | 7.14      | 2640                          | 0.51        |                          |                               | 5.9                           | 400                 |
| 492        | 7.04      | 2920                          | 0.47        |                          |                               | 2.9                           | 400                 |
| 493        | 7.02      | 2800                          | 0.48        |                          |                               | 8                             | 400                 |
| 495        | 7.27      | 3280                          | 0.48        |                          |                               | 3.3                           | 400                 |
| 496        | 7.34      | 3080                          | 0.54        |                          |                               | 5                             | 400                 |
| 497        | 6.8       | 3600                          | 0.39        |                          |                               | 2.9                           | 400                 |
| 498        | 6.95      | 3200                          | 0.42        |                          |                               | 5                             | 400                 |
| 499        | 7.01      | 3000                          | 0.44        |                          |                               | 5.4                           | 400                 |
| 500        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 502        | 7.03      | 3160                          | 0.44        |                          |                               | 5                             | 400                 |
| 503        | 6.99      | 2760                          | 0.48        |                          |                               | 3.7                           | 400                 |
| 504        | 7.16      | 2640                          | 0.57        |                          |                               | 2.9                           | 400                 |
| 505        | 7.13      | 2800                          | 0.47        |                          |                               | 2.9                           | 400                 |
| 506        | 7.05      | 2920                          | 0.54        |                          |                               | 3.3                           | 400                 |
| 507        | 7.08      | 3080                          | 0.5         |                          |                               | 5                             | 400                 |
| 509        | 7.46      | 2920                          | 0.57        |                          |                               | 4.6                           | 200                 |
| 510        | 7.14      | 3120                          | 0.61        |                          |                               | 3.7                           | 200                 |
| 511        | 7.18      | 3080                          | 0.58        |                          |                               | 2.1                           | 200                 |
| 512        | 7.17      | 2960                          | 0.56        |                          |                               | 2.1                           | 200                 |
| 513        | 7.13      | 3200                          | 0.5         |                          |                               | 2.1                           | 200                 |
| 514        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 516        | 7.23      | 3560                          | 0.57        |                          |                               | 3.7                           | 200                 |
| 517        | 7.3       | 2760                          | 0.65        |                          |                               | 4.6                           | 200                 |
| 518        | 5.91      | 2600                          | 0.15        |                          | 13.5                          | 4.2                           | 200                 |
| 519        | 5.08      | 2200                          |             |                          | 8.7                           | 11.2                          | 200                 |
| 520        | 5.8       | 2480                          |             |                          | 6.2                           | 7.6                           | 200                 |
| 521        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 523        | 7.24      | 3320                          | 0.57        |                          | 4.3                           | 7.6                           | 200                 |
| 524        | 7.2       | 3000                          | 0.65        |                          | 2.4                           | 5                             | 200                 |
| 525        | 7.33      | 2920                          | 0.61        |                          | 1.8                           | 5                             | 250                 |
| 526        | 7.05      | 1600                          | 0.57        |                          | 2.7                           | 4.1                           | 250                 |
| 527        | 7.1       | 3160                          | 0.5         |                          | 0.6                           | 3.7                           | 300                 |
| 528        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 530        | 7.22      | 3400                          | 0.51        |                          |                               | 1.2                           | 300                 |
| 531        | 7.05      | 3360                          | 0.51        |                          |                               | 2.5                           | 350                 |
| 532        | 7.24      | 3320                          | 0.55        |                          |                               | 2.5                           | 300                 |
| 533        | 7.18      | 3000                          | 0.62        |                          |                               | 2.9                           | 350                 |
| 534        | 6.83      | 3200                          | 0.41        |                          |                               | 3.7                           | 350                 |
| 535        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 537        | 7.31      | 3720                          | 0.59        | 135                      | 49                            | 22.2                          | 350                 |
| 538        | 7.04      | 2800                          | 0.57        |                          | 22.7                          | 10.7                          | 350                 |
| 539        | 7.13      | 3200                          | 0.56        | 60                       | 29.7                          | 14.5                          | 350                 |
| 540        | 7.13      | 2720                          | 0.55        | 330                      | 47.3                          | 23.2                          | 330                 |
| 541        | 7.09      | 2600                          | 0.58        | 370                      | 48.5                          | 23.2                          | 350                 |

**Resultados Experimentales del Digestor M1**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Allimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 542        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 544        | 7.12      | 2920                          | 0.49        | 500                      | 76.9                          | 23.1                          | 350                  |
| 545        | 7.08      | 2800                          | 0.54        | 284                      | 45                            | 21.6                          | 350                  |
| 546        | 7.05      | 2400                          | 0.5         | 350                      | 52                            | 25.5                          | 350                  |
| 547        | 6.78      | 3400                          | 0.36        | 660                      | 41.1                          | 34.5                          | 350                  |
| 548        | 6.86      | 3200                          | 0.37        | 620                      | 55.1                          | 28.4                          | 350                  |
| 549        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 551        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 552        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 553        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 554        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 555        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 556        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 558        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 559        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 560        | 7.17      | 3600                          | 0.38        | 50                       | 1.8                           | 6.7                           | 50                   |
| 561        | 7.18      | 4800                          | 0.55        |                          | 0.3                           | 11.2                          | 50                   |
| 562        | 7.28      | 5640                          | 0.53        | 1000                     | 28.8                          | 23.2                          | 300                  |
| 563        | 7.6       | 4960                          | 0.58        | 110                      | 29.2                          | 22.2                          | 350                  |
| 564        | 7         | 4360                          | 0.38        | 63                       | 32.7                          | 18                            | 300                  |
| 565        | 7.17      | 4690                          | 0.45        | 207                      | 33.2                          | 19                            | 200                  |
| 566        | 7.11      | 3160                          | 0.53        | 150                      | 45                            | 26.6                          | 350                  |
| 567        | 7.16      | 4320                          | 0.5         | 640                      | 70                            | 30                            | 350                  |
| 568        | 7.04      | 3640                          | 0.51        | 200                      | 65.3                          | 36.5                          | 350                  |
| 569        | 7.15      | 3200                          | 0.5         | 390                      | 65.9                          | 28.9                          | 350                  |
| 570        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 572        | 7.19      | 3400                          | 0.61        | 440                      | 65.3                          | 30.1                          | 350                  |
| 573        | 7.16      | 2800                          | 0.57        | 120                      | 65.3                          | 30.8                          | 350                  |
| 574        | 7.55      | 2720                          | 0.61        | 90                       | 60.1                          | 29.5                          | 350                  |
| 575        | 7.16      | 2680                          | 0.61        | 10                       | 74.8                          | 25.2                          | 350                  |
| 576        | 7.38      | 2800                          | 0.55        |                          | 76.9                          | 23.1                          | 350                  |
| 577        | 7.03      | 2600                          | 0.6         |                          | 42.2                          | 21.1                          | 350                  |
| 579        | 7.19      | 2640                          | 0.6         | 5                        | 76.2                          | 23.8                          | 350                  |
| 580        | 7.17      | 2480                          | 0.62        |                          |                               |                               | 350                  |
| 581        | 7.2       | 2880                          | 0.21        | 67                       | 29.2                          | 14                            | 350                  |
| 582        | 7.4       | 3120                          | 0.47        | 70                       | 22.3                          | 11.7                          | 100                  |
| 583        | 7.07      | 3200                          | 0.56        | 60                       | 35.8                          | 19                            | 200                  |
| 584        | 7.13      | 2680                          | 0.58        |                          | 35.2                          | 18.5                          | 200                  |
| 586        | 7.12      | 2800                          | 0.54        | 82                       | 35.2                          | 4                             | 300                  |
| 587        | 7.18      | 2880                          | 0.62        |                          | 35.2                          | 18.5                          | 300                  |
| 588        | 6.39      | 2920                          | 0.59        | 125                      | 36.3                          | 19.5                          | 300                  |
| 589        | 7.24      | 2920                          | 0.54        | 140                      | 33.2                          | 18.5                          | 300                  |
| 590        | 7.14      | 2520                          | 0.58        | 165                      | 62                            | 34.5                          | 300                  |

**Resultados Experimentales del Digestor M2**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 430        | 6.48      | 3280                          | 0.24        | 332                      | 31.7                          | 49.3                          | 550                 |
| 432        | 6.37      | 3240                          | 0.22        | 402                      | 33.2                          | 49.3                          |                     |
| 433        | 6.43      | 3600                          | 0.22        | 857                      | 31.2                          | 44.8                          |                     |
| 434        | 6.55      | 3720                          | 0.24        | 994                      | 34.2                          | 45.5                          | 25                  |
| 435        | 6.6       | 3640                          | 0.63        | 545                      | 52.6                          | 19                            | 30                  |
| 436        | 6.77      | 2840                          | 0.32        |                          | 40                            | 23.2                          | 450                 |
| 437        | 6.8       | 3200                          | 0.31        | 688                      | 45                            | 27.2                          | 500                 |
| 439        | 6.99      | 2480                          | 0.38        | 521                      | 46.1                          | 32.6                          | 500                 |
| 440        | 6.9       | 3320                          | 0.33        | 1043                     | 45                            | 34.5                          | 500                 |
| 441        | 6.86      | 3160                          | 0.35        | 1043                     | 45                            | 6.9                           | 500                 |
| 442        | 6.8       | 3200                          | 0.36        | 886                      | 43.9                          | 41.9                          | 500                 |
| 443        | 6.8       | 3160                          | 0.31        | 1043                     | 42.8                          | 41.9                          | 500                 |
| 444        | 6.84      | 3520                          | 0.34        | 1043                     | 43.9                          | 41.2                          | 450                 |
| 446        | 6.91      | 3080                          | 0.38        | 500                      | 48.5                          | 35.8                          | 450                 |
| 447        | 6.84      | 3400                          | 0.35        | 615                      | 74.8                          | 53.2                          | 450                 |
| 448        | 6.87      | 3240                          | 0.33        | 605                      | 68.6                          | 43.3                          | 450                 |
| 449        | 6.91      | 3280                          | 0.36        | 522                      | 78                            | 21                            | 400                 |
| 450        | 6.8       | 3480                          | 0.34        | 835                      | 42.2                          | 38                            | 400                 |
| 451        | 6.76      | 3800                          | 0.32        | 1020                     | 68.6                          | 31                            | 400                 |
| 453        | 6.92      | 3400                          | 0.35        | 1000                     | 52                            | 57                            | 450                 |
| 454        | 6.75      | 3920                          | 0.34        | 930                      | 70.7                          | 29.2                          | 450                 |
| 455        | 6.7       | 3240                          | 0.37        | 400                      | 70                            | 29.8                          | 450                 |
| 456        | 6.73      | 3160                          | 0.27        | 991                      | 62.7                          | 33.8                          | 400                 |
| 457        | 6.65      | 3600                          | 0.23        | 960                      | 68.6                          | 33                            | 400                 |
| 458        | 6.66      | 3606                          | 0.24        | 680                      | 79.1                          | 19.8                          | 400                 |
| 460        | 6.74      | 3760                          | 0.26        | 1021                     | 70.7                          | 28.3                          | 400                 |
| 461        | 6.74      | 3920                          | 0.29        | 756                      | 72.7                          | 28.3                          | 400                 |
| 462        | 6.94      | 4040                          | 0.3         | 850                      | 72.7                          | 28.3                          | 400                 |
| 463        | 6.78      | 4120                          | 0.32        | 1025                     | 41.7                          | 35.2                          | 400                 |
| 464        | 6.9       | 3320                          | 0.37        | 970                      | 71.3                          | 27.2                          | 400                 |
| 465        | 6.71      | 3600                          | 0.31        | 1025                     | 63.3                          | 35.2                          | 400                 |
| 467        | 6.7       | 3840                          | 0.3         | 817                      | 68.6                          | 28.9                          | 250                 |
| 468        | 6.69      | 3560                          | 0.33        | 950                      | 41.7                          | 49.3                          | 300                 |
| 469        | 6.81      | 4440                          | 0.29        | 991                      | 54.4                          | 45.5                          | 300                 |
| 470        | 6.58      | 3640                          | 0.27        | 800                      | 62.7                          | 35.2                          | 300                 |
| 471        | 6.84      | 3680                          | 0.41        | 1000                     | 59.4                          | 37.8                          | 250                 |
| 472        | 6.75      | 3880                          | 0.31        | 1047                     |                               |                               | 250                 |
| 474        | 6.72      | 4360                          | 0.27        | 760                      | 38.9                          | 38.5                          | 250                 |
| 475        | 6.7       | 3720                          | 0.27        | 667                      | 56.9                          | 43.1                          | 200                 |
| 476        | 6.9       | 3920                          | 0.3         | 271                      | 64.6                          | 35                            | 250                 |
| 477        | 6.73      | 4200                          | 0.26        | 456                      | 32.7                          | 36.2                          | 50                  |
| 478        | 6.67      | 3800                          | 0.29        | 276                      | 27.3                          | 18                            | 250                 |
| 479        | 6.7       | 4080                          | 0.27        | 204                      | 34.2                          | 33.9                          | 50                  |
| 481        | 7.03      | 4200                          | 0.29        | 95                       | 32.7                          | 28.9                          | 250                 |
| 482        | 6.85      | 4120                          | 0.3         | 114                      | 30                            | 20                            | 250                 |
| 483        | 6.77      | 4980                          | 0.25        | 144                      | 30.7                          | 35.2                          | 50                  |
| 484        | 6.7       | 4320                          | 0.25        | 103                      | 32.2                          | 35                            | 30                  |
| 485        | 6.88      | 4360                          | 0.39        | 55                       | 31.7                          | 29                            | 30                  |

**Resultados Experimentales del Digestor M2**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 486        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 488        | 6.77      | 4120                          | 0.27        | 130                      | 31.2                          | 28.9                          | 250                 |
| 489        | 6.83      | 4560                          | 0.24        | 436                      | 48.5                          | 49.8                          | 50                  |
| 490        | 6.83      | 4200                          | 0.22        | 333                      | 43.3                          | 37.8                          | 50                  |
| 491        | 6.68      | 5040                          | 0.21        | 120                      | 52                            | 49.2                          | 30                  |
| 492        | 6.65      | 4920                          | 0.2         | 33                       | 19.2                          | 9.4                           | 30                  |
| 493        | 6.67      | 4640                          | 0.23        | 33                       | 21.4                          | 12.1                          | 30                  |
| 495        | 6.81      | 4600                          | 0.21        | 75                       | 31.2                          | 28.9                          | 100                 |
| 496        | 7.13      | 4520                          | 0.24        | 55                       | 20.9                          | 12.6                          | 25                  |
| 497        | 6.53      | 4200                          | 0.21        |                          | 41.7                          | 18                            | 25                  |
| 498        | 6.58      | 4480                          | 0.22        | 65                       | 62                            | 38                            | 25                  |
| 499        | 6.51      | 4240                          | 0.2         | 65                       | 64.6                          | 28.9                          | 100                 |
| 500        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 502        | 6.6       | 3880                          | 0.25        | 144                      | 80.5                          | 19.2                          | 250                 |
| 503        | 6.63      | 4400                          | 0.23        | 327                      | 45                            | 27.2                          | 25                  |
| 504        | 6.57      | 4480                          | 0.24        | 611                      | 76.9                          | 22.1                          | 75                  |
| 505        | 6.9       | 4800                          | 0.32        | 884                      | 79.8                          | 20                            | 75                  |
| 506        | 6.86      | 5040                          | 0.27        | 916                      | 87.2                          | 12.8                          | 100                 |
| 507        | 6.99      | 5800                          | 0.27        | 1144                     | 42.2                          | 23.8                          | 25                  |
| 509        | 7.26      | 4880                          | 0.28        | 407                      | 79.8                          | 18                            | 50                  |
| 510        | 7.08      | 4920                          | 0.3         | 42                       | 40.6                          | 25                            | 200                 |
| 511        | 6.95      | 3960                          | 0.32        | 94                       | 34.7                          | 26                            | 200                 |
| 512        | 6.88      | 4680                          | 0.32        | 10                       | 3                             | 1.6                           | 200                 |
| 513        | 6.72      | 4720                          | 0.25        | 70                       | 13.9                          | 7.6                           | 100                 |
| 514        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 516        | 6.8       | 4640                          | 0.26        | 10                       | 22.3                          | 4.6                           | 25                  |
| 517        | 6.75      | 6160                          | 0.19        | 11                       | 21.8                          | 7.2                           | 100                 |
| 518        | 6.66      | 4560                          | 0.3         | 21                       | 16.7                          | 11.7                          | 200                 |
| 519        | 6.63      | 4480                          | 0.25        | 21                       | 12.7                          | 8.5                           | 200                 |
| 520        | 6.65      | 4800                          | 0.21        |                          | 4.6                           | 23.6                          | 100                 |
| 521        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 523        | 6.69      | 4400                          | 0.24        | 7                        | 42.8                          | 21.6                          | 150                 |
| 524        | 6.69      | 4280                          | 0.21        |                          |                               |                               | 150                 |
| 525        | 6.62      | 3960                          | 0.21        |                          | 0.6                           | 8.5                           | 100                 |
| 526        | 6.41      | 3880                          | 0.15        |                          |                               | 9.8                           | 250                 |
| 527        | 6.35      | 3720                          | 0.2         |                          | 0.6                           | 2.1                           | 250                 |
| 528        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 530        | 6.53      | 3400                          | 0.23        |                          | 35.8                          | 13.1                          | 200                 |
| 531        | 6.41      | 3400                          | 0.17        |                          | 37.3                          | 12.1                          | 200                 |
| 532        | 6.51      | 4000                          | 0.16        |                          | 10.5                          | 5                             | 25                  |
| 533        | 6.6       | 4640                          | 0.18        |                          | 20.9                          | 5.4                           | 25                  |
| 534        | 6.68      | 4760                          | 0.21        |                          | 29.2                          | 8                             | 75                  |
| 535        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 537        | 7.05      | 4920                          | 0.29        |                          | 16.7                          | 5.4                           | 150                 |
| 538        | 6.76      | 4720                          | 0.27        | 30                       | 16.7                          | 2.9                           | 25                  |
| 539        | 6.86      | 4600                          | 0.26        |                          | 21.8                          | 7.2                           | 150                 |
| 540        | 6.74      | 4240                          | 0.22        |                          | 21.4                          | 8                             | 150                 |
| 541        | 6.66      | 4560                          | 0.24        |                          | 31.2                          | 13.1                          | 200                 |

**Resultados Experimentales del Digestor M2**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 542        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 544        | 6.8       | 3640                          | 0.2         |                          | 55.1                          | 35.8                          | 150                 |
| 545        | 6.67      | 4480                          | 0.23        | 151                      | 72.7                          | 27.3                          | 100                 |
| 546        | 6.68      | 4800                          | 0.21        | 220                      | 57.5                          | 14                            | 100                 |
| 547        | 6.8       | 4400                          | 0.27        | 200                      | 60.1                          | 39.1                          | 150                 |
| 548        | 6.87      | 4360                          | 0.28        | 460                      | 68.6                          | 31.2                          | 150                 |
| 549        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 551        | 6.65      | 4920                          | 0.28        | 500                      | 62                            | 36.5                          | 150                 |
| 552        | 6.7       | 4720                          | 0.24        | 320                      | 47.3                          | 27.8                          | 100                 |
| 553        | 6.65      | 3200                          | 0.48        | 260                      | 6.9                           | 3.7                           | 150                 |
| 554        | 6.69      | 3280                          | 0.23        | 840                      | 55.1                          | 42                            | 100                 |
| 555        | 6.6       | 4800                          | 0.28        | 400                      | 44.4                          | 25.5                          | 100                 |
| 556        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 558        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 559        | 6.78      | 5440                          | 0.25        | 277                      | 42.8                          | 21.6                          | 250                 |
| 560        | 6.58      | 4880                          | 0.2         | 407                      | 60.7                          | 39.2                          | 50                  |
| 561        | 6.63      | 4840                          | 0.3         | 209                      | 47.3                          | 31.4                          | 50                  |
| 562        | 6.91      | 6080                          | 0.24        | 190                      | 30.2                          | 27.2                          | 100                 |
| 563        | 6.91      | 6240                          | 0.28        | 210                      | 32.7                          | 27.8                          | 100                 |
| 564        | 6.66      | 5960                          | 0.29        | 240                      | 32.7                          | 28.4                          | 100                 |
| 565        | 6.9       | 6360                          | 0.25        | 207                      | 30.2                          | 28.4                          | 150                 |
| 566        | 6.72      | 4600                          | 0.25        | 170                      | 57.5                          | 58.2                          | 250                 |
| 567        | 6.73      | 3320                          | 0.46        | 440                      | 58.8                          | 41.2                          | 75                  |
| 568        | 6.63      | 5600                          | 0.21        |                          | 42.8                          | 38.5                          | 200                 |
| 569        | 6.74      | 4880                          | 0.24        | 140                      | 56.9                          | 35.2                          | 75                  |
| 570        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 572        | 6.77      | 5320                          | 0.24        | 225                      | 59.4                          | 35.2                          | 200                 |
| 573        | 6.7       | 4840                          | 0.26        | 220                      | 62.7                          | 36.8                          | 100                 |
| 574        | 6.89      | 4800                          | 0.32        | 300                      | 59.4                          | 37.8                          | 250                 |
| 575        | 6.83      | 5280                          | 0.22        | 210                      | 73.4                          | 26.6                          | 250                 |
| 576        | 6.98      | 5960                          | 0.49        | 170                      | 68.6                          | 31.2                          | 250                 |
| 577        | 6.64      | 5280                          | 0.23        | 190                      | 72.7                          | 27.3                          | 250                 |
| 579        | 6.61      | 5520                          | 0.21        | 177                      | 77.7                          | 22.3                          | 200                 |
| 580        | 6.64      | 4460                          | 0.22        | 420                      |                               |                               | 200                 |
| 581        | 6.83      | 4960                          | 0.22        | 267                      | 32.2                          | 32                            | 200                 |
| 582        | 6.81      | 5840                          | 0.22        | 330                      | 28.8                          | 10.3                          | 100                 |
| 583        | 7.09      | 5560                          | 0.24        | 600                      | 30.7                          | 28.4                          | 100                 |
| 584        | 6.67      | 5084                          | 0.24        | 534                      | 37.3                          | 30.8                          | 100                 |
| 586        | 6.82      | 4800                          | 0.27        | 490                      | 41.1                          | 29.9                          | 200                 |
| 587        | 6.96      | 5120                          | 0.29        | 689                      | 36.8                          | 27.2                          | 200                 |
| 588        | 7.01      | 5960                          | 0.27        | 345                      | 8.3                           | 5.1                           | 100                 |
| 589        | 7.01      | 5160                          | 0.31        | 400                      | 69.3                          | 30.7                          | 200                 |
| 590        | 6.85      | 5120                          | 0.25        | 538                      | 69.3                          | 29.4                          | 200                 |

**Resultados Experimentales del Digestor T1**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 430        | 8.01      | 2800                          | 0.71        |                          | 0.6                           | 7.2                           | 30                  |
| 432        | 8         | 3000                          | 0.66        |                          | 0.6                           | 5                             | 450                 |
| 433        | 7.61      | 3600                          | 0.5         |                          | 0.9                           | 5.9                           | 30                  |
| 434        | 7.61      | 3360                          | 0.57        |                          | 0.6                           | 5.9                           | 30                  |
| 435        | 7.72      | 3400                          | 0.57        |                          | 0.9                           | 5                             | 30                  |
| 436        | 7.86      | 3280                          | 0.59        |                          | 0.9                           | 4.6                           | 30                  |
| 437        | 7.85      | 3200                          | 0.62        |                          | 0.9                           | 5                             | 30                  |
| 439        | 7.86      | 3400                          | 0.57        |                          | 1.2                           | 5.4                           | 30                  |
| 440        | 7.91      | 3200                          | 0.61        |                          | 0.9                           | 5                             | 40                  |
| 441        | 8.15      | 2920                          | 0.71        |                          | 0.6                           | 5                             | 300                 |
| 442        | 7.84      | 3600                          | 0.6         |                          | 0.9                           | 10.7                          | 30                  |
| 443        | 8.01      | 3280                          | 0.54        |                          | 0.9                           | 5.9                           | 30                  |
| 444        | 7.73      | 3760                          | 0.53        |                          | 1.2                           | 7.2                           | 50                  |
| 446        | 7.76      | 3360                          | 0.55        |                          | 0.9                           | 7.6                           | 100                 |
| 447        | 7.65      | 3360                          | 0.59        |                          | 2.1                           | 11.2                          | 30                  |
| 448        | 8.03      | 3800                          | 0.47        |                          | 2.1                           | 11.7                          | 300                 |
| 449        | 7.66      | 3480                          | 0.56        |                          | 3                             | 13.5                          | 30                  |
| 450        | 8.19      | 3480                          | 0.63        |                          | 2.1                           | 9.4                           | 300                 |
| 451        | 7.79      | 3880                          | 0.52        |                          | 2.4                           | 16                            | 300                 |
| 453        | 8.03      | 3240                          | 0.62        |                          | 3                             | 11.2                          | 300                 |
| 454        | 7.63      | 3800                          | 0.47        |                          | 2.7                           | 15                            | 300                 |
| 455        | 7.89      | 3160                          | 0.62        |                          | 2.7                           | 15                            | 300                 |
| 456        | 7.55      | 3520                          | 0.48        |                          | 3.6                           | 17                            | 30                  |
| 457        | 8.18      | 3720                          | 0.61        |                          | 0.6                           | 6.3                           | 300                 |
| 458        | 7.68      | 3360                          | 0.58        |                          | 2.1                           | 6.3                           | 50                  |
| 460        | 8.15      | 3640                          | 0.64        |                          | 2.1                           | 11.7                          | 300                 |
| 461        | 7.73      | 3800                          | 0.55        |                          | 1.2                           | 5.9                           | 300                 |
| 462        | 7.88      | 3280                          | 0.63        |                          | 1.8                           | 12.1                          | 300                 |
| 463        | 7.75      | 3280                          | 0.58        |                          | 1.8                           | 10.7                          | 50                  |
| 464        | 8.29      | 2960                          | 0.68        |                          | 4.6                           | 9.4                           | 300                 |
| 465        | 7.7       | 3400                          | 0.52        | 21                       | 2.4                           | 10.7                          | 50                  |
| 467        | 7.93      | 2600                          | 0.73        |                          | 1.2                           | 8.5                           | 300                 |
| 468        | 7.73      | 3040                          | 0.65        | 21                       | 2.1                           | 8.9                           | 350                 |
| 469        | 7.56      | 2800                          | 0.57        |                          | 2.1                           | 20.7                          | 50                  |
| 470        | 7.61      | 3460                          | 0.51        |                          | 1.2                           | 8                             | 50                  |
| 471        | 7.71      | 3200                          | 0.5         |                          | 1.5                           | 11.2                          | 50                  |
| 472        | 7.62      | 2800                          | 0.58        |                          |                               |                               |                     |
| 474        | 8.1       | 3360                          | 0.54        | 2                        | 0.6                           | 6.3                           | 50                  |
| 475        | 7.9       | 3400                          | 0.58        |                          | 0.6                           | 6.1                           | 50                  |
| 476        | 7.92      | 3280                          | 0.56        |                          | 0.9                           | 12.1                          | 50                  |
| 477        | 7.95      | 3200                          | 0.67        |                          | 0.6                           | 6.3                           | 50                  |
| 478        | 7.95      | 3320                          | 0.62        |                          | 1.2                           | 10.3                          | 50                  |
| 479        | 7.95      | 4200                          | 0.52        |                          | 0.6                           | 5.9                           | 50                  |
| 481        | 8.31      | 3080                          | 0.61        |                          | 0.6                           | 5.4                           | 300                 |
| 482        | 7.83      | 3280                          | 0.53        |                          | 0.6                           | 5.9                           | 300                 |
| 483        | 7.97      | 3280                          | 0.48        |                          | 1.8                           | 11.2                          | 300                 |
| 484        | 7.82      | 3400                          | 0.58        |                          | 1.5                           | 9.8                           | 300                 |
| 485        | 8.09      | 3560                          | 0.58        |                          | 1.8                           | 9.8                           | 300                 |

**Resultados Experimentales del Digestor T1**

| Día | pH   | Alcalinidad (mg/L) | Alfa | Biogás (ml/L) | CH <sub>4</sub> (%) | CO <sub>2</sub> (%) | Alimentación |
|-----|------|--------------------|------|---------------|---------------------|---------------------|--------------|
| 486 |      |                    |      |               |                     |                     |              |
| 488 | 8.12 | 3680               | 0.57 |               | 1.5                 | 11.7                | 300          |
| 489 | 7.68 | 4280               | 0.46 | 11            | 2.4                 | 12.6                | 50           |
| 490 | 7.98 | 3240               | 0.55 |               | 3                   | 11.2                | 300          |
| 491 | 7.75 | 3480               | 0.48 |               | 5.2                 | 17                  | 300          |
| 492 | 7.37 | 4200               | 0.47 |               | 3.3                 | 8.9                 | 50           |
| 493 | 7.69 | 3760               | 0.51 |               | 5.6                 | 16                  | 50           |
| 495 | 8.2  | 3200               | 0.6  |               | 1.8                 | 8.5                 | 300          |
| 496 | 8.08 | 3200               | 0.62 |               | 3.6                 | 15                  | 300          |
| 497 | 7.27 | 3400               | 0.44 |               | 3.6                 | 12.1                | 300          |
| 498 | 7.34 | 3280               | 0.5  |               | 7.3                 | 21.1                | 300          |
| 499 | 7.46 | 3160               | 0.51 | 218           | 6.9                 | 18                  | 300          |
| 500 |      |                    |      |               |                     |                     |              |
| 502 | 7.66 | 3400               | 0.56 |               | 4.3                 | 16.5                | 300          |
| 503 | 7.36 | 3000               | 0.52 |               | 3.9                 | 15                  | 300          |
| 504 | 7.48 | 3120               | 0.55 |               | 4.3                 | 14.5                | 300          |
| 505 | 7.8  | 3160               | 0.6  |               | 4.6                 | 17.5                | 300          |
| 506 | 7.62 | 3200               | 0.6  |               | 4.6                 | 15.5                | 300          |
| 507 | 7.69 | 4080               | 0.53 |               | 6.6                 | 19                  | 200          |
| 509 | 7.88 | 3640               | 0.53 |               | 4.9                 | 17.8                | 200          |
| 510 | 7.67 | 3600               | 0.54 |               | 4.3                 | 9.8                 | 200          |
| 511 | 7.64 | 3600               | 0.5  |               | 3.6                 | 10.3                | 200          |
| 512 | 7.6  | 3590               | 0.39 |               | 3.3                 | 21.6                | 200          |
| 513 | 7.22 | 3590               | 0.39 |               | 3.3                 | 21.6                | 200          |
| 514 |      |                    |      |               |                     |                     |              |
| 516 | 7.39 | 4200               | 0.43 |               | 9                   | 18                  | 200          |
| 517 | 7.25 | 3640               | 0.39 |               | 9.4                 | 21.6                | 200          |
| 518 | 7.2  | 3720               | 0.43 |               | 8.7                 | 17                  | 200          |
| 519 | 7.3  | 3400               | 0.4  |               | 22.7                | 32.6                | 200          |
| 520 | 7.32 | 3640               | 0.41 |               | 13.5                | 17                  | 200          |
| 521 |      |                    |      |               |                     |                     |              |
| 523 | 7.65 | 4520               | 0.44 |               | 8.3                 | 17                  | 200          |
| 524 | 7.47 | 2880               | 0.52 |               | 4.6                 | 20                  | 250          |
| 525 | 7.32 | 3200               | 0.47 |               | 4.9                 | 17                  | 250          |
| 526 | 7.14 | 3120               | 0.38 |               | 6.6                 | 17.5                | 250          |
| 527 | 7.47 | 3040               | 0.46 |               | 17.1                | 21.6                | 300          |
| 528 |      |                    |      |               |                     |                     |              |
| 530 | 7.6  | 3440               | 0.58 |               | 10.1                | 16                  | 300          |
| 531 | 7.66 | 3120               | 0.56 |               | 3.9                 | 5.9                 | 350          |
| 532 | 7.57 | 3320               | 0.53 |               | 6.2                 | 13.5                | 300          |
| 533 | 7.67 | 3320               | 0.59 |               | 7.6                 | 16.5                | 300          |
| 534 | 7.57 | 3360               | 0.51 |               | 9.8                 | 19                  | 300          |
| 535 |      |                    |      |               |                     |                     |              |
| 537 | 7.74 | 3880               | 0.59 | 20            | 2.1                 | 7.6                 | 300          |
| 538 | 7.47 | 3400               | 0.56 |               | 3.6                 | 13.1                | 300          |
| 539 | 7.53 | 3120               | 0.57 |               | 3.6                 | 11.7                | 300          |
| 540 | 7.48 | 3280               | 0.54 |               | 4.6                 | 12.1                | 300          |
| 541 | 7.43 | 2920               | 0.54 |               | 2.7                 | 6.3                 | 300          |



**Resultados Experimentales del Digestor T1**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 542        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 544        | 7.34      | 2640                          | 0.5         |                          | 2.4                           | 6.3                           | 300                 |
| 545        | 7.52      | 2720                          | 0.57        |                          | 7.6                           | 10.3                          | 300                 |
| 546        | 7.28      | 3200                          | 0.47        |                          | 4.3                           | 11.1                          | 300                 |
| 547        | 7.13      | 3680                          | 0.41        |                          | 9                             | 23.8                          | 300                 |
| 548        | 7.36      | 2960                          | 0.4         |                          | 11.6                          | 26.6                          | 300                 |
| 549        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 551        | 7.57      | 3360                          | 0.44        |                          | 13.9                          | 20                            | 300                 |
| 552        | 7.43      | 3640                          | 0.43        |                          | 12.4                          | 17.5                          | 300                 |
| 553        | 7.39      | 3200                          | 0.48        |                          | 13.1                          | 19                            | 300                 |
| 554        | 7.31      | 3440                          | 0.46        |                          | 7.6                           | 8.9                           | 50                  |
| 555        | 7.24      | 3080                          | 0.42        |                          | 8.3                           | 10.7                          | 50                  |
| 556        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 558        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 559        | 7.5       | 4000                          | 0.45        | 156                      | 69.3                          | 28.9                          | 300                 |
| 560        | 6.82      | 3800                          | 0.31        | 282                      | 41.7                          | 34.1                          | 300                 |
| 561        | 6.94      | 2400                          | 0.51        | 212                      | 49                            | 67.1                          | 200                 |
| 562        | 7.06      | 4680                          | 0.28        | 410                      | 28.3                          | 35.2                          | 300                 |
| 563        | 7.3       | 3120                          | 0.39        | 300                      | 28.8                          | 28.9                          | 300                 |
| 564        | 7.02      | 3040                          | 0.32        | 328                      | 33.2                          | 30.1                          | 300                 |
| 565        | 7.3       | 3600                          | 0.42        | 327                      | 35.8                          | 30.1                          | 200                 |
| 566        | 7.06      | 3040                          | 0.38        | 270                      | 10.1                          | 11.2                          | 300                 |
| 567        | 7.26      | 4120                          | 0.32        | 700                      | 72                            | 25                            | 300                 |
| 568        | 7.09      | 3640                          | 0.41        |                          | 23.2                          | 26.6                          | 250                 |
| 569        | 7.2       | 3200                          | 0.37        | 170                      | 66.6                          | 49.3                          | 350                 |
| 570        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 572        | 7.44      | 3520                          | 0.43        | 480                      | 49                            | 27.2                          | 350                 |
| 573        | 7.15      | 3280                          | 0.41        | 90                       | 76.2                          | 23.2                          | 300                 |
| 574        | 7.49      | 3080                          | 0.45        | 50                       | 72.7                          | 27.3                          | 300                 |
| 575        |           |                               |             | 10                       | 2.4                           | 11.7                          |                     |
| 576        | 7.43      | 3640                          | 0.47        | 150                      | 53.8                          | 30.8                          | 300                 |
| 577        | 7.15      | 4880                          | 0.41        | 110                      | 32.2                          | 16.5                          | 300                 |
| 579        | 7.23      | 3600                          | 0.44        | 57                       | 80.5                          | 19.5                          | 350                 |
| 580        | 7.38      | 4320                          | 0.38        | 30                       |                               |                               | 300                 |
| 581        | 7.5       | 3680                          | 0.34        | 53                       | 36.8                          | 24.9                          | 300                 |
| 582        | 7.37      | 4440                          | 0.32        | 300                      | 36.3                          | 24.9                          | 300                 |
| 583        | 7.51      | 4000                          | 0.35        | 120                      | 34.2                          | 28.4                          | 300                 |
| 584        | 7.23      | 3120                          | 0.42        |                          | 7.3                           | 12.6                          | 300                 |
| 586        | 7.3       | 3000                          | 0.41        |                          | 3.9                           | 15.5                          | 300                 |
| 587        | 7.5       | 2960                          | 0.45        |                          | 0.9                           | 8.5                           | 300                 |
| 588        | 7.52      | 2880                          | 0.45        |                          | 0.6                           | 3.3                           | 300                 |
| 589        | 7.55      | 3040                          | 0.43        |                          | 0.6                           | 8                             | 300                 |
| 590        | 7.12      | 3000                          | 0.4         |                          | 0.9                           | 13.1                          | 300                 |

**Resultados Experimentales del Digestor T2**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 430        | 7.73      | 4080                          | 0.48        |                          | 3.6                           | 11.7                          | 25                  |
| 432        | 7.62      | 4200                          | 0.48        |                          | 2.7                           | 11.7                          | 30                  |
| 433        | 7.59      | 4680                          | 0.46        |                          | 2.4                           | 11.2                          | 30                  |
| 434        | 7.71      | 4600                          | 0.46        |                          | 2.4                           | 11.7                          | 30                  |
| 435        | 7.63      | 4600                          | 0.46        |                          | 2.4                           | 11.2                          | 30                  |
| 436        | 7.57      | 4520                          | 0.46        |                          | 2.4                           | 11.7                          | 30                  |
| 437        | 7.66      | 4600                          | 0.43        |                          | 2.4                           | 12.1                          | 30                  |
| 439        | 7.79      | 4320                          | 0.49        |                          | 2.7                           | 10.3                          | 30                  |
| 440        | 7.72      | 4520                          | 0.46        |                          | 3                             | 11.7                          | 40                  |
| 441        | 7.73      | 4320                          | 0.48        |                          | 2.7                           | 11.7                          | 30                  |
| 442        | 7.88      | 4720                          | 0.44        |                          | 2.7                           | 11.7                          | 30                  |
| 443        | 7.93      | 3600                          | 0.51        |                          | 1.5                           | 8.9                           | 300                 |
| 444        | 7.75      | 4240                          | 0.42        | 20                       | 1.5                           | 10.3                          | 50                  |
| 446        | 7.79      | 4200                          | 0.47        |                          | 4.6                           | 21.6                          | 100                 |
| 447        | 7.5       | 4400                          | 0.4         |                          | 2.7                           | 12.6                          | 30                  |
| 448        | 7.58      | 3800                          | 0.47        |                          | 4.6                           | 22.2                          | 300                 |
| 449        | 7.47      | 5200                          | 0.38        |                          | 3.3                           | 12.1                          | 30                  |
| 450        | 7.77      | 3720                          | 0.51        |                          | 5.2                           | 21.1                          | 300                 |
| 451        | 7.4       | 4840                          | 0.33        |                          | 3.9                           | 20.6                          | 300                 |
| 453        | 8.01      | 3400                          | 0.61        |                          | 7.3                           | 24.9                          | 300                 |
| 454        | 7.37      | 488                           | 0.33        |                          | 4.9                           | 14.5                          | 30                  |
| 455        | 7.7       | 3600                          | 0.52        |                          | 3.6                           | 10.3                          | 300                 |
| 456        | 7.43      | 440                           | 0.36        |                          | 6.9                           | 22.7                          | 30                  |
| 457        | 7.52      | 3560                          | 0.39        |                          | 4.6                           | 15                            | 300                 |
| 458        | 7.38      | 4600                          | 0.34        |                          | 6.2                           | 21.1                          | 300                 |
| 460        | 7.9       | 3400                          | 0.5         |                          | 3                             | 11.7                          | 50                  |
| 461        | 7.54      | 5120                          | 0.39        |                          | 3                             | 11.2                          | 75                  |
| 462        | 7.81      | 4080                          | 0.49        |                          | 4.6                           | 19                            | 300                 |
| 463        | 7.56      | 4800                          | 0.41        |                          | 4.3                           | 18                            | 50                  |
| 464        | 7.86      | 3400                          | 0.55        |                          | 3.6                           | 16                            | 300                 |
| 465        | 7.4       | 3600                          | 0.41        |                          | 3.6                           | 21.6                          | 50                  |
| 467        | 7.74      | 3200                          | 0.57        |                          | 0.9                           | 12.1                          | 300                 |
| 468        | 7.6       | 3240                          | 0.51        |                          | 0.9                           | 14                            | 350                 |
| 469        | 7.54      | 4000                          | 3.8         |                          | 2.7                           | 12.6                          | 50                  |
| 470        | 7.55      | 3240                          | 0.5         |                          | 4.3                           | 24.3                          | 50                  |
| 471        | 7.72      | 2880                          | 0.51        |                          | 4.3                           | 21.1                          | 150                 |
| 472        | 7.44      | 2480                          | 0.56        |                          |                               |                               |                     |
| 474        | 7.78      | 3360                          | 0.54        |                          | 2.4                           | 11.7                          | 50                  |
| 475        | 7.35      | 3320                          | 0.36        |                          | 3                             | 11.2                          | 50                  |
| 476        | 7.6       | 3200                          | 0.56        |                          | 3.6                           | 12.6                          | 50                  |
| 477        | 7.66      | 3040                          | 0.53        |                          | 3.6                           | 12.1                          | 50                  |
| 478        | 7.5       | 2960                          | 0.51        |                          | 4.3                           | 20                            | 30                  |
| 479        | 7.53      | 2880                          | 0.56        |                          | 5.6                           | 11.7                          | 30                  |
| 481        | 7.58      | 2760                          | 0.56        |                          | 3.6                           | 11.2                          | 30                  |
| 482        | 7.77      | 2520                          | 0.55        |                          | 4.9                           | 12.1                          | 30                  |
| 483        | 7.61      | 2640                          | 0.57        |                          | 4.3                           | 11.7                          | 30                  |
| 484        | 7.48      | 2560                          | 0.51        |                          | 4.3                           | 11.4                          | 30                  |
| 485        | 7.83      | 2640                          | 0.54        |                          | 3.9                           | 11.7                          | 30                  |

**Resultados Experimentales del Digestor T2**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Alimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 486        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 488        | 8         | 2760                          | 0.57        |                          | 5.9                           | 17                            | 30                  |
| 489        | 7.33      | 2680                          | 0.53        |                          | 11.6                          | 20                            | 30                  |
| 490        | 7.6       | 2880                          | 0.43        |                          | 10.5                          | 21.6                          | 30                  |
| 491        | 7.61      | 3000                          | 0.49        |                          | 10.9                          | 24.9                          | 300                 |
| 492        | 7.59      | 2960                          | 0.51        |                          | 11.2                          | 18.5                          | 30                  |
| 493        | 7.58      | 3000                          | 0.46        |                          | 7.3                           | 13.1                          | 30                  |
| 495        | 7.91      | 3160                          | 0.51        |                          | 7.6                           | 17                            | 30                  |
| 496        | 7.89      | 2720                          | 0.57        |                          | 9.8                           | 22.2                          | 300                 |
| 497        | 7.13      | 4000                          | 0.38        |                          | 8                             | 20                            | 300                 |
| 498        | 7.2       | 3200                          | 0.43        |                          | 8.7                           | 20.6                          | 300                 |
| 499        | 7.3       | 3440                          | 0.44        |                          | 6.2                           | 14.5                          | 300                 |
| 500        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 502        | 7.6       | 3200                          | 0.5         |                          | 4.3                           | 10.7                          | 300                 |
| 503        | 7.22      | 2800                          | 0.45        |                          | 7.6                           | 20                            | 300                 |
| 504        | 7.32      | 2920                          | 0.47        |                          | 6.6                           | 18.5                          | 300                 |
| 505        | 7.64      | 2880                          | 0.55        |                          | 7.3                           | 21.1                          | 300                 |
| 506        | 7.6       | 2800                          | 0.57        |                          | 8                             | 20.6                          | 300                 |
| 507        | 7.94      | 3480                          | 0.54        |                          | 10.1                          | 25.5                          | 200                 |
| 509        | 7.88      | 3520                          | 0.5         |                          | 7.3                           | 19                            | 200                 |
| 510        | 7.88      | 3560                          | 0.59        |                          | 4.3                           | 9.8                           | 200                 |
| 511        | 7.27      | 3400                          | 0.47        |                          | 12.4                          | 18.5                          | 200                 |
| 512        | 7.4       | 3160                          | 0.5         |                          | 7.6                           | 14                            | 200                 |
| 513        | 7.05      | 3280                          | 0.32        | 20                       | 4.9                           | 18                            | 200                 |
| 514        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 516        | 7.35      | 3360                          | 0.42        |                          | 6.9                           | 13.1                          | 200                 |
| 517        | 7.23      | 3360                          | 0.39        |                          | 9.8                           | 18                            | 200                 |
| 518        | 7.23      | 2720                          | 0.37        |                          | 8.7                           | 15                            | 200                 |
| 519        | 7.22      | 3600                          | 0.38        |                          | 17.5                          | 31.4                          | 200                 |
| 520        | 7.41      | 3400                          | 0.47        |                          | 9.4                           | 16.5                          | 200                 |
| 521        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 523        | 7.71      | 4400                          | 0.49        |                          | 8                             | 12.1                          | 250                 |
| 524        | 7.45      | 4120                          | 0.4         |                          | 10.5                          | 43.3                          | 250                 |
| 525        | 7         | 2920                          | 0.28        |                          | 11.2                          | 32                            | 250                 |
| 526        | 6.75      | 2600                          | 0.3         |                          | 6.2                           | 16.5                          | 250                 |
| 527        | 7.1       | 3920                          | 0.3         |                          | 9.4                           | 18                            | 300                 |
| 528        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 530        | 7.57      | 3320                          | 0.48        |                          | 13.9                          | 24.9                          | 300                 |
| 531        | 7.4       | 3200                          | 0.43        |                          | 8.7                           | 12.1                          | 350                 |
| 532        | 7.48      | 3040                          | 0.52        |                          | 15.1                          | 21.1                          | 300                 |
| 533        | 7.63      | 3200                          | 0.52        |                          | 13.5                          | 22.2                          | 300                 |
| 534        | 7.24      | 3800                          | 0.43        |                          | 8                             | 13.5                          | 300                 |
| 535        |           |                               |             |                          |                               |                               |                     |
| 537        | 7.78      | 3600                          | 0.6         |                          | 9                             | 17                            | 300                 |
| 538        | 7.2       | 4000                          | 0.42        |                          | 4.9                           | 11.2                          | 300                 |
| 539        | 7.24      | 3320                          | 0.48        |                          | 5.9                           | 10.3                          | 300                 |
| 540        | 7.26      | 3800                          | 0.42        |                          | 10.1                          | 19.5                          | 300                 |
| 541        | 7.28      | 3600                          | 0.42        |                          | 3.6                           | 12.1                          | 700                 |

**Resultados Experimentales del Digestor T2**

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Alcalinidad<br/>(mg/L)</b> | <b>Alfa</b> | <b>Biogás<br/>(ml/L)</b> | <b>CH<sub>4</sub><br/>(%)</b> | <b>CO<sub>2</sub><br/>(%)</b> | <b>Allimentación</b> |
|------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 542        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 544        | 6.86      | 2880                          | 0.38        |                          | 8.9                           | 12.6                          | 300                  |
| 545        | 7.25      | 2800                          | 0.48        |                          | 14.7                          | 25.5                          | 300                  |
| 546        | 7.14      | 3400                          | 0.35        |                          | 11.2                          | 23.2                          | 300                  |
| 547        | 7.27      | 2960                          | 0.4         |                          | 9.8                           | 24.3                          | 300                  |
| 548        | 7.38      | 3000                          | 0.44        |                          | 9                             | 18.5                          | 300                  |
| 549        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 551        | 7.48      | 3160                          | 0.49        |                          | 7.6                           | 16.5                          | 300                  |
| 552        | 7.46      | 3120                          | 0.46        |                          | 4.3                           | 9.8                           | 350                  |
| 553        | 7.36      | 3440                          | 0.46        |                          | 6.6                           | 15.5                          | 300                  |
| 554        | 7.4       | 2840                          | 0.49        |                          | 3.3                           | 10.9                          | 300                  |
| 555        | 7.25      | 3680                          | 0.42        |                          | 2.7                           | 8.5                           | 300                  |
| 556        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 558        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 559        | 7.57      | 4000                          | 0.45        |                          | 3                             | 11.2                          | 300                  |
| 560        | 7.36      | 4160                          | 0.42        |                          | 3                             | 12.1                          | 300                  |
| 561        | 7.6       | 2520                          | 0.76        |                          | 2.7                           | 11.7                          | 300                  |
| 562        | 7.27      | 4320                          | 0.36        |                          | 2.1                           | 10.7                          | 300                  |
| 563        | 7.39      | 4000                          | 0.41        |                          |                               |                               | 350                  |
| 564        | 7.01      | 3840                          | 0.29        |                          |                               |                               | 300                  |
| 565        | 7.14      | 4120                          | 0.3         |                          |                               |                               | 300                  |
| 566        | 6.64      | 3640                          | 0.23        |                          |                               | 2.5                           | 300                  |
| 567        | 6.87      | 3800                          | 0.3         |                          | 5.6                           | 16                            | 350                  |
| 568        | 6.9       | 3720                          | 0.23        |                          | 9.4                           | 18.5                          | 350                  |
| 569        | 7.07      | 3800                          | 0.42        |                          | 9.8                           | 19                            | 350                  |
| 570        |           |                               |             |                          |                               |                               |                      |
| 572        | 7.68      | 3880                          | 0.51        |                          | 4.3                           | 9.4                           | 350                  |
| 573        | 7.44      | 3200                          | 0.47        |                          | 5.9                           | 12.6                          | 300                  |
| 574        | 7.57      | 2960                          | 0.54        |                          | 8                             | 15.5                          | 300                  |
| 575        | 7.52      | 3080                          | 0.49        |                          | 6.2                           | 28.9                          | 300                  |
| 576        | 7.56      | 3160                          | 0.48        |                          | 7.6                           | 15.5                          | 300                  |
| 577        | 7.35      | 3400                          | 0.56        |                          | 4.9                           | 8.5                           | 300                  |
| 579        | 7.32      | 3280                          | 0.46        |                          | 3                             | 13.1                          | 350                  |
| 580        | 7.3       | 1800                          | 0.48        |                          |                               |                               | 350                  |
| 581        | 6.93      | 2440                          | 0.34        |                          |                               |                               | 350                  |
| 582        | 7.03      | 2480                          | 0.3         |                          |                               |                               | 300                  |
| 583        | 6.88      | 3360                          | 0.41        |                          | 1.2                           | 3.7                           | 300                  |
| 584        | 6.85      | 2400                          | 0.3         |                          | 1.2                           | 3.7                           | 300                  |
| 586        | 7         | 2800                          | 0.3         |                          | 2.1                           | 7.2                           | 300                  |
| 587        | 7.1       | 2880                          | 0.31        |                          | 0.9                           | 2.9                           | 300                  |
| 588        | 7.65      | 2720                          | 0.38        |                          | 2.7                           | 8                             | 300                  |
| 589        | 7.45      | 2560                          | 0.45        |                          | 2.7                           | 8                             | 300                  |
| 590        | 7.3       | 3160                          | 0.46        |                          | 1.5                           | 5.9                           | 300                  |