

01167 4



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**“Metodología Basada en la Teoría General  
de Sistemas para el Análisis  
y Generación de Modelos”  
Un estudio de caso**

**TÉSIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(Planeación)**

Presenta:

Catalina Ferat Toscano

Director de tesis  
Dr. Jorge Carrera Bolaños



MÉXICO, D.F.

JUNIO DE 2002



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.

**FALTA  
LAS  
PAGINAS**

**I A II**

Dedicatorias:

A mi padre

Ing. Ricardo L. Ferat Palencia, que donde quiera que se encuentre, sé que sería de orgullo esta muestra de mi amor (q.e.p.d).

A mi madre

Beatriz Toscano Zárate, a quién le debo momentos que no fue posible compartir por realizar esta meta, todo mi amor y agradecimiento por brindarme su apoyo y ejemplo, ya que su dedicación, responsabilidad y entrega a su trabajo como técnica anestesista siempre recordaré.

A mis hermanos y hermanas: Margarita, Ricardo, Jorge, María del Carmen, Beatriz, Pedro y Eduardo que aunque las distancias nos separan siempre estaremos juntos de corazón.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



FALTA  
PAGINA

IV

## Agradecimientos

A todos y cada uno de los miembros del jurado: M. en I. Rubén Téllez Sánchez, M. en I. Javier Suárez Rocha, y Dr. Ricardo Aceves García, a quienes agradezco sus valiosos comentarios que hicieron posible integrar conocimientos de varias disciplinas.

De forma especial agradezco a:

Mi director de tesis el Dr. Jorge Carrera Bolaños, quién además de alentar en todo momento la realización de este trabajo, tuvo la paciencia por orientarme y brindarme los conocimientos necesarios para llevar a cabo ésta investigación;

a la Dra. Gabriela Moeller Chávez, por ser mi asesora en la parte correspondiente al área de Ingeniería Ambiental y a quién le doy las gracias por compartir sus conocimientos y su amistad;

al M. en I. Fernando Pozos Román, por su valiosa y desinteresada ayuda en la parte correspondiente a la evaluación económica; y

al M. en I. Arturo Fuentes Zenón por sus atinados comentarios en la parte correspondiente a planeación.

A mis amigos y compañero del trabajo, que día tras día compartimos momentos que forman parte de nuestras vidas, les agradezco el interés y apoyo que me manifestaron durante el desarrollo de este trabajo,. De manera especial agradezco su ayuda a la Biól. Edith Tápia Sánchez, Tina Sanders Ríos y al M. en I. Mario Sáenz Piña.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FALTA  
PAGINA

VI

<b>Índice:</b>	<b>Página</b>
Resumen	1
Introducción	3
Objetivo	7
Capítulo 1.- Planeación, Enfoque de sistemas y Teoría General de Sistemas.	
1.1. Conceptos de planeación.	11
1.2. Enfoque de Sistemas	14
1.3 Estructura del movimiento sistémico	18
1.4 Metodología de los Sistemas Suaves. Peter B. Checkland	20
1.5 Elementos que integran un sistema	29
1.6 Clasificación de los sistemas	30
Capítulo 2.- Conceptos de Planeación y Enfoque de Sistemas	
2.1. Planeación comprensiva. Metodología.	33
2.2. El problema bajo el punto de vista de la Teoría General de Sistemas	36
2.3. Metodología de los sistemas suaves.	37
2.4. Condiciones de construcción y arranque de las unidades experimentales.(Digestores Anaerobios).	43
Capítulo 3.-Desarrollo de una metodología de análisis y su aplicación al estudio de caso.	
3.1. El estudio de caso. Un sistema de digestión anaerobia para el tratamiento de lodos.	50
3.2. Etapas del experimento	53
3.3. Marco teórico –práctico. Desarrollo de la metodología. de análisis.	54

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Capítulo 4.0 Resultados obtenidos después de haber aplicado una metodología de análisis al estudio de caso.	
4.1. Resultados del análisis del proceso de digestión anaerobia como sistema.	77
4.2. Resultados del análisis de los datos en cada una de las etapas.	80
4.3. Formulaciones matemáticas continuas del sistema.	86
4.4 Análisis de los resultados para obtener la ecuación que represente el sistema en sus diferentes etapas.	91
4.5. Modelos mixtos lineales y de segundo orden	95
Capítulo 5.0. Beneficios del tratamiento y evaluación económica del sistema en estudio.	
5.1 Antecedentes	97
5.2 Panorama General de la contaminación	98
5.3 Aspectos sociales	100
5.4. El sistema de tratamiento en estudio	104
5.5. Evaluación económica del sistema	106
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones	113
Bibliografía	121
Anexo 1: Generalidades sobre agua residual, Tratamiento y lodos.	127
Anexo 2 Tratamiento de lodos. Digestión anaerobia	145
Anexo 3 Tablas	170
Anexo 4 Gráficas	



## LISTA TABLAS Y FIGURAS

### Figuras

Figura 1: Metodología de los Sistemas Suaves.	23
Figura 2: Etapas para la construcción del modelo conceptual	26
Figura 3: Esquema de la Planta de Tratamiento de Agua Residual.	38
Figura 4: Origen de los lodos de tratamiento	39
Figura 5: Lodos	40
Figura 6: Sistema de Digestión Anaerobia.	40
Figura 7: Sistema de Digestión Anaerobia (condiciones de operación)	41
Figura 8: Modelo Conceptual en un primer nivel.	42
Figura 9. Presentación de los cuatro digestores anaerobios	45
Figura 10: Esquema básico de un sistema	46
Figura 11: Planta "El Rey", Cancún, Quintana Roo	111
Figura 12: Lodos de la "Planta Norte", Cancún, Quintana Roo.	112
Figura 13: Filtro prensa. Planta "Pok-Ta-Pok", Cancún, Quintana Roo.	112
Figura 14: Planta "Gucumatz", Cancún, Quintana Roo.	112

### Tablas

Tabla 1. Comparación de los procesos para estabilización de lodos	34
Tabla 2: COV calculadas con diferentes cantidades de materia orgánica (So)	55
Tabla 3: COV calculadas para la Etapa 1.1	56
Tabla 4 Valores calculados de COV para la Etapa 1.2	56
Tabla 5: Valores calculados de COV para la Etapa 2.0	56
Tabla 6: Valores calculados de COV para la Etapa 3.0	57
Tabla 7: Estados del sistema de digestión de lodos	60

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 8: Funciones de transición de estado	61
Tabla 9: Valores promedios de las observaciones en laboratorio de las entradas y salidas de lodo	66
Tabla 10: Cantidad de materia orgánica removida y gas producido	66
Tabla 11: % de remoción promedio y producción de biogás.	67
Tabla 12 Valores máximos y mínimos de remoción y producción de biogás.	67
Tabla 13. Grado de influencia de la Biomasa presente con respecto a las entradas.	68
Tabla 14: Influencia de la biomasa presente al pasar de un estado de mayor concentración a uno de menor concentración	70
Tabla 15: Funciones de salida	71
Tabla 38: Resumen de las características de las ecuaciones lineal y cuadráticas del modelo en cada una de las etapas	92
Tabla 39: Ecuaciones que mejor representan al sistema en cada una de las etapas	93
Tabla 40: Costos Ambientales anualizados totales de acuerdo al medio, 1990 (millones de dólares americanos de 1986).	99
Tabla 41 Resultados obtenidos programa CAPDET.	108
Tablas 17 a la 37 correspondientes a las etapas 1.1, 1.2, 2.0 y 3.0. modelo lineal y cuadrático	anexo 3
Gráficas 1 a la 48 correspondientes a las etapas 1.1, 1.2, 2.0 y 3.0	anexo 4.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Capítulo 1.- Planeación. Enfoque de Sistemas y Teoría General de Sistemas.

### Introducción

En este capítulo se establecen los conceptos teóricos fundamentales de planeación y Teoría General de Sistemas que servirán de base para la planeación, estructuración y realización de este trabajo.

#### 1.1 . Conceptos de Planeación

##### 1.1.1 Definición

La planeación es un término comúnmente utilizado, ya que se aplica a una gran variedad de situaciones. Resulta ser en algunos casos un concepto muy general que tiende a lo vago, por lo que es difícil encontrar una definición que determine exactamente en que consiste, ya que estas definiciones están dadas en su mayoría por el tema que tratan los diferentes autores.

Sin embargo, dada la extensión que tiene el término, se han tomado dos de ellas que permiten ir desde el nivel más elemental hasta un nivel muy general con gran alcance.

- Desde el nivel más elemental la planeación puede ser entendida como “ aquella actividad por medio de la cual un sujeto busca cómo actuar sobre un objeto para cambiarlo (o conducirlo) de acuerdo con ciertos propósitos. Bajo el supuesto de que estos propósitos no serán alcanzados a menos que se introduzca la acción intencional referida ” (Fuentes Zenón, 1991).
- “Un proceso que permite plantear hechos y consecuencias que sean factibles, y que apoyan a la toma de decisiones”(Negroe, G. 1995)



Dada la extensa aplicabilidad que tiene el término, se plantean distintos enfoques de planeación para la resolución de un problema. Frente a la variedad y diversidad de ellos se han generado tres clases de respuesta: (Fuentes Zenón, 2001)

1.- Algunos autores han tratado de dar forma a una *Teoría general de planeación*, que permita englobar los enfoques particulares, como las teoría de sistemas, con el defecto de que su misma generalidad las vuelve abstractas y lejanas de cualquier necesidad práctica.

2.- Otros autores hacen referencia a una *Colección de enfoques de planeación* en lugar de concentrarse en cualquier escuela en particular, para lo cual incluyen una breve descripción de los enfoques seleccionados, así como una relación de los pro y contra que identifican. La desventaja de esto es que no existe un criterio sólido que permita definir cuántos y cuáles enfoques se deben incluir.

3.- Existe un tercero, en donde se parte de un considerando un tanto evidente: si la *bondad* de cada enfoque depende de la naturaleza del problema que se aborda, entonces se elabora una tipología de problemas y se indaga que alternativa es la más apropiada para cada caso.

El resultado es un sistema de enfoques de planeación, tal que ante un problema dado se estudia su naturaleza para definir a qué clase pertenece y luego se aplica el enfoque que para el efecto se recomienda.

A pesar de que esta idea parece prometedora y que está bien fundamentada, los resultados están lejos de llenar las expectativas creadas, pues son imprecisos.

Esto es producto de una contradicción: mientras en los problemas tipo se requiere de cierto detalle para evitar ambigüedades o abstracciones, del otro lado lo que cada autor procura es ganar la mayor generalidad para su obra, lo que hace imposible construir una relación clara enfoque-problema.

NOV 2011  
BIBLIOTECA DE LA UNAM

Por tanto, los sistemas de enfoque son de interés al ampliar y dar cierto orden al panorama de opciones, pero su valor es escaso en un plano operativo.

Haciendo un análisis a los distintos enfoques de planeación revelan que todos tiene algo en común, y esto es comprensible ya que todos parten del mismo tronco representado por la planeación comprensiva, en la que *el cambio es visto como el fruto natural de un proceso para ganar conocimiento.*

Es calificada como comprensiva, porque en este proceso se busca conocer toda la situación problemática, tener en cuenta los distintos objetivos, plantear el número más amplio de alternativas, predecir sus diferentes consecuencias, etc., donde no hay espacio para vaguedades, pues todo debe quedar debidamente sustentado.

La planeación comprensiva también es llamada sinóptica o racional, el primer término se debe a su proceder lineal, paso a paso, hasta la estructuración total del plan; en tanto que el segundo se le atribuye al tomar como un hecho que no se puede ser racional acerca de un problema sin comprenderlo a plenitud, sin conocer claramente qué se quiere y sin hacer una valoración sistemática de los medios alternativos para alcanzar lo que se desea.

Más que una escuela en particular, la planeación comprensiva es representativa de una familia de enfoques, cada uno de los cuáles presenta alguna variante con respecto al modelo clásico, pero conservando en lo general el mismo espíritu y las etapas básicas de trabajo.

El papel que juega la metodología de la planeación es el de orientar las distintas etapas de investigación requeridas para dar respuesta a interrogantes planteadas y llegar a una meta, y por eso es concebida como un proceso lógico de adquisición de conocimiento, el conocimiento necesario para apoyar la toma de decisiones.

En la planeación comprensiva se contemplan las siguientes etapas:

- El análisis de la situación para definir los problemas por atender,
- la formulación de los objetivos del plan,
- la identificación del conjunto de alternativas posibles,
- el análisis de las ventajas y desventajas de cada opción para definir la más conveniente, y
- el desarrollo de la alternativa preferida para su implantación y posterior control.

Se ha hecho referencia a este concepto porque a partir de este enfoque se dará inicio y se estructurarán las actividades a realizar en este trabajo cuya parte aplicativa se presentan en el siguiente capítulo.

## 1.2. Enfoque de sistemas.

### 1.2.1. Definición

Al tratar de definir o explicar qué es el enfoque de sistemas, lo primero que salta a la mente es tratar de definirlo. De acuerdo al autor van Gigch, 1998 : " es una forma de pensamiento, una filosofía práctica y una metodología de cambio" .

Estas tres premisas conllevan, en un inicio a realizar un cambio en la visualización de nuestro entorno (cambio de paradigmas) para ver a los problemas desde un punto de vista diferente (como un todo) que difiere enormemente a como normalmente se visualizan los problemas desde el punto de vista científico(situaciones particulares o puntuales).

Este cambio de paradigma, es en algunas ocasiones difícil de lograr porque la estructura del pensamientos puede ser "tan rígida", y no precisamente por la resistencia al cambio, que no nos permite la visualización tan fácilmente. Sin embargo, a través del tiempo, con las explicaciones adecuadas y necesarias y con situaciones que ejemplifican adecuadamente estos conceptos, es posible

comprender en qué nivel debe uno situarse para poder tener este tipo de perspectiva.

El enfoque de sistemas, así como el de teoría de sistemas, pensamiento sistémico o simplemente sistemas, se han agrupado una serie de disciplinas que tuvieron su surgimiento y su rápido desarrollo después de la segunda guerra mundial.

Su impacto y difusión es tal, que se encuentran múltiples aplicaciones y desarrollos en campos del conocimiento tan diversos como en biología, ingeniería, sociología, administración, geografía e historia. Sin embargo, de ellas han surgido diferentes corrientes como Ingeniería de Sistemas, Teoría General de Sistemas, Análisis de Sistemas, etc., mostrando con ello la gran variedad debida a la enorme influencia que han adquirido los sistemas.

Al plantear un problema normalmente existe un mayor o menor grado de incertidumbre, ya sea en cuanto a los fines que se persigan, o con respecto a los medios que es posible aplicar, o en cuanto a las características mismas del sistema bajo estudio. A partir de estos estados pocos claros es que se deben establecer puntos de referencia muy específicos para estructurar un plan: definiciones de variables relevantes, relaciones causa-efecto, objetivos, metas, etcétera, sin olvidar que hay que establecer la distinción primordial entre:

- a) cuándo se trata de mejorar un sistema y
- b) cuándo de diseño de sistemas.

Es muy importante hacer esta distinción y es difícil de llevarla a cabo, ya que para llevar a efecto la planeación se requiere plantear correctamente y específicamente los objetivos del problema en estudio.

### 1.2.2. Mejoramiento de un Sistema:

El simple término conlleva a pensar en que el sistema ya está definido y que se han establecido las normas para su operación. Mejorar significa la transformación o cambio que lleva a un sistema más cerca del estándar, o de la condición de

operación normal en donde es necesario trazar las causas de desviaciones de las normas operantes establecidas, o a investigar cómo puede hacerse para que el sistema produzca mejores resultados.

Un problema de mejora implica definir el problema, que incluye el delimitar el alcance de la investigación; se describe la naturaleza del sistema y se identifican sus subsistemas componentes. Una vez identificados se procede mediante un análisis a buscar elementos que pueden proporcionar posibles respuestas al porqué del problema.

Partiendo de los hechos conocidos procedemos por deducción a sacar algunas conclusiones tentativas y se desintegra el gran problema en subproblemas mediante el proceso de reducción.

El mejoramiento del sistema procede por introspección, vamos hacia el interior del sistema y hacia sus elementos y concluimos que la solución de los problemas de un sistema se encuentra dentro de sus límites. Se considera que el mal funcionamiento es causado por defectos del contenido o sustancia y asignable a causas específicas, y no se cuestiona la función, propósito, estructura y proceso de los sistemas.

Por lo tanto, el mejoramiento es temporal. No puede resultar una solución duradera de un mejoramiento en la operación de los sistemas existentes en la actualidad ya que da origen a supuestos y objetivos defectuosos. El mejorar hace caso omiso del hecho de que las premisas originales en las cuales se diseñó el sistema han cambiado. Éste requiere un rediseño completo.

### 1.2.3. Diseño de Sistemas.

Este término se toma como sinónimo de enfoque de sistemas (van Gigch, 1998), es una metodología de diseño y cuestiona la misma naturaleza del sistema y su papel en el contexto de un sistema mayor.

Al definir el propósito de la existencia del sistema, se requiere tener una comprensión del sistema en relación con todos los demás sistemas mayores y que estén en interfaz con este mismo. A esta perspectiva se le llama Extrospectiva, debido a que éste procede del sistema hacia el exterior, en contraste con el mejoramiento del sistema que es introspectivo, ya que procede del sistema hacia el interior.

El enfoque de sistemas procede de lo particular a lo general, e infiere el diseño del mejor sistema mediante un proceso de inducción y síntesis. Es un método de investigación; una forma de pensar, que enfatiza el sistema total, en vez de sus componentes, se esfuerza por optimizar la eficacia del sistema total en lugar de mejorar la eficiencia de sistemas cercanos.

Dentro de la metodología a seguir en el enfoque de sistemas es: definir el problema con relación a los sistemas superordinales, así como los objetivos deben ser revisados con relación a sistemas mayores o al sistema total.

Los diseños actuales deben evaluarse en términos de costos de oportunidad o del grado de divergencia del sistema del diseño óptimo; éste último generalmente no se encuentra cerca de las formas presentes adoptadas. El diseño óptimo involucra la planeación, evaluación e implantación de nuevas alternativas que ofrecen salidas innovadoras y creativas para el sistema total. Por lo que el planificador asume el papel de líder en vez de seguirlo.

El planificador debe animar la elección de alternativas que alivien e incluso se opongan, en lugar de reforzar los efectos y tendencias no deseados de diseños de sistemas anteriores.

Este enfoque de sistemas puede contribuir al estudio de los sistemas:

1.- Como un enfoque, el método es indispensable para considerar la relación de un problema particular con las condiciones del medio y para identificar los factores y variables que afectan a la situación.

2.- El enfoque de sistemas proporciona *un marco de trabajo útil en el cual puede evaluarse el desempeño* de varios sistemas, subsistemas y el sistema global. Y proporciona entre otras cosas un modelo matemático.

3.- El enfoque de sistemas y su metodología concomitante puede utilizarse para rediseñar los sistemas existentes y comparar y probar el valor relativo de planes alternativos.

La Teoría General de Sistema (TGS) proporciona los fundamentos teóricos al enfoque de sistemas, que quien trata con las aplicaciones (Teoría General de Sistemas aplicada).

Fue importante hacer la distinción entre ambos conceptos, porque en este trabajo, lo que se pretende es tener un mayor conocimiento acerca de un sistema (1.1.2., inciso 2), y en ningún momento se pretende establecer una mejora o rediseñar un sistema.

### 1.3. Estructura del movimiento de sistemas.

Un sistema es "un conjunto o reunión de elementos relacionados" que hacen un todo. Ese todo puede ser cualquier problema que quiera resolverse o estudiarse, y que para hacerlo es necesario establecer sus componentes. Estas bases o lineamientos son proporcionados por la teoría general de sistemas.

El movimiento de sistemas se divide en dos grandes grupos:

- 1) La aplicación de las ideas de sistemas a otras disciplinas y
- 2) El desarrollo de las ideas de sistemas como tales.

Dentro de este grupo, a su vez se divide en dos:

2.1) El desarrollo teórico de sistemas.

2.2.) Desarrollo y aplicación de sistemas en la solución de problemas.

En este último grupo se encuentran:

- Apoyo a la toma de decisiones.
- Los trabajos en sistemas duros.
- Los trabajos en sistemas suaves.

Dentro del desarrollo teórico de sistemas, se encuentra la Teoría General de Sistemas y la cibernética cuyos propósitos es el desarrollo de nuevos marcos teóricos para la explicación o comprensión de los fenómenos naturales y sociales, sin que de manera inmediata vaya de por medio un interés de carácter utilitario.

En cambio, la investigación de operaciones, análisis de sistemas, ingeniería de sistemas, que se encuentran en la corriente de sistemas duros, así como la corriente de sistemas suaves, (designaciones efectuada por Checkland), tienen como centro de interés la solución de problemas que implica un apoyo a la toma de decisiones.

La investigación de operaciones se dedica a la construcción de un modelo para apoyar la toma de decisiones. El análisis de sistemas a realizar una valoración amplia de los costos y beneficios de las distintas alternativas, y la ingeniería de sistemas a los diseños que permitan la creación de un sistema físico.

En cambio, la corriente de sistemas suaves, incluía en un principio solamente al trabajo realizado por Checkland, y que posteriormente se le han unido otros autores cuyos trabajos tienen similitud con los realizados por éste. El argumento de esta designación se debe a que muchos problemas no pueden tratarse como se hace en la corriente de los sistemas duros, ya que la situaciones son más inciertas y tan sólo establecer qué se desea constituye en sí un problema.



Al enfrentar un problema se tiene cierto grado de incertidumbre sobre los fines que persigue ya que pueden ser demasiados cualitativos. También se puede encontrar que no se conozca con el detalle suficiente al sistema bajo estudio, de tal suerte que no hay una idea clara de cuál es la razón de las deficiencias observadas y qué posibilidad existe de que se modifique. Por esto, se plantea que más que tratar con problemas, se trata en estados de desorden, estados que en general se caracterizan por ser complejos, complicados, ambiguos, resultados de ambientes dinámicos, etcétera.

Éste tipo de argumentos lleva a los autores de sistemas suaves no tanto a hablar de modelos de optimización, valoración de consecuencias o del diseño de alternativa, sino más bien a *elaborar una metodología para conocer la situación* y en el curso definir objetivos, recursos disponibles, restricciones, alternativas, etcétera para sobre ésta base recomendar los cambios y acciones más convenientes.(Fuentes Zenón, 1995)

De acuerdo a los objetivos planteados en éste trabajo, el caso en estudio entra en la corriente de los sistemas suaves, siguiendo la metodología de Checkland para obtener el modelo conceptual de sistema.

#### 1.4. Metodología de Sistemas Suaves. Peter B. Checkland.

Es uno de los autores que en la actualidad goza de un mayor reconocimiento gracias a las novedosas formas de estudio que ha planteado. En ellas destacan sus aportaciones metodológicas y conceptuales para la definición del sistema bajo estudio (modelo conceptual) y el uso que da a éste en la investigación problemática.

Checkland hace una distinción entre problemas estructurados y problemas mal estructurados o problemas reales. Los primeros consisten en seleccionar o diseñar un curso de acción para cumplir con un objetivo definido (o que puede definirse sin dificultad). En cambio, en los problemas mal estructurados el definir cuál es el

problema a resolver constituye en sí un problema, ya que el punto de partida es que hay un desajuste entre lo que existe y lo que debiera existir.

Así la metodología de sistemas suaves, no se orienta a indicar en exclusiva cómo mejorar una situación sino también a definir qué es lo que debe mejorarse, de tal modo que establecer cuál es el problema que se enfrenta constituye una parte importante de la estrategia de solución.

La metodología de los sistemas suaves está constituida por una serie de actividades (figura1), a través de las cuáles se gana conocimiento acerca de la situación y se exploran los posibles cursos de acción.

Dentro de la metodología, se conciben dos tipos de actividad: en las etapas 1,2,5,6,y 7 hay interacción con las personas involucradas en la situación, mientras que las etapas 3 y 4 tienen un carácter conceptual.

En gran número de ocasiones, donde no es posible visualizar el contexto en que esta inmerso el problema, esta herramienta es de mucha utilidad ya que de una situación problema no estructurada, pasamos a la situación problema expresada (estadios 1 y 2) actividades pertenecientes al "mundo real". En estas etapas se busca contar con una descripción amplia del sistema y de la situación problemática, a través de la opinión de personas relacionadas con la situación.

De aquí establecemos las definiciones raíz de los sistemas (estadio 3) y es a partir de estas definiciones que se crean los modelos conceptuales (estadio 4) de los sistemas, actividades pertenecientes del " pensamiento de sistemas". Estas dos etapas constituyen el corazón de la metodología de Ckeckland; su propósito es definir los aspectos esenciales del sistema, así como el conjunto de actividades que, a partir de la lógica, se requieren para que el sistema cumpla con su función.

En términos generales, la definición raíz es una descripción breve y precisa de lo que se considera que es el sistema y que de acuerdo con la situación problemática estudiada se considera relevante.

Esta definición raíz se elabora al dar respuesta a los elementos de la palabra mnemotécnica CATWOE donde:

C: son los clientes o consumidores. ¿A quién beneficia o perjudica? Víctimas o beneficiarios de T.

A: actores. ¿Quiénes ejecutan las actividades? Aquellos que realizarán T.

T: proceso de transformación. ¿Qué hace el sistema? Conversión de entradas en salida.

W: Weltanschauung o visión del mundo. ¿Desde qué punto de vista se le está considerando? ¿Qué hace a ésta T significativa en contexto.

O: los dueños o poseedores. ¿Quién decide? Aquellos que podrían detener T.

E: restricciones del medio. ¿Qué restricciones existen? Son elementos fuera del sistema que éste toma como dadas.

La realidad es muy rica y el observador extrae sólo una parte que responde al propósito o interés que tenga. No se propone elaborar una descripción de la realidad misma, sino ciertas construcciones mentales que habrá de emplearse para estudiarla.

Una vez que se ha determinado qué es el sistema a través de la definición raíz, se formulan los modelos conceptuales de acuerdo a la metodología propuesta en el punto 1.2.4. Éste modelo conceptual se compara (estado 5) con la situación problema expresada (estado 2), perteneciente a las actividades del "mundo real", con la participación de los interesados. Su finalidad es identificar qué diferencias existen y cuál es la razón de las mismas.

El uso de éstos modelos permite conducir la investigación en forma más amplia y más ordenada, además de que hace explícitas algunas concepciones intuitivas. Todo

esto contribuye a lograr mejores condiciones para la comunicación, entendimiento y debate entre los distintos involucrados en la situación problemática.

De ésta comparación se definirán los posibles cambios que al mismo tiempo sean deseables y viables (estadio 6), que pueden ir desde un modesto ajuste hasta el diseño e implantación de nuevos sistemas. Finalmente, se procede la implantación, en donde se llevan a cabo las acciones necesarias para mejorar la situación problema (estadio 7). Puede que se logre lo esperado con respecto a la problemática original, sin embargo es posible que surjan nuevos problemas y entonces se regresará a la etapa 1 (Checkland,1997).

El uso de ésta metodología aplicada al caso en estudio, es con el objeto de establecer cuál es el sistema hasta una etapa anterior a su análisis. Éste será realizado por la metodología propuesta desde la TGS. Como resultado del conocimiento adquirido del sistema se proporcionan algunas sugerencias que caen dentro de la etapa 6, más sin embargo la etapa 7 no se hace referencia a ella por no formar parte de los objetivos de este trabajo.

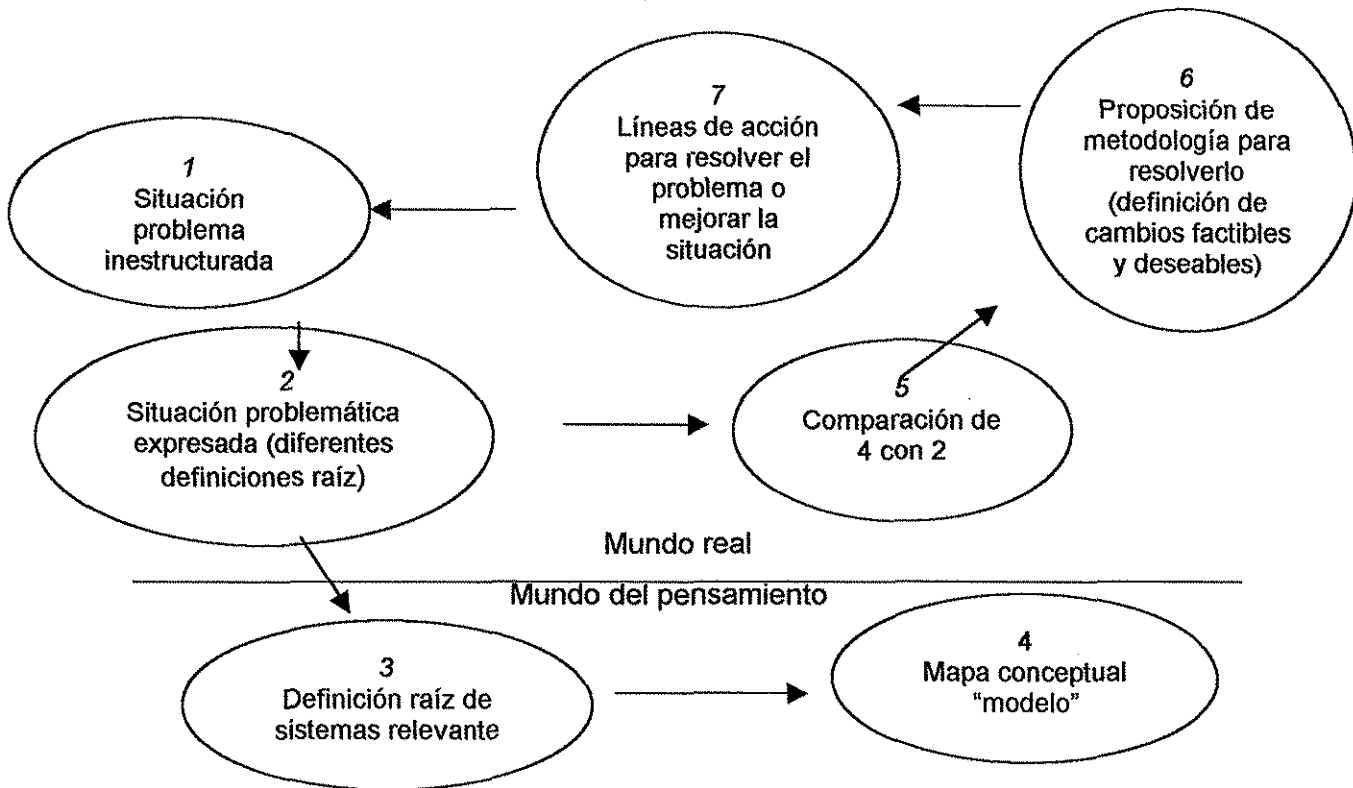


Figura 1: Metodología de los Sistemas Suaves.

#### 1.4.1. Construcción del modelo conceptual.

Para la construcción del modelo conceptual, se tienen tres formas básicas: la concepción estructural, la funcional y la de caja negra.

##### a) La concepción estructural

Al ser un sistema un conjunto de elementos interconexos que forman un todo, se concluye que para conocer el objeto y explicar sus propiedades basta con:

- identificar las partes o componentes del sistema objeto
- conocer las características de las partes
- establecer el patrón de relaciones entre las partes
- reunir esta información y de ahí deducir las propiedades y comportamiento del sistema total

Para la construcción bajo este esquema, se requiere mucha información que crece de manera explosiva, alejándose con ellos de cualquier fin, por lo que normalmente se sugiere tomar en cuenta sólo la información relevante y evitar los detalles. Sin embargo esto sería una decisión arbitraria pues el procedimiento no aporta ningún criterio para hacer esta distinción.

##### b) La concepción de caja negra.

El objeto es visto como una entidad que recibe ciertos insumos y los transforma en un producto, empleando para su representación diagramas de bloque, llamados también de caja negra porque en un primer nivel de análisis no se establece cómo se lleva a cabo el proceso de transformación, es decir, que contiene la caja.

Ésta forma de representación, a pesar de ser muy sencilla, es de mucha utilidad en la solución de problemas, ya que lleva a pensar en la interacción del objeto con su entorno y con ello a tratar temas tan importantes como son: la validez de los

objetivos, la viabilidad del sistema de acuerdo a la disponibilidad de insumos, la existencia de oportunidades de desarrollo, el impacto de ciertos cambios, etc.

Al tomar esta forma de elaboración del modelo se deja a un lado los detalles y se necesita una gran visión: ¿qué se busca y por qué?, ¿qué afecta y cómo?, etc.

### c) La concepción funcional

A diferencia de la concepción estructural que visualiza al objeto como un agregado de partes, la concepción funcional estudia dicho objeto como un proceso. Éste es un conjunto de actividades requeridas para cumplir con una función o propósito, cuyas actividades se encuentran relacionadas de forma lógica. Cada actividad puede desmembrarse en un conjunto de subactividades, de la misma manera que la función del sistema puede verse como una actividad de un sistema más amplio, lo que conduce a hablar de subsistemas y suprasistemas.

Éste procedimiento de agregación o desagregación se puede seguir hasta alcanzar el nivel de detalle que se juzgue apropiado.

Una vez formulado el sistema de actividades, en una siguiente etapa este modelo podrá ser empleado como base para elaborar otro tipo de representaciones.

Si se requiere diseñar o evaluar un sistema, se plantearán preguntas para cada actividad o - subactividad- y el modelo conceptual resultante representará flujos de información con estas características.

El nivel de detalle de los sistemas de actividades y la clase de preguntas por hacer están en relación directa con el o los problemas por resolver.

Procedimiento:

- a) Establecer el conjunto de actividades primarias o generales que, desde un punto de vista lógico, se requieren para llevar a cabo el proceso de transformación contenido en la definición raíz.

- b) Establecer las relaciones entre las distintas actividades (relaciones de dependencia lógica y flujos de información, materiales, etcétera).
- c) Desarrollar en subsistemas para alcanzar el nivel de detalle requerido.

Al elaborar un sistema de actividades -o cualquier otra versión basada en preguntas- no se intenta retratar lo que en la realidad se práctica, pues esto es precisamente lo que se desea indagar.

Los modelos conceptuales se formulan a partir de considerar en el terreno de la lógica qué actividades se requieren para cumplir con la función propuesta y a través de qué medios o con qué recursos se podrían ejecutar. Esto permite desarrollar una especie de lente para indagar en la realidad de manera selectiva en búsqueda de qué está mal y cuál es la razón; aunque por supuesto, el modelo conceptual también puede ser empleado como base para el diseño del sistema objeto.

Cada una de las formas básicas para la concepción de un sistema llevan a considerar a un mismo objeto o problema desde distintas facetas. La concepción estructural es útil para explicar el porqué de ciertas propiedades del objeto, la funcional para entender cómo opera y la de caja negra para aclarar el para qué, es decir, para definir el papel que juega el sistema en el entorno en que se desenvuelve.

El desarrollo del procedimiento para la elaboración del modelo conceptual que sintetiza estas tres formas, en donde se relaciona el para qué, el cómo y el porqué se muestra en la figura 2.

Figura 2: Etapas para la construcción del modelo conceptual

1a. Etapa

<b>¿ PARA QUÉ?</b>
Función que cumple el sistema con su medio ambiente

## 2ª. Etapa

<b>¿ CÓMO FUNCIONA?</b>
Actividades que se requieren para que el sistema cumpla con su función y detección de aquellas actividades que no se desarrollen adecuadamente

## 3a.Etapa

<b>¿POR QUE?</b>
Explicación del porque del mal funcionamiento de algunas actividades al estudiar las características de los elementos

La concepción estructural -que se basa en conocer los elementos del sistema objeto, relaciones y atributos-, tiene como principal definir que elementos y que atributos deben de tomarse en cuenta para explicar las propiedades del sistema objeto. Tales dificultades se reducen si la concepción funcional antecede a la estructural, ya que a la luz del buen o mal comportamiento de cada actividad es posible discriminar cuáles partes son necesarias conocer con mayor o menor detalle y cuáles no.

Finalmente, dado el carácter multifuncional y multivalente de los objetos, es imposible elaborar un sistema de actividades que los cubra por completo, por lo que la concepción de caja negra es útil para especificar que funciones son de relevancia y desde qué punto de vista o visión del mundo se les estudiará.

Primera etapa: (basada principalmente en la concepción de caja negra)

- Hacer una breve descripción de la problemática que se enfrenta .



- Definir cuál o cuáles de las funciones <sup>1</sup>, de entre las que se le atribuyen al sistema objeto<sup>2</sup>, se relacionan con el problema planteado.
- Establecer la o las visiones del mundo desde las cuáles debe ser analizado el problema, para lo cuál se preguntará: ¿Cuál es la razón por la que se considera importante el cumplimiento de cada función?

Segunda etapa: (basada principalmente en la concepción funcional):

- Definir el sistema de actividades que se requiere para cumplir con la función atribuida al sistema objeto, teniendo presente la visión del mundo adoptado.
- Establecer las interconexiones entre actividades y con el exterior del sistema.
- Desarrollar el sistema de actividades en subsistemas hasta alcanzar el nivel de detalle requerido.
- En el caso de que se tenga varias funciones y/o visiones del mundo, se recomienda elaborar un sistema de actividades distinto para cada una de ellas.

Tercera etapa (basada principalmente en la concepción estructural):

- Una vez que se han formulado los sistemas y subsistemas de actividades, estos modelos se usarán como base para definir qué propiedades y qué elementos deben ser observados y estudiados para explicar el comportamiento del sistema.

Dado el carácter multifuncional y multivalente de los objetos, un modelo conceptual sólo es una narración entre muchas de cómo interpretar un objeto y que sirve como medio o instrumento para indagar en los problemas y estudiar la posibilidad de introducir algún cambio.

---

<sup>1</sup> Se entiende como función cualquier bien, servicio u otra salida del sistema objeto. (Fuentes Zenón, 1995)

<sup>2</sup> Sistema objeto, término que se aplica a una entidad o a un grupo de ellas, en la que se identifica una función o propósito común. (idem, )

Con esto se observa que todos los sistemas pueden ser representados o esquematizados bajo el mismo marco conceptual. Esto no quiere decir que sean todos iguales, sino que cada sistema tiene sus propias características que los distingue de los demás; el reunir las características esenciales en este esquema, además de permitir mayor o menor visualización del sistema, coadyuva a detectar la problemática, apoya en la creación de un nuevo sistema y permite el diseño de un proceso estructurado de problemas de sistemas, (Ochoa Rosso, 1997).

El proceso estructurado debe corresponder a la naturaleza del problema; así, los problemas de mejoramiento y corrección guardan una gran similitud, ya que el sistema no requiere cambios cuantitativos relevantes, sino variaciones, reajustes o reorganización de sus elementos. Los problemas de expansión, contracción y creación de nuevos sistemas implican cambios cuantitativos importantes, que pueden generar un nuevo sistema.

#### 1.5. Elementos que integran un Sistema.

##### a) Problema:

Un problema puede ser una pregunta para buscar una respuesta o una situación (como un sistema de información existente). Un problema en el diseño y en el análisis de sistemas, significa que hay una situación que debe ser entendida y una solución a ser determinada.

##### b) Sistema

Un sistema es un todo que no puede ser dividido en partes independientes. Cada parte tiene propiedades que se pierden cuando se separan del sistema.

De acuerdo al Diccionario de Matemática Moderna: "un sistema se define como un conjunto con más de un elemento, que posee entidad propia, que pierde al separarla algunos de sus elementos. En un sistema el todo es algo más que la reunión de

todas sus partes, estas pierden parte de su individualidad al fundirse en un sistema “ (Maravall, C. 1982).

”La idea más general de sistema es de algún objeto concreto, existente en el tiempo, que toma la información del exterior (entrada) y proporciona información de regreso (salida). Es esencialmente que el sistema sea cerrado con respecto al exterior.” (Carrera, J. 1983).

c) Estado: son las condiciones específicas del sistema en un momento dado (Carrera, J. 1999).

d) Entrada: Representación de aquello del exterior que influye en el sistema.

e) Salida: Representación de aquello que el sistema ofrece al exterior.

## 1.6. Clasificación de los sistemas.

Los sistemas se pueden clasificar en:

- Abiertos: que es aquel que se encuentra en comunicación e intercambia información con otros sistemas.
- Cerrado: no hay sistemas externos que lo afecten. Su única comunicación con el exterior es su entrada y salida.
- Concreto: es aquel en que sus elementos son objetos.
- Abstractos: es aquel cuyos elementos son conceptos.
- Duros: conformado por elementos no vivientes u objetos.
- Suaves(flexibles): conformado por elementos vivientes.

Tomando en cuenta las definiciones anteriores, el caso en estudio puede resumirse como:

“ Un sistema cerrado como objeto concreto; es un ente en cuyo interior se lleva a cabo un proceso, y que la forma de conectarse con el exterior es a través de la entrada (de donde se recibe algo del exterior) que será transformado y que regresa al exterior a través de la salida”.

El conocimiento adquirido de ese todo es de suma utilidad, porque revela información que no es fácil de captar y que ahí esta, y que solamente bajo éste nuevo enfoque es posible descubrirla, ya que en infinidad de ocasiones al estudiar los problemas de manera particular los pasamos desapercibidos. Sobre las bases de éste nuevo conocimiento adquirido de manera global, es posible planear actividades, rediseñar sistemas, o simplemente como fue en este trabajo, obtener un mayor conocimiento de un sistema bajo otra perspectiva , el enfoque de sistemas.

Finalmente es importante puntualizar que la aplicación de todos éstos conceptos a un caso en estudio nos conducirán a establecer una base metodológica que permita obtener un mayor conocimiento de un sistema dado, y que por supuesto, la información que se obtenga sea de utilidad para actividades de planeación que apoye a la toma de decisiones.



## **Capítulo 2.0. Aplicación de conceptos de Planeación y enfoque de sistemas.**

### **Introducción.**

Como se expuso en el capítulo anterior, dada la extensa aplicabilidad de los conceptos de planeación y el enfoque de sistemas, la metodología propuesta para el análisis es aplicable a un caso de estudio. Éste en específico se trata de un problema del área de Ingeniería Ambiental.

En este capítulo se aplica la metodología propuesta para la planeación Comprensiva, así como la elaboración del mapa conceptual del caso en estudio de acuerdo a la metodología de los sistemas suaves de Checkland.

### **2.1. Planeación Comprensiva. Metodología.**

#### **2.1.1. Análisis de la situación.**

Al inicio de este trabajo como parte de la introducción, se hace referencia a los antecedentes y la problemática sobre el caso en estudio.

#### **2.1.2. Los objetivos del plan :**

Reducir, procesar, tratar o eliminar los lodos que se generan durante el tratamiento del agua residual ya que son fuente de contaminación y son desechados a la alcantarilla.

#### **2.1.3. Identificación de las alternativas posibles:**

Hay varias formas de tratar estos lodos cuyo propósito es la "estabilización".

La estabilidad esta en función de uso final que se le piensa dar al lodo. Ésta va de acuerdo a la reducción de sólidos suspendidos volátiles, reducción de patógenos, disminución de la toxicidad y reducción en el olor.

Los métodos empleados para la estabilización se dividen en dos tipos:

- Procesos químicos (Estabilización química):

a) Estabilización con cal.

- Procesos biológicos:

b) Digestión aerobia

c) Composteo - pilas, hileras, tambores

d) Digestión anaerobia

2.1.4. Análisis de las ventajas y desventajas de cada opción.

La tabla # 1 muestra las ventajas y desventajas de los procesos de tratamiento utilizadas para la estabilización de los lodos, desde el punto de vista de proceso como en su costo.

**Tabla 1. Comparación de los procesos para estabilización de lodos**

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
DIGESTIÓN AEROBIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Igual reducción de sólidos volátiles que la digestión Anaerobia</li> <li>- Formación de un subproducto final inodoro, parecido al humus, biológicamente estable.</li> <li>- Menores problemas operativos</li> <li>- Menor inversión de capital</li> <li>- Se lleva a cabo a temperatura ambiente</li> <li>- La digestión aerobia autotérmica aprovecha el calor producido por la oxidación biológica del lodo.</li> <li>- Manteniendo la temperatura entre 35°C y 70°C, con tiempos de retención de 3 a 8 días, se obtiene un lodo estable con una reducción considerable de patógenos (pasteurización)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El proceso consiste en la aereación del lodo durante 10 a 15 días. El grado de estabilización disminuye con la temperatura.</li> <li>- Elevado costo de energía asociado al suministro del oxígeno necesario.</li> </ul>

(Fuente: Metcalf, 1977 )

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
DIGESTIÓN ANAEROBIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Buena destrucción de ssv (40-60%).</li> <li>-Costos operacionales bajos, sobre todo si se utiliza el metano.</li> <li>-Amplia aplicabilidad.</li> <li>-El producto final es adecuado para uso en el suelo.</li> <li>-Buena inactivación de patógenos.</li> <li>-Reducción de la masa total del lodo.</li> <li>-Requerimientos bajos de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere operarios especializados, puede causar espumamiento.</li> <li>-El proceso es lento y -Puede producir olores desagradables.</li> <li>-El sobrenadante tiene una carga muy alta en términos de DBO, DQO, SS y NH<sub>3</sub>.</li> <li>-Procedimientos de limpieza difíciles.</li> <li>-Altos costos iniciales.</li> <li>-Problemas de seguridad debido a la inflamabilidad del metano.</li> </ul>
COMPOSTEO	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Producto resultante de alta calidad, adecuado para fines agrícolas.</li> <li>-Puede combinarse con otros procesos.</li> <li>-Costos iniciales bajos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere de 40 a 60 % de sólidos y de un agente abultador.</li> <li>- Requiere una fuente de carbón.</li> <li>- Requiere suministro de aire forzado o volteado y por consecuencia, costos de operación altos.</li> <li>- Puede producir olores desagradables y diseminación potencial de patógenos a través del polvo. Requiere cantidades grandes de terreno.</li> </ul>
ESTABILIZACION CON CAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Costos de capital bajos.</li> <li>-Fácil operación .</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-El lodo sólo puede algunas veces utilizarse para aplicación en suelos ácidos.</li> <li>-Alto consumo de reactivos químicos.</li> <li>-Aumento del volumen de lodos producido . La disminución del pH después del tratamiento puede generar olores y nuevo crecimiento biológico.</li> </ul>

(Fuente: wef, mop-fd9, 1993)



### 2.1.5. Desarrollo de la alternativa preferida para su implantación.

La alternativa seleccionada es la digestión anaerobia porque ofrece las mejores condiciones y ventajas sobre los otros tipos de tratamiento.

### 2.2. El problema bajo el punto de vista de la Teoría General de Sistema.

Un sistema es “un conjunto o reunión de elementos relacionados” que hacen un todo. Ese todo puede ser cualquier problema que quiera resolverse o estudiarse, y que para hacerlo es necesario establecer sus componentes. Estas bases o lineamientos son proporcionados por la teoría general de sistemas.

La Teoría General de Sistemas tiene como propósito el desarrollo de nuevos marcos teóricos para la explicación o comprensión de los fenómenos naturales.

El objetivo planteado para este trabajo consiste en la elaboración de una metodología que permita analizar información. De acuerdo a esto, el trabajo planteado pertenece a la corriente de los sistemas suaves, ya que es en esta donde se plantea la posibilidad de elaborar dicha metodología.

El sistema en estudio es pues entonces el digestor anaerobio, de alta tasa, construido a nivel piloto, y que es operado en el laboratorio, cuya función es tratar un volumen del lodo primario que se genera como subproducto del tratamiento del agua residual.

Se parte de un problema real, que son los lodos que provienen de una planta de tratamiento de aguas residuales que no son tratados y que son desechados a la alcantarilla. Se construyó un digestor anaerobio tipo huevo a nivel experimental para digerirlos o tratarlos. El punto de interés es conocer el funcionamiento de este proceso.

### 2.3. Metodología de los Sistemas Suaves.

Para conocer la forma de operación de dicho sistema, se utilizó la metodología de los sistemas suaves de Checkland para establecer un primer nivel de análisis.

De acuerdo a ésta metodología, tanto las etapas 1 y 2 se refieren a la descripción amplia del sistema y de la situación problemática. (condiciones que a continuación se describen).

#### 2.3.1. Origen del problema.

Como se hizo mención en la introducción, al tratar el agua residual se generan los subproductos llamados Lodos que son desechados a la alcantarilla y son una fuente de contaminación. El origen de estos lodos, específicamente para el caso de estudio, provienen de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del D.F.

Éstos lodos que sirvieron de base para el funcionamiento del sistema en estudio, provienen del tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico que se reciben en esta planta y cuyo destino final una vez tratadas es que sean usadas para riego.

La planta (suprasistema) utiliza el sistema de tratamiento de lodos activados y está constituida por dos unidades de sedimentación, que trabajan con un gasto total de 160 lps.

El agua entra por gravedad al desarenador, que consta de tres canales. En la unidad 1, el agua ya desarenada pasa a dos tanques de sedimentación primaria, semicirculares, de  $88 \text{ m}^2$  cada uno, tipo tanques Imhoff. Después pasa a dos tanques de aereación, de flujo helicoidal, que en conjunto tienen un volumen de  $1333 \text{ m}^3$ , con un tiempo de retención promedio de 4.6 horas.

Posteriormente, pasa al área de sedimentación secundaria, constituida por dos tanques de flujo horizontal de  $30 \times 18 \text{ m}$ . Al final de éstos, el agua ya clarificada, a razón de 1.4 lps/m, se recibe en un tanque, al cual se le adiciona hipoclorito de sodio.

La unidad 2 consta de dos sedimentadores primarios rectangulares de 4.15 x 17.35m, no tiene tanque Imhoff; la aereación se efectúa en dos cámaras horizontales de 30 x 3 x 3.5 m, lo que da un volumen 325 m<sup>3</sup> y significa un tiempo de retención promedio de 4.5 horas. La sedimentación secundaria se produce en dos tanques de 4.5 x 2.30 m, con una descarga de agua clarificada de 1.2 lps /m (figura 3).

La cantidad calculada aproximada de lodos producidos son:

De lodo primario	68 m <sup>3</sup> / d ;	1361 Kg/d (peso seco)
De lodo secundarios	92 m <sup>3</sup> / d ;	918 Kg/d (peso seco)
Total	160 m <sup>3</sup> / d ;	2279 Kg/d (peso seco)

La planta consta de dos digestores anaerobios que no se encuentran en operación por lo que los lodos producidos en la sedimentación primaria y en la secundaria son purgados a la alcantarilla.

#### Suprasistema

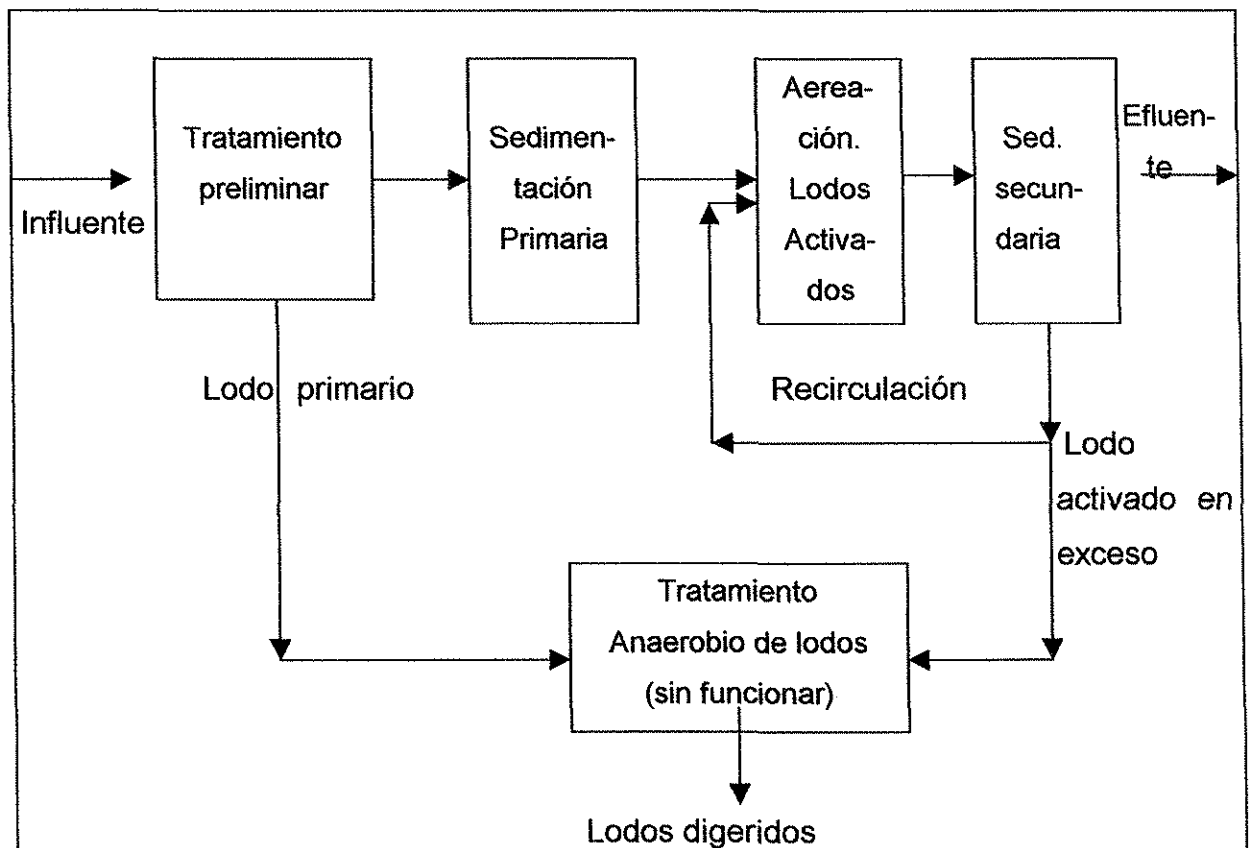


Figura 3: Esquema de la Planta de Tratamiento de Agua Residual. (Lucero, 1986)

Información más detallada al respecto se encuentra en el anexo 1, dado que es parte importante del contenido que debe incluirse en las etapas 1 y 2 de ésta metodología.

La figura 4 muestra un diagrama que representa esta problemática desde que se originan los lodos hasta llegar al sistema en estudio. La información contenida en el anexo 1 hace referencia básicamente al agua residual, tipos de tratamientos, tipos de lodos con sus formas de tratamiento y responde a las preguntas planteadas en la figura 5.

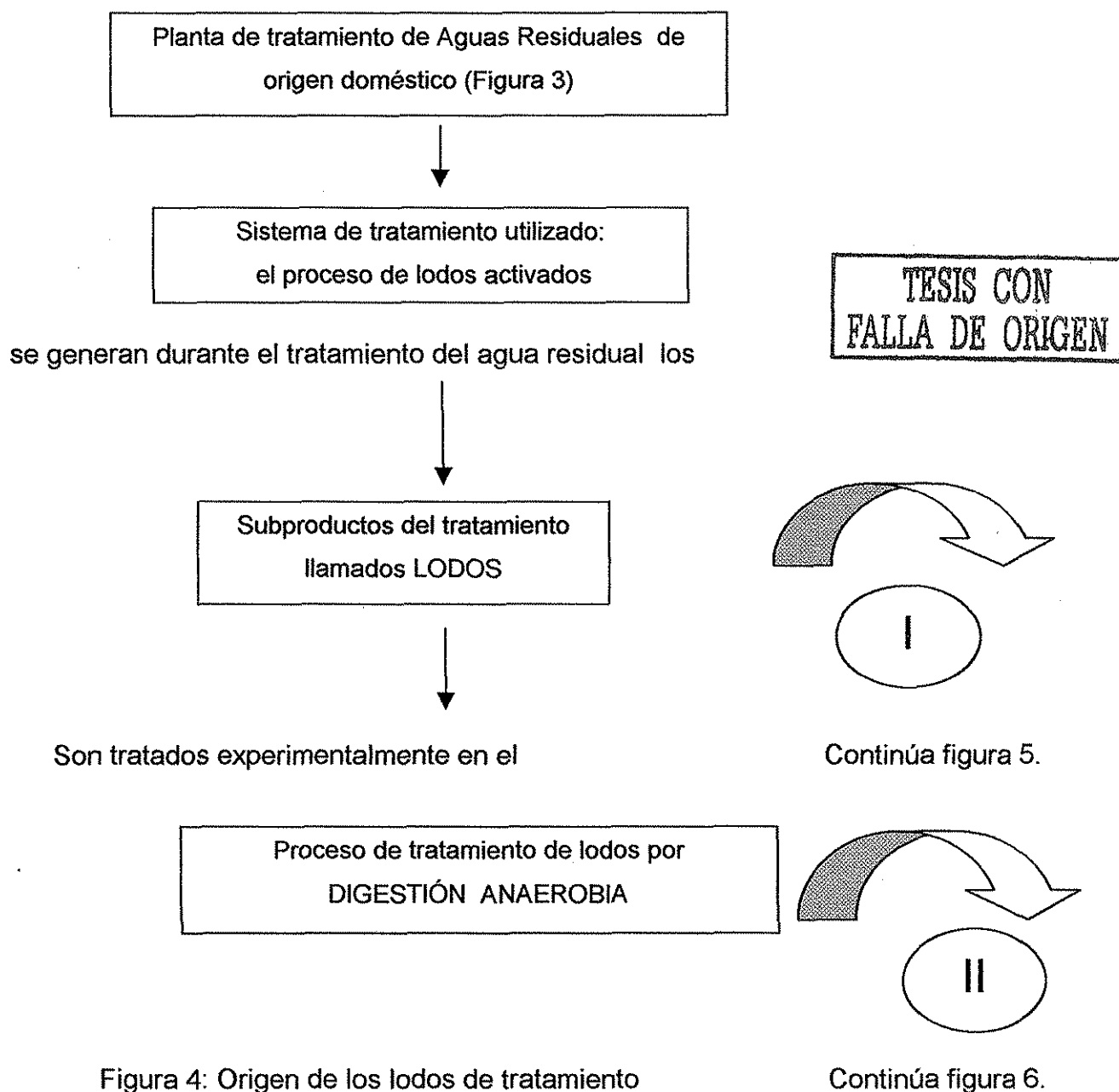


Figura 4: Origen de los lodos de tratamiento

Figura 5: Lodos

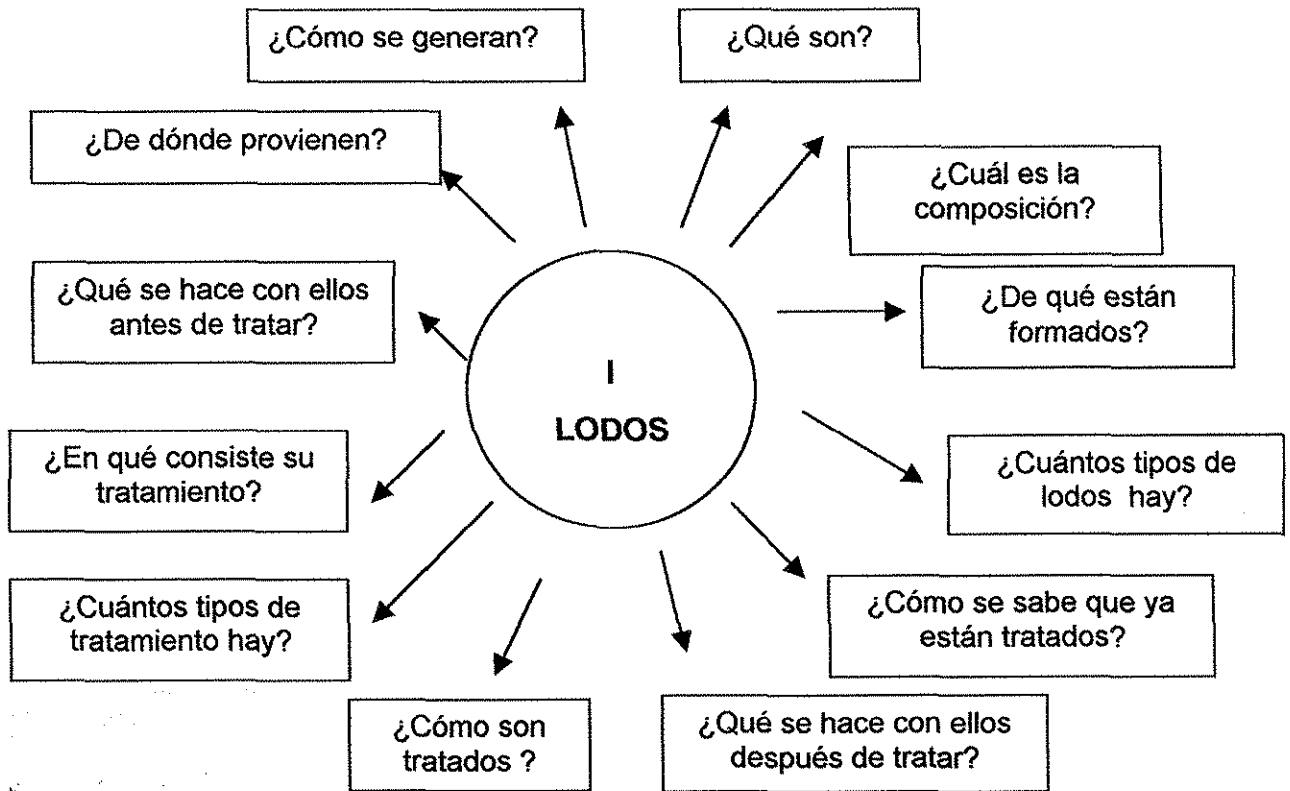
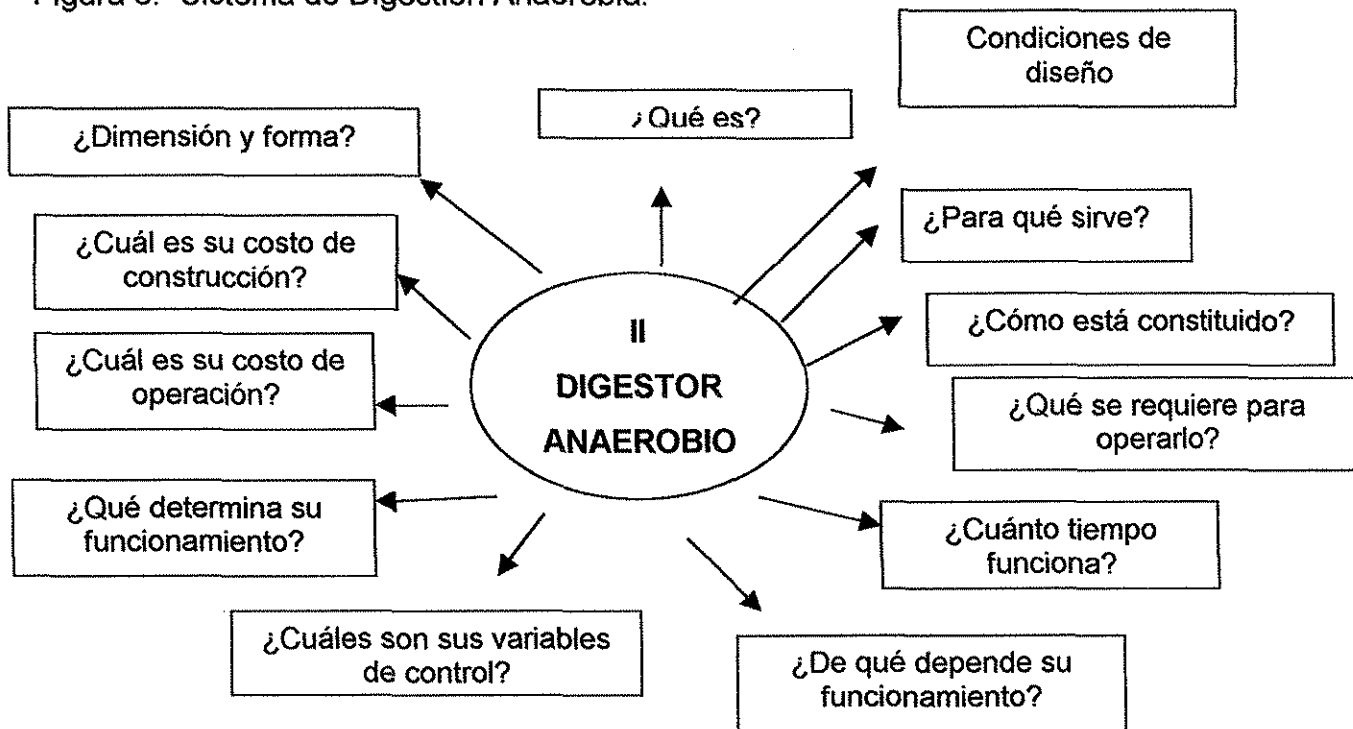
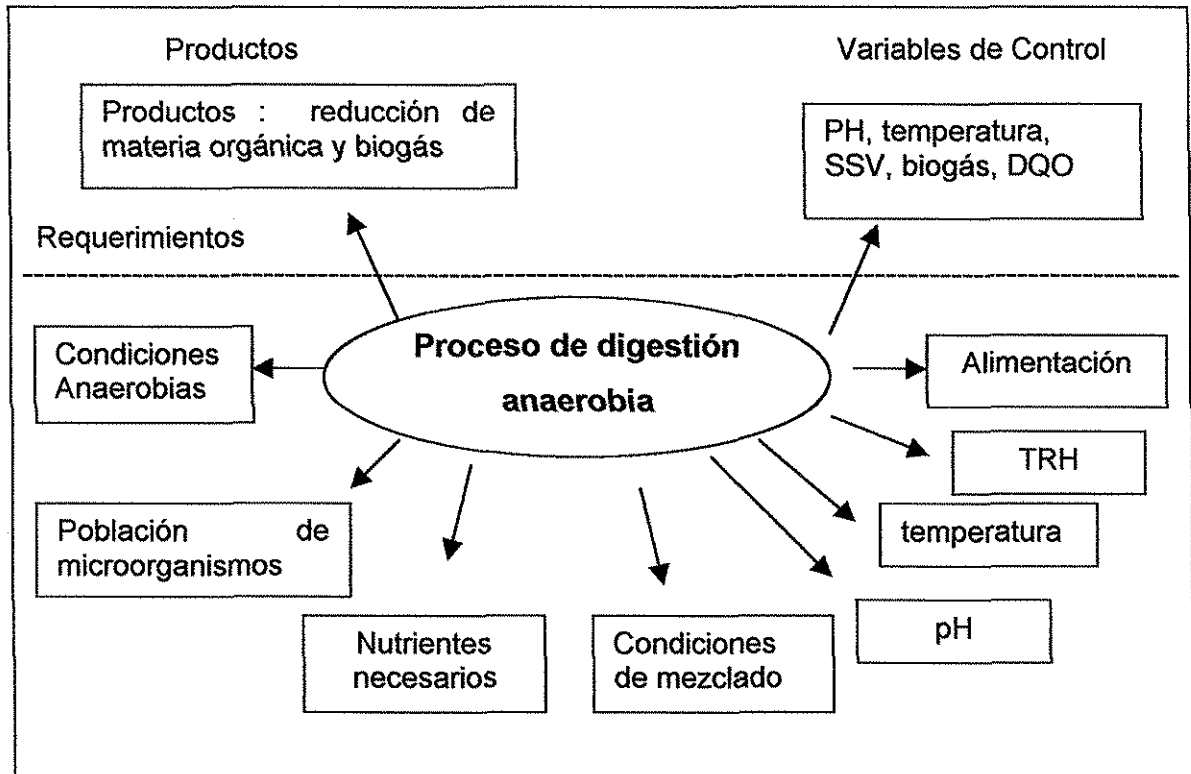


Figura 6: Sistema de Digestión Anaerobia.



En el anexo 2 de este trabajo, se encuentra la información que da respuesta a las preguntas planteadas en la figura 6 (capítulo 1, figura 2, 2ª. etapa). Una vez obtenida la información correspondiente a ellas, se pudieron resumir las condiciones de operación del sistema de digestión anaerobia en la figura 7.

Figura 7: Sistema de Digestión Anaerobia  
(condiciones de operación)



Las etapas 3 y 4 constituyen la parte medular de la metodología de los sistemas suaves, y corresponde al planteamiento de la definición raíz sobre el sistema anaerobio para el tratamiento de los lodos.

Haciendo uso de la figura 7 (condiciones de operación del sistema) se da respuesta a la palabra mnemotécnica CATWOE :

C beneficiarios: es la población.

A actores: los microorganismos.

T proceso de transformación: degradación de la materia orgánica.

W visión: proceso anaerobio puede favorecer el medio ambiente.

O dueños: los encargados o responsables de la planta de tratamiento.

E restricciones del medio: descargas con una composición diferente a las aguas del tipo doméstico.

Por lo tanto la definición raíz (etapa 3) correspondiente es:

El sistema de beneficio a la población, cuyo proceso de transformación es realizado por microorganismos que degradan la materia orgánica de tipo doméstico disminuyendo con esto la fuente de contaminación. (figura 7).

Una vez establecida la definición raíz, se plantean las actividades, en un primer nivel para el modelo conceptual sobre el sistema en estudio:

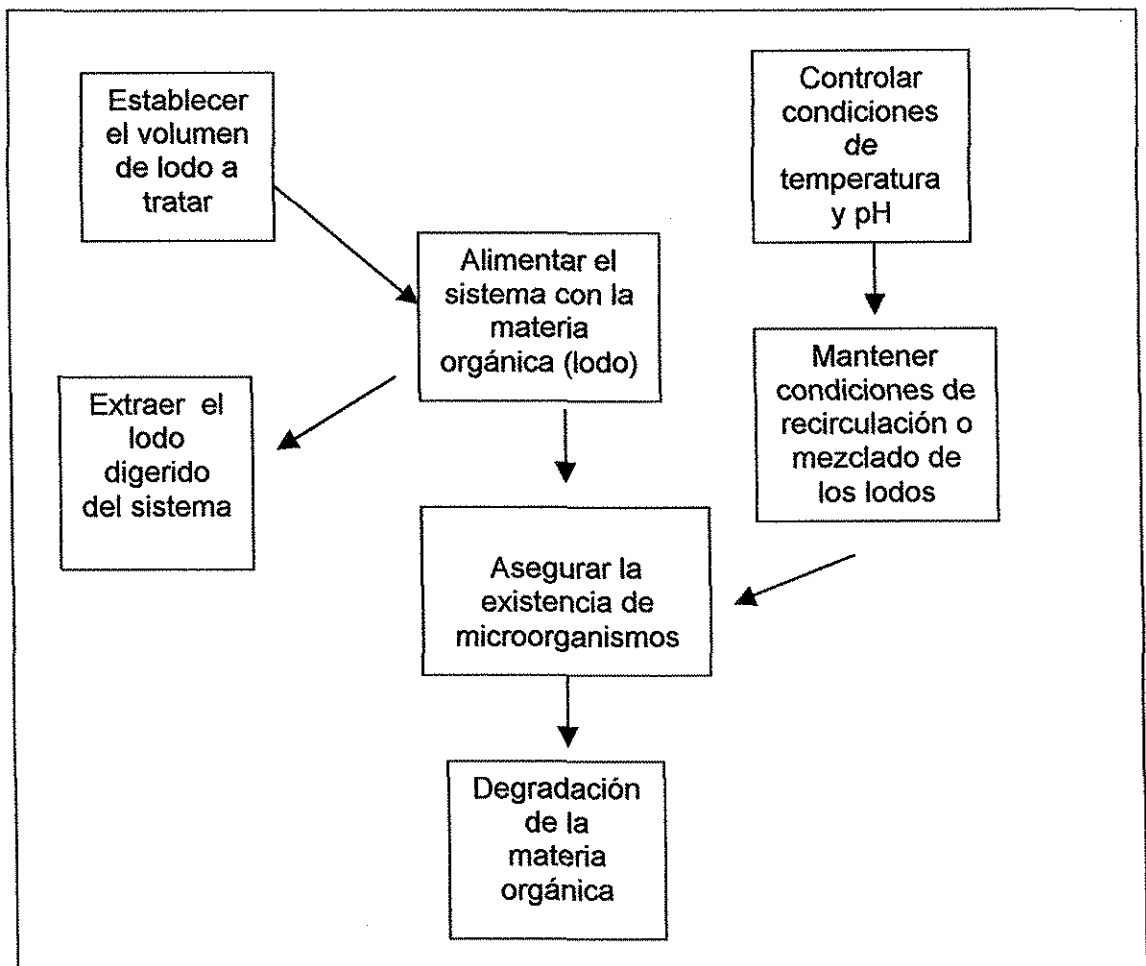


Figura 8: Modelo Conceptual en un primer nivel.

De acuerdo al modelo conceptual obtenido, se ha visto que cumple perfectamente con las características de ser considerado un sistema.

Al ser considerado el caso de estudio ya un sistema, ahora es necesario clasificarlo. Se ha clasificado en un sistema cerrado duro, ya que su única comunicación con el exterior es su entrada y salida, por lo que no tiene otros sistemas que lo afecte y se considera un todo (el digestor como unidad de proceso y no a su contenido).

Para profundizar aún más en el nivel de análisis del sistema en estudio, es que en este momento se plantea una metodología basada en la teoría de sistemas que permitirá el :

- Análisis del funcionamiento del digestor anaerobio visto como un sistema, estableciendo las entradas, salidas, estados, así como las funciones de transición de estados.
- Se establecerá el modelo matemático del sistema que mejor lo represente, con los datos obtenidos experimentalmente.

#### 2.4. Condiciones de construcción y arranque de las unidades experimentales. (Digestores Anaerobios).

Para el trabajo de investigación realizado por G.Moeller, se fabricaron cuatro digestores anaerobios tipo huevo, que fueron diseñados para tratar de forma experimental en el laboratorio, un volumen de lodo primario bajo diferentes condiciones de operación.

De acuerdo a las especificaciones del diseño éstos se construyeron en barro pintado de color negro, recubierto en su interior por un impermeabilizante para evitar evaporación de su contenido a través del material poroso que constituye las paredes del sistema (figura 9).

Los digestores tienen aproximadamente un metro de alto y se encuentran sobre una base de metal, en posición vertical. En el extremo superior se encuentra una válvula por donde es alimentado el digestor (influyente).



La alimentación ( entrada del sistema), consiste en agregar cierta cantidad de lodos crudos que provienen directamente de la planta de tratamiento. La cantidad necesaria para su alimentación ha sido calculada previamente de acuerdo al contenido de materia orgánica que contiene y al volumen a tratar en el digestor (anexo 2).

Los lodos son digeridos o procesado en el interior del sistema por la acción de microorganismos, y del lado opuesto a la válvula de entrada, se encuentra otra válvula que da salida a los lodos ya procesados y que se conocen como lodos digeridos (efluente).

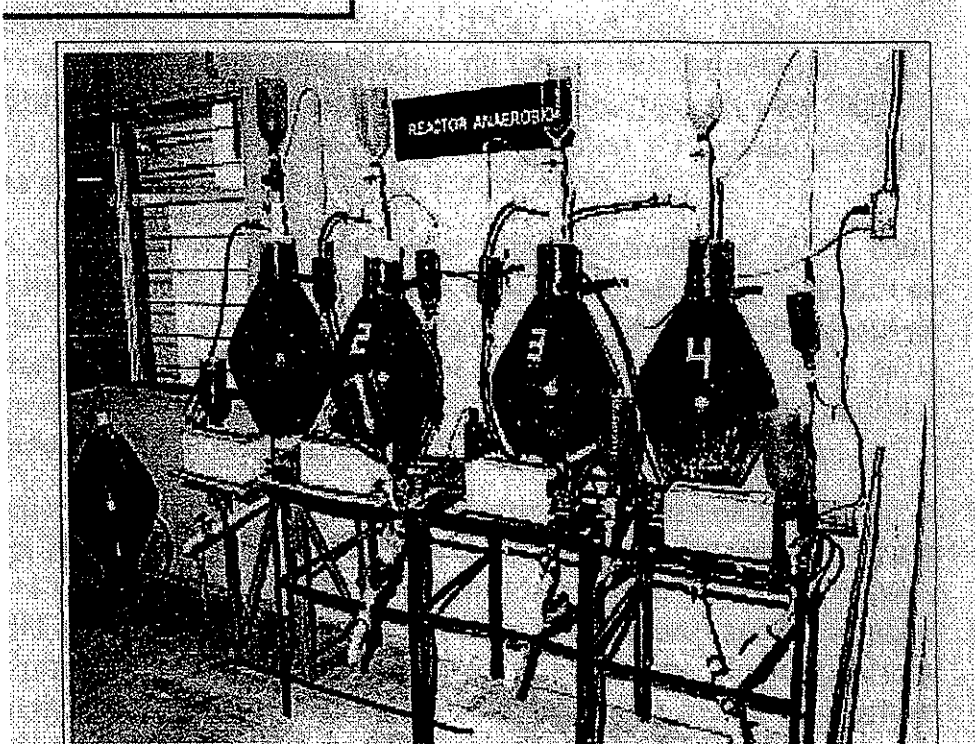
El digestor anaerobio es de alta tasa. Las válvulas, tanto de entrada como de salida se encuentran conectadas a una bomba peristáltica por medio de una manguera, y tiene la función de recircular el lodo para que se lleve a cabo una mezcla completa. El volumen total del digestor es recirculado 7 veces al día.

En la parte superior, junto a la válvula de entrada, se encuentra otra manguera que va conectada a un frasco con hidróxido de sodio. Es en este frasco donde va directamente el biogás que se va generando durante el proceso y el cual es medido por el desplazamiento de volumen del hidróxido de sodio que pasa a otro frasco que está vacío.

Básicamente el proceso de digestión o degradación del lodo es realizada por un grupo de microorganismos, mismos que se encuentran dentro de una estructura cerrada ya que realizan su función en condiciones totalmente anaerobia. Dicha estructura tiene una entrada y una salida, por lo que fácilmente se determinó que dicho proceso podía ser representado como un sistema.

De la información obtenida sobre el funcionamiento de éstos cuatro digestores, se utilizó para este estudio la correspondiente al digestor anaerobio que trabajó bajo condiciones normales de operación (blanco).

Figura # 9. Presentación de los cuatro digestores anaerobios



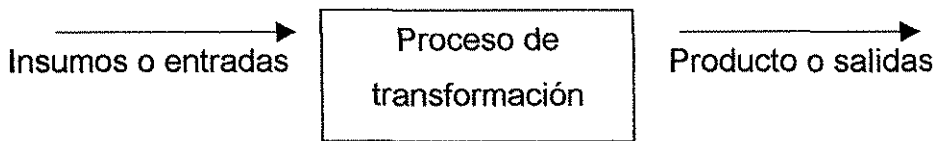
Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, la definición del sistema en estudio se resume en:

“ Un sistema cerrado como objeto concreto, es un ente en cuyo interior se lleva a cabo un proceso, y que la forma de conectarse con el exterior es a través de la entrada (de donde se recibe algo del exterior) que será transformado y que regresa al exterior a través de la salida”.

De acuerdo a la definición anterior aplica perfectamente al objeto en estudio que es el digestor anaerobio, por lo que éste es visto ahora como una entidad que recibe insumos y los transforma en un producto. La representación del sistema se muestra en la figura 10.



Figura 10: Esquema básico de un sistema



Estudiando la respuesta de las variables del objeto de estudio, se conoce al objeto de estudio, que en este caso es el digestor anaerobio.

Para dar paso al siguiente nivel de análisis, se requiere definir los componentes del sistema, éstos se encuentran en el capítulo siguiente, dónde se plantean las bases estructurales de la metodología y que se aplicarán directamente sobre el caso en estudio.

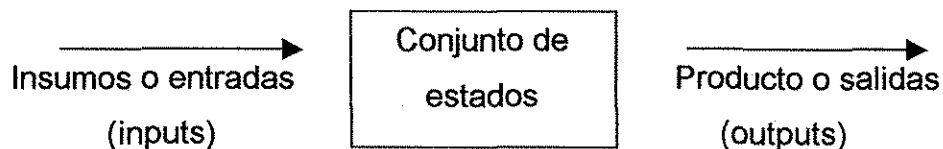
En éste mismo capítulo se encuentra la parte correspondiente a los modelos matemáticos, y se consideró el modelo lineal por ser el más sencillo y posteriormente el modelo cuadrático. Ambos conceptos fueron destinados a un solo capítulo por representar la parte medular de este trabajo.

### Capítulo 3. Desarrollo de una metodología de análisis y su aplicación al estudio de caso.

Introducción:

En este capítulo se aprovechan los conceptos y la descripción que se ha hecho de los procesos a analizar, para dar una presentación condensada y lo suficientemente formalizada de un digestor anaerobio que permita ir dando las correspondencias requeridas entre el sistema real y su representación como entidad matemática en el marco de Teoría General de Sistemas.

El modelo Propuesto es discreto de acuerdo a los conceptos generales de la Teoría General de Sistemas, es de la forma:



Para poder concretar este esquema general, se lleva a cabo un estudio lo más exhaustivo y preciso del caso concreto bajo estudio, o sea, se establecen:

1. El conjunto de entradas
- 2.- El conjunto de salidas
- 3.- El conjunto de estados internos del sistema.
- 4.- Las funciones de transición de estado y
- 5.- La función de salida.

Lo anterior requiere por supuesto el conocimiento profundo y detallado del caso concreto.

Éste caso concreto fue intensamente estudiado, véase anexo 1 y 2, para poder llegar a lo siguiente:

- 1.- El conjunto de entradas se definió como:

$$\phi_i(m) = \alpha_1, \alpha_2$$

- 2.- El conjunto de salida:

$$\phi_o(\%, v) = (\beta_1, \beta_2,)$$

Lo más problemático, como es usual en teoría de sistemas, fue definir adecuadamente el conjunto de los estados del sistema.

La dinámica del sistema concreto tuvo que ser analizada, desglosada, sintetizada y se llegó a:

3.- Los estados del sistema están definidos como:

$$Q = (\mu, \eta, \theta)$$

Y las funciones correspondientes son:

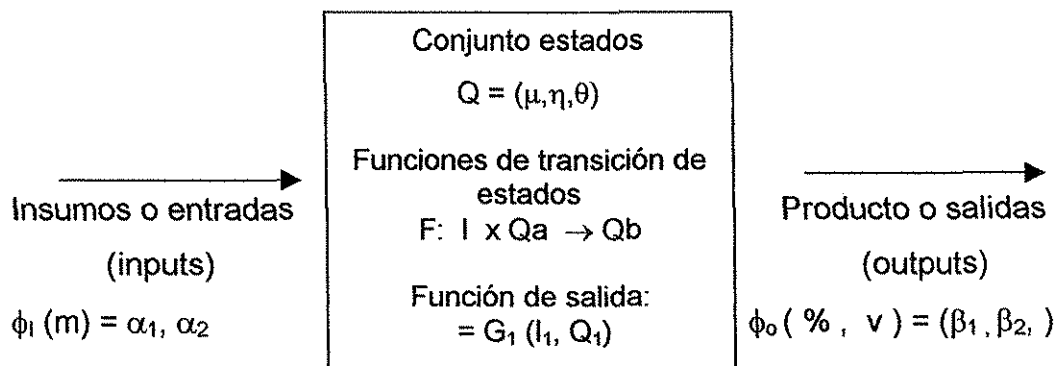
4.- Función de transición de estados:

$$F: I \times Q_a \rightarrow Q_b$$

5.- Función de salida es:

$$f: \text{Output}_1 = G_1(I_1, Q_1) = (\% \text{ de remoción, volumen de gas producido})$$

Lo cuál se condensa en el esquema siguiente:



Es importante señalar que este sistema particular, por la naturaleza de los datos, está dado como un sistema discreto, ya que por esa naturaleza, es la manera más adecuada de representar el conocimiento y la información que se tiene del sistema.

Como tal, podría parecer demasiado particularizado, lo cuál no es el caso, porque a partir de él, es factible desarrollar otras representaciones, por ejemplo en formas continuas que permitan mayor flexibilidad en la planeación.

Al respecto, se encuentran algunas propuestas en esta sección.

Esquemáticamente tenemos el siguiente ejemplo:

Ecuaciones de tipo lineal:

$$Y_1 = a_1x_1 + b_1$$

$$Y_2 = a_2x_1 + b_2$$

Se asume que los datos de entrada serán proporcionados al sistema matemático en secuencias correspondientes a la secuencia real en que se dieron las entradas correspondientes a los valores de los parámetros de entrada. De esta manera se introduce implícitamente el tiempo en el modelo matemático.

En una primera instancia se describen los aspectos reales de las entradas y salidas del digestor que se usará en el experimento. Se puntualiza este experimento y poco a poco se va profundizando tanto en la descripción de los parámetros de entrada y salida, como en el aspecto más sutil, la definición de los estados internos del sistema abstracto, basados en el comportamiento formalizado del digestor.

A lo largo de este capítulo de este estudio se van también conformando las definiciones de las funciones requeridas.

Cabe recordar, que para el estudio de caso únicamente se trabajó con la información obtenida del digestor anaerobio que utilizó el lodo crudo sin ningún tratamiento (referido como blanco en el experimento). Tanto las condiciones de operación como de alimentación fueron las mismas para los 4 digestores, cambiando únicamente el lodo con que fueron alimentados éstos. Dichas condiciones del lodo se mencionan en el apartado 3.1.2.

### 3.1. El estudio de caso. Un sistema de digestión anaerobia para el tratamiento de lodos

#### 3.1.1. Condiciones de Operación del sistema.

El digester fue llenado al inicio del experimento con 30 litros de lodos primarios. Posteriormente se le agregó un inóculo de lodos estabilizados que contenían los microorganismos requeridos para acelerar el proceso y se tuvieron las condiciones anaerobias. Esta alimentación fue en lote o tipo Batch hasta que el sistema se aclimatara y empezara a producir gas, lo cual ocurrió tres días después.

De manera posterior a esta etapa, el digester fue alimentados de forma semicontinua, con los mismos lodos primarios provenientes de la planta referida anteriormente (3.1.2.).

Para llevar a cabo la alimentación del digester, en primer instancia se detenía el funcionamiento de la bomba, y se dejaba reposar el sistema un tiempo para que sedimentaran los lodos. Posteriormente se abría la válvula de salida para recolectar un volumen de éstos lodos digeridos que fue calculado de acuerdo a la COV (medido como Kg de DQO/ m<sup>3</sup>/día) y al tiempo de retención hidráulico ( 10, 15 y 20 días), que fueron las condiciones de operación del sistema experimentalmente.

El volumen fue variando de acuerdo con las diferentes etapas del experimento (inciso 3.2)

Una vez obtenida la muestra, era alimentado el digester con lodo crudo, con una cantidad igual a la obtenida en la salida, esto con el objeto de mantener los 30 litros del llenado inicial durante toda la operación y finalmente se volvía a poner en funcionamiento la bomba para continuar con la digestión.

Este procedimiento de alimentación fue realizado por un operario especializado, que a su vez verificaba el funcionamiento del aparato varias veces al día.

La temperatura a la que trabajó el digestor durante el experimento fue de 28 °C. (temperatura ambiente).

El experimento se llevo a cabo durante 8 meses, período durante el cuál se obtuvieron las muestras de lodo ya digeridas (efluente), así como de las muestras con que fueron alimentados (influyente). Dichas muestras fueron analizadas por el mismo operario especializado.

Además de los parámetros de funcionamiento establecidos para el sistema (SSV y biogás), se tomaron lecturas del pH y temperatura, y se realizaron análisis de alcalinidad total, concentración de ácidos grasos volátiles y DQO. Todos éstos parámetros son considerados de respuesta primarios, ya que con ellos es posible evaluar el funcionamiento del digestor anaerobio y por lo tanto las condiciones bajo las cuáles se esta digiriendo el lodo dentro del reactor.

Fue de especial cuidado el tomar la lectura de pH y el análisis de ácidos grasos para el control interno del sistema. La razón de ello es porque a un pH ácido, el proceso puede verse afectado totalmente en su funcionamiento al haber inhibición de las bacterias metanogénicas para la producción de gas que ocasionaría una caída del sistema.

Todas las determinaciones de los parámetros anteriormente mencionadas, tanto del influente como de efluente, se hicieron por duplicado para tener mayor confiabilidad en los valores obtenidos.

### 3.1.2. Condiciones de alimentación.

Los lodos crudos fueron sometidos a diferentes pretratamientos antes de ser utilizados para la alimentación de los digestores.

El punto de interés para este estudio es el digestor A.



### **Digestor A:**

Este digestor referido como Blanco, fue alimentado con lodos crudos, sin ningún tratamiento previo, por lo que las muestras obtenidas y analizadas de este digestor son el patrón de comparación con los resultados obtenidos de los otros tres digestores que trabajaron bajo diferentes condiciones.

### **Digestor B:**

Al volumen de lodo con que fue alimentado, (aproximadamente un volumen un poco mayor de 1.5 L., ya que era necesario guardar muestra para el análisis del laboratorio, se le agregó un estimulante, que en este caso fue extracto de levadura al 0.05 %. El propósito de este estimulante era aumentar la actividad de las bacterias metanogénicas (productoras de biogás).

### **Digestor C:**

En este caso, a este digestor se le agregó de igual manera el mismo estimulante pero a diferente concentración, esto es, a un 0.1 %.

### **Digestor D:**

El volumen de lodo con que iba a ser alimentado el digestor sufría un pretratamiento térmico, esto es, el volumen de lodo (1.5 L) era esterilizado a 121° C durante una hora en autoclave. Esto con la finalidad de degradar la materia orgánica.

Posteriormente ya enfriados a temperatura ambiente, se procedía a la alimentación de la misma manera que los anteriores.

Bajo estas condiciones fueron tratados los lodos antes de ser utilizados en la alimentación de los digestores.

Para el cambio de las condiciones de alimentación en las siguientes etapas siguientes, no fue necesario detener el funcionamiento del sistema por lo que éste siguió operando de manera continua.

### 3.2. Etapas del experimento:

Es importante mencionar que los cuatro digestores, que trabajaron con lodos diferentes, tuvieron cada uno 4 etapas durante su desarrollo. En cada una de ellas se hizo variar las condiciones de la carga orgánica volumétrica y el tiempo de retención hidráulico.

Primera etapa:

La carga orgánica volumétrica (COV) fue de 1.0 Kg de DQO m<sup>3</sup>/día a un tiempo de retención hidráulico de 20 días.

Segunda etapa:

Carga orgánica volumétrica de 1.75 Kg de DQO m<sup>3</sup>/día a un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 días.

Tercera etapa:

Carga orgánica volumétrica de 1.9 kg de DQO m<sup>3</sup>/día a un tiempo de retención de 15 días.

Cuarta etapa:

Carga orgánica volumétrica de 3.0 Kg de DQO m<sup>3</sup>/día a un tiempo de retención de 10 días.

Una vez terminado el experimento, los lodos fueron drenados y pasaron a un lecho de secado donde posteriormente se dispusieron de ellos.

### 3.3. Marco teórico –práctico. Desarrollo de la metodología de análisis:

La metodología seleccionada para el análisis del sistema se efectuó de la siguiente manera:

3.3.1. Análisis del comportamiento global del sistema en sus cuatro etapas, donde se identificaron los componentes del sistema: entradas, salidas, estados y funciones de transición.

3.3.2. Análisis estadísticos de los valores obtenidos en el laboratorio, en cada una de las etapas.

3.3.3. Modelación matemática del sistema de tipo lineal y cuadrática con los datos obtenidos experimentalmente para cada una de las etapas.

#### 3.3.1. Análisis del comportamiento global del sistema en sus cuatro etapas.

Tomando en consideración las características de funcionamiento que tiene el sistema de digestión de lodos se observa que se asemeja a una caja negra, (capítulo 1, apartado 2), en función de la respuesta que representan ante un cierto Input, los datos de salida revelan la información sobre su funcionamiento interno, por lo que a continuación se definen los componentes del sistema:

**a) Entrada del sistema ( Inputs, I):** que es la cantidad de lodo que alimenta al digester, y que esta definido por:

$$\phi_1 (m) = \alpha_1, \alpha_2$$

Donde  $\alpha_1$  corresponde a la cantidad de SSV que contiene el lodo, medidos en g/L y  $\alpha_2$  es la carga orgánica volumétrica (C.O.V.), medidos como Kg de DQO /m<sup>3</sup> /día, que de manera indirecta se utiliza como referencia ya que por el volumen se conoce el tiempo de retención hidráulico.

Para el experimento, se tomaron en cuenta los tiempos de retención de 10, 15 y 20 días, que fueron los TRH considerados.

La tabla 2 muestra las cargas orgánicas volumétricas obtenidas a diferentes tiempos de retención. Cálculos efectuados con tres concentraciones de materia orgánica, medida como Kg /m<sup>3</sup>/día de DQO. Para fines de este cálculo, las fórmulas están descritas en el anexo 2, apartado 1.3.

Tabla 2: COV calculadas con diferentes cantidades de materia orgánica (So)

Etapa	Q	So	TRH	COV
1.1	1.5 L/d	20.1 g/L DQO	20 días	1.01 Kg de DQO/m <sup>3</sup> /d
1.2	1.5 L/d	34.5 g/L DQO	20 días	1.72 Kg de DQO/ m <sup>3</sup> /d
2	2.0 L/d	30.8 g/L DQO	15 días	2.05 Kg de DQO m <sup>3</sup> //d
3	3.0 L/d	30.6 g/L DQO	10 días	3.06 Kg de DQO/ m <sup>3</sup> /d

Los valores de la tabla 2 se refieren a diferentes cargas a diferentes tiempos de retención, por lo que fue necesario completar los cálculos en cada una de las etapas. Se tomaron como base estos datos y de ahí se estimaron las COV para otros tiempos de retención.

La tabla 3 muestra los valores calculados para la COV en la etapa 1.1; las tablas 4, 5, 6 y 7 corresponden a los valores calculados de las COV para las etapas 1.2, 2.0, y 3.0 respectivamente.



Tabla 3: COV calculadas para la Etapa 1.1

<b>Etapa 1.1</b>	<b>20.1 g/L de DQO</b>	<b>12.8 g/L de SSV = 13 g/L de SSV</b>	
	<b>C.O.V. ( g/L)</b>	<b>C.O.V. ( g/L)</b>	<b>TRH (días)</b>
	0.67	0.43	30
	0.81	0.52	25
	1.0	0.65	20
	1.35	0.87	15
	2.0	1.3	10
	4.0	2.6	5

Tabla 4: Valores calculados de COV para la Etapa 1.2

<b>Etapas1.2</b>	<b>34.5 g/L de DQO</b>	<b>18.5 g/L de SSV = 19 g/L de SSV</b>	
	<b>C.O.V. ( g/L)</b>	<b>C.O.V. ( g/L)</b>	<b>TRH (días)</b>
	1.15	0.63	30
	1.38	0.76	25
	1.73	0.95	20
	2.3	1.27	15
	3.45	1.9	10
	6.9	3.8	5

Tabla 5: Valores calculados de COV para la Etapa 2.0

<b>Etapas 2.0</b>	<b>31.14 g/L de DQO</b>	<b>15.65 g/L de SSV = 15.7 g/L de SSV</b>	
	<b>C.O.V. ( g/L)</b>	<b>C.O.V. ( g/L)</b>	<b>TRH (días)</b>
	1.04	0.52	30
	1.25	0.63	25
	1.55	0.78	20
	2.07	1.04	15
	3.11	1.57	10
	6.22	3.13	5

Tabla 6: Valores calculados de COV para la Etapa 3.0

Etapas 3.0	30.05 g/L de DQO	14.6 g/L de SSV = 15 g/L de SSV	
	C.O.V. ( g/L)	C.O.V. ( g/L)	TRH (días)
	1.0	0.49	30
	1.2	0.58	25
	1.5	0.73	20
	2.0	0.97	15
	3.0	1.46	10
	6.0	2.91	5

Las zonas sombreadas indican las COV medidas como DQO, los SSV medidos en g/L y los tiempos de retención utilizados, que servirán de base para conformar las tablas de funciones de transición y de salidas del sistema que se encuentran presentadas posteriormente y que en su momento se explica como fueron elaboradas.

Para efecto del análisis teórico del sistema, se tomo en consideración un tiempo de retención mínimo de 5 días. Sin embargo hay que recordar, que para éste tiempo, una buena parte de la biomasa presente dentro del sistema puede perderse por el efecto de lavado en la alimentación, y aunque alguna cantidad de ella permanezca dentro, no es factible que lleve a cabo la degradación del sustrato.

Como puede observarse para las etapas dos y tres del experimento (tablas 4 y 5), la cantidad de SSV o Kg de DQO casi son las mismas. Por lo que para efectos de la elaboración de ambas tablas (transición y de salida), se tomo un solo valor 15 g/L como el promedio de ambas.

**b) Ente:** es el digestor anaerobio cerrado, en cuyo interior se lleva a cabo el proceso de transformación del lodo por medio de los microorganismos, básicamente bacterias facultativas anaerobias. En éste proceso, como se mencionó anteriormente, se degrada la materia orgánica con producción de biogás. Dicho proceso se detalla en el anexo 2, inciso 1.6.

### c) Estados del sistema:

Para poder determinar los estados del sistema, fue necesario estudiar y conocer exactamente el funcionamiento interno del digester anaerobio, desde el diseño mismo, las formas de operación y alimentación, las condiciones y cálculos de las cargas y sobre todo comprender en que consistía y de que dependían las condiciones de funcionamiento interno. ( anexo 2 inciso 1.6: microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia).

Como se mencionó en la sección 3.1.1., al inicio del experimento se efectuó la carga del digester con 30 litros de lodo crudo procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Fue necesario dejar aclimatar el digester durante algunos días para que el proceso de digestión comenzara a llevarse a cabo y se produjera biogás. Por lo que es importante remarcar, que el estado inicial al que se hace referencia en éste análisis corresponde al momento en que empieza a producir biogás el sistema.

Tomando en cuenta lo anterior, los estados del sistema, definido con la letra (Q) están representados por 3 condiciones:

- 1.- Concentración de sólidos, medidos en gramos por litro (g/L). ( $\mu$ )
- 2.- Porcentaje de llenado del digester ( 0 a 100 %).( $\eta$ )
- 3.- Porcentaje de biomasa anaerobia presente (0 hasta 100%).( $\theta$ )

Quedando representado el estado de la forma:

$$Q = (\mu, \eta, \theta)$$

Respetando las limitaciones que impone el comportamiento real del sistema, lo importante fue tratar de seleccionar cuales eran la secuencia de estados en las que al tener una entrada de lodo, se pudiera obtener un buen % de remoción y una alta producción de biogás.

Para determinar esto se hicieron algunas consideraciones tomando en cuenta las condiciones en que mejor opera un digester anaerobio, las condiciones de operación



del digestor y los valores obtenidos en las variables de respuestas de la parte experimental:

### 1.- Carga orgánica volumétrica:

Por referencias bibliográficas, se tiene conocimiento que éste tipo de sistema utilizado para la digestión de lodos, soporta cargas de 1.6 a 6.4 de SSV  $\text{m}^3$  /día (Notas del curso "Tratamiento de lodos residuales", 1999).

Por experimentos y pruebas anteriormente efectuadas en el laboratorio, se encontró que los mejores resultados que se habían obtenido para la remoción y producción de gas fueron utilizando cargas orgánicas volumétricas de 1.0 a 3.0 Kg de DQO/  $\text{m}^3$  /día, y que en términos de SSV representa de 0.7 a 1.5  $\text{m}^3$  /día g/L

### 2.- Llenado del digestor.

El llenado de éste puede ser variado. Puede ser a un 100% de su capacidad, lo cuál no es recomendable, pues dificultaría su funcionamiento ya que en el momento en que empiece a generarse biogás habría problemas con la presión interna del sistema, por lo que es necesario dejar un espacio libre para su acumulación. En cambio si es llenado a menor capacidad, se estaría desperdiciando espacio que pudiera ser utilizado para la degradación de un mayor volumen de lodo.

Por lo anterior, se considera que un 80 % de llenado es bueno, ya que no tan sólo se toma en cuenta el espacio necesario para la producción de gas sino que también se pone la mayor cantidad de lodo que puede ser digerido por las bacterias. Los 30 litros de lodo equivalen a un volumen de 80% en el digestor, cantidad que se mantiene constante en el interior del sistema a lo largo de todo el estudio.

### 3.- Biomasa anaerobia presente.

Es un factor primordial para el sistema de tratamiento. Este fue un factor difícil de cuantificar, ya que la manifestación de la presencia de las bacterias es la producción



de biogás. Sin embargo de acuerdo a la forma de operación que tienen los reactores, tomando en cuenta la C.O.V. y el TRH, se buscó la forma de representar de manera cualitativa la cantidad de las bacterias anaerobias presentes en el sistema que fueran capaces de degradar la materia orgánica.

Para efectos prácticos se definió en términos de porcentaje, en una escala de 0 a 4 en donde se indica que:

0: no hay bacterias anaerobias

1: 25 %

2: 50%

3: 75%

4: 100% de biomasa anaerobia

Tomando en cuenta estas características solamente se tomaron en cuenta a aquellos estados con los que se contaba con suficiente información y que cumplieran con las condiciones especificadas anteriormente. Por lo que los estado del sistema quedaron representados como sigue (tabla 7):

Tabla 7: Estados del sistema de digestión de lodos

Estados del Sistema	Representación
Q <sub>0</sub>	(0,0,0)
Q <sub>1</sub>	(13,30,0)
Q <sub>2</sub>	(13,30,1)
Q <sub>3</sub>	(13,30,2)
Q <sub>4</sub>	(13,30,3)
Q <sub>5</sub>	(13,30,4)
Q <sub>6</sub>	(15,30,1)
Q <sub>7</sub>	(15,30,2)
Q <sub>8</sub>	(15, 30,3)
Q <sub>9</sub>	(15,30,4)
Q <sub>10</sub>	(19,30,1)
Q <sub>11</sub>	(19,30,2)
Q <sub>12</sub>	(19,30,3)
Q <sub>13</sub>	(19,30,4)

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Tabla 8 : Funciones de transición de estado

Estado	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>9</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>12</sub>	Q <sub>13</sub>
	(0,0,0)	(13,30,0)	(13,30,1)	(13,30,2)	(13,30,3)	(13,30,4)	(15,30,1)	(15,30,2)	(15,30,3)	(15,30,4)	(19,30,1)	(19,30,2)	(19,30,3)	(19,30,4)
Entrada (g/L, COV)														
I <sub>1</sub> (13,30)	Q <sub>1</sub> (13,30,0)													
I <sub>2</sub> (13,4)	Q <sub>2</sub> (13,30,1)	Q <sub>2</sub> (13,30,1)	Q <sub>2</sub> (13,30,2)	Q <sub>2</sub> (13,30,3)	Q <sub>2</sub> (13,30,4)	Q <sub>2</sub> (13,30,1)	Q <sub>2</sub> (13,30,2)	Q <sub>2</sub> (13,30,3)	Q <sub>2</sub> (13,30,4)	Q <sub>2</sub> (13,30,2)	Q <sub>2</sub> (13,30,3)	Q <sub>2</sub> (13,30,4)	Q <sub>2</sub> (13,30,1)	Q <sub>2</sub> (13,30,2)
I <sub>3</sub> (13,2)	Q <sub>3</sub> (13,30,2)	Q <sub>3</sub> (13,30,2)	Q <sub>3</sub> (13,30,3)	Q <sub>3</sub> (13,30,4)	Q <sub>3</sub> (13,30,1)	Q <sub>3</sub> (13,30,2)	Q <sub>3</sub> (13,30,3)	Q <sub>3</sub> (13,30,4)	Q <sub>3</sub> (13,30,2)	Q <sub>3</sub> (13,30,3)	Q <sub>3</sub> (13,30,4)	Q <sub>3</sub> (13,30,1)	Q <sub>3</sub> (13,30,2)	Q <sub>3</sub> (13,30,3)
I <sub>4</sub> (13,1,4)	Q <sub>4</sub> (13,30,3)	Q <sub>4</sub> (13,30,3)	Q <sub>4</sub> (13,30,4)	Q <sub>4</sub> (13,30,1)	Q <sub>4</sub> (13,30,2)	Q <sub>4</sub> (13,30,3)	Q <sub>4</sub> (13,30,4)	Q <sub>4</sub> (13,30,1)	Q <sub>4</sub> (13,30,2)	Q <sub>4</sub> (13,30,3)	Q <sub>4</sub> (13,30,4)	Q <sub>4</sub> (13,30,1)	Q <sub>4</sub> (13,30,2)	Q <sub>4</sub> (13,30,3)
I <sub>5</sub> (13, 1,0)	Q <sub>5</sub> (13,30,4)	Q <sub>5</sub> (13,30,4)	Q <sub>5</sub> (13,30,1)	Q <sub>5</sub> (13,30,2)	Q <sub>5</sub> (13,30,3)	Q <sub>5</sub> (13,30,4)	Q <sub>5</sub> (13,30,1)	Q <sub>5</sub> (13,30,2)	Q <sub>5</sub> (13,30,3)	Q <sub>5</sub> (13,30,4)	Q <sub>5</sub> (13,30,1)	Q <sub>5</sub> (13,30,2)	Q <sub>5</sub> (13,30,3)	Q <sub>5</sub> (13,30,4)
I <sub>6</sub> (15, 6)	Q <sub>6</sub> (15,30,1)	Q <sub>6</sub> (15,30,1)	Q <sub>6</sub> (15,30,2)	Q <sub>6</sub> (15,30,3)	Q <sub>6</sub> (15,30,4)	Q <sub>6</sub> (15,30,1)	Q <sub>6</sub> (15,30,2)	Q <sub>6</sub> (15,30,3)	Q <sub>6</sub> (15,30,4)	Q <sub>6</sub> (15,30,2)	Q <sub>6</sub> (15,30,3)	Q <sub>6</sub> (15,30,4)	Q <sub>6</sub> (15,30,1)	Q <sub>6</sub> (15,30,2)
I <sub>7</sub> (15, 3)	Q <sub>7</sub> (15,30,2)	Q <sub>7</sub> (15,30,2)	Q <sub>7</sub> (15,30,3)	Q <sub>7</sub> (15,30,4)	Q <sub>7</sub> (15,30,1)	Q <sub>7</sub> (15,30,2)	Q <sub>7</sub> (15,30,3)	Q <sub>7</sub> (15,30,4)	Q <sub>7</sub> (15,30,2)	Q <sub>7</sub> (15,30,3)	Q <sub>7</sub> (15,30,4)	Q <sub>7</sub> (15,30,1)	Q <sub>7</sub> (15,30,2)	Q <sub>7</sub> (15,30,3)
I <sub>8</sub> (15, 2)	Q <sub>8</sub> (15,30,3)	Q <sub>8</sub> (15,30,3)	Q <sub>8</sub> (15,30,4)	Q <sub>8</sub> (15,30,1)	Q <sub>8</sub> (15,30,2)	Q <sub>8</sub> (15,30,3)	Q <sub>8</sub> (15,30,4)	Q <sub>8</sub> (15,30,1)	Q <sub>8</sub> (15,30,2)	Q <sub>8</sub> (15,30,3)	Q <sub>8</sub> (15,30,4)	Q <sub>8</sub> (15,30,1)	Q <sub>8</sub> (15,30,2)	Q <sub>8</sub> (15,30,3)
I <sub>9</sub> (15,1,5)	Q <sub>9</sub> (15,30,4)	Q <sub>9</sub> (15,30,4)	Q <sub>9</sub> (15,30,1)	Q <sub>9</sub> (15,30,2)	Q <sub>9</sub> (15,30,3)	Q <sub>9</sub> (15,30,4)	Q <sub>9</sub> (15,30,1)	Q <sub>9</sub> (15,30,2)	Q <sub>9</sub> (15,30,3)	Q <sub>9</sub> (15,30,4)	Q <sub>9</sub> (15,30,1)	Q <sub>9</sub> (15,30,2)	Q <sub>9</sub> (15,30,3)	Q <sub>9</sub> (15,30,4)
I <sub>10</sub> (19,7)	Q <sub>10</sub> (19,30,1)	Q <sub>10</sub> (19,30,1)	Q <sub>10</sub> (19,30,2)	Q <sub>10</sub> (19,30,3)	Q <sub>10</sub> (19,30,4)	Q <sub>10</sub> (19,30,1)	Q <sub>10</sub> (19,30,2)	Q <sub>10</sub> (19,30,3)	Q <sub>10</sub> (19,30,4)	Q <sub>10</sub> (19,30,2)	Q <sub>10</sub> (19,30,3)	Q <sub>10</sub> (19,30,4)	Q <sub>10</sub> (19,30,1)	Q <sub>10</sub> (19,30,2)
I <sub>11</sub> (19, 3,5)	Q <sub>11</sub> (19,30,2)	Q <sub>11</sub> (19,30,2)	Q <sub>11</sub> (19,30,3)	Q <sub>11</sub> (19,30,4)	Q <sub>11</sub> (19,30,1)	Q <sub>11</sub> (19,30,2)	Q <sub>11</sub> (19,30,3)	Q <sub>11</sub> (19,30,4)	Q <sub>11</sub> (19,30,2)	Q <sub>11</sub> (19,30,3)	Q <sub>11</sub> (19,30,4)	Q <sub>11</sub> (19,30,1)	Q <sub>11</sub> (19,30,2)	Q <sub>11</sub> (19,30,3)
I <sub>12</sub> (19, 2,3)	Q <sub>12</sub> (19,30,3)	Q <sub>12</sub> (19,30,3)	Q <sub>12</sub> (19,30,4)	Q <sub>12</sub> (19,30,1)	Q <sub>12</sub> (19,30,2)	Q <sub>12</sub> (19,30,3)	Q <sub>12</sub> (19,30,4)	Q <sub>12</sub> (19,30,1)	Q <sub>12</sub> (19,30,2)	Q <sub>12</sub> (19,30,3)	Q <sub>12</sub> (19,30,4)	Q <sub>12</sub> (19,30,1)	Q <sub>12</sub> (19,30,2)	Q <sub>12</sub> (19,30,3)
I <sub>13</sub> (19, 1,8)	Q <sub>13</sub> (19,30,4)	Q <sub>13</sub> (19,30,4)	Q <sub>13</sub> (19,30,1)	Q <sub>13</sub> (19,30,2)	Q <sub>13</sub> (19,30,3)	Q <sub>13</sub> (19,30,4)	Q <sub>13</sub> (19,30,1)	Q <sub>13</sub> (19,30,2)	Q <sub>13</sub> (19,30,3)	Q <sub>13</sub> (19,30,4)	Q <sub>13</sub> (19,30,1)	Q <sub>13</sub> (19,30,2)	Q <sub>13</sub> (19,30,3)	Q <sub>13</sub> (19,30,4)

Donde  $Q_i$  son los estados del sistemas. El primer número se refiere a la cantidad de SSV en g/L; 30 es el volumen de lodo que se encuentra en el interior del sistema y el último número representa la escala referente a la biomasa presente dentro del sistema.

Una vez definidas cuáles son las entradas y estados del sistema, ahora es necesario establecer las funciones de transición y de salida del sistema.

#### **d) Funciones de transición de estado:**

Éstas se refieren al cambio que existe de un estado a otro, al tener una entrada al sistema.

Tenemos una entrada al sistema definida como INPUT (I) al estado  $Q_a$ , que origina un cambio de estado ( $Q_b$ )

$$F: I \times Q_a \rightarrow Q_b$$

Para poder establecer las funciones de transición de estados, fue necesario tener en cuenta:

- 1.- las condiciones del estado( $Q_a$ ) antes de la entrada, que son las condiciones de operación prevalecientes en ese momento.
- 2.-Las condiciones de la entrada "X"
- 3.- Tratar de definir a que estado pasaba ( $Q_b$ ) al tener una entrada " X".

Bajo estas condiciones fue elaborada la tabla 8: Funciones de transición, donde se observa en la parte superior las letras Q con un subíndice que indican los diferentes estados del sistema y del lado izquierdo las entradas que se especificaron anteriormente.

Para poder comprender el contenido de esta tabla y la forma en que es utilizada, es necesario poner varios ejemplos:

1.- En la parte superior izquierda encontramos el estado  $Q_0$  (0,0,0), definido como aquel estado del sistema en donde aún no se encuentra en funcionamiento el digestor y que se lee: 0 cantidad de SSV, 0 volumen de lodo y 0 biomasa presente.

2.- En la entrada,  $I_1$  (13,30) que se lee: 13.0 g/L de SSV, volumen de 30 L; es la primera entrada al sistema, que corresponde al llenado del digestor (con 30 litros de lodo) que contiene 13 g/L de SSV. Es la única ocasión en que se presenta esta entrada, ya que es la que marca el llenado de lodo del digestor a una concentración de 13 g/L.

En este momento, el sistema pasa del estado  $Q_0$  al estado  $Q_1$  (13,30,0).

3.- Al tener una entrada  $I_2$  (13, 4) al estado  $Q_1$ , este cambia al estado  $Q_2$  (13,30.1) que indica que el sistema conserva la misma cantidad de lodo (30 L), la concentración de 13 g/L de SSV es la misma, pero existe un incremento en la biomasa presente en el sistema de 0 al 25 %.

La columna que muestra el estado  $Q_1$  (13,30,0) y que contiene diferentes entradas, no representa ningún problema, ya que no existe aún ninguna cantidad de biomasa dentro del digestor y los cambios de estado que se presenten estarán de acuerdo a las entradas que tenga el sistema.

En cambio, a partir de  $Q_2$ , es necesario hacer ciertas consideraciones, ya que hay que tomar en cuenta que no solamente existe en el interior del sistema cierta cantidad de biomasa (%), sino que también hay una concentración diferente de materia orgánica, y que dependiendo de las condiciones de entradas, estas influirán o no para que produzca un cambio o se mantenga el estado presente.

A este respecto, se presentaron varias situaciones:

4.- Para la entrada  $I_2$  (13,4) a  $Q_2$  (13,30.1), por ejemplo, no existirá un cambio de estado se mantiene en  $Q_2$  (13,30.1), por el hecho de que:

- la entrada tiene la misma concentración que la ya existente, 13 g/L de SSV
- se mantienen los 30 litros al ser alimentado el digestor
- existe 25 % de biomasa en el interior del sistema (nivel 1), que al ser alimentado con una COV de 4.0 Kg ,( el TRH corresponde a 5 días), por lo tanto la cantidad de microorganismos presentes están en un 25 % también (nivel 1).

Por lo tanto, el estado se mantiene.

5.- En la entrada  $I_4(13, 1.4)$  a  $Q_2$ , cambiará a un estado  $Q_4(13,30,3)$ , en donde se mantiene la cantidad de sólidos pero la cantidad de biomasa presente esta modificada (75%, nivel 3) , por el hecho de que la COV esta calculada para 20 días, período en el cuál habrá un incremento considerado de biomasa por el hecho de que se encuentre la materia orgánica más tiempo en el digestor y por lo tanto, las bacterias tendrán mayor oportunidad en degradarla.

Para los estados que presentan un mayor % de biomasa en el digestor, antes de ser alimentados y que en el momento de tener una entrada con una COV calculada para 5 o 10 días, la biomasa presente no se mantendrá en su totalidad pero servirá de inóculo por lo que no se requerirá más tiempo para su formación., y aunque gran parte de la biomasa se eliminará por tener cargas calculadas para 5 o 10 días, cuando menos un poco de ella permanecerá en el sistema.

Es por ello que los cambios de estados que se presenten bajo estas condiciones, no estarán totalmente en función de la entrada, sino también de la biomasa existente inicialmente.

6.- Un último ejemplo. La entrada:  $I_7(15, 3)$  al estado  $Q_9(15,30,4)$ , pasará al estado  $Q_8(15,30,3)$ , en lugar al  $Q_7(15,30,2)$  por el hecho de que en el estado 9 existe un 100% de bacterias presentes en el sistema, que sirven de inóculo para esta entrada de materia orgánica.

Bajo estas consideraciones fue diseñada la tabla 8, que nos indica que existen diferentes estados en el sistema y que el cambio o el mantenimiento de ellos

estarán determinados por el estado en que se encuentre el sistema y por las condiciones de entrada.

Una vez obtenidas las funciones de transición (los cambios de un estado a otro), se establecen las salidas del sistema.

**e) Salida de sistema:** es el % de remoción de sólidos efectuado dentro del sistema que se obtiene por diferencia entre la entrada y salida multiplicado por 100; así como la producción de biogás que se genera durante el proceso de digestión, medido en L/día.

Esto queda definido de la siguiente manera:

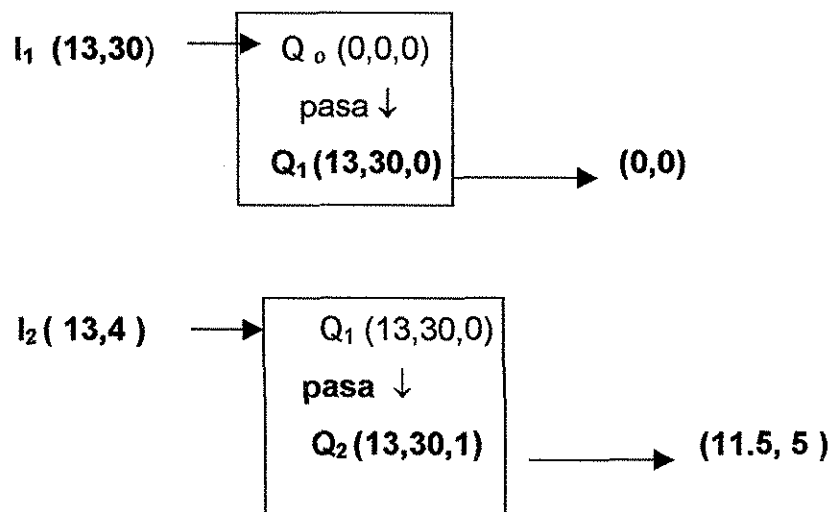
$$\phi_o ( \% , v ) = ( \beta_1 , \beta_2 , )$$

Donde  $\beta_1 =$  porcentaje de remoción

$\beta_2 =$  es el volumen generado de biogás.

Tomando en cuenta todo lo anterior la función de salida queda representada por:

$$\text{Output}_n = G (I_i, Q_i) = ( \% \text{ de remoción, volumen de biogás producido} )$$



Por lo tanto, la función de salida estará representada por:

$$\text{Output}_1 = G_1(I_1, Q_1) = (\% \text{ de remoción, volumen de biogás producido})$$

$$O_1 = G_1[(13,30), (13,30,0)] = (0.0)$$

$$\text{Output}_2 = G_2(I_2, Q_2) = (\% \text{ de remoción, volumen de biogás producido})$$

$$O_2 = G_2[(13, 4), (13,30,1)] = (11.5,5)$$

De la misma manera que para los estados de transición, la elaboración de la tabla que muestra las funciones de salida del sistema, esta basada en:

e.1) los valores promedios de las entradas y salidas de las variables de respuesta de SST, SSV, DQO y biogás obtenidos experimentalmente (tabla 9 ).

Tabla 9: Valores promedios de las observaciones en laboratorio de las entradas y salidas de lodo

PARÁMETRO	Etapa1.1(n =10)	Etapa1.2 (n =21)	Etapa 2.0(n =12)	Etapa 3 (n =20)
	Crudo/Digerido	Crudo/digerido	Crudo/Digerido	Crudo/Digerido
SST (mg/L)	17090-8870	24560 - 13260	22150-16810	22260-16420
SSV (mg/L)	12812 - 6250	18530 -7230	15650 -11520	14570-10960
DQO (mg/L)	19816 - 8874	34511 - 15097	31136 -25426	30054-23551
Biogás (L/d)	7.8 - --	9.03 - 70.35 %	15.48 -- 63.29	17.20 – 73.54

e.2) De los datos obtenidos en la tabla anterior se obtuvo la cantidad removida de materia orgánica, medida de diferentes formas y la cantidad de biogás producido (tabla 10).

Tabla 10: Cantidad de materia orgánica removida y gas producido

PARÁMETRO	Etapa 1.1	Etapa 1.2	Etapa 2.0	Etapa 3
	Remoción	Remoción	Remoción	Remoción
SST (mg/L)	8220	11300	5340	5840
SSV (mg/L)	6562	11300	4130	3610
DQO (mg/L)	10942	19414	5710	6503
Biogás (L/d)	7.8 - --	9.03 - 70.35 %	15.48 -- 63.29	17.20 – 73.54

Finalmente la tabla 11, muestra los valores considerados para la elaboración de la tabla 11 (funciones de salida del sistema), expresados en % de remoción de materia orgánica y producción de biogás (litros/día).

Tabla 11: % de remoción promedio y producción de biogás.

Etapa	TRH (días)	Remoción (%)	Producción de biogás (L/día)
1.1	20	45.9	8.2
1.2	20	55.0	8.78
2.0	15	22.0	16.6
3.0	10	21.3	17.5

e.3) Los valores máximos y mínimos obtenidos en la remoción y producción de biogás fueron (tabla 12):

Tabla 12 Valores máximos y mínimos de remoción y producción de biogás.

Etapa	Remoción Máximo		Remoción Mínimo		Producción de biogás Máximo		Producción de biogás. Mínimo	
	%	g/L	%	g/L	L/día	%	L/día	%
1.1	61	12	26.6	7	15	49	2.7	52
1.2	80	5.33	19.4	16	16	19.4	2.7	52
2.0	51.5	24	9.5	21	24	51.5	12.9	14
3.0	56	15.9	0.4	19.9	24	4.5	13	22

e.4) Las salidas del sistema que están en función de las entradas al sistema y del nivel de biomasa que se encuentre en el estado previo.

Para poder identificar el grado de influencia de la biomasa presente en los estados, y conocer cómo influye en las salidas del sistema se elaboró la tabla 13. Primeramente fue necesario establecer si influía o no la biomasa presente.



En caso afirmativo se establecieron 3 niveles de influencia: poco (P); regular (R), mucho (M). Esto fue de acuerdo al % de biomasa presentes.

Tabla 13. Grado de influencia de la Biomasa presente con respecto a las entradas.

Nivel de biomasa → Entrada ↓	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)	4 (100%)
<b><math>I_2 (13,4)</math></b>	No	SI (P)	SI (R)	SI (m)
<b><math>I_3 (13,2)</math></b>	No	No	SI (P)	SI (P)
<b><math>I_4 (13,1.4)</math></b>	No	No	No	SI (P)
<b><math>I_5 (13, 1.0)</math></b>	No	No	No	SI (P)
<b><math>I_6 (15, 6)</math></b>	No	SI (P)	SI (R)	SI (m)
<b><math>I_7 (15, 3)</math></b>	No	No	SI (P)	SI (P)
<b><math>I_8 (15, 2)</math></b>	No	No	No	SI (P)
<b><math>I_9 (15, 1.5)</math></b>	No	No	No	SI (P)
<b><math>I_{10} (19,7)</math></b>	No	SI (P)	SI (R)	SI (m)
<b><math>I_{11} (19, 3.5)</math></b>	No	No	SI (P)	SI (P)
<b><math>I_{12} (19, 2.3)</math></b>	No	No	No	SI (P)
<b><math>I_{13} (19, 1.8)</math></b>	No	No	No	SI (P)

Una vez elaborada la tabla anterior, podemos determinar de forma cualitativa las salidas y como se ven influenciadas de acuerdo a la cantidad de SSV que entran al sistema y el nivel de biomasa presente del estado anterior.

La cantidad de biomasa presente en el digestor es difícil de precisar. Se tiene el conocimiento por la producción de biogás, que dentro del sistema ya se encuentran la población de bacterias que hacen posible la transformación de la materia orgánica, sin embargo no es posible cuantificarlas.

Tomando en cuenta esto, los datos obtenidos experimentalmente, los valores máximos y mínimos de remoción y producción de biogás, es posible hacer las siguientes suposiciones:

Al pasar del estado (Qa) que contiene una menor concentración de SSV al estado Qb que tiene ya sea igual o mayor concentración de sólidos, las bacterias presentes (con niveles 2 y 3) inmediatamente aprovecharán la materia orgánica recién ingresada al sistema. Por lo que la producción de biogás y remoción de materia orgánica será ligeramente mayor, cuando se tengan entradas al sistema de COV calculadas con los TRH de 10 y hasta 15 días.

Al igual que para los estados de transición, se hace la suposición de que para 5 días se mantendrá o estará ligeramente superior el nivel de biomasa presente. Y que esta influirá favorablemente en la salida.

e.5) Influencia de la biomasa. ¿De que manera influye la biomasa presente ya en el digestor en las diferentes etapas?

Para ello fue necesario elaborar otra tabla (tabla 14) en la que se viera el cambio de biomasa de una etapa a otra, ya que los datos obtenidos experimentalmente fueron obtenidos a diferentes TRH y la concentración de SSV es diferente para cada etapa.

Tabla 14: Influencia de la biomasa presente al pasar de un estado de mayor concentración a uno de menor concentración.

a ↓ b →	13 g/L	15 g/L	19 g/L
13 g/L	=biomasa = %remoción, = producción de biogás	$\Delta$ Biomasa $\therefore$ > remoción > producción de biogás	$\Delta$ Biomasa $\therefore$ >> remoción >>producción de biogás
15 g/L	$\nabla$ biomasa $\therefore$ < remoción < producción de biogás	=biomasa $\therefore$ = %remoción, = producción de biogás	$\Delta$ Biomasa $\therefore$ > remoción > producción de biogás
19 g/L	$\nabla$ biomasa $\therefore$ << remoción << producción de biogás	$\nabla$ biomasa $\therefore$ >> remoción >> producción de biogás	=biomasa $\therefore$ = %remoción, = producción de biogás

(Concentración de SSV en g/L)

Una vez determinado el grado de influencia en la biomasa presente al cambiar de un estado con diferentes concentraciones de SSV se elaboró finamente la tabla de salidas del sistemas (tabla 15), considerando todos los anteriores supuestos y los valores obtenidos experimentalmente.

### 3.3.2. Análisis estadístico de los valores obtenidos en el laboratorio.

Los datos del modelo del blanco, en sus diferentes etapas, corresponden al promedio de las mediciones de las variables de respuesta obtenidas por duplica, durante el experimento.

Tabla 15 : Funciones de salida

Estado	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>9</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>12</sub>	Q <sub>13</sub>
	(0,0,0)	(13,30,0)	(13,30,1)	(13,30,2)	(13,30,3)	(13,30,4)	(15,30,1)	(15,30,2)	(15,30,3)	(15,30,4)	(19,30,1)	(19,30,2)	(19,30,3)	(19,30,4)
Entrada (g/L;COV)														
I <sub>2</sub> (13,4)		(11,5, 2)	(11,5, 2)	(12, 3)	(12, 3)	(13, 3,6)	(11,5, 2)	(12, 3)	(12, 3)	(12, 3,5)	(11,5, 2)	(12, 3)	(12, 3)	(12, 3)
I <sub>3</sub> (13,2)		(23, 4)	(23, 4)	(23,4)	(28, 4,5)	(28, 5)	(23,4)	(25, 5)	(25, 5)	(25, 5,5)	(23,4)	(26, 5)	(27, 5,5)	(27, 5,5)
I <sub>4</sub> (13,1,4)		(34,5, 6)	(34,5, 6)	(34,5, 6)	(34,5, 6)	(40, 7)	(34,5, 6)	(34,5, 6,5)	(36, 6,5)	(36, 7)	(34,5,6)	(35, 6,5)	(36, 6,5)	(37, 7)
I <sub>5</sub> (13, 1,0)	(6,5,50,8)	(46, 8)	(46, 8)	(46, 8)	(46, 8)	(50, 10)	(46,8)	(46,8)	(46,8)	(47, 10)	(46,8)	(46,8)	(46,8)	(48, 10)
I <sub>6</sub> (15, 6)		(13,5, 3)	(13,5, 3)	(15, 4)	(15, 4)	(16, 4,5)	(13,5, 3)	(15, 4)	(15, 4)	(18,5)	(13,5, 3)	(14, 3,5)	(14, 3,5)	(14, 4,0)
I <sub>7</sub> (15, 3)	(13,13,16)	(27, 6)	(27, 6)	(27, 6)	(28, 7)	(28, 7)	(27, 6)	(27, 6)	(28, 7)	(32, 8)	(27, 6)	(28, 7)	(28, 7)	(28, 7,5)
I <sub>8</sub> (15, 2)		(40, 9)	(40, 9)	(40, 9)	(40, 9)	(42, 11)	(40, 9)	(40, 9)	(40, 10)	(42, 11)	(40, 9)	(40, 9,5)	(40, 9,5)	(40, 10)
I <sub>9</sub> (15, 1,5)		(54, 12)	(54, 12)	(54, 12)	(54, 12)	(56, 13)	(54, 12)	(54, 12)	(54, 13)	(54, 14)	(54, 12)	(54, 12)	(54, 12)	(56, 13)
I <sub>10</sub> (19,7)		(15,4)	(15,4)	(16, 5)	(16, 5)	(17, 5,5)	(15,4)	(16, 5)	(16, 5)	(18, 5,5)	(15,4)	(18, 5)	(20, 5)	(20, 5,5)
I <sub>11</sub> (19, 3,5)		(30,8)	(30,8)	(30,8)	(32,9)	(32,9)	(30,8)	(30,8)	(32,9)	(35, 9)	(30,8)	(30,8)	(32,9)	(32,10)
I <sub>12</sub> (19, 2,3)		(45,12)	(45,12)	(45,12)	(45, 13)	(48, 14)	(45,12)	(45,12)	(45,12)	(48, 13)	(45,12)	(45,12)	(45,13)	(48,14)
I <sub>13</sub> (19, 1,8)	(6,88,6)	(60,16)	(60,16)	(60,16)	(60,16)	(62,17)	(60,16)	(60,16)	(60,16)	(62,18)	(60,16)	(60,16)	(60,16)	(62,19)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- a) Se graficaron los valores que representan las entradas (SSV influente) y las variables de salida del sistema (SSV medido y metano medido).
- b) Una vez graficados los puntos, se efectuó un análisis de los datos iniciales en cada una de las etapas.
- c) Se eliminaron aquellos puntos muy bajos o muy altos que estadísticamente salían del conjunto de datos obtenidos y que no eran representativos de la población analizada (datos aberrantes). Para ello se aplicaron las pruebas de valores aberrantes: (prueba de Grubbs y Dixon). (Notas curso "Validación de métodos analíticos").

Ésta consideración se hizo debido a los posibles errores de medición y que en un momento dado, éstos datos aberrante pudieran influir de manera significativa en la obtención de los coeficientes de las ecuaciones que mejor puedan representar el sistema.

- d) Se efectuó el análisis de las gráficas con los datos iniciales, en cada una de las etapas.

### 3.3.3. Modelación matemática del sistema.

La modelación de un sistema real es el proceso de elaborar diversos sistemas matemáticos equivalentes entre sí dado que todos pretenden modelar el mismo sistema real bajo diferentes puntos de vista, a efecto de profundizar en el conocimiento del sistema real y tener diversas maneras de elaborar la información de que se dispone (Carrera, notas de curso 2001).

Es sumamente importante enfatizar que lo desarrollado en las secciones anteriores ya ha dado como resultado un sistema matemático discreto, o sea el quinteto (I,O,Q;

f, g) donde los conjuntos I, O y Q han sido perfectamente descritos y las funciones f y g están dadas por las tablas 8 y 15.

La pregunta ahora es: ¿ Es factible dar una formulación general en forma de un modelo matemático continuo? O sea, hay que determinar algunos de los otros modelos matemáticos posibles del proceso de digestión anaerobia.

Esto puede darse en dos direcciones principales estadística y determinista. En la primera se plantean modelos basados en la probabilidad y estadística; en la segunda se efectúan interpolaciones de los datos sin usar la estadística. Dado que en la actualidad existen eficientes paquetes computacionales para análisis estadístico, se optó por dejar esa parte para investigaciones futuras y se pasó a una generación de funciones con los métodos clásicos básicos. En primer lugar se procedió a analizar las posibilidades de modelar linealmente y por medio de la ecuación general de segundo orden.

#### a) Relación del tipo lineal

Tanto el análisis detallado de los datos iniciales, como de los aspectos biológicos que intervienen en el sistema ( anexo 3), así como la preocupación de encontrar la expresión más sencilla del sistema, han conducido a formular como primera hipótesis de trabajo una relación lineal entrada – salida del tipo:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1X_1 + b_1 \\ Y_2 &= a_2X_1 + b_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $y_1$  representa la materia orgánica modificada (mm) ;  $y_2$  la producción de biogás (gm),  $X_1$  la cantidad de materia orgánica inicial,  $a_1, b_1, a_2, b_2$ , son los parámetros que relacionan las entradas y salidas.

Las consideraciones que llevan a proponer un sistema del tipo (1), están desarrolladas al inicio de éste capítulo, y de manera esquemática son:

1.- Parámetros como la temperatura, pH, la frecuencia de muestreo, la frecuencia de extracción y suministro de material, etcétera. se mantienen constantes en promedio, a lo largo de todo el proceso. Es por ello que se decidió tomar como factor de entrada la cantidad de materia orgánica que se suministra en el sistema, medida como SSV g/L.

2.- Se pudo establecer una fuerte proporcionalidad entre el suministro de la materia orgánica y la materia orgánica de la salida o modificada y la producción de biogás.

Para obtener la ecuación de la línea recta que representara el sistema en estudio, se utilizaron dos métodos: el proporcionado por el paquete Excel y el método poligonal de primer orden (anexo3)

Debido a que cada etapa trabajo bajo diferentes cargas, se trato de buscar la función matemática que representara más adecuadamente dentro de las premisas, a cada una de ellas.

b) Modelo polinomial de segundo orden.

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1x_1^2 + b_1x_1 + c_1 \\ Y_2 &= a_2x_1^2 + b_2x_1 + c_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Con respecto a los modelos de este tipo, se utilizaron dos métodos:

El proporcionado por el paquete Excel y el método poligonal de segundo grado.

El trabajo experimental y de medición se realizó haciendo las siguientes consideraciones teóricas:

- El sustento teórico fundamental esta dado por la teoría de sistemas.
- De acuerdo a lo anterior se ha supuesto que se pueden encontrar otras formulaciones matemática del funcionamiento de los digestores considerados.

- Como una primera instancia de análisis y representación se supondrá que el sistema tiene un comportamiento lineal continuo en la relación entrada-salida.
- Como una segunda instancia de análisis y representación, se supondrá que el sistema se comporta de acuerdo a una función cuadrática.

Al utilizar las herramientas proporcionadas por el paquete Excel se obtuvieron directamente las ecuaciones matemáticas de primer y segundo orden (anexo 3).

Con respecto al modelo poligonal el procedimiento fue el siguiente:

Para las curvas de primer grado, se obtuvieron las ecuaciones de las rectas por cada par de punto. Una vez obtenidos los valores de las pendientes y ordenadas de cada recta (a, b), tanto para la curva de SSV como para la de producción de biogás y se obtuvo un valor promedio de los coeficiente obtenidos.

Con las ecuaciones que representan a cada una de las curvas SSV y producción de biogás), se substituyó el valor de  $X$ , que en este caso se refiere al valor de la concentración de SSV de la entrada (g/L) y se calculan los valores tanto de SSV como de biogás. (referidos en las tablas del Anexo 3, modelos polinomiales de primero orden, valores calculados)

Posteriormente se comparan estos valores calculados con respecto a los valores obtenidos experimentalmente y se obtiene un porcentaje de error.

Para las curvas de segundo grado, se realizó el mismo procedimiento, sólo que en lugar de obtener solo dos coeficiente en este caso se obtuvieron tres: a, b, c. Se obtuvieron las ecuaciones de segundo orden para los SSV y biogás y se substituyeron los valores de  $X$ , para obtener los valores calculados en ambas curvas.(Anexo 3, modelos polinomiales de segundo orden)





## **Capítulo 4. Resultados obtenidos después de haber aplicado una metodología de análisis al estudio de caso.**

### 4.1. Resultados del análisis del proceso de digestión anaerobia como sistema. (global).

Para el análisis se utilizaron las tablas de función de transición de estado y de salida (8 y 15) que se elaboraron en el capítulo anterior, que relacionan las entradas, los estados y la función de salidas.

La tabla 15 muestra en las entradas, que conforme va aumentando la cantidad de materia orgánica (medida como SSV) y disminuye la COV, tanto la degradación de la materia orgánica como la producción de biogás alcanzan niveles altos.

Entre mayor sea la cantidad de materia orgánica que ingrese al sistema, y mayor la cantidad de biomasa presente en el interior del sistema, la degradación de ella será superior y se tendrá de la misma manera una cantidad superior de biogás producido, claro todo esto bajo los límites de capacidad del biodigestor, pudiéndose comprobar que las salidas del sistema dependen del estado anterior en que se encuentre éste.

Las condiciones anteriores se cumplen cuando se incrementa la cantidad de SSV de 13 a 19 g/L de SSV, con un TRH de 20 días (etapa 1.1 a la etapa 1.2), en el cual el incremento en la remoción fue de un 13.14 % y que va directamente proporcional a la producción de biogás que también se ve incrementada en un 6.95%.

Si extrapolamos los resultados obtenidos para 15 g/L para 20 días, un incremento paulatino en la cantidad de sólidos en la entrada, de 13 a 15 g/L, bajo las mismas condiciones de operación y aprovechando que ya se encuentra un 100 % biomasa presente (nivel 4), se esperaría que con esta carga de 15 g/L de SSV (30 g/L de DQO), habría una remoción de un 45% como mínimo que fue la obtenida cuando se utilizaron 13 g/l y una producción de biogás de 10 y 12 L aproximadamente, a un TRH de 20 días.

Para un TRH de 15 días, es de esperarse que estos valores desciendan a un 35 – 40 % de remoción con una producción de biogás de 10 L, aproximadamente, al considerar que la biomasa existente, ya no es la misma puesto que ésta se vería disminuida al cambiar la COV, calculada a un tiempo de 15 días.

Sin embargo, al efectuarse los cambios de alimentación de 19 a 15 g/L, los datos obtenidos experimentalmente son diferentes a los supuestos efectuados.

Vemos que el % de remoción es inferior al esperado (23%) y que la cantidad de biogás producido aumenta a 16 L, por lo que el incremento en éste fue del 88.72%. Al cambiar las condiciones de alimentación, la COV varió de 2.0 a 3.0 (TRH de 15 a 10 días), disminuyendo aún más el % de remoción como era de esperarse (15.82%), más sin embargo no así el biogás producido que este se vio incrementado en un 5.73%.

Fue posible detectar lo anterior al hacer uso de las tablas 8 y 15 (funciones de transición y salida, respectivamente, bajo estas nuevas condiciones de operación, en donde se efectuó el cambio de alimentación.

Comparando el estado presente en el sistema y su correspondiente salida, del estado  $Q_5$  que nos encontrábamos inicialmente podría pasar al estado  $Q_3$  (13,30,3) ó  $Q_4$ (13,30,4), cuyos valores de salida para un TRH de 10 días (25, 5).

Pero al comparar estos valores teóricos con los valores experimentales, la remoción es inferior y la producción de biogás es superior al valor esperado.

Este hecho podría explicarse partiendo de que parte de la materia orgánica que se encuentra en el interior del digestor proveniente de la etapa anterior, y que se encuentra lo suficientemente degradada como para que, al pasar a la etapa 2 sea asimilado por las bacterias productoras de metano que estuviera presente en el digestor. Si esta fuera la razón del incremento, la producción de biogás iría decayendo paulatinamente hasta que nuevamente el sistema se estabilizara, ya que la producción de biogás esta directamente relacionada con la remoción de

materia orgánica, como puede observarse en las gráficas de las etapas 1.1 y 1.2. (anexo 4).

Otra explicación que pudiera dársele a tal incremento sería que parte de la material que ingresa al sistema tiene tal composición que pueda ser asimilado directamente por las bacterias metanogénicas, sin necesidad de que ésta pase por un proceso de degradación.

Al observar estos resultados de salida, que no correspondían a las condiciones estándar del funcionamiento, ya que a mayor remoción de materia orgánica se obtiene mayor producción de biogás y viceversa, se realizó una búsqueda bibliográfica que explicara este comportamiento.

En la bibliografía consultada se hace referencia a que el 50% de la materia orgánica de los lodos que provienen de aguas municipales esta formada por lípidos, y quizá esta sea la causa de la producción de biogás, donde un grupo de microorganismo degradan directamente los lípidos para formar metano, directamente incrementándose la cantidad.

Nota: Todas las gráficas a las cuáles se hará mención de aquí en adelante, se encuentran contenidas en el anexo 4.

Al observar las gráficas de remoción contra producción de biogás en cada una de las etapas (gráficas 2,4,6,8), existen "ciclos" entre las curvas de SSV (influyente y efluente) comparados con la curva de producción de biogás; en donde a mayor degradación de materia orgánica, mayor producción de biogás. Sin embargo también se observa que existe un mecanismo limitante de degradación, de ahí que solamente exista cierto rango de remoción, más sin embargo al observar un incremento en la concentración de materia orgánica en las entradas, la respuesta del sistema es inmediata ya que se incrementa la remoción de la misma. Esto hace pensar que los microorganismos, aunque se vieran un poco disminuido por las nuevas condiciones de operación aún persisten y ahora se encuentran adaptados a ciertas condiciones de alimentación en donde la concentración de materia orgánica es asimilada

solamente hasta cierta cantidad que pueden remover y que al verse ésta modificada (al incrementarse), la capacidad de respuesta por parte de los microorganismos es inmediatamente ya que se ve reflejada en el incremento en la remoción de ella. Esto puede verse en la gráfica 4 (etapa 1.2), lo que permite conocer parte del funcionamiento interno del sistema, y su capacidad para trabajar en diferentes condiciones.

#### 4.2. Resultados del análisis de los datos en cada una de las etapas

Como se menciona en el anexo 2, durante el proceso de digestión anaerobia se observan claramente tres fases o etapas:

Fase uno. Una vez alimentado el sistema, las bacterias hidrolíticas y fermentativas empiezan su actividad con la degradación de la materia orgánica (etapa de hidrólisis y fermentación), pero aún no ha llegado el momento en que se produce el biogás.

De esta fase no se tomaron datos experimentales, ya que el punto de interés de éste trabajo parte de la siguiente etapa.

Etapa dos. Continúa la degradación de la materia aunada con la producción de ácidos grasos volátiles y de biogás. Ambos grupos de bacterias se encuentran al mismo tiempo, dentro de un rango de producción (etapa de hidrólisis, fermentación y metanogénica).

Y una tercera fase en donde sigue habiendo esa degradación de materia orgánica pero se ve disminuida en proporción de acuerdo al estado anterior, ya que hay un aumento notorio en la producción de biogás.

Esto es explicable y concuerda con lo publicado por Hanaka y Noike en 1985 en su artículo, ya que las dos primeras etapas, conocidas como etapas constantes (fase de DBO) en donde el lodo de tratamiento en estado sólido es licuado, y en la tercera etapa (reducción de DBO o COD en el proceso completo) en donde la materia

orgánica soluble ha sido gasificada y que posteriormente se menciona en cada una de las etapas.

#### 4.2.1.Resultados

Etapa 1.1:

Temperatura = 28 °C

TRH = 20 días

COV = 1.0 kg de DQO m<sub>3</sub>/día

Una vez obtenidas las condiciones de operación iniciales y que hubiera producción de biogás, comenzó la etapa 1.1.

El reactor fue alimentado diariamente y estuvo funcionando bajo las condiciones señaladas por un período de un mes y se obtienen 10 muestras para ser analizadas. Este periodo fue de corta duración ya que una vez estabilizado el sistema, se procedió a pasar a la etapa 1.2 para incrementar la cantidad de SSV del influente.

En la gráfica 1 se observa las curvas que representan los valores obtenidos directamente en el laboratorio de los SSV del influente (entrada) y del efluente(salida) y la cantidad de biogás producido (efluente).

En lo sucesivo en las gráficas y en las tablas, se utiliza la siguiente connotación para poder distinguir las curvas que representan los valores de salida del sistema (efluente); que son los parámetros de control: materia modificada ( $y$ ) o (mm) y biogás ( $y_1$ ) ó (gm).; de las curvas de los valores calculados u obtenidos al aplicar la ecuación matemática: valores calculadas ó ( $y'$ ) y ( $y_1'$ ).

Como se verá en casi todas las gráficas los valores del efluente o salida medidos en cada etapa, existe una proporcionalidad entre la curva original de SSV de la entrada del sistema (influyente) con respecto a la curva de salida.

En la gráfica 1, al comparar la curva de influente con la del efluente, la cantidad de sólidos variaron entre 9.68 y 14.71 g/L teniendo un valor promedio de 12.18 g/L indicando con esto que las entradas al sistema son medibles pero no son totalmente controlables sus variaciones. Al hacer esta comparación entre ambas curvas, las

dos presentan el mismo comportamiento, esto es, la variación que se observa en los sólidos en la entrada es la misma que presenta la curva de SSV del efluente (amplitud de la curva). Este hecho se confirma al observarse los % de remoción en cada par de punto analizados, ya que ésta son entre 40 y 60%. Dicha variación es provocada por la diferencia en la concentración de sólidos en los lodos de la entrada, misma que se confirma con los coeficientes obtenidos de las ecuaciones lineales, en ésta etapa.

El hecho de que exista ésta variación se debe a que el lodo (producto del tratamiento del agua residual ) está en relación directa con la calidad del agua residual a tratar en la planta y el modo de operación de ésta, y que a su vez depende de la materia orgánica que contenga el agua que llegue a la planta.

Durante la parte experimental, se puso especial cuidado en la calidad del lodo que serviría de alimentación a los digestores con el objeto de mantener las condiciones de operación y alimentación constantes.

Lo anterior indica que existe una relación directa entre la concentración de materia orgánica que entra al digestor con respecto a las salidas del mismo, que fueron medidas como materia orgánica removida y producción de biogás.

Entre mayor degradación de la materia orgánica, habrá una mayor producción de biogás. En esta misma gráfica (1), es posible notar perfectamente que existe ciclos de remoción- producción de biogás; mismos que se observan en las otras etapas.

Esto se confirma ,con lo mencionado anteriormente referente al proceso de digestión, que corresponde a las etapas 2 (fermentación) y 3 (metanogénesis), y es posible observarlas en todas las gráficas. Existe una relación directa entre el proceso de degradación de los sólidos y la producción de biogás. Durante el período de hidrólisis y fermentación, la materia orgánica es degradada logrando obtener bajos valores de salida en el efluente( la remoción es mayor), produciéndose biogás a cierta velocidad; llega un momento en que los sólidos ya fragmentados se encuentran en

tal cantidad que ya no hay remoción (se observa un rango en la remoción obtenida (limita la cantidad de materia orgánica fragmentada) y es entonces en este punto donde las partículas ya degradadas son utilizados en su mayor parte por el grupo de bacterias metanogénicas (etapa 3 ) para la producción de biogás . Es por eso que se observan los valores máximos y mínimos de las curvas de biogás del efluente y SSV efluente. (gráfica 2).

#### 4.2.2. Etapa 1.2

Temperatura = 28 °C

TRH = 20 días

COV = 1.72 kg de DQO m<sup>3</sup>/día

Se alimenta el reactor diariamente, el número de muestras analizadas es de 21. Del análisis estadístico efectuado al conjunto de datos, se encuentra que tres de ellos son aberrantes, los cuales fueron descartados.

Al incrementarse la cantidad de materia orgánica que entran al sistema, se observa un incremento en la remoción de materia orgánica de la misma forma que la producción de biogás.

El número de datos analizados fueron mayores, lo que permitió obtener mayor conocimiento del sistema al graficar las curvas de salida de los parámetros de control. Como en la etapa 1.1, se observan los ciclos existiendo variaciones en la proporcionalidad. En esta segunda etapa al tener el mismo tiempo de retención (20 días) que la etapa anterior, el sistema ya se encontró más estabilizado.

Como puede observarse en la gráfica 3, tanto la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás dentro del sistema fue más constante, aún cuando la materia orgánica se vio incrementada se siguen observando los ciclos dentro de un rango para los SSV y producción de biogás.

En la gráfica 4, es posible observar que en esta etapa, se alcanzan niveles de remoción de materia orgánica muy altos que van de 31.4 al 80 %, como se muestra



en la gráfica en su parte final, y es claramente observable la relación directa entre remoción y producción de biogás.

#### 4.2.3. Etapa 2.0

Temperatura = 28 °C

TRH = 15 días

COV = 1.9 kg de DQO m<sub>3</sub>/día.

Se mantienen las mismas condiciones de alimentación que en etapas anteriores. Se obtienen 14 muestras para ser analizadas. De los datos originales, se eliminaron 4 que resultaron aberrantes después de aplicarles la prueba de Druggs y Dixon.

La gráfica 5 muestra el comportamiento de cada una de las curvas del sistema. Al comparar las curvas de SSV, tanto del influente como del efluente, se observa que tienen un comportamiento muy similar, ya que hay una disminución progresiva en ambas curvas con respecto a los SSV. No existe de forma tan evidente esta proporción en las etapas anteriores.

Al analizar los datos obtenidos de SSV, estos varían de 8.4 a 15.00 g/L. Sin embargo el TRH ha disminuido a 15 días, por lo que la cantidad de biomasa presente también le ocurre lo mismo reflejando con esto una disminución en la remoción, como puede verse en la gráfica 6.

Con respecto al biogás obtenido, los valores oscilan entre 12.86 a 24.00 L/día, que si los comparamos con los valores de la etapa anterior son superiores, como puede verse en esta misma gráfica.

#### 4.2.4. Etapa 3:

Temperatura = 28 °C

TRH = 10 días

COV = 3.0 kg de DQO m<sub>3</sub>/día

Se sigue el mismo procedimiento en la forma de alimentación. Se obtienen 19 muestras para ser analizadas.

En esta tercera etapa, las condiciones del sistema son diferentes. La cantidad de materia orgánica utilizada, referida como SSV es casi la misma que en la etapa anterior, sin embargo hay reducción en el TRH a 10 días y esto modifica la cantidad de biomasa existente reduciendo su cantidad en el interior.

En la gráfica 7, se puede observar que dentro de las primeras seis muestras analizadas la cantidad de biogás va aumentando paulatinamente, y posteriormente se presentan los valores máximos (picos) no tan evidentes como en las etapas anteriores. En la misma gráfica se observa que la cantidad de SSV del efluente se mantiene dentro de cierto rango durante el experimento y que la producción de biogás se mantiene también en cierto rango. Los primeros valores de la gráfica van disminuyendo y posteriormente se mantiene en cierto rango. Sin embargo es notable, nuevamente la capacidad de respuesta del sistema, cuando al haber un incremento en la materia orgánica ( dato 11, gráfica 7), la remoción se incrementa también (gráfica 8)

En la gráfica 8 se observa claramente como va disminuyendo la remoción, cuyo valor promedio es del 22 % alcanzando valores muy bajo, incluso de 1 % y sin embargo el biogás producido se mantiene.

Haciendo una revisión global del funcionamiento del digestor, en sus diferentes etapas de operación y al comparar los resultados que muestran las gráficas entre cada una de ellas, se observa que el sistema se comporta de forma similar en las diferentes etapas, sólo que hay que tomar en cuenta que los ciclos son más largos o más cortos dependiendo de la frecuencia y amplitud de ellos y que esto va en relación directa con las entradas que se tienen al sistema así como el volumen de la COV.

#### 4.3. Formulaciones matemáticas continuas del sistema.

Para tratar de obtener la ecuación que represente el sistema, se realizaron varias aproximaciones.

- a) Para línea recta se ocupó la herramienta proporcionada por el paquete Excel, a través de la regresión lineal.
- b) Modelo poligonal de primer orden para posibles interpolaciones, y ver si es mejor aplicar un modelo no lineal.
- c) Del modelo poligonal anterior, se obtuvieron los valores promedios para de ahí obtener otra aproximación lineal (2ª. Aproximación).
- d) Un primer modelo no lineal, polinomial cuadrático estadístico, nuevamente utilizando la herramienta proporcionada por Excel.
- e) Un segundo modelo no lineal polinomial cuadrático.

Los resultados obtenidos de ellos se encuentran contenidos en el anexo 3 de éste trabajo.

##### 4.3.1. Relación del tipo lineal.

Ecuaciones obtenidas para cada una de las etapas.

###### Etapa 1.1.

Los valores de los coeficientes de  $a$ ,  $b$  que relacionan las entradas y salidas del sistema, tanto para SSV como para la producción de biogás son similares, al compararse ambos métodos. Las ecuaciones obtenidas son similares (anexo 3) cuyas gráficas 9 y 11; 10 y 12 se encuentran en el anexo 4.

###### Etapa 1.2

En esta etapa los valores de los coeficientes  $a$ ,  $b$ , respectivamente, obtenidos con el paquete Excel son:

0.1, 5.31 para SSV      -.022, 12.8 para biogás.

Con el modelo polinomial de primer orden se obtienen valores superiores:

0.87, -4.35 para SSV ;      -1.54, 29.37 para biogás.

Los coeficientes calculados por ambos métodos son muy diferentes, y sin embargo los coeficientes de correlación para ambas curvas son iguales. Esto muestra la diferencia entre los dos métodos utilizados, ya que por el método poligonal se tiene un coeficiente cercano a 1 (tabla 18) , lo que indica cierta proporcionalidad entre las entrada y las salida del sistema. Esto se confirma al observar las gráficas 15 y 16, en donde las curva obtenidas por el método poligonal representan de mejor manera al sistema en esta etapa.

## Etapa 2.0

De la misma manera que en la etapa anterior, los coeficientes a, b calculados por ambos métodos son diferentes (tabla 19). El modelo polinomial proporciona una mejor aproximación del sistema en esta etapa, cuyos coeficientes para a y b son:

Para SSV:    0.9, -1.28                      y para biogás 1.9, -13.91.

Las gráficas 19 y 20 muestra esto.

## Etapa 3.0

Cómo se ha hecho referencia en los apartados anteriores, por el hecho de operar el sistema con un TRH de 10 días, la frecuencia de los ciclos aumenta pero la amplitud de los mismos disminuye. Por lo que tratar de representar este tipo de comportamiento es difícil.

La ecuación proporcionada por la herramienta del paquete Excel para SSV fue mejor que la obtenida por el método de la poligonal de primer orden. Los coeficientes

obtenidos son : 1.45 (a), 4.75 (b) , como puede compararse en las gráficas 21. En cambio para la producción de biogás, es diferente. La mejor aproximación se obtiene con el método de la poligonal cuyo coeficiente para a y b son -0.5 y 24.91 (tabla 20, gráfica 24).

En resumen:

El procedimiento más elemental es el de promediar los valores de los coeficientes  $a_1, b_1, a_2, b_2$  , y obtenemos  $\bar{a}_1, \bar{b}_1, \bar{a}_2, \bar{b}_2$ , para cada una de las etapas (tabla 16, anexo 4), que son los valores promedios de los coeficientes  $a_1, b_1, a_2, b_2$  .

Ésta tabla, muestra el promedio de los coeficientes obtenidos por el método de la poligonal de 1er.orden para el conjunto de datos observados en las diferentes etapas.

Las tablas 17, 18, 19 y 20 , muestra los resultados obtenidos en cada una de las etapas, bajo los dos métodos mencionados y cómo puede observarse, al compararse ambas ecuaciones en cada una de ellas, al ser menor el número de datos a analizar (tabla 17 etapa 1.1), los ecuaciones son muy similares, no así en las siguientes etapas en donde el número de datos fue mayor.

Con éstos valores obtenemos para los datos que conocemos las siguientes predicciones que se comparan en la misma tabla con los valores medidos: etapas 1.1 ; 1.2 ; 2.0 y 3.0 (tablas 22, 23, 24 y 25 respectivamente).

También se observa que el método más exacto es el de la poligonal por pares de puntos, ya que se obtiene la ecuación de la recta por cada tramo de la curva (por pares), logrando con esto obtener una mejor representación del sistema.

#### 4.3.2 Modelo polinomial de segundo orden.

Las ecuaciones obtenidas para cada una de las etapas se encuentran en el anexo 3.

## Etapa 1.1.

Las ecuaciones obtenidas con el modelo poligonal de segundo orden, tanto para SSV y producción de biogás son las que se aproximan más a las curvas originales . Este hecho se confirma al observar las gráfica(29 y 30) y la tabla 32, que muestra los porcentajes de error. Para SSV, la curva tiene una muy buena aproximación, con un % de error del 17 %; y para la producción de biogás , 64.9% de error, que es inferior al obtenido con Excel.

## Etapa 1.2

Al analizar las curvas obtenidas con ambas herramientas, se observa que la única curva que tiene una ligera aproximación con la original es la de SSV, obtenida con el paquete Excel (41.53%).

La curva de biogás obtenida con Excel (51.43%), tiende a disminuir la amplitud de los ciclos y se asemeja a la curva del influente. Esto se debe básicamente a que la curva original de biogás presenta varios ciclos, cuya amplitud es considerable (valores máximos de 40 y mínimos de 5).

Con respecto a las ecuaciones obtenidas con el modelo poligonal, ambas presentan ciclos de amplitud considerable. Ambas curvas tienden a semejar a las curvas del influente (gráficas 35 y 36), sin embargo los % de error son altos: para SSV 118.66 y para biogás 324.01 % respectivamente (tabla 33).

## Etapa 2.0

Al observar las gráficas de las ecuaciones obtenidas por el modelo poligonal tanto para SSV como para biogás ( gráficas 41 y 42), estas muestran una semejanza con las curvas originales. Los % de error para cada una de ellas son 14.92 y 25.36 % respectivamente. (tabla 34). Sin embargo si observamos el % de error obtenido para la curva de biogás proporcionada por Excel, vemos que éste es de 15.61, sin embargo la gráfica 40, muestra que la curva tiende a ser lineal .

### Etapa 3.0

En esta etapa, debido a la frecuencia de ciclos que se presentan en las curvas originales, la representación matemática obtenida tiende a la linealidad.

Para SSV, ambos métodos proporcionan curvas muy parecidas (gráficas 45 y 47), sin embargo la que tiene menor % de error, cuya diferencia no es tan significativa es la del modelo poligonal con 14.33% (tabla 35).

Con respecto a la curva de biogás, la que más se aproxima a la curva original es la curva proporcionada por Excel, con 18.78% (gráfica 46).

En resumen:

La tabla 26 (anexo 3) se encuentran los promedios de los coeficientes de las ecuaciones del modelo cuadrático. Las tablas 27,28,29 y 30 muestran las ecuaciones de segundo orden para las etapas 1.1,1.2,2.0 y 3.0 respectivamente, tanto por el paquete Excel como con el método de la poligonal de segundo orden.

La tabla 31 muestra las desviaciones estándar de los coeficientes del modelo de segundo orden. Las cuáles en  $a^2$  son bajos y en cambio para  $C$  son extremadamente altos.

Los resultados de las predicciones efectuadas con estas ecuaciones se encuentran en las tablas 32,33, 34 y 35 que corresponden respectivamente a las etapas mencionadas anteriormente.

Al igual que en el análisis del modelo lineal, se tomo en consideración aquellas ecuaciones que tuvieran el menor % de error y la forma de la curva al observar su gráficas (anexo 4) que corresponde a: etapa 1.1 de la gráfica 25 a la 30; etapa 1.2 de la gráfica 31 a la 36; etapa 2.0 de la 37 a la 42 y de la 43 a la 48 etapa 3.

4.4. Análisis de los resultados para obtener la ecuación que represente el sistema en sus diferentes etapas.

Las consideraciones anteriores permiten ubicar la capacidad de predicción del modelo planteado. Bajo este marco es necesario decir que se tomaron en cuenta dos situaciones para determinar qué modelo es el que mejor representa el sistema original:

- a) La predicción del modelo, que se aproxime a nuestro sistema real, teniendo un valor máximo del 20 % de error .
- b) Y la forma que tiene la curva obtenida, que al graficarse sea lo más semejante al sistema original. (Anexo 4, gráficas 9 a la 12 para la etapa 1.1 ; de la 13 a la 16 etapa 1.2; de la 17 a la 20 para la etapa 2.0 y de la 21 a la 24 etapa 3).

Cabe aclarar, que se obtuvieron ecuaciones con bajos porcentajes de error, como son en algunos casos los proporcionados por el paquete Excel, sin embargo al observar las gráficas se alejan del sistema original. En cambio, con el modelo poligonal se obtienen unas muy buenas aproximaciones a la curva original, más sin embargo los % error son más altos. El problema radica en que el análisis de error es aún muy elemental. En futuras investigaciones se deben utilizar métricas más sofisticadas.

Se revisaron los cálculos obtenidos de las predicciones para el mejor modelo que ajustara el sistema, y se obtuvieron los % de error.

En la siguiente tabla, después de haber hecho el análisis de las ecuaciones obtenidas en cada una de las etapas, se obtuvo la mejor en cada uno de los modelos, tanto lineal como cuadrático. La tabla 38 muestra los resultados obtenidos de ello.



Tabla 38: Resumen de las características de las ecuaciones lineales y cuadráticas del modelo en cada una de las etapas.

E t a p a	Modelo lineal				Modelo Cuadrático		
	Método	Ecuación obtenida	% de error	Valores de coeficientes a, b	Método	% de error	Valores de coeficientes a, b, c
1.1	Polig.*	$Y = \% \text{ Remoc.}$	13	0.20, 4.3	Polig.	17.31	0.12; -2.87; 23.64
	Polig.	$Y_1 = \text{biogás}$	51.74	1.41; -10.02	Polig.*	64.91	0.56; -11.94; 69.46
1.2	Polig.	$Y = \% \text{ Remoc.}$	67.77	0.86; -4.36	Excel*	41.53	-0.01; 0.41; 4.74
	Polig.	$Y_1 = \text{biogás prod.}$	168.34	-1.54; 29.37	Excel*	51.43	-0.02; -0.69; 13.41
2.0	Polig.	$Y = \% \text{ Remoc.}$	18.29	0.9; -1.28	Polig.*	14.92	-0.48; 14.90, -101.44
	Polig.	$Y_1 = \text{biogás prod.}$	26.19	1.9; -13.91	Polig.*	25.36	-0.83; 26.68; -195.68
3.0	Excel*	$Y = \% \text{ Remoc.}$	12.33	0.45; 4.75	Polig.	14.33	0.044; -1.16; 18.87
	Polig.*	$Y_1 = \text{biogás prod.}$	12.61	-0.5; 24.91	Excel	18.78	-0.06; 1.06; 13.5

\* bajo % de error.

Después de comparar nuevamente las gráficas en cada una de las etapas y de acuerdo a cada modelo obtenido, se eligió aquella ecuación que:

- 1) Mejor representara al sistema en esa etapa de acuerdo a los datos originales.
- 2) Aquella que tuviera el menor % de error.

Los resultados de la tabla anterior, son los datos comparativos con respecto a los modelos poligonales de primer y segundo orden. Los % de error son muy cercanos entre ambas ecuaciones en cada una de las etapas. Sin embargo al notar esta similitud, nuevamente se revisaron las gráficas y se encontró que en la mayoría de los casos, las ecuaciones obtenidas con el método de la poligonal fueron las mejores.

Con el análisis efectuado a las curvas obtenidas, en algunos casos, algunas de ellas resultaron ser similares a las curvas originales, pero la amplitud entre una y otra curva es extremadamente grande, obteniéndose con esto altos valores de % de error.

Finalmente las ecuaciones que representan al sistema en cada una de las etapas fueron (tabla 39):

Tabla 39: Ecuaciones que mejor representan las etapas del sistema

Etapa		Ecuación que mejora representa el sistema en cada etapa
1.1	Y = Remoción de materia orgánica	$y = 0.20 X + 4.3$ (Gráfica 11)
	Y <sub>1</sub> = biogás producido	$y_1 = 0.56 X^2 - 11.94 X + 69.46$ (Gráfica 30)
1.2	Y = Remoción de materia orgánica	$Y = -0.011 X^2 + 0.41 X + 4.73$ Gráfica 33
	Y <sub>1</sub> = biogás producido	$y_1 = 0.015 X^2 - 0.69 X + 13.41$ Gráfica 34
2.0	Y = Remoción de materia orgánica Y = Remoción	$y = -0.483 X^2 + 14.895 X - 101.436$ Gráfica 41
	Y <sub>1</sub> = biogás producido	$y_1 = -0.829 X^2 + 26.677 X - 195.68$ Gráfica 42
3.0	Y = Remoción de materia	$y = 0.45 X + 4.75$ Gráfica 21
	Y <sub>1</sub> = biogás producido	$y_1 = -0.5026 X + 24.91$ Gráfica 24

#### 4.4.1. Aspectos estadísticos de las ecuaciones obtenidas.

Como se puede apreciar en la tabla 36 y 37, los valores de los coeficientes  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ , en cada etapa no quedan unívocamente determinados por toda la serie de factores que podemos clasificar bajo el rubro de no determinísticos y aleatorios. Es por ello que se incluyo las siguientes consideraciones de orden estadístico.

Al mismo tiempo al comparar los coeficientes obtenidos por cada uno de los métodos utilizados, se vio que el método que reporto una mejor aproximación al sistema original es el de la poligonal .

Se tiene la desviación estándar de los datos en las diferentes etapas, y de cada unos de los coeficientes  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  (tabla 21);  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  (tabla 29). Esta es similar en el conjunto de datos para cada etapa, siendo superior la de la etapa 1.2.

Esto indica que los datos y cálculos son bastante buenos desde el punto de vista estadístico, por lo que un tratamiento bastante sencillo debe permitir encontrar valores de los coeficientes  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  que proporcionen salidas teóricas con una buena aproximación.

Los coeficientes de correlación entre los grupos de datos correspondientes al modelo poligonal lineal entre "X" con respecto a "Y" y "Y<sub>1</sub>" son:

Etapa	Coef.correl. (mm)	Coef.Correl. (gm)
1.1	0.38	0.69
1.2	0.51	-0.47
2.0	0.11	0.45
3.0	0.51	-0.20

Lo que indica que las entradas son medibles pero no del todo controlables, por la variación en la materia orgánica.

#### 4.5. Modelos mixtos lineales y de segundo orden.

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1x_1 + b_1 \\ Y_2 &= a_2x_1^2 + b_2x_1 + c_2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1x_1^2 + b_1x_1 + c_1 \\ Y_2 &= a_2x_1 + b_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Como puede verse, al comparar las ecuaciones de la tabla 36, se observa que para la etapa 1.1, existe un modelo mixto, en donde la curva de SSV es lineal y para la producción de biogás es de segundo orden

Se realizaron intentos con modelos de mayor orden, pero la sencillez de este sistema no los justifica, por lo que no se muestran en este trabajo. Sin embargo, se utilizó el paquete Excel para buscar alguna medida de tendencia que mejor representara al sistema en estudio. Y se realizaron ensayos hasta ecuaciones de 6° orden, para cada una de las etapas. Se encontró que para ecuaciones de 3 incógnitas o más, era necesario buscar algún paquete que resolviera y obtuviera los coeficientes referentes a la ecuación referida, ya que los resultados a éste respecto así como las gráficas obtenidas en ningún momento garantizaba que fuera la mejor representación, por lo que ya no se presentaron en este trabajo.



## **Capítulo 5.0 Beneficios del tratamiento y Evaluación económica del sistema en estudio.**

### **Introducción**

Este capítulo hace mención a diferentes consideraciones que son de importancia para realizar una evaluación económica. Se muestra un panorama general de los costos que representa la contaminación en diferentes medios, la repercusión que tiene el problema desde el punto de vista social, los beneficios del tratamiento, la posible utilización de los subproductos del tratamiento y se ha tratado de obtener un costo aproximado del sistema en estudio.

### **5.1 Antecedentes**

Como una de las actividades de importancia que se incluyen dentro de la planeación, es la evaluación económica de un proyecto, cuyo propósito fundamental es informar a quienes toman las decisiones, respecto a que tan rentable o no puede serlo. En este tipo de evaluaciones, la más utilizada es el análisis costo-beneficio, que consiste en hacer una comparación de lo que cuesta realizar un proyecto y cuál es el beneficio que se obtendría al realizarlo, y esto normalmente se expresa en términos monetarios.

Al ser los lodos un subproducto del tratamiento del agua residual, el costo del tratamiento del lodo esta incluido en el costo del tratamiento del agua, por lo que no se encuentran datos específicos que identifiquen cuál es su costo. No así para el tratamiento del agua, en donde se generan proyectos y se realizan análisis costo-beneficio sobre los trenes de tratamiento mas adecuados para ella.

Para conocer de manera aproximadas el costo de tratamiento de los lodos, se toman en cuenta ciertas proporciones que se encuentran referidas en la bibliografía. Se sabe que de los costos totales de construcción de una planta de

tratamiento, el 50% corresponde a la parte de tratamiento de lodos y que 1/3 del costo del m<sup>3</sup> agua tratada está referida a ellos.

Haciendo uso de esta información y dada la importancia que tiene la parte económica en cualquier estudio, se ha tratado de hacer una estimación en la evaluación del sistema con respecto al tratamiento de lodos, utilizando una herramienta de cómputo utilizada para el diseño de plantas de tratamiento y que además reporta un costo aproximado para la ejecución de la obra (inciso 5.5 de este capítulo).

## 5.2 Panorama General de la contaminación.

La contaminación ha provocado y sigue provocando innumerables costos, gastos y problemas a la población, como se muestra en la tabla 40.

En ella se indican los costos asociados a la realización de actividades relacionadas con el control de la contaminación, expresados en costos totales anualizados, que incluyen los costos de operación, los intereses y la depreciación asociada con inversiones acumuladas para el control de la contaminación ( a una tasa de interés del 7%).

Al analizar la información contenida en ésta tabla, es posible apreciar que del costo total, el 42.34 % corresponde a actividades relacionadas con el agua, y que de ésta cantidad, el 91.5 % se destina a la actividad de tratarla. Éstas cifras resultan ser bastante significativas ya que muestran que se invierte grandes cantidades de dinero para tratar de recuperar éste vital líquido de los acuíferos contaminados.

Tabla 40: Costos Ambientales anualizados totales de acuerdo al medio, 1990  
(millones de dólares americanos de 1986).

<b>Medio</b>	<b>Costos</b>	<b>Aplicación mayor</b>
-Total de Aire y radiación Aire Radiación	28 029 27 588 441	Actividad para limpiar el aire Actividad para controlar la contaminación por Radón
- Total en agua Calidad del agua Agua para beber	42 410 38 823 3 587	Actividades para limpiar el agua Actividades para beber agua segura
- Total de suelos RCRA Fondo	26 547 24 842 1 704	Conservación de los recursos y actividades de remediación Actividades de responsabilidad, compensación y respuesta ambiental
- Total Químicos Substancias tóxicas Pesticidas	1 579 600 979	Actividades para el control de sustancias tóxicas Actividades federales rodenticidas, funguicidas e insecticidas
<b>Costos totales</b>	<b>100 167</b>	

Fuente: US EPA (1990) Environmental Investments: The cost of a clean Environment  
US EPA, Washington, D.C.

Los costos para el control de la contaminación en E.U. se han cuadruplicado entre 1972 a 1990, alcanzando un nivel de \$ 115 billones (\$115 mil millones) en 1990. Este vasto incremento en los gastos se refleja en el extenso crecimiento de las regulaciones ambientales federales. En 1975, el Código Federal de E.U. que regula el ambiente consistía en 2,763 páginas; para 1990, la misma sección del código contiene 11 087 paginas (Gilpin Alan, 2000).

Desde el punto de vista económico (Field, 1999) el análisis costo – beneficio, es la principal herramienta analítica que se utiliza para evaluar las decisiones ambientales y tanto los costos como los beneficios de una política se miden y se expresan en términos comparativos. Con frecuencia este análisis se aplica a políticas y programas que tienen como producto el mejoramiento en la calidad ambiental.



El estatus y el papel del análisis Costo-Benéfico en los recursos naturales públicos y en la toma de decisiones ambientales ha sido tema de continuas discusiones como también de conflictos políticos y administrativos. Esto se debe a la complejidad que representa éste tipo de acciones para ser evaluadas ya que se necesita una métrica única con la cuál se puedan interpretar todos los impactos de un proyecto o programa, con el fin de compararlos entre sí.

Al final, ciertos impactos ambientales no se podrán reducir a términos monetarios debido a que no es posible hallar una forma para medir cuánto valoran las personas estos impactos.

En este caso, los resultados monetarios del análisis Costo/Beneficio se deben complementar con los cálculos intangibles de esos impactos y recordar que entre mayor es el daño, mayor es el costo.

### 5.3 Aspectos Sociales

Al ser visto el problema de los lodos desde el punto de vista social es posible identificar las repercusiones que tiene estos subproductos al ser considerados una fuente de contaminación. Tratar de determinar en términos monetarios cuáles son sus costos son difíciles de valorar por el impacto que tienen estos lodos sobre el medio ambiente, como contaminan y cuales son los daños a la salud que pueden ocasionar. Esto último es de vital importancia, ya que la salud humana no tiene precio. Sí se tratara de valorarla en un momento dado puede hacerse de manera indirecta, como por ejemplo cuanto cuesta el tratamiento médico por una enfermedad gastrointestinal ( médico, medicinas, hospitales); cuanto se pierde en fuerza laboral al estar una persona enferma, por mencionar algunas de ellas.

Por tratarse de impactos a la sociedad y al medio ambiente, se convierten en problemas extremadamente complejos al tratar de evaluarlos, ya que al designarle un costo por contaminar y el beneficio de no hacerlo, depende de quien lo hace, a

quien impacta y cuanto se pierde, por lo que se convierte en un problema totalmente subjetivo.

En el anexo 2, se hace referencia, de manera general la forma en que impactan los lodos al medio ambiente y al hombre. Esta degradación ambiental surge a partir del comportamiento humano, directamente de la forma como se ha organizado el sistema económico dentro del cuál las personas se dan a la tarea de hacer sus vidas y cómo instituciones conducen a que las personas tomen decisiones que generan destrucción ambiental.

Las personas contaminan porque ésta es la forma más económica que poseen para resolver un problema práctico muy común. Este problema consiste en la eliminación de los productos de desecho que quedan después de que los consumidores han terminado de utilizar algo, o después de que las firmas comerciales acaban de producir bienes.

El aire y los recursos hídricos altamente contaminados son la vía principal para tener los mayores impactos contra la salud humana y los sistemas ecológicos. Cualquier sistema producirá impactos ambientales destructivos si los incentivos del sistema no están estructurados para evitarlos.

Se debe mirar de manera más profunda el interior de cualquier sistema económico para poder entender como funcionan estos sistemas de incentivos y cómo se pueden cambiar para obtener una economía razonablemente progresiva sin efectos colaterales de desastre ambiental.

Las empresas sienten el estímulo de aprovechar cualquier factor que este disponible con el fin de mejorar su productividad. La motivación principal para hacer esto es que tales recursos normalmente son gratis, y cuando se utilizan los insumos gratis, tanto como es posible, una empresa obviamente puede incrementar sus beneficios o lograr mejor sus objetivos de producción.

Esta situación es la que ha contribuido a generar los niveles excesivos de contaminación que hay en la actualidad. Por ello se han realizado varias reformas a la legislación de ordenamiento ecológico en el sentido de que: *“el que contamine pague por ello “ y que aquellas empresas o industria que están realizando actividades encaminadas a reducir el problema de la contaminación se verán favorecidos por incentivos fiscales.*

En el artículo 72 de la Ley Ambiental del D.F. se estipula que se promoverá el otorgamiento de estímulos fiscales, financieros y administrativos a quienes:

- 1.- Adquieran, instalen y operen las tecnologías, sistemas, equipos y materiales o realicen las acciones que acrediten prevenir o reducir las emisiones contaminantes establecidos por la normas oficiales mexicanas y las ambientales para el D.F., o prevenir y reducir consumo de agua o de energía o que incorporen sistemas de recuperación y reciclamiento de las aguas de desecho o que utilicen aguas tratadas o de reuso para sus funciones productiva, de conformidad con los programas que al efecto se establezcan.
- 2.- Realicen desarrollos tecnológicos y de ecotécnicas viables cuya aplicación demuestre prevenir o reducir las emisiones contaminantes, la producción de grandes cantidades de desechos sólidos municipales, el consumo de agua o consumo de energía, en los términos de los programas que al efecto se expidan.
- 3.- Integren organizaciones civiles con fines de desarrollo sustentable, que acrediten su personalidad jurídica ante la secretaria; y
4. - Lleven a cabo actividades que garanticen la conservación sustentable de los recursos naturales. (“Ley Ambiental del Distrito Federal” Gaceta Oficial del D.F. del 13 de enero de 2000.)

De los beneficios conocidos para el industrial, es el mismo precio del agua.  
De acuerdo al Código Financiero del D.F., en su artículo 197 (Enero 2002) indica que :

I.- Tratándose de agua potable:

a) de toma de válvula de tipo cuello de garza \$ 20.00 m<sup>3</sup>

b) cuando se surte de camiones cisternas para su comercialización, incluyendo transporte en el D.F. 53.70 m<sup>3</sup>

II.- Agua residual 1.20 m<sup>3</sup>

III.- Agua residual tratada a nivel secundario:

a) De tomas de válvulas tipo cuello de garza 12.00 m<sup>3</sup>

b) Cuando se surte en camiones cisterna para su comercialización incluyendo el transporte en el D.F. 32.22m<sup>3</sup>

IV.- Agua residual tratada a nivel terciario:

a) De tomas de válvulas tipo cuello de garza 14.00 m<sup>3</sup>

b) Cuando se surte en camiones cisterna para su comercialización, incluyendo el transporte en el D.F. 42.96 m<sup>3</sup>

De acuerdo a éstos precios, es fácil apreciar el ahorro substancial que tendría el industrial al hacer uso del agua residual tratada, cuyos costos se verían disminuidos en un 40 % aproximadamente al hacer uso de ella.

## 5.4. El sistema de tratamiento en estudio.

### 5.4.1. Beneficios del tratamiento anaerobio de lodos.

1.- El principal beneficio de tratar los lodos es disminuir la fuente de contaminación y así reducir los daños a la salud que pudieran provocar cuando son arrojados a las alcantarillas o que realizan una disposición de ellos sin haber sido tratados adecuadamente.

Al ser tratado el lodo, reduce el riesgo de transmisión de enfermedades pues en este proceso se destruyen casi todas las bacterias y protozoarios causantes de enfermedades gastrointestinales.

2.- La producción de biogás mediante digestión anaerobia de residuos permite obtener los siguientes beneficios:

a).- Proporciona combustible (biogás).

b)- Reduce la contaminación ambiental al convertir las excretas que contienen microorganismos patógenos, larvas, huevos, etc, en residuos útiles.

3- Produce abono orgánico con un contenido mineral similar al de las excretas secas pero de mejor calidad nutricional para las plantas y para el desarrollo del fitoplancton utilizados por algunos peces y crustáceos para su alimentación.

4.- El efluente del biodigestor es un abono orgánico de mayor calidad que la composta, puesto que la digestión anaerobia comparada con la descomposición de las excretas al aire libre, disminuye la pérdida de nitrógeno del 18 % al 1% y del carbono del 33% al 7%. Dentro del biodigestor no existen pérdidas apreciables para el fósforo, potasio y calcio contenidos en las excretas.

5.- Durante el proceso de biodigestión el efluente pierde todo el olor característico del estiércol que lo origina, puede ser utilizado en el mejoramiento de suelos arcillosos y arenosos que son pobres en humus, y como medio nutritivo de

hortalizas y frutales, o en fertilización de estanques para agricultura como estímulo a la producción del plancton.

#### 5.4.2. Limitantes de la Digestión Anaerobia.

La biodigestión como método de tratamiento biológico de los residuos tienen algunas limitaciones, tales como:

- 1.- Es necesaria una inversión inicial relativamente alta. Aproximadamente el 50% del costo de una planta de tratamiento está destinado al sistema de tratamiento de los lodos que se generan.
- 2.- Se requiere de una alimentación diaria del biodigestor en cantidades y concentraciones adecuadas de materia orgánica.
- 3.- El biodigestor necesita una supervisión y mantenimiento diario para mantener el proceso.
- 4.- Cuando la instalación es relativamente grande se requiere de un sistema de disposición final de los materiales digeridos.

El principal reto en la producción de biogás es desarrollar diseños de biodigestores económicos que puedan utilizarse masivamente, requiriendo materiales locales, con métodos constructivos adaptados a las condiciones locales y que no necesiten una supervisión continua para su correcta operación.

De lo anterior se desprende, que independientemente de cuál sea el valor calculado en términos monetarios de los beneficios y costos, los primeros siempre serán superiores a los costos al tratarse de la salud humana y al medio ambiental.

## 5.5. Evaluación Económica del Sistema.

Para obtener un costo aproximado sobre el tratamiento del lodo, fue necesario recurrir al costo del m<sup>3</sup> del agua residual ya tratada, para de ahí deducir un costo aproximado del lodo.

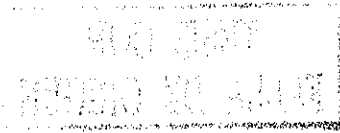
Como se mencionó al inicio de éste capítulo, para lograr lo anterior, se utilizó el paquete de computación para el diseño de plantas de tratamiento (CAPDET). Esta es una herramienta que proporciona una buena aproximación sobre el diseño y los costos obtenidos al construir una planta de tratamiento.

Para hacer uso de este paquete fue necesario contar con información necesaria referente a las características del agua residual, tanto del influente como del efluente, el gasto que maneja la planta, y diferentes costos para la obra civil. Éstos costos fueron actualizados a febrero de 2002 de acuerdo al INPC y al tipo de cambio vigente del dólar.

Para obtener resultados lo más aproximado a lo real, el programa fue alimentado con información referente a la planta de tratamiento en estudio, por lo que el tren de tratamiento especificado para el agua residual es el mismo que se lleva a cabo en la planta de tratamiento (ver capítulo 2, inciso 2.2.1. figura 3). Sin embargo, debido a que la planta solamente cuenta con los digestores anaerobios (que no se encuentran en funcionamiento), se propusieron dos alternativas para su secado y disposición final: lechos de secado y filtro prensa.

### 5.5.1. Resultado de la evaluación:

La tabla 41 muestra los resultados obtenidos al utilizar esta herramienta de cómputo. Las cifras son un aproximado de lo que podría costar un proyecto de esta naturaleza, desde su inversión inicial para su construcción, el financiamiento



respectivo a 20 años ( a una tasa del 10%), los costos de operación y mantenimiento anuales; así como costos indirectos y el costo del terreno.

El reporte que emite este paquete, además de incluir los costos de cada parte del proceso de tratamiento, proporciona información referente a las especificaciones técnicas de diseño y características de la calidad del agua y de los lodos producidos durante este.

Como lo muestra la tabla 41, el costo total del proyecto de inversión de una planta con el tratamiento convencional de lodos activados con filtro prensa es de \$36,500,000.00; \$12,000,000.00 millones más que el proyecto con lecho de secado.

Sumando los conceptos referentes a la parte del tratamiento de los lodos, se observa que el importe del tren que utiliza el lecho de secado (digestor anaerobio, lecho de secado, transporte y relleno) representa un 25 % del costo total de construcción de la planta y para el filtro prensa (digestor anaerobio, filtro prensa, transporte y relleno) de 35%.

La diferencia entre ambos trenes radica básicamente en el equipo utilizado. El filtro prensa tiene una mayor inversión en equipo comparándolo con el primero. La diferencia en costos es de \$ 6'700 000.00 pesos aproximadamente.

Debido al incremento en la inversión en equipo, el financiamiento es superior y por ende, el costo por m<sup>3</sup> del agua residual es ligeramente superior.

Si analizamos las tarifas publicadas en el Código Financiero del D.F., cuyos precio de venta del agua residual (\$1.20) es superior al costo aproximado por m<sup>3</sup> de agua residual tratada y que involucra el sistema de tratamiento de lodos de filtro prensa es de \$ 0.75 pesos, éste último representa casi un 62 % del precio de venta del agua residual sin tratar.



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**Tabla 41: Resultados obtenidos programa (CAPDET)**

	Lecho seco				Filtro prensa			
	Inversión inicial		Operación y mantenimiento (anual)		Inversión inicial		Operación y mantenimiento (anual)	
	Dólares	Pesos	Dólares	Pesos	Dólares	Pesos	Dólares	Pesos
Costos totales de construcción	1,850,576.00	16,840,241.60			2,750,820.00	25,307,544.00		
Costos Indirectos	545,284.00	4,962,084.40			801,931.00	7,377,765.20		
Terreno	57,850.00	526,435.00			57,850.00	532,220.00		
Intereses	245,371.00	2,232,876.10			361,060.00	3,321,752.00		
<b>Total</b>								
<b>Costo total del proyecto</b>	<b>2,699,081.00</b>	<b>24,561,637.10</b>			<b>3,971,661.00</b>	<b>36,539,281.20</b>		
<b>Costos totales por operación y mantenimiento</b>			<b>165,548.00</b>	<b>1,523,041.60</b>			<b>164332</b>	<b>1,511,854.40</b>
Costo del Digestor anaerobio	516,292.00	4,698,257.20	14,764.00	134,352.40	516,292.00	4,698,257.20	14764	134,352.40
Lecho de secado	91,817.00	835,534.70	4,196.00	38,183.60				
Filtro prensa					829,488.00	7,548,340.80	3037	27,636.70
Acarreo y relleno	51176	465,701.60	11,317.00	102,984.70	51,411.00	467,840.10	11,330.00	103,103.00
<b>Subtotal</b>	<b>659,285.00</b>	<b>5,999,493.50</b>	<b>30,277.00</b>	<b>275,520.70</b>	<b>1,397,191.00</b>	<b>12,714,438.10</b>	<b>29,131.00</b>	<b>268,005.20</b>
Costo del A.R. (dol/Tgal)			0.266				0.31	0.75
Costos del A.R. (pesos/m3)				0.64				
Costo tratamiento del lodo		<b>5,999,493.50</b>		<b>275,520.70</b>	<b>12,714,438.10</b>			<b>268,005.20</b>
%c.t.		0.244262769			0.347966289			
% c.o.m.		0.180901625			0.177269187			
* Valores actualizados a febrero de 2002. T.C. \$9.10 por dólar								
	Trat.A.R.		Características técnicas		Trat.A.R.		F.P.	
	D.A.	L.S.	Final	D.A.	D.A.	F.P.	Final	
Caract. Lodo Vol.(gal/d)		50532.31	12201.04	1220.1	50,532.31	12,201.46		1,423.46
Primario (gal/d)	13,097.32				13,097.32			
Secundario (gal/d)	37434.99				37434.9			
Total (gal/d)		12,201.04	1,220.10		12,201.04	1,423.46		0.00
Tons. de lodo transportado por día			5.34					6.23

El costo aproximado del agua residual por ambos métodos ( lecho de secado y filtro prensa) es de 0.64 y 0.75 pesos por m<sup>3</sup> respectivamente, lo cual no hace mucho la diferencia entre los dos, recordando que la cifras aproximadas ya incluyen el tratamiento del lodo.

Si tomamos en cuenta que ya tratada a nivel terciario tiene un precio de 14.00 , la utilidad bruta por m<sup>3</sup> es de \$13.25 pesos. Si se deducen todos aquellos gastos que se requieren para que opere la planta e impuestos, aún así hace suponer que la utilidad neta que se obtendría sería buenas. Esto solamente es posible comprobarlos si se hace un proyecto de inversión considerando estas condiciones.

Los costos obtenidos por m<sup>3</sup> del agua residual tratada, son valores aproximados a los reportados de plantas de tratamiento que utilizan el sistema de lodos activados para el tratamiento del agua residual y que se encuentran en operación.

Con respecto a la parte de costos del lodo, hay que recordar que 1/3 del costo por m<sup>3</sup> del agua residual esta destinado a ello.

Para el caso en estudio, se tomó el valor de 35%, por lo que se tiene que:

Por el lecho de secado es: \$ 0.23 m<sup>3</sup>

Y Filtros prensa es: \$ 0.26 m<sup>3</sup>

Continuando con las aproximaciones obtenidas con esta herramienta, se observa que para ambas alternativas se tiene un % similar en la operación y mantenimiento anual con respecto al valor total de este.

Sólo un 18 % del gasto total anual por concepto de operación y mantenimiento de la planta se destinaría para la parte correspondiente al tratamiento de lodos, lo cuál no representa mucho en unidades monetarias; sobre todo si se pensara en la utilización de los subproductos del tratamiento de los lodos (biogás y biosólidos).

El primero podría considerarse su uso dentro de la misma planta como fuente de calor, representando un ahorro como podría pensarse en el calentamiento de agua para las instalaciones de los baños del personal; y por otro lado, los lodos podrían ser vendidos como mejorador del suelo y así obtener otros ingresos, además del ingreso esperado por la venta del agua residual.

Comparando los dos trenes de tratamiento de lodos, el más favorable sería el que utiliza el filtro prensa ya que se obtiene un lodo de mayor calidad que puede ser dispuesto más fácilmente y ser utilizado posteriormente como mejorador del suelo.

Para algunos inversionistas quizá la opción del tren de tratamiento con filtro prensa, podría representar un costo elevado, por la inversión inicial y su financiamiento, sin embargo, sí solamente se toma la parte correspondiente al tratamiento de lodos y se considera:

- la depreciación del equipo,
- la amortización de los costos asociados a la instalación y puesta en marcha de ésta parte del tratamiento,
- así como la venta de los lodos obtenidos como mejoradores del suelo, ya que la calidad que presentan facilita su disposición

es una opción que requiere ser analizada con mayor profundidad para determinar si ésta parte del proyecto es rentable o no, de tal manera que se pudiera instalar esta parte del proceso a varias plantas que no cuentan con el sistema de tratamiento de lodos y de esta manera reducir la contaminación provocada por el desecho de éstos lodos sin tratar a la alcantarilla.

Aunque no se cuenta con el dato preciso sobre sí los lodos son vendidos o no, algunas plantas que se encuentran en la zona hotelera de Cancún utilizan el agua residual para riego de jardines y los lodos como mejorador del suelo. El precio de

venta del agua residual ya tratada, en una de éstas plantas es de \$1.00 (peso el m<sup>3</sup>).

Las siguientes imágenes corresponden a algunas plantas que se encuentran en la zona hotelera de Cancún, en donde se observa los lodos obtenidos y el filtro prensa utilizado ello.

Cabe mencionar que estas plantas de tratamiento funcionan como todo un sistema. El agua residual que ingresa al sistema, es un agua que ha sido utilizada en la zona hotelera. Una vez tratada, el producto y el subproducto son aprovechados. El agua residual es destinada para el riego de las áreas verdes y el lodo procesado es utilizado como mejorador del suelo.



Figura 11: Planta “El Rey”, Cancún, Quintana Roo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 12: Lodos de la "Planta Norte", Cancún, Q.R.



Figura 13: Filtro Prensa. Planta "Pok-Ta-Pok", Cancún , Q.R.



Figura 14: Planta "Gucumatz", Cancún, Q.R.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## Capítulo 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El digester anaerobio, por su forma, estructura y funcionamiento pudo ser caracterizado como un sistema cerrado, por lo que la metodología empleada en el análisis de este problema sirvió para estructurar y elaborar la información disponible desde un panorama global, con base en modelos y aspectos teóricos y permitió además profundizar tanto en el conocimiento del sistema concreto estudiado, como en la aplicación de las metodologías proporcionadas por la teoría de sistemas.

En referencia al caso de estudio, al ser visto el digester anaerobio como un sistema, se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1.- Al caracterizar los estados del sistema de digestión anaerobia se obtuvo un conocimiento profundo sobre el mismo, gracias a la metodología sistémica. Como fue posible observar en el trabajo, dado que las condiciones de salida dependen del estado anterior, permite una mejor comprensión del funcionamiento del sistema en los diferentes niveles de su funcionamiento.
2. Con los conocimientos adquiridos sobre el tema más la información consultada fue posible elaborar las tablas (8 y 15) que sirvieron para el análisis del sistema de digestión anaerobia. Para su construcción se detectó información relevante que al ser analizada se logró un mayor conocimiento sobre el mismo sistema.

La información relevante fue:

- 2.1. Entrada del sistema: cantidad de lodo requerido, cantidad de materia orgánica presente y forma de alimentación del sistema.

## 2.2. Condiciones internas de funcionamiento del sistema:

- a) Comportamiento de los microorganismos responsables del proceso (etapas de la degradación de la materia orgánica)
- b) Capacidad de respuesta por parte de ellos frente a las diferentes condiciones de operación, así como en las variaciones en la concentración de materia orgánica en la alimentación (remoción y producción de biogás).
- c) Velocidad de degradación de la materia orgánica, cuyos productos son la materia orgánica removida y producción de biogás.

2.3 Proporciona información sobre el tipo de material que esta entrando en el lodo (composición de la materia orgánica que constituye el lodo de alimentación). Esto se observó al pasar de la etapa 1.2 a la 2; y de la etapa 2 a la 3, . en dónde hay un decremento en el TRH. Hay un aumento en la carga orgánica volumétrica y sin embargo la producción de biogás aumenta en un 88%, con reducción en la remoción de materia orgánica.

2.4 La relación entre la cantidad de materia orgánica presente en el lodo de alimentación con respecto a la COV.

Esta relación es inversa, si lo que se busca es incrementar la cantidad de materia orgánica en el lodo de alimentación. Con esta relación, lo que se pretende es obtener una mayor remoción de materia orgánica bajo las misma condiciones de operación.

Para un TRH de 20 días se sugiere dejar la misma cantidad de sólidos 35 g/L medidos como DQO pero disminuir la COV a 1.5 L , esto es porque al hacer el análisis de las gráficas es posible ver que en la etapa 1.2 se alcanzaron eficiencias hasta del 80 % de remoción de los SSV, por lo que se podría aumentar ligeramente la concentración de SSV o disminuir la carga orgánica

volumétrica a 1.5 Kg m<sup>3</sup>/día de DQO para lograr una mayor eficiencia. El promedio se aproxima al porcentaje reportado en la bibliografía (70%-80% de materia orgánica degradada), ya que el resto es material refractario (constituido básicamente por biomasa y por SSF) que no es posible de ser degradado por el sistema. También hay que recordar que no es posible incrementar tanto la carga ya que altas cargas pueden ser un factor limitante en la remoción y producción de biogás. Los microorganismos no pueden degradar toda la materia orgánica. En este tipo de sistema su etapa limitante esta en la conversión de acetato a metano (microorganismos acetoclásticos). La limitación de nutrientes es un factor determinante en la baja tasa de conversión de acetato a metano.

2.5 COV bajas, calculadas a TRH de 20 días, habrá mayor degradación de la materia orgánica y no así mayor producción de biogás. Este largo período favorecerá que las bacterias hidrolíticas y fermentadoras tengan mayor actividad. Esto se observa al pasar de la etapa 1.1 a la 1.2.; esto ocurre siempre y cuando se mantengan las condiciones de operación.

2.6 Se observan ciclos en la remoción de materia orgánica y producción de biogás. Existe un rango en la degradación de la materia orgánica por parte de las bacterias hidrolíticas y fermentadoras hasta llegar a cierta cantidad degradada que ya no es posible degradar más hasta que esta es utilizada para la producción de metano por los microorganismos metanogénicos.

2.7 Las 4 etapas del experimentado pueden ser divididas en dos grupos: etapas 1.1 y 1.2 en donde se lleva a cabo mayor remoción de materia orgánica; y segunda parte, etapas 2 y 3 donde hubo mayor producción de biogás.

3.- Dado que para este tipo de sistemas aún no se tienen modelos matemáticos totalmente satisfactorios ( en este sentido este trabajo es pionero), se efectuaron



pruebas de simulación a partir de ecuaciones muy sencillas, haciendo cada vez más complejas poco a poco las funciones matemáticas.

Se utilizaron modelos polinomiales de primer y segundo orden, el primero lineal, el segundo ya intentando introducir los aspectos no lineales que las gráficas de los datos originales sugieren. Además se emplearon las herramientas polinomiales del paquete Excel.

Como se comenta en el cuerpo de la tesis, los resultados, aunque ya parecen indicar la dirección correcta, aún deben de ser tomados como un primer intento.

La información proporcionada debe ser aún complementada. Para la elaboración de las tablas cambios de estado y de salida (8 y 15) se realizaron algunas suposiciones que requieren ser comprobadas para conocer el verdadero funcionamiento del sistema bajo estas condiciones.

En el TRH de 20 días, la concentración de materia orgánica medida como DQO de 35 g/L, disminuirla a 30 g/L; e incrementar la materia orgánica a 35 g/L para los TRH de 15 días y 10 días. Esto con el objeto de completar la tabla y conocer el comportamiento del sistema bajo estas condiciones de operación.

Se podría tener una idea más clara y detallada del proceso, si se contara con información más precisa. Para ello, se sugiere que las muestras se recolecten y se analicen con el mismo intervalo de diferencia y a los mismos tiempos. Los valores obtenidos en la salida del sistema indicarán como se comporta el sistema bajo estas nuevas condiciones de operación que tratarían de ser lo más constante para que se pudiera obtener una ecuación que mejor lo represente.

4.- Con respecto a los modelos matemáticos se obtuvo en primera instancia un modelo discreto muy de acuerdo a los planteamientos sistémicos y que además de proporcionar un sistema de análisis prácticamente exacto, sentó las bases para

continuar con un proceso de modelación matemática que puede llegar a proporcionar en futuras investigaciones y tomando en cuenta los resultados de este trabajo, modelos flexibles y generales.

Al respecto, al obtener los primeros modelos se vio que difieren bastante uno de otro. La herramienta proporcionada por el paquete Excel, por estar codificado para obtener la ecuación de la línea recta con el método de mínimos cuadrados, reporta % error bastante bajos comparados con el modelo polinomial, lo cual sería bien aceptado, si el análisis queda hasta este nivel. Sin embargo, al utilizar el modelo polinomial y graficar los puntos, se compararon ambas curvas con los valores obtenidos experimentalmente en el laboratorio. La curva proporcionada por el paquete Excel muestra una notoria diferencia con respecto a las otras dos. Y esto también se observa con las ecuaciones de segundo orden en su comportamiento con respecto a los datos originales.

Se vio que con el modelo poligonal, tanto para la ecuación de la línea recta como para la ecuación de segundo orden se tienen mejores aproximaciones con respecto a la proporcionada por el paquete Excel.

5.- A cualquier dato que sobresalga del valor promedio de la muestra, se sugiere que se le aplique la prueba de Grubbs y Dixon para datos aberrantes, ya que estos puntos al estar tan alejados del conjunto, pueden provocar un alejamiento significativo de la ecuación que mejor represente al sistema.

6.-Dadas las condiciones y los datos aún no fue posible obtener una ecuación que representara con un alto grado de exactitud el sistema en estudio en cada una de las etapas, más sin embargo en la mayoría de ellas se pudo lograr una buena aproximación. La utilización del modelo poligonal de 1er. y 2º orden permite hacer una mejor representación del sistema original por la obtención de las ecuaciones por cada par o tercetas de datos. En algunos casos fue mejor la de primer grado, pero en la mayoría de los casos la de segundo orden se adaptaba

mejor al sistema original. Sin embargo los % de error eran en algunos casos demasiado altos, esto debido a la variación existente en la concentración de la materia orgánica que entraba en el lodo de alimentación.

7.- Para poder lograr cada vez mejores representaciones matemáticas, será necesario obtener un mayor número de datos y tener un mayor control en la variación de los SSV que contenga. Esta misma información podría servir de base para obtener el óptimo de operación del digester anaerobio, en donde se busca determinar la máxima remoción posible de materia orgánica y que se produzca la mayor cantidad de biogás, además de obtener un lodo estable y proyectar y decidir sobre nuevas condiciones de operación.

El número de datos proporcionados para la realización del análisis, no fue suficiente, por lo que no fue posible determinar una función óptima de funcionamiento del sistema.

8.- Con respecto a las metodologías planteadas para seguir el curso de este trabajo, después de haber hecho varias consultas bibliográficas y personales, se llegó a la conclusión que dependiendo del punto de vista en sea visto un problema, será utilizada en su caso, la más adecuada; sin embargo todas ellas tienden a buscar, ahondar y tratar de definir, según el nivel de detalle deseado cuál es el problema y su manejo.

9.- Con respecto a la evaluación económica del sistema, después de comparar los costos obtenidos por tratar el agua residual (programa CAPDET) y el precio a que es vendido el m<sup>3</sup> de agua residual, es posible observar que se tiene un alto margen de utilidad. Hay que tomar en cuenta que si son vendidos los lodos después de ser tratados, podrían ser considerados como otros ingresos para la planta de tratamiento.

De esta manera se vería beneficiada la población al eliminar su descarga y así evitar enfermedades en ella, beneficiar al medio ambiente por no contaminar al eliminar las descargas y el que sean utilizados estos lodos como mejoradores de suelo ya que por su composición son un excelente abono.

- Posibles usos de la información obtenida:

Gracias a la aplicación de esta metodología para el análisis del sistema, la información revelada puede ser utilizada en :

- 1.- Establecer nuevas condiciones de operación del sistema que permita obtener, de acuerdo al objetivo que se persiga mayor remoción en la materia orgánica o mayor producción de biogás.
- 2.- Con la cantidad de información necesaria y suficiente de datos, se podría establecer la ecuación matemática que mejor represente al sistema y con ella:
  - tratar de establecer la función óptima de operación del sistema.
  - tratar de establecer cuál sería el comportamiento del sistema si se cambian las condiciones de operación ( alimentación, tiempo, etc)
- 3.- Al conocer el comportamiento del funcionamiento del digestor y la capacidad de respuesta de los microorganismos responsables del proceso ante los incrementos en la materia orgánica del influente, es posible establecer los rango en donde es posible que sea degradada así como la máxima remoción de ella.
- 4.- Con la información obtenida sería posible decidir nuevas condiciones de operación que permitieran obtener una mayor remoción de materia orgánica o una mayor producción de biogás., además de determinar la cantidad de materia orgánica necesaria para ello.

5.- Sería posible proyectar, de acuerdo al conocimiento adquirido, las condiciones de funcionamiento de un digestor anaerobio a escala, tratando de establecer desde un inicio las mejores condiciones de operación y con ello reducir o minimizar los costos y el tiempo que implica su arranque.

6.- Por el nivel o grado de funcionamiento que pudiera tener el sistema, es posible obtener lodos de diferente calidad y características mismas que pueden tener diferentes usos. Por ser los lodos ya tratados un material que contiene una gran riqueza de componentes es posible que en un futuro sean vistos no como un subproducto del tratamiento del agua residual sino como un producto sujeto a ser comercializados.

## BIBLIOGRAFÍA

Arredondo Figueroa José Luis, Pedro Luis Domínguez Guarde y Daniel Grande Cano (1997) "Sistemas Integrales de Acuicultura para el Desarrollo Sustentable" Ed. Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa.

Barry C. Field (1995) "Economía Ambiental. Una Introducción." 2ª.ed. Ed. Mc. Graw Hill. Colombia.

Carrera Bolaños Jorge (1983) Tesis de Doctorado: "Teoría de Sistemas y Geometría Diferencial: Una Introducción- con un resultado de realimentación controlada ". Budapest, Hungría.

Checkland Peter (1997) Pensamiento de Sistemas, Práctica de Sistemas. Ed. Limusa S.A. de C.V. México.

Checkland Peter and Jim Scholes (1994) "La metodología de Sistemas Suaves en Acción". Ed Limusa. México

Código Financiero del D.F. ( Enero, 2002).

Eckenfelder, W.W. ( 1970) "Water Pollution Control". Pemberton Press, Austin, N.Y.

Environmental Protection Agency (1995): "Process Design Manual: Land. Application of Sewage Sludge and Domestic Septage" EPA/625/R-95/001 . September 1995 Cincinnati, Ohio.

Environmental Protection Agency (1992): "Environmental Regulations and Technology. Control of Pathogens and vector attraction in sewage".(Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503. EPA/625/R-92/013 . December 1992 Washington D.C.

Environmental Protection Agency (1989). Technical support document for pathogen reduction in sewage sludge. NTIS No.PB89-136618. Springfield, VA: National Technical Information Service.

Fuentes Zenón Arturo y Gabriel Sánchez Guerrero ( 1995) Cuadernos de Planeación y Sistemas: Número 1 :Metodología de la Planeación Normativa. 3ª.reimp. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería.

Fuentes Zenón Arturo ( 1995) Cuadernos de Planeación y Sistemas: Número 3: "El pensamiento sistémico, caracterización y principales corrientes" 3ª.reimp. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería (D-88).

Fuentes Zenón Arturo ( 1991) Cuadernos de Planeación y Sistemas: Número 6: "El problema general de la planeación. Pautas para un enfoque contingente." 2ª.reimp. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería .

Fuentes Zenón Arturo (2001) La planeación en imágenes: Número 2. "Enfoques de Planeación. Un sistema de metodologías". 1ª. imp.

Gilpin Alan (2000) Environmental Economics . A critical Overview. Ed. John Wiley & Sons. England.

Haime Levy Luis (1993) Planeación financiera en la Empresa Moderna 2ª. ed. Ed. Ediciones Fiscales ISEF, S.A. DE C.V. México, D.F.

Henry Glynn J. & Gary W. Heinke ( 1999) "Ingeniería Ambiental". 2ª.ed Ed. Prentice Hall. México.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ( 1999 )  
Apuntes "Curso Teórico-Práctico para el Tratamiento de Lodos Residuales"

Instituto de Geografía (2001). VII Curso Teórico-Práctico: " Validación de Métodos Analíticos: fundamentos estadísticos y aplicaciones".. Junio

Jack Macki and Aaron Strauss (1982) "Introduction to optimal control theory ", Undergraduate Texts in Mathematics. Ed. Springer-Verlag, New York.

Keisuke Hanaki, Talsuya Noike and Junichiro Matsumoto (1985) "Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process", in Mathematical Models in Biological Waste water Treatment. Edited by JØrgensen –Gromier. Ed. Elsevier, Amsterdam.

Kiely Gerard (1999) Ingeniería Ambiental. Ed. McGraw Hill. Madrid, España.  
Kowal, N.F. 1985. Health effects of land applications of municipal sludge.  
Publ. No. EPA/600/1-85/015  
Research triangle Park, N.C.: U.S. EPA Health Effects Research Laboratory

Lawrence, Alonzo (1971) " Application of process kinetics to design of anaerobic processes" en Anaerobic Biological Treatment Processes. Editor Robert Could, USA.

Maravall Casesnoves Dario (1982) " Diccionario de Matemática Moderna". Editora Nacional, ed. 2ª. Madrid España.

Metcalf-Eddy. " Tratamiento y Depuración de las aguas residuales"  
Ed. Labor. 1977.

Metcalf & Eddy (1996) Ingeniería de Aguas Residuales. Vol. I y II. Ed. McGraw-Hill. México.

Miklos Tomas y Ma. Elena Tello (1991) " Planeación Prospectiva: Una Estrategia para el Diseño del Futuro". Ed. Limusa -Noriega Editores. México.

Moeller Chávez Gabriela (1999) "Mejoramiento de la digestión anaerobia de lodos residuales primarios por medio de estimulación y pretratamiento" Tesis Doctoral. DEPFI. México, D.F.

Negroe Pérez Gonzalo (1995). Apuntes curso "Teoría y metodología de la planeación"

Negroe Pérez Gonzalo (1980) "Papel de la Planeación en el Proceso de Conducción". Tesis de Maestría. DEPFI. México, D.F.

Notas del "Curso Teórico-Práctico para el Tratamiento de lodos Residuales", Organizado por el IMTA, del 21 al 25 de junio de 1999.

Ochoa Rosso Felipe (1997) Cuadernos de Planeación y Sistemas No. 10. "Método de los Sistemas" 2ª. Ed. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería .

"Panorama del Agua en México" en Agua Potable. Revista de Saneamiento Ambiental en México. Vol. 10 #123. Feb.1995

Ramalho (1991) Tratamiento de Aguas residuales. Editorial Reverté. Barcelona, España.

Pavlostathis S.G. & Giraldo Gómez (1991) "Kinetics of Anaerobic Treatment" in Water Scientis Technology Vol.24, No. pp.35-59. Switzenbaum, editor.

Tebbutt, T.H.Y. "Fundamentos de control de calidad del agua". Ed. Limusa-Noriega. 1990

Vesilind Aarne, P. (1975) "Treatment and Disposal of Sludge. Ann Arbor. Michigan. USA.

Vilar Barrio Francisco José (1997) "Cómo implantar y gestionar la calidad total". 2ª. Ed. Ed. Fundación CONFEMETAL. Madrid, España.

Water Environmental Federation (1993) Sludge Stabilization. Manual of Practice No. FD - 9..

Water Environmental Federation (1995) Wastewater Residual Stabilization. Manual of Practice FD-9 . Alexandria, Virginia pp. 55-59

Winkler Michael A. "Tratamiento Biológico de agua de desecho" Ed. Limusa 1989.





# **ANEXO 1**



# GENERALIDADES SOBRE AGUA RESIDUAL, TRATAMIENTO Y LODOS

## 1. Agua Residual

### 1.1. Definición de agua residual

Se entiende por agua residual al conjunto de las aguas utilizadas por una comunidad que están constituidas por:

- a) todo lo que recogen los drenajes, colectores y pasan al sistema general de alcantarillado, como son los desechos domésticos, deposiciones humanas y aguas de limpieza.
- b) los residuos industriales como ácidos, aceites y materia orgánica.
- c) aguas superficiales, atmosféricas y subterráneas que se vierten en el sistema de alcantarillado.

### 1.2. Composición del Agua Residual

Las aguas residuales están compuestas, aproximadamente, por un 99% de agua, 0.02 a 0.003% de sólidos suspendidos y sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas. Los compuestos orgánicos que contienen las aguas residuales se clasifican en nitrogenados y no nitrogenados; los nitrogenados son urea, proteínas aminas, y aminoácidos; los no nitrogenados incluyen a carbohidratos, grasas y jabones.

La cantidad de materia orgánica presente en el agua residual determina su grado de contaminación, que se mide por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).

Es necesario someter las aguas residuales a un tratamiento antes de deshacerse de ellas ya que actualmente las ciudades ya no pueden eliminar estas por dilución en los cuerpos de agua (ríos, lagos, presas, mar), como lo hacían anteriormente. La relación entre la cantidad de agua residual y el volumen de agua natural que la

recibe, ha cambiado, debido a que la demanda de agua para el consumo doméstico e industrial crece constantemente. La evacuación de las aguas residuales sin someterlas a tratamiento tiene las siguientes consecuencias:

- a) diseminación de microorganismos patógenos
- b) contaminación de los cuerpos receptores de agua
- c) eliminación de la vida acuática y daños al ecosistema.

Entre los diversos procedimientos para el tratamiento de aguas residuales, el método de elección se establece en cada caso teniendo en cuenta los aspectos de:

- 1- características del agua
- 2- cuerpos receptores finales
- 3- legislación sanitaria vigente.

### 1.3. Requisitos de las aguas tratadas (efluentes)

El objetivo primordial del tratamiento de aguas residuales consiste en eliminar o modificar los contaminantes perjudiciales para la salud humana o el entorno acuático, terrestre o aéreo. La descarga en terrenos, la evaporación en estanques y la inyección en pozos profundos son opciones ocasionales, pero por lo común las únicas salidas prácticas para deshacerse de aguas residuales tratadas (o sin tratamiento) son los arroyos, ríos, lagos y océanos. Para proteger estos recursos hidráulicos se debe controlar la descarga de contaminantes en los mismos. Esto se hace en Estados Unidos y Canadá fijando requisitos de efluentes en cuanto a DBO, sólidos suspendidos (SS) y coliformes fecales (C.F.). Normalmente es necesario un tratamiento secundario para satisfacer estos requisitos.

## 2. Procesos de tratamiento.

El proceso de tratamiento consiste, en general, en que los contaminantes en suspensión coloidales y disueltos (orgánicos e inorgánicos) en las aguas residuales se pueden separar físicamente, transformarse por medios biológicos o someterse a modificaciones químicas

Los contaminantes se eliminan de las aguas residuales en orden de dificultad creciente. Primero se retienen trapos, palos y diversos objetos grandes en tamices burdos (con espacios de 100 a 150 mm) cuando es necesario para proteger bombas pequeñas. Después se separa la arenilla, que es un material que desgasta los equipos, ocupa espacio y se sedimenta en tanques o cámaras desarenadoras. En este punto la mayor parte de los sólidos pequeños todavía están en suspensión y la parte sedimentable de los mismos (alrededor del 50%) se puede separar y concentrar en los tanques primarios de sedimentación por gravedad. Los **sólidos concentrados**, llamados **lodos crudos**, se bombean a un **digestor anaerobio** para su descomposición biológica y el efluente del tanque primario clarificado fluye hacia las unidades de tratamiento secundario.

Éstas se componen de:

1.- Una sección de oxidación biológica en donde la materia disuelta y coloidal de las aguas residuales sirve de alimento a microorganismos, los cuales luego convierten las sustancias orgánicas en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ; y

2.- Un tanque de sedimentación final por gravedad en donde los microorganismos se sedimentan. Una porción de estos lodos biológicos concentrados se devuelven para “resembrar” la sección de oxidación, pero la mayor parte pasan al digestor anaerobio después de un espesamiento adicional. La última etapa del tratamiento de aguas residuales es la desinfección del efluente de la planta antes de que se descargue en las aguas receptoras (Henry, 1999).

Los sistemas de tratamiento de las aguas residuales están diseñadas para reducir los efectos adversos sobre el ambiente. Así como el agua residual difiere grandemente en su composición, de la misma manera los sistemas de tratamiento.

Existen tres tipos de sistemas básicos para el tratamiento de agua residuales domésticas:

- a) tratamiento primario
- b) tratamiento secundario
- c) tratamiento terciario o final

## 2.1. Tratamiento primario

Método ampliamente usado cuyo objetivo principal de este tratamiento es remover los sólidos capaces de asentarse (precipitan) del agua residual y de esta manera hacen del agua menos inconveniente. ( Vesilind, 1975). La cantidad de material flotante, llamado nata, no es usualmente grande y es también tratado con los sólidos sedimentables o dispuesto convenientemente a la tierra sin ningún tratamiento.

Por este tratamiento se eliminan del 40 a 60 % de los sólidos suspendidos. Los sólidos removidos del fondo del clarificador son conocidos como lodos primarios crudos, son bastantes nocivos, y tienen un alto porcentaje de agua. Estas dos características los hacen más difíciles de manejar.

Este lodo es a menudo digerido en el digester anaerobio para hacerlo menos molesto y entonces se le conoce como lodo primario digerido. Con la digestión anaerobia se reduce un 50% de sólidos volátiles, se elimina el olor desagradable y hay una destrucción significativa de organismos patógenos.

El lodo digerido puede ser dispuesto directamente sobre la tierra, deshidratado en lechos de secado o manejado por medios mecánicos antes de su disposición final.

La corriente líquida que sale del tratamiento primario es muy inestable, ya que contiene muchas sustancias finamente dispersas junto a los compuestos orgánicos solubles que se oxidan fácilmente.

La demanda biológica de oxígeno de estas puede ser lo suficientemente elevada como para producir efectos nocivos. A esta agua se le adicionan lodos del sedimentador secundario y se somete a una intensa aereación, lo que provoca la coagulación de las materias coloidales, las cuales forman flóculos. Las partículas de flóculos son de naturaleza gelatinosa, contienen gran cantidad de bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. En la práctica este proceso tarda de 4 a 8 horas.

## 2.2. Tratamiento secundario

Las plantas de tratamiento secundario, están diseñadas para remover la demanda biológica de oxígeno al igual que los sólidos. La DBO es usualmente removida por medios biológicos, pero recientemente también por medios físico-químicos han sido utilizados con este propósito.

La mezcla formada de agua y lodos activados, que sale del aereador, entra en un tanque de sedimentación secundaria en donde los lodos activados y la materia orgánica (flóculos), por sus características de gran capacidad de sedimentación, se depositan rápidamente en el fondo.

Los lodos se eliminan con rastras mecánicas, una parte hacia las tolvas que los recirculan a los tanques de aeración, para reiniciar el ciclo, y otra hacia los tanques de digestión (actualmente esto último no se realiza, el excedente de lodos se arroja al drenaje municipal).

### 2.2.1. Lagunas de oxidación.

Las lagunas de oxidación son construcciones poco profundas que normalmente reciben agua residual cruda, en ella se realizan procesos naturales de depuración, si las condiciones climatológicas son adecuadas.

Si se cuenta con espacio suficiente, es un proceso adecuado para el tratamiento de agua residual, ya que puede lograrse una buena remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos.

### 2.2.2. Sistemas de película biológica.

El tratamiento de aguas residuales se puede efectuar en reactores que contengan una superficie sólida a la cual se adhiere una población microbiana mixta en forma de película llamada zooglea.

Los filtros percoladores, que es un material de soporte cubierto con microorganismos (zooglea) donde el agua residual es filtrada, es de igual manera usado como



tratamiento biológico para DBO. Su mayor inconveniente es que ellos requieren demasiada tierra para aplicarlos a gran escala.

Los sólidos degradados del material filtrante (filtros) son capturados en el clarificador final. Este lodo, llamado humus filtrado, está limitado en cantidad (excepto a ciertas épocas del año cuando la flora y la fauna sobre el material de soporte cambia).

### 2.2.3. Tratamiento del agua residual por el proceso de lodos activados

Los lodos activados están constituidos por varios componentes que se pueden clasificar como: organismos viables, organismos no viables o moribundos, organismos muertos, materia orgánica biodegradable y materia orgánica inerte.

Los organismos viables son los que utilizan la materia orgánica para producir nuevos organismos o biomasa. Los organismos no viables utilizan bioquímicamente los compuestos, pero no producen nuevos microorganismos, son más numerosos. La materia orgánica inerte puede incluir sustancias originalmente presentes en los residuos y en los organismos muertos.

La proporción de los organismos viables depende de la tasa global de crecimiento, la que se determina por el tiempo de residencia de los lodos. En general, puede ser tan bajo como del 2 a 3 %, con una edad del lodo de 4 días.

Entre los microorganismos más importantes que se encuentran en los lodos podemos mencionar a las bacterias, algas, hongos, protozoarios y rotíferos, cada uno tienen actividades específicas en su ecosistema:

- las bacterias descomponen la materia orgánica.
- los hongos sobreviven a pH bajos, que es importante en aguas industriales.
- los protozoarios consumen bacterias y partículas orgánicas como fuente de energía.
- los rotíferos consumen bacterias dispersas.

El proceso de los lodos activados es quizá el método biológico de más amplio uso para el tratamiento del agua residual, doméstica e industrial. Han surgido variaciones del sistema básico, los cuales confieren al tratamiento una versatilidad que le permite adaptarse a un amplio campo de circunstancias operacionales.

El fundamento del proceso consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con una población microbiana mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema aerado y agitado. La materia en suspensión y la coloidad se eliminan rápidamente de las aguas residuales por la absorción y aglomeración en los flóculos microbianos; esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen lentamente por acción del metabolismo microbiano, proceso que se le denomina estabilización.

En este proceso, parte de la materia orgánica se oxida a sustancias simples como  $\text{CO}_2$ , etapa denominada mineralización, y parte se convierte en materia celular nueva, etapa llamada de asimilación.

Parte de la masa microbiana se descompone también en un proceso llamado respiración endógena. El proceso oxidativo suministra la energía necesaria para la realización de los procesos de adsorción y asimilación .

Una vez que se alcanza el grado de tratamiento deseado, la masa microbiana floculenta conocida como lodo se separa del agua residual por asentamiento; ésta parte se conoce como clarificación o sedimentación. El sobrenadante es el agua residual tratada.

La mayor parte del lodo asentado se regresa al tanque de aereación, para mantener la concentración de microorganismos lo suficientemente alta y lograr un tratamiento efectivo, es decir que actúe como un inóculo microbiano. Una porción de los lodos se extrae para su descarga, se les conoce como lodos activados de desecho.

La alimentación del agua residual al tanque de aereación es precedida generalmente por un proceso primario de tratamiento, para la remoción de materiales gruesos,

aceitosos y grasosos, por métodos físicos como la sedimentación. El producto de este proceso primario se conoce como lodo primario, el cual es un producto desagradable que no debe confundirse con los lodos activados.

La naturaleza moribunda de los lodos activados significa que la remoción de nutrientes no es un proceso asociado al crecimiento. Solo una pequeña proporción de los microorganismos presentes en los lodos es viable y genera nueva masa microbiana. Un considerable número de los microorganismos no se reproducen, pero conserva cierta actividad bioquímica, utilizando nutrientes para proporcionar energía de mantenimiento.

Los lodos activados, es un sistema ecológico formado por varios tipos diferentes de microorganismos, junto con materia inerte, inorgánica y orgánica.

Este es casi el sistema ideal para remover y disponer de material disuelto de alta energía encontrado en el agua residual. Desafortunadamente la cantidad de microorganismos producidos en el proceso de lodos activados exceden la cantidad requerida por el sistema. Así algunos de estos sólidos deben ser tirados.

Esta basura de material biológico, referenciado como lodos activados, representa uno de los verdaderos problemas del tratamiento de las aguas residuales. Tanto el humus filtrado como el lodo activado, son a menudo mezclados con el lodo primario crudo y digerido por digestión anaerobia. El material resultante, llamados lodo digerido mezclado, a menudo es deshidratado antes de su disposición final.

La remoción de nitrógeno y fósforo, igual que el material demandante de oxígeno; el tratamiento físico-químico ha recibido una amplia atención. La adición de sales de hierro o aluminio al clarificador primario resulta en la producción de lodo que tiene alguna característica de lodos secundarios biológicos.

La adición de químicos al efluente secundario resulta en lodos similares al lodo de la planta de la planta. En ambos casos, los lodos son difíciles de manejar y de deshidratar.

Otro tipo de lodo en ingeniería sanitaria es el lodo del tratamiento de agua.

El sulfato de aluminio es el más ampliamente usado como coagulante químico y floculante en el tratamiento de agua y produce un lodo llamado Lodos alumbre.

### 2.3. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario o avanzado se define como los tratamientos adicionales necesarios para eliminar de los sólidos suspendidos y de las sustancias disueltas que permanecen en el agua residual después del tratamiento secundario convencional.

Existen varias modalidades:

- Desinfección a través de la cloración, ozonación, radiación ultravioleta
- Filtración: en arena, membrana, filtros prensa, etc
- Osmosis inversa
- Intercambio iónico
- Tratamiento con carbón activado

## 3. Lodos

### 3.1 Generación

Los lodos residuales son producto del tratamiento del agua residual, donde la parte sólida removida es separada por sedimentación, generando un desecho o subproducto el cual contiene los contaminantes que se le han quitado al agua.

La generación de lodos en una planta empieza desde el tratamiento primario, generalmente en los tanques de sedimentación, posteriormente se generan lodos en los tratamientos secundarios, ya sea de tipo biológico o químico y en algunos casos existen lodos provenientes de tratamientos terciarios.

Por lo tanto, los lodos primarios que resultan únicamente de los procesos de separación sólido – líquido (decantación, floculación) se conocen como lodos primarios, y los provenientes de procesos biológicos se designan lodos secundarios. Los primarios consisten en partículas sólidas, básicamente de naturaleza orgánica. Los secundarios son fundamentalmente biomasa en exceso producida en los procesos biológicos (Ramalho, 1991) .

Según la naturaleza del lodo, existen diferentes procesos para su tratamiento, los cuales se pueden combinar, buscando siempre el más adecuado y económico, que contemple tanto el tratamiento del lodo como su disposición final o aprovechamiento.

Hay que resaltar que cualquier sistema de tratamiento genera lodos, ya sea en mayor o en menor medida.

De las plantas de tratamiento de aguas residuales que existen, el 60% tienen el sistema de lodos activados y generan aproximadamente 600 tons. de lodo por día.

El 90% de los lodos producidos no se someten a ningún control y son descargados al drenaje municipal o a cuerpos de agua superficiales, ocasionando su contaminación y por lo tanto, disminuyendo sus posibilidades de uso; o bien los lodos son dispuestos en basureros a cielo abierto sin tomar medidas de protección adecuada, para evitar la contaminación del suelo y acuíferos.

### 3.2. Características de los lodos.

Estos lodos contienen de 2 a 5% de sólidos y el resto es agua. Estos sólidos tienen compuestos orgánicos, inorgánicos y microorganismos.

Las características esenciales de un lodo especifican que: debe contener una población microbiana capaz de descomponer una proporción tan grande como sea

posible de los compuestos de las aguas residuales que se traten y, que debe flocular con facilidad, entendiéndose como floculo el consorcio materia-microorganismo.

El crecimiento floculante de los lodos es importante para la adsorción y aglomeración de materias iónicas, coloidales y en suspensión, presentes en las aguas residuales, así como también para la rápida separación de los lodos procedentes de las aguas tratadas.

Cuando se mezclan los lodos con las aguas residuales entrantes, la aglomeración de los materiales en suspensión con los floculos tiene lugar rápidamente y produce un descenso de la demanda de oxígeno.

La descomposición y asimilación del material aglomerado continúa lentamente, acompañada de una producción y descomposición de la biomasa: a este proceso se le suele llamar estabilización, debido a que la descomposición de los nutrientes hace menos propensa la putrefacción.

La naturaleza floculenta de los lodos es de gran importancia en la remoción de contaminantes, así como también para facilitar la separación de los microorganismos, cuando se haya alcanzado la descomposición requerida.

La unidad ecológica de los lodos es el floculo individual. Los floculos son cúmulos de millones de células bacterianas, junto con otros organismos y compuestos. Un buen floculo es el que esta en equilibrio dinámico, entre la tendencia de hacerse más grandes y el efecto de romperse en unidades pequeñas. Los floculos grandes tienden a formarse de bacterias muertas rodeadas por bacterias vivas.

La composición de los lodos en un sistema particular dependerá de la constitución de las aguas residuales por tratar, así como de las condiciones de la planta. Diferentes procesos producen diferentes lodos; además, los lodos de un mismo proceso pueden mostrar variaciones.

El lodo debido a su naturaleza y origen, es el depositario de todo tipo de microorganismos. Los que llegan a las aguas residuales no todos sobreviven, sin embargo, tanto las aguas residuales como sus lodos muy pronto adquieren una flora que es característica de ambos. La naturaleza de esta flora puede ser condicionada por el tipo de agua residual, ya sea industrial o doméstica.

La concentración de microorganismos es mucho mayor en los lodos que en el agua residual. Debido a la presencia de estos microorganismos en las aguas residuales es de suma importancia su eliminación o por lo menos disminuir su incidencia.

En los lodos existe un elevado número de microorganismos patógenos cuando no están estabilizados correctamente y se les intenta dar un posterior uso al lodo (como mejorador del suelo).

Si los lodos son descargados en las alcantarillas y cuerpos receptores y no reciben tratamiento alguno, es seguro, que esta acción contribuirá grandemente a la alta incidencia de enfermedades gastrointestinales.

En la tabla 1, se muestra el % de sólidos en los diferentes tipos de lodos.

Tabla 1: Concentración de sólidos en lodos

Tipo de Lodo	Concentración % de sólidos
Primario crudo	4-8
Primario digerido anaeróbicamente	6-10
Humus filtrado	3-4
Lodo activado	0.5-1.5
Mezcla digerida ( Primario + Lodo activado)	2-4
Digerido aerobio	1-3
Lodo alumbre	0.5-1.5

(Vesilind, 1975 )

El lodo digerido anaeróbicamente es de color oscuro y tiene un olor añejo que no es del todo objetable.

### 3.3. Formas de tratamiento del lodo

Hay varias formas de tratar estos lodos cuyo propósito es la "estabilización".

Esta estabilidad esta definida como el procedimiento realizado para evitar que el lodo sufra una descomposición biológica espontánea, en donde se mejore las características del lodo hasta llegar a un producto aceptable e inocuo que pueda ser descargado o dispuesto en la naturaleza sin causar daño al ambiente y que no produzca condiciones dañinas o indeseables.

La estabilidad esta en función de uso final que se le piensa dar al lodo que va de acuerdo a la reducción de sólidos suspendidos volátiles, reducción de patógenos, disminución de la toxicidad, reducción en el olor.

La estabilización de lodos ha sido practicada desde hace más de 100 años: la palabra estabilización ha sido adoptada como un termino para todos los métodos de tratamiento que mejoren las características problemáticas del lodo. La definición de un lodo estable es difícil de describir, pero puede considerarse que un lodo estable es aquel que puede ser descargado en el medio ambiente sin que cause daño alguno, ni produzca condiciones dañinas o indeseables. Los objetivos principales para efectuar la estabilización del lodo son:

- a) reducir el número de microorganismos patógenos
- b) descomponer la materia orgánica en compuestos inertes inorgánicos
- c) eliminar olores desagradables

### 3.4. Estabilización del lodo.

Los métodos empleados para la estabilización se dividen en dos tipos: procesos químicos y procesos biológicos .



### 3.4.1. Procesos químicos (Estabilización química):

Son los que logran una estabilización temporal con:

- adición de cal - hidratada y cal viva
- adición de otros agentes: peróxidos, clorados y oxidantes fuertes.

El tratamiento de los lodos con sustancias químicas para su estabilización tiene ventajas sobre los tratamientos biológicos en términos de simplicidad de operación y tiempo. Las principales desventajas de estos métodos son:

- a) los altos costos de los reactivos
- b) la estabilización se debe realizar en recipientes cerrados
- c) algunos compuestos no tienen efecto duradero.

La estabilización química se puede efectuar con;  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$ , y otros agentes químicos como  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{NaClO}_3$ . Sin embargo, el uso de compuestos clorados no se recomienda en lodos que se piensan utilizar como mejoradores de suelo. Las sales ferrosas se utilizan en la remoción de sulfuros.

### 3.4.2. Procesos biológicos:

Efectúan una estabilización permanente y son :

- a) Digestión aerobia- sin calor y autotérmica

La digestión aerobia sin calor se lleva a cabo a temperatura ambiente; el proceso consiste en la aereación del lodo durante 10 a 15 días. El grado de estabilización disminuye con la temperatura.

La digestión aerobia autotérmica aprovecha el calor producido por la oxidación biológica del lodo. Si la temperatura se mantiene entre  $35^\circ\text{C}$  y  $70^\circ\text{C}$ , con tiempos de retención de 3 a 8 días, se obtiene un lodo estable con una reducción considerable de patógenos (pasteurización).

#### b) Doble digestión

Este proceso tiene dos fases; la digestión aerobia autotérmica y la digestión anaerobia mesófila. En la primera fase se lleva a cabo la digestión autotérmica, usando oxígeno de alta pureza, en esta se efectúa una oxidación parcial de los sólidos del lodo a una temperatura entre 50°C y 60°C; posteriormente se pasa a la fase anaerobica, donde la temperatura baja a 35°C.

#### c) Composteo- pilas, hileras, tambores

El composteo es la oxidación biológica, aerobia y exotérmica sin control en pilas de lodo crudo. Normalmente, con este proceso se obtiene un lodo seco muy estable. Una de las desventajas es la producción de olores desagradables durante los primeros días, debido a las altas temperaturas que se generan. El confinamiento del lodo durante un año, produce una completa estabilización de este.

#### d) Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es uno de los procesos de estabilización de lodos más empleada. Generalmente los lodos tratados con este método tienen un olor menos desagradable que los lodos crudos y la cantidad de microorganismos patógenos es menor. Por ser el punto de interés de esta investigación, se ha puesto de forma separada (anexo 2).

Digestión sin calor, se lleva a cabo en lagunas de estabilización, sus costos de operación son bajos pero se requiere de grandes superficies de terreno.

Digestión anaerobia mesófila, se trabaja entre 20°C y 30°C. El proceso se realiza en dos etapas; la primera se realiza en un tanque cerrado, la segunda se efectúa en un tanque abierto o laguna, con un tiempo de retención de 15 a 20 días.

La digestión anaerobia termófila opera entre los 40°C y 60°C, las ventajas de este método son; un incremento de la reducción de patógenos y sólidos volátiles. Además los tiempos de retención son más cortos. Pero su desventaja es que es un proceso inestable.



## **ANEXO 2**



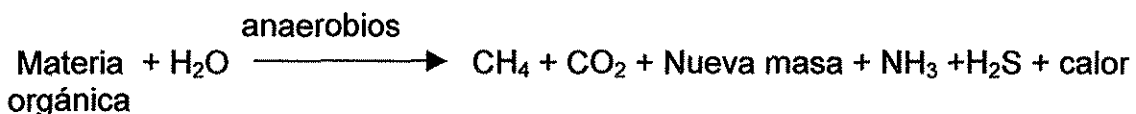
## TRATAMIENTO DE LODOS: DIGESTIÓN ANAEROBIA

### 1.0 Digestión Anaerobia.

La digestión anaerobia del lodo se encuentra entre las formas de tratamiento biológico del agua residual más antiguas, y su origen se puede datar alrededor de 1850, cuando se desarrolló el primer tanque diseñado para la separación y retención de sólidos. Entre 1920 y 1935 se investigó a profundidad el proceso de digestión anaerobia, aplicándose calor al proceso y se introdujeron grandes mejoras, tanto en el diseño de los digestores como de sus elementos complementarios. Actualmente se sigue utilizando la misma práctica, pero se han realizado grandes progresos en la compresión y control del proceso, el dimensionamiento de los tanques, y en el diseño y aplicación de los equipos (Metcalf & Eddy, 1996).

El proceso unitario de tratamiento de digestión anaerobia se emplea en todo el mundo para la depuración de aguas residuales y lodos procedentes de la industria, la agricultura y de origen urbano. Recientemente también se aplica en el tratamiento de residuos sólidos urbanos.

Por definición, la digestión anaerobia (D.A.) es : “ la utilización de microorganismos, en ausencia de oxígeno, para estabilizar la materia orgánica por conversión a metano y otros productos inorgánicos incluyendo dióxido de carbono”.



Frecuentemente este proceso se emplea como primera etapa de tratamiento en residuos de alta carga orgánica. El objetivo en el uso de la D.A. es el de reducir las altas cargas orgánicas a valores de DQO que puedan emplearse en procesos aerobios tradicionales, típicamente en los procesos de lodos activados. Por lo tanto, la D.A. no es un proceso de tratamiento de aguas residuales completo en sí mismo. Es una adición a los procesos aerobios convencionales. (Kiely, Gerard, 1999).

La digestión anaerobia sigue siendo el proceso de estabilización de uso más extendido debido al interés por el ahorro y recuperación de energía, y en el deseo de obtener productos que permitan usos benéficos del lodo del agua residual.

### 1.1. Digestor Anaerobio

Es el equipo diseñado especialmente para que se lleve a cabo la digestión de los lodos.

Se le llama digestión a la transformación o degradación de los sólidos; y es anaerobia porque se realiza en la ausencia de oxígeno molecular proveniente del aire, por lo que se realiza en un dispositivo completamente cerrado.

El modelo actual, tiene la forma de un huevo (ovoide), cuyas paredes son lisas y curvadas y por ello no presenta aristas en su diseño, lo cual facilita la circulación de los lodos en el interior, evitando con esto zonas muertas. Por presentar esta forma, se les conoce como digestores anaerobios de tipo huevo.

Hay tres formas de alimentar a estos digestores:

- 1.- forma de lote o tipo batch, en donde se alimenta una sola vez al inicio de su operación
- 2.- semicontinuo: se alimenta cada 24 horas. una sola vez
- 3.- continuo: como su nombre lo indica, el volumen requerido para la alimentación se dosifica durante 24 horas.

Para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales es necesario conocer el volumen de agua (gasto) y el tipo de agua residual que se va a tratar, ya que de esto dependerá la cantidad de lodo generado durante el proceso.

Es por ello, que para el diseño y operación de los digestores anaerobios que traten estos subproducto, estarán en función de la cantidad de lodos que se generan

durante el tratamiento del agua y esto a su vez dependerá de la cantidad y calidad del agua residual que llegue a la planta (gasto).

## 1.2. Descripción del proceso

Generalmente, los digestores anaerobios se clasifican en dos tipos: los de baja y alta tasa.

### 1.2.1. Digestores de baja tasa:

Son aquellos en donde no son mezclados los lodos en el interior y que algunos autores también hacen referencia a la cantidad de volumen que manejan

Los de baja tasa son los llamados de tasa estándar o digestores convencionales y se caracterizan por tener una alimentación intermitente, bajos niveles de carga orgánica, no hay mezcla por lo que se forman capas y largos tiempos de retención (30-60 días)

### 1.2.2. Digestores Anaerobios de alta tasa.

Para mejorar el modelo anterior surgieron los digestores de alta tasa, que se caracterizaron por el calentamiento, junto con el mezclado, espesamiento, la alimentación continua y el volumen que manejan es superior al anterior.

El calentamiento incrementa la tasa de crecimiento de los microorganismos junto con la tasa de digestión y producción de gas. Los digestores anaerobios de alta tasa operan en rangos de temperatura mesofílicos y termofílico .

El rango mesofílico es aproximadamente entre los 30 y 38 ° C y los termofílicos entre 50 y 60 ° C.

La máxima producción de gas ocurre en cualquiera de estos dos rangos de temperatura. (Water Environmental Federation, 1993)

### 1.2.3. Tipos de digestores



#### a) Digestión Convencional.

El proceso de digestión convencional se lleva a cabo en una única fase. El proceso suele tener lugar en el intervalo mesófilo de temperatura (30 a 38 °C), las funciones de digestión, espesado de lodos y formación de sobrenadante, se llevan a cabo de forma simultánea. Desde el punto de vista operativo, en un proceso de fase única, el lodo crudo se introduce en la zona en la que el lodo está siendo digerido activamente y en la que se está liberando calor externo. Conforme el gas asciende hacia la superficie, arrastra partículas de lodo y otros materiales, tales como grasas y aceites, y acaba formando una capa de espuma.

Como resultado de la digestión, el lodo se estratifica formando una capa de sobrenadante por encima del lodo digerido y experimenta un aumento de la mineralización (p.e. aumenta el % de sólidos fijos). Como consecuencia de la estratificación y de la ausencia de mezclado íntimo se utiliza menos del 50% del volumen del digester convencional de fase única. Debido a estas limitaciones, el proceso convencional tan solo se utiliza en instalaciones pequeñas.

#### b) Digestión de una fase y alta carga.

Este proceso difiere del proceso convencional de una fase en que la carga de sólidos es mucho mayor. El lodo se mezcla íntimamente mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración (no se produce la separación de espumas y sobrenadantes), y se calienta para conseguir optimizar la velocidad de digestión.

A excepción de las mayores cargas y del mejor mezclado, entre el digester primario de un proceso convencional de dos etapas, y un digester de una fase y alta carga, sólo existen algunas diferencias. Los equipos de mezclado deben tener mayor capacidad y poder alcanzar eficazmente hasta el fondo del tanque; las conducciones de gas serán algo mayores, unas pocas tomas para la extracción del lodo sustituirán a las salidas del sobrenadante y en el caso de digester de alta carga, el tanque deberá ser más profundo, si ello es posible, para favorecer el proceso de mezcla.

El bombeo del lodo al digestor se debe llevar a cabo de forma continua o temporizada en ciclos de 30 minutos a 2 horas de duración, a fin de mantener condiciones constantes en el interior de reactor. El lodo que entra desplaza el lodo digerido hasta un tanque de almacenamiento. Debido a que no se produce una separación del sobrenadante, ya que los sólidos se reducen en un 45-50 % liberándose en forma de gas, el lodo digerido suele tener una concentración del orden de la mitad de la del lodo crudo. Los digestores pueden tener cubiertas fijas o flotantes. Algunas o todas las cubiertas flotantes pueden ser, a su vez, campanas de recogida de gas, lo cual permite disponer de un volumen de almacenamiento de gas adicional. Alternativamente, el gas se puede almacenar en una campana de gas independiente o en un depósito de almacenamiento a presión.

### 1.3. Diseño del Proceso. Método empleados para su dimensionamiento.

(Metcalf, 1996)

El diseño de los procesos de digestión anaerobia del lodos se debe basar en los principios bioquímicos y microbiológicos, pero también es posible tomar en cuenta métodos empíricos como pueden ser el uso de factores de carga volumétricos.

Factores de Carga:

Uno de los métodos más comunes empleados en el dimensionamiento de digestores, consiste es determinar el volumen necesario a partir del factor de carga cuyo uso parece estar más extendido en los kilogramos de sólidos volátiles añadidos por día y por metro cúbico de capacidad del digestor.

Para su cálculo es necesario conocer:

El tiempo de retención hidráulico se refiere al tiempo que tarda una partícula con agua en pasar de un lado al otro del digestor ( de la entrada hasta la salida) y que es digerida.

Y la carga orgánica volumétrica resulta al aplicar una formula que relaciona la cantidad de sustrato con el volumen del digestor y el caudal.

El tiempo de retención hidráulico (TRH ó  $\theta$ ) se obtiene de:

$$\theta = \frac{V_r}{Q}$$

Donde

$V_r$  = es el volumen del reactor (  $m^3$  )

$Q$  = caudal del influente o gasto (  $m^3/día$  )

$\theta_s$  = tiempo medio de retención hidráulica (día)

Para el cálculo de la Carga orgánica volumétrica (C.O.V.), que es la cantidad de sustrato ( medido como kg DQO ó SSV) que se introduce por unidad de volumen ( $m^3$  reactor).

$$COV = \frac{Q S_o}{V}$$

$COV$  = kg DQO /  $m^3 \cdot d$

$Q$  = gasto (  $m^3/día$  )

$S_o$  = concentración de sustrato ( kg DQO /  $m^3$  )

En el caso de digestores convencionales, las cargas de sólidos recomendados varían entre 0.5 y 1.6 kg/d  $m^3$  de sólidos volátiles, con tiempos de retención entre 10 y 20 días.

Cuando se trabaja con cargas superiores a los 4.0 kg/dm<sup>3</sup>, el mezclado suele constituir un problema.

El grado de estabilización obtenido también se suele medir por el porcentaje de reducción de sólidos volátiles. La reducción conseguida se puede relacionar, tanto con el tiempo medio de retención celular como con el tiempo de retención hidráulico basado en el caudal de alimentación del lodo crudo.

## 1.4. Diseño de los tanques

### 1.4.1. Forma

Los tanques de digestión anaerobia pueden ser cilíndricos, rectangulares o con forma de huevo. (Metcalf, 1996)

La tipología más común es en forma de cilindro vertical de poca altura, no suelen tener diámetros inferiores a 6 m ni superiores a 30 m. La profundidad del líquido no debe ser inferior a 7.5 m y puede llegar a ser de 14 m o más

El uso de digestores rectangulares no es frecuente debido a la mayor dificultad para conseguir un mezclado uniforme del contenido del tanque.

Los tanques ovalados son de uso muy común en Europa y su implantación en Estados Unidos es muy reciente. El objetivo de los tanques de diseño ovalado es eliminar la necesidad de limpiar tanques. En la parte inferior del tanque, las paredes forman un cono de inclinación suficientemente pronunciada como para evitar la posibilidad de acumulación de arenas. Otra de las ventajas de los tanques ovalados son el mejor mezclado, el mejor control de la capa de espumas y las menores necesidades de superficies. Los digestores ovalados se pueden construir de varios materiales.

La composición volumétrica del gas generado en la digestión anaerobia del lodo de aguas residuales contiene del 65-70 % de CH<sub>4</sub>, 25-30 % de CO<sub>2</sub>, y pequeñas cantidades de N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, vapor de agua y otros gases.

#### 1.4.2. Producción de Gas.

La producción total de gas se suele estimar a partir de la reducción del porcentaje de sólidos volátiles. Los valores habituales varían entre 0,75 y 1,12 m<sup>3</sup>/kg de sólidos volátiles destruidos. La producción de gas puede fluctuar en un amplio intervalo, en función del contenido en sólidos volátiles del lodo crudo, y de la actividad biológica desarrollada en el digestor. En ocasiones, durante la puesta en marcha, se presentan producciones excesivas de gas que pueden causar la formación de espumas y escape de éstas (y de gas), por los bordes de las cubiertas flotantes del digestor.

Si, una vez alcanzadas las condiciones de funcionamiento estable, se mantuvieran las anteriores tasas de producción de gas, el operador puede tener la certeza de que el resultado será un lodo bien digerido.

La producción de gas también se puede estimar, de forma aproximada, con base en la aportación por habitante. En plantas de tratamiento primario que tratan aguas residuales domésticas de concentración media, la producción normal varía entre 15 y 22 m<sup>3</sup>/1.000 hab-d. En plantas de tratamiento secundario, la producción de gas aumenta hasta valores cercanos a 28 m<sup>3</sup>/1.000 habitantes-d.

#### 1.4.3. Utilización del gas de digestión.

Un metro cúbico de metano, a temperatura y presión normales, tiene un poder calorífico neto de 35.800 KJ. El gas de digestión suele tener un contenido del 65 % de metano, el poder calorífico del gas de digestión es de, aproximadamente, 22 400 KJ/m<sup>3</sup>. Comparativamente, el gas natural, mezcla de metano, propano y butano, tiene un poder calorífico de aproximadamente 37.300 kJ/m<sup>3</sup>

#### 1.5. Parámetros de funcionamiento

Los parámetros a analizar son las variables del control de operación de los reactores. Estos los podemos dividir en :

- Parámetros físicos: temperatura, pH, sólidos totales y volátiles.
- Parámetros químicos: alcalinidad total, producción de gas, ácidos grasos y demanda química de oxígeno (DQO).

##### 1.5.1. Definición de parámetros:

El pH, alcalinidad total, concentración de ácidos grasos volátiles, DQO y producción de gas son considerados parámetros de respuesta primarios, ya que con ellos es posible evaluar el funcionamiento del digester anaerobio y por lo tanto las condiciones bajo las cuales se esta digiriendo el lodo dentro del reactor.

a) pH: potencial de hidrógeno.

Debe de existir un rango en el cual se garantice el crecimiento de las bacterias y este es entre 6.8 y 7.4 . A pH menores existe una inhibición de bacterias formadoras de metano. La lectura del pH se efectúa con un potenciómetro.

b) Temperatura.

La temperatura se mide con un termómetro en °C, y al igual que el pH, se requiere de un rango de temperatura óptimo para el desarrollo de las bacterias. (rango mesofílico entre 33 y 37 °C, para una buena digestión del lodo residual).

c) Sólidos totales y volátiles:

Sólidos totales que son la cantidad total de sólidos que contiene el lodo y son: fijos y volátiles.

d) Sólidos volátiles, ya sea disueltos o suspendidos, son medidos como la materia orgánica que se ha volatilizado al ser incinerados los lodos a 550 °C (medidos en mg/lt).

Esta materia orgánica es la que es degradada y sirve de alimento a los microorganismos para su reproducción.

e) Alcalinidad total:

Este es un parámetro importante para el control del proceso.

Debe de ser mayor de 1 500 mg/lt para que se logre reducir el efecto de la producción excesiva de acidez en el reactor, provocada por la elevada concentración de ácidos volátiles o por el contenido de CO<sub>2</sub>.

f) Ácidos grasos volátiles:

Se producen durante la hidrólisis acetogénica (producción de ácidos grasos) que pueden bajar el pH del reactor y como consecuencia afecta la etapa metanogénica.

g) Producción de gas:

La medición del volumen del gas producido proporciona información sobre la estabilidad o inestabilidad del proceso anaerobio. Baja producción de metano indica problemas en la digestión, ya sea por exceso de ácidos volátiles o presencia de inhibidores o tóxicos que afectan a las bacterias metanogénicas.

#### h) Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es una medida de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica de un desecho por medio de un agente oxidante bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo transformando la materia orgánica en bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua., medidos en mg/lt.

#### i) Demanda biológica de oxígeno (DBO)

La demanda biológica de oxígeno (DBO), es otro parámetro importante, que en nuestro caso no se midió, por haberse medido el anterior y es la medida de oxígeno requerido para la estabilización química y biológica de la materia orgánica en un intervalo de tiempo.

Estos dos últimos miden la capacidad de biodegradación de la materia orgánica presente en los lodos residuales.

### 1.6. Descripción del proceso interno

El método convencional más recomendable para el tratamiento de los lodos y para el tratamiento de las aguas residuales de alta carga orgánica, es el de digestión anaerobia o metanogénesis.

La metanogénesis es un proceso biológico anaerobio en el cual la materia orgánica es degradada progresivamente por una comunidad bien organizada de varias poblaciones microbianas (biomasa activa), hasta metano y bióxido de carbono.

La materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular, nitratos y sulfatos es convertida a metano y  $\text{CO}_2$  por la combinación de la actividad de 5 grupos diferentes de microorganismos.

En el intervienen microorganismos facultativos y anaerobios estrictos.

Las bacterias en general no son capaces de alimentarse de materia orgánica particulada por lo que los biopolímeros son degradados.

La carga orgánica (DQO) del material inicial disminuye y el lodo remanente después del proceso es estabilizado, ya no sufre degradación biológica espontánea, lo cual

facilita su disposición final o su utilización. Además el biogás producido es un producto potencialmente importante como energético.

Dentro de los objetivos específicos de la digestión anaerobia los principales son los siguientes:

- Degradar o descomponer el contenido de materia orgánica de los lodos a un producto final "estabilizado" o humus.
- Reducir la masa y el volumen de los lodos.
- Obtener subproductos de utilidad.
- Destruir y /o controlar a los agentes causales de las enfermedades.

Las cantidades y características de los lodos a tratar deben monitorearse periódicamente. Su caracterización debe ser hecha básicamente en función de la concentración de sólidos totales y sólidos volátiles.

Este proceso se divide en tres etapas:

#### 1ª. etapa: Hidrólisis

En esta se lleva a cabo la degradación de las moléculas grandes de lípidos, carbohidratos y proteínas. Las moléculas son hidrolizadas en unidades más pequeñas, que son los ácidos grasos, monosacáridos y aminoácidos.

#### 2ª. Etapa: Fermentación:

Estas unidades más pequeñas de aminoácidos y azúcares son utilizadas por los organismos fermentadores, y los ácidos grasos superiores y alcoholes por los oxidadores anaeróbios

Los productos de estas reacciones son acetato, hidrógeno, biomasa (nuevas células de microorganismos) y productos intermedios como propionato y butirato.



### 3ª. Etapa: Metanogénesis

Estos 2 últimos son degradados hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias llamadas acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno que están en relación con las metanogénicas que utilizan el hidrógeno.

Estos dos productos, el acetato e hidrógeno son los verdaderos sustratos de las bacterias metanogénicas.

Bacterias metanogénicas hidrogenofílicas, utilizan el H<sub>2</sub> producido para reducir el CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>



Bacterias metanogénicas acetoclásticas, que transforman el acetato en CH<sub>4</sub>.

El metano (CH<sub>4</sub>) que se produce en el digestor, el 70% se debe a esta reacción.



Por lo tanto, dentro del reactor ocurren una serie de reacciones químicas, de las cuales están a cargo por los microorganismos al descomponer la materia orgánica.

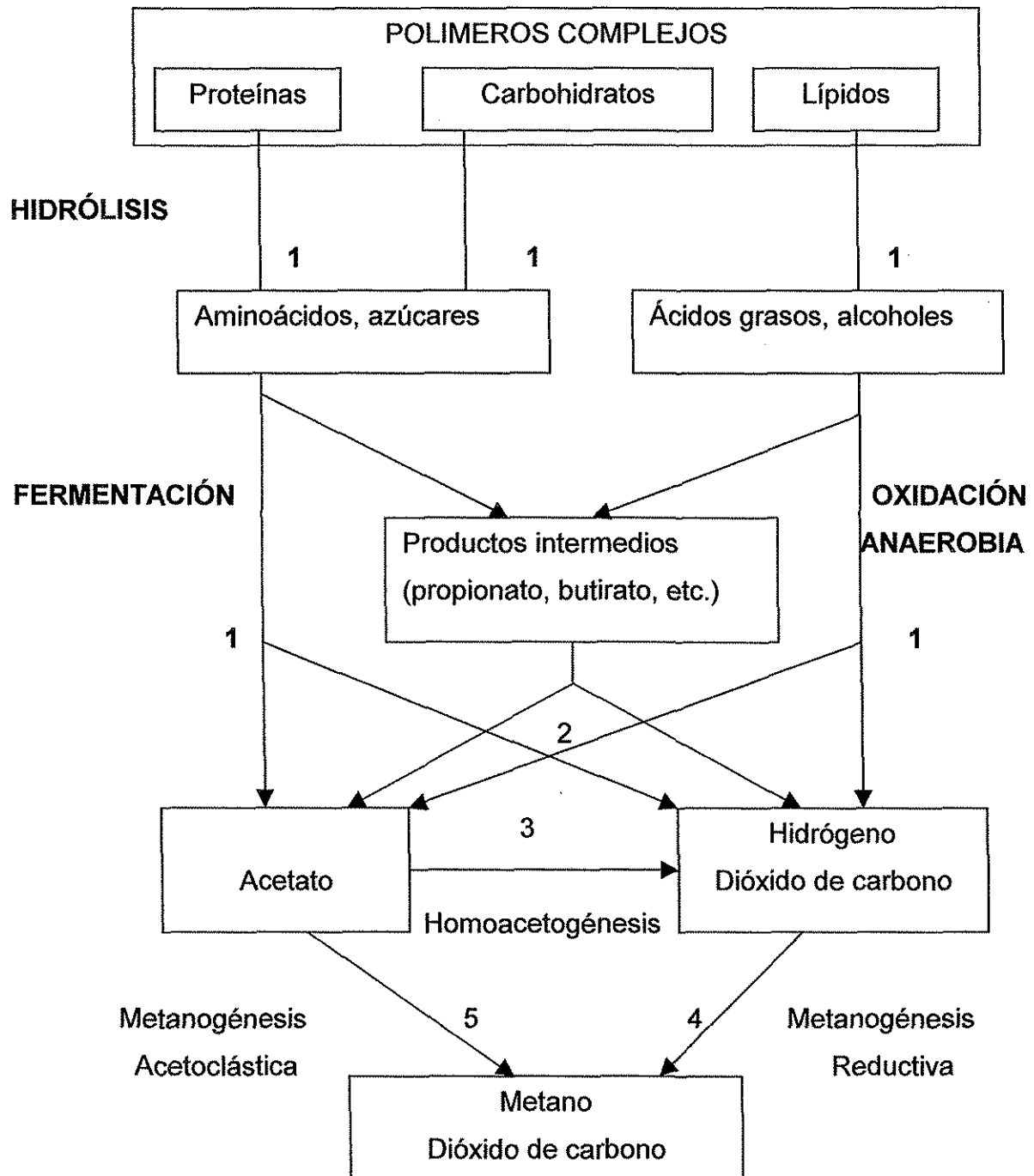
Las poblaciones de estos microorganismos están en equilibrio y producen un lodo estabilizado.

Para una mayor comprensión del proceso interno, la figura 2 representa el diagrama que representa el proceso de digestión anaerobia en sus diferentes etapas.

El número indica el grupo de bacteria involucrada:

- 1.- bacterias fermentativas
- 2.- bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno
- 3.- bacterias acetogénicas consumidoras de hidrógeno
- 4.- metanogénicas reductoras- ácido carbónico
- 5.- metanogénicas acetoclásticas.

Figura 2 Esquema de la digestión anaerobia de complejos poliméricos (adaptado de Gujer and Zehnder (1983) y Zinder (1984)).



Por lo tanto, de la digestión de los lodos se obtiene: gas metano, que es recogido por la parte superior del reactor; y los lodos ya digeridos, que tienen todavía cierta cantidad de sólidos, materia orgánica refractaria (materia que ya no se puede

descomponer), compuestos inorgánicos y microorganismos que son recolectados por la parte inferior del mismo.

Los lodos crudos presentan un olor desagradable, que al momento de ser digeridos pierden ese olor característico.

Es importante mencionar que debido a las condiciones de operación de los digestores, no es posible alcanzar una reducción al 100% de la materia orgánica debido a que queda un 20 % que ya no es posible reducir y se le conoce como material refractario, esperando que se degrade en un 80 %.

Típicamente, al incrementarse el TRS se incrementará el % de remoción de sólidos volátiles de 50 a 60% a 35 ° C. Una vez alcanzado el nivel óptimo de TRS, existe un remoción adicional mínima. Se reporta que los lodos primarios se degradan más rápidamente que los secundarios , y una mezcla de ambos se degradarán en el intervalo de los dos anteriores.

La concentración de patógenos se reducen substancialmente durante la estabilización anaerobia. Se ha visto que se remueven virus de 1 a 4 órdenes de magnitud en rangos termofílicos. Los coliformes fecales en dos órdenes ; parásitos y protozoarios normalmente no sobreviven, pero los huevos de helmintos si sobreviven aún después de la digestión termofílica. Dado que no se da una eliminación total de patógenos durante la digestión anaerobia, se han puesto restricciones adicionales que limitan el contacto humano con estos biosólidos.

Por otro lado, la calidad y cantidad de gas producida en el digestor sirve para evaluar el desempeño de él.

La producción de gas esta directamente relacionada bioquímicamente con la cantidad de sólidos volátiles destruidos y se expresa como volumen de gas por unidad de masa destruida de SV.

La tasa de producción específica de gas es diferente para cada sustancia orgánica que se encuentre en el digestor. Un digestor anaerobio típico que maneje lodos primarios y secundarios municipales deberá producir aproximadamente 0.8 a 1 m<sup>3</sup> / Kg de Sólidos volátiles removidos ( 13 a 18 ft<sup>3</sup> / lb )

La cantidad de gas producido esta en función de la temperatura, del TRS y de la carga de SV.

El metano y bióxido de carbono son los principales constituyentes del biogás, junto con elementos traza de nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno.

Un digestor en buen funcionamiento producirá de 65 a 70 % de volumen de metano y de un 30 a 35 % de bióxido de carbono. Un incremento en los niveles (%) de CO<sub>2</sub> indicará que el digestor estará fallando.

Un digestor típico produce calor entre los 20 y 25 MJ / m<sup>3</sup> ( 500 a 700 BTU / ft<sup>3</sup> ) (Water Environmental Federation, 1995)

### 1.7. Condiciones óptimas de operación

Las condiciones óptimas de funcionamiento del digestor anaerobio están en función de disminuir el volumen del lodo y el olor, (tabla 1) lo que implica, un bajo contenido de materia orgánica y una reducción de microorganismos patógenos, los cuales se reducen pero no de manera significativa.

Las condiciones ambientales y de operación de un digestor anaerobio de alta tasa, para la obtención de la máxima producción de metano son: de 30 días con una remoción del 65.5%

Una vez obtenida esta condición de operación, es que podrá definirse su disposición y su uso de acuerdo a las características que presenta el lodo.

Tabla 1: Condiciones óptimas de operación de un digestor anaerobio.

Parámetro	Óptima	Extrema
PH	6.8 –7.4	6.4 – 7.8
Alcalinidad mg/l de CaCO <sub>3</sub>	1500 – 3000	1000-5000
Temperatura mesofílica	30-35 °C	20-40 °C
Tiempo de retención Hidráulico (días)	10-15	7-30
Metano CH <sub>4</sub> (%V)	60-70	60-75
Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) ( % V)	30-35	25-40
Ácidos volátiles	< 500 mg/l	

#### 1.8. Disposición Final . (Después del tratamiento. Usos y Regulación.)

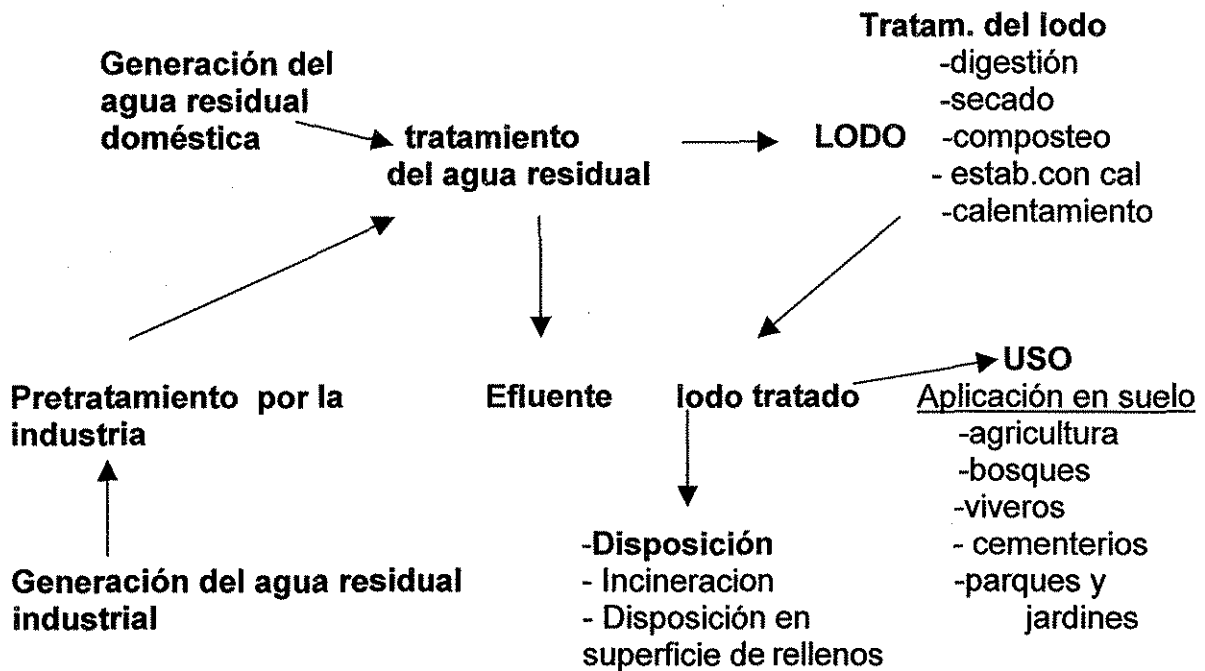
Un lodo es el residuo generado durante el tratamiento del agua residual doméstica y es usado como acondicionador del suelo y parte como fertilizante en los E.U. y en otros países.

La EPA(Environmental Protection Agency, Agencia de Protección Ambiental), es la primera agencia responsable del manejo de los lodos, y fomenta su uso benéfico.

En 1988 se encontró que el 33% del lodo generado en E.U. había sido aplicado a la tierra (EPA, 1988). Los lodos removidos de los tanques sépticos y otros sitios de tratamiento que reciben solo aguas residuales domésticas, son otra forma de lodo y de esta manera puede también ser aplicado a la tierra o dispuesto en una superficie.

La figura 3 muestra un resumen sobre el origen del agua residual, su tratamiento y disposición de los lodos.

Fig. 3 Generación, tratamiento, uso y disposición de los lodos (EPA , 1992.)



Los lodos son aplicados a los campos en la agricultura (pastizales y campos de cultivo), áreas perturbadas (revueltas, áreas minadas, sitios de contaminación), viveros, bosques, áreas de recreación (parques, campos de golf, etc.), cementerios, carreteras, terraplenes y jardines de casas.

Los lodos de tratamiento tienen nutrientes benéficos para las plantas y propiedades acondicionantes para el suelo; sin embargo, también contienen bacterias, virus, protozoarios, parásitos y otros microorganismos que pueden ocasionar enfermedades.

La aplicación en el suelo o la disposición de los lodos en una superficie crea una exposición potencial al ser humano de estos organismos , que pueden ser de contacto directo o indirecto. Para proteger la salud pública de estos organismos y de los contaminantes que algunos lodos contienen, muchos países regulan ahora el uso y la disposición de los lodos.

En general, se debe considerar la disposición final como la última opción dentro de una estrategia general de manejo de lodos y dependerá del tipo de lodo. Los sitios de disposición deberán contar con sistemas técnicos de operación y diseño sencillos, con mínimos requerimientos de operación, control, supervisión y mantenimiento.

### 1.9. Reglamentación de los lodos

En México, el manejo de los lodos residuales esta contemplada en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente ( 1º. De marzo, 1988) y en su respectivo Reglamento, en materia de residuos peligrosos (25 de nov 1988); en la Ley de Aguas Nacionales (1º. de dic.1992) y en su reglamento (12/01/94).

Actualmente se esta trabajando en el Anteproyecto de Norma correspondiente a los Biosólidos (NOM-004-Ecol.1997), por lo que para el uso y la disposición de los lodos tomamos como referencia lo dispuesto por la EPA y que están regulados bajo el apartado 40 CFR parte 503, subparte D.

En este apartado se encuentra la regulación para proteger la salud pública y el ambiente. Consiste en reducir el riesgo potencial de tener contacto con los microorganismos causantes de enfermedades (patógenos) de los lodos de alcantarilla, al ser aplicados a la tierra o puestos en un sitio de disposición.

El otro interés ambiental que tiene, además del efecto en la salud pública que es primordial, esta asociado con la aplicación de los lodos y el efecto de los patógenos sobre los animales (EPA, 1992).

La Agencia de Protección Ambiental ha definido dos tipos de lodos de acuerdo a lo anterior, cuyas características son (Environmental Regulation and Techology, 1992):

Lodo tipo A:

Puede tener contacto con la gente ya que es utilizado como tierra para jardín y para pastos, en donde debe tener un contenido menor de 1000 NMP de C.F. por gramo de sólidos totales; y menos de 3 NMP de Salmonella por cada 4 gramos de S.T.

## Lodo tipo B

Tiene un contacto indirecto con la población ya que es utilizado como fertilizante de bosques, y que por lo menos debe de permanecer un año sin que la población tenga contacto con él y cuyo NMP de C.F. no deba exceder de  $2 \times 10^6$  por gramo de S.T.

El nivel de patógenos presentes en los lodos depende de la reducción lograda por el proceso de tratamiento del agua residual y de los lodos .

Los patógenos en el agua residual están asociados básicamente con los sólidos insolubles.

En el proceso primario del tratamiento de las aguas residuales, se concentran estos sólidos en un lodo, y el lodo crudo o no tratado tiene un alto numero de patógenos al igual que el agua residual que entra.

En el proceso de tratamiento biológico del agua residual como lagunas, filtros percoladores y lodos activados pueden substancialmente reducir el número de patógenos en el agua residual (EPA,1989). Aún así, el resultado de los lodos biológicos pueden todavía contener un nivel suficiente de patógenos que son de interés para la salud pública y al ambiente.

Los organismos presentes pueden causar infecciones o enfermedades si los humanos o los animales están expuestos a los niveles suficientes de los organismos patógenos. Los niveles (llamada dosis infecciosa) varia por cada patógeno y de su huésped.

Cuando los lodos son aplicados a la tierra o puestos en un sitio de disposición, los humanos y los animales pueden estar expuestos a los patógenos directamente al tener contacto directo con los lodos de alcantarilla o indirectamente por consumo de agua o comida contaminada. por patógenos de lodos de agua residual.

Insectos, pájaros, roedores y aún los trabajadores del campo pueden contribuir a estas rutas de exposición, transportando el lodo del agua residual y a los patógenos del lodo del agua residual, fuera de su lugar (sitio).

Esta exposición puede ser por:



### Contacto directo

- contacto inadvertido con el lodo del agua residual.
- caminar a través de un área, como campo, bosque o área recreativa, en un corto tiempo después de haberse aplicado el lodo de agua residual.
- manejo de suelo y productos crudos del campo, o jardines de casa donde el lodo del agua residual ha sido aplicado.
- inhalación de microorganismos que vienen en el aire ( vía aerosoles, polvo ,etc,) durante diseminación del lodo del agua residual o por fuertes vientos, arado o suelos cultivados después de la aplicación .

### Contacto Indirecto

- Consumo de cosechas contaminadas por patógenos que crecieron en suelos regados con lodos de agua residual u otros productos de comida que han sido contaminados por contacto directos con estas cosechas..
- Consumo de leche contaminada por patógenos u otros productos alimenticios provenientes de animales de pastoreo desarrollados en pastizales o alimentados por cosechas en crecimiento y que estos campos fueron regados por lodos de agua residual.
- Ingestión de agua potable o agua de uso recreativo contaminado por corrientes cercanas a los sitios de aplicación o por la migración de organismos del lodo de agua residual dentro de los acuíferos.
- Consumo de pescado cocinado inadecuadamente o no cocido proveniente de agua contaminada por corrientes cercanas de un sitio de aplicación.
- Contacto con lodos de agua residual o patógenos transportados fuera del sitio de disposición por roedores, insectos, u otros vectores incluyendo animales de pastoreo.

El tiempo de exposición disminuye conforme pasa el tiempo. Bajo condiciones ambientales como calor, radiación solar, desecación y otros, destruyen a organismos patógenos que pueden estar presentes en el lodo del agua residual.

Los quistes de protozoarios en suelos y plantas son rápidamente muertos por factores ambientales, y la amenaza de los protozoarios en los lodos de las aguas residuales a la salud pública y a los animales es mínima.

Bacterias, virus y helmintos (particularmente huevos de helmintos, que son la parte más resistente del ciclo de vida), son de mucho interés.

Por lo tanto, la parte 503 contiene los requerimientos para la reducción de bacterias, virus y helmintos en los lodos de agua residual, pero no contiene los requerimientos para la reducción de patógenos.

Para reducir un poco el riesgo de estos lodos hay varios caminos:

- Reducir el número de patógenos en el lodo de agua residual a través del tratamiento y/o atenuación del ambiente.
- reducir la atracción de los vectores de enfermedades en los lodos de agua residual (insectos, pájaros, roedores y otros organismos vivos ) que pueden transportar patógenos.
- Restricciones a los sitios de confinamiento, que limiten el contacto animal y humano con los lodos , a través de la reducción a niveles bajos de patógenos.

La reducción en la cantidad de patógenos puede ser lograda tecnológicamente con un adecuado tratamiento del lodo, antes de su uso o disposición, a través de una atenuación ambiental.

Muchos procesos de tratamiento que están disponibles usan una variedad de aproximaciones que reducen patógenos y alteran los lodos del agua residual; de esta manera estos se vuelven medios menos efectivos para el crecimiento de las bacterias y atracción de vectores.

Por ejemplo un pH alto puede destruir completamente a las bacterias y virus, pero tienen un pequeño o nulo efecto sobre los huevos de helmintos.

La efectividad de un proceso en particular puede también variar dependiendo de las condiciones bajo las cuales operan.

La reducción de patógenos es medida a través de los análisis microbiológicos que miden la efectividad del proceso de tratamiento de los lodos.



## **ANEXO 3**

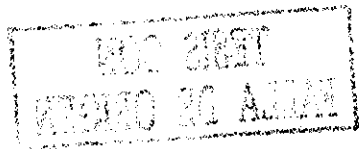


Tabla 18 Coeficientes modelo lineal

Modelo polinomial de primer orden

Etapa	Coeficientes			
	Eflue. SSV y(mm)	a1	b1	Eflue. biogas y1(gm)
1.1				
1.2				
2				
3				

Tabla 19 Etapa 1.1 Modelo lineal

Modelo lineal

TIEMPO = 20 DIAS

$y = 0.1442x + 4.6685$

$y = 1.1847x - 6.2617$

$y = 1.4127x - 10.016$

Etapa	Eflue. SSV				Eflue. biogas					
	X(m)	Y(mm)	a1	b1	Y1(gm)	a2	b2	Y2(gm)	a3	b3
1.1	9.90	4.90	0.14	4.67	2.93	1.18	-6.26	13.33	-0.22	12.8
1.2	12.20	5.86			2.67			16		
2	14.71	7.46			15.06			13.33		
3	9.68	5.71			8.00			2.67		
Promedio	10.69	7.84			7.44			13.33		
Desv. Estand.	11.21	6.64			8.53			8		
Coef. correl	16.86	6.56			12.53			5.33		

Tabla 20 Etapa 1.2 Modelo lineal

Modelo lineal

TIEMPO = 20 DIAS

$y = 0.1047x + 5.3133$

$y = -0.2195x + 12.769$

$y = 0.8609x - 4.3563$

$y = -1.5437x + 29.3761$

Etapa	Eflue. SSV				Eflue. biogas					
	X(m)	Y(mm)	a1	b1	Y1(gm)	a2	b2	Y2(gm)	a3	b3
Excel	8.07	2.04	0.105	5.31	13.33	-0.22	12.8	16		
1.1	17.54	8.73			13.33			13.33		
1.2	18.37	7.13			2.67			13.33		
2	15.68	6.83			13.33			5.33		
3	20.07	5.62			8			5.33		
Promedio	12.92	5.22			8			8		
Desv. Estand.	13.61	9.31			13.04			7.09		
Coef. correl	10.2	8.22			10.2			8.22		
	11.47	7.86			11.47			7.86		
	15.47	8.58			15.47			8.58		
	9.46	5.16			9.46			5.16		
	26.21	9.77			26.21			9.77		
	41.65	8.33			41.65			8.33		
	22.04	7.25			22.04			7.25		
	39.24	9.6			39.24			9.6		
Promedio	18.25176	7.224706	0.105	5.31	18.25176	-0.22	12.8	18.25176	-0.22	12.8
Desv. Estand.	9.558504	1.975152			9.558504			1.975152		
Coef. correl	0.5068				0.5068					



Tabla 24 Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones

Modelo lineal		Excel				Etapa 1.1	
		a	b	c.c.x/	% de error		
y (mm)		0.14	4.67	0.38	11.95		
y1(gm)		1.18	-6.26	0.69	56.46		
y = 0.1442x + 4.6685		y = 1.1847x - 6.2617					
Resul. del modelo teórico	X1	Resultados medidos		Comparación		Obtención del error	
		Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y calc Y1-Y1/Y1	%
	9.90	6.10	4.90	1.20	2.54	0.24	0.87
	12.20	6.43	5.86	0.57	5.52	0.10	2.07
	14.71	6.79	7.46	0.67	3.90	0.09	0.26
	9.68	6.06	5.71	0.35	2.79	0.06	0.35
	10.69	6.21	7.84	1.63	1.04	0.21	0.14
	11.21	6.28	6.64	0.36	1.51	0.05	0.18
	16.86	7.10	6.56	0.54	1.18	0.08	0.09
Promedio	12.18	6.42	6.42	0.76	2.64	0.12	0.56
Coef.correl			0.38				
Promedio de la poligonal de primer orden		a	b	C.C. X/	% de error	Etapa 1.1	
y (mm)		0.20	4.30	0.38	13.00		
y1(gm)		1.41	-10.01	0.69	51.74		
Y = 0.1983 X + 4.2994		Y1 = 1.4127 X - 10.016					
Resul. del modelo teórico	X1	Resultados medidos		Comparación		Obtención del error	
		Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y calc Y1-Y1/Y1	%
	9.90	6.26	4.90	1.36	1.04	0.28	0.35
	12.20	6.72	5.86	0.86	4.55	0.15	1.70
	14.71	7.22	7.46	0.24	4.30	0.03	0.29
	9.68	6.22	5.71	0.51	4.34	0.09	0.54
	10.69	6.42	7.84	1.42	2.35	0.18	0.32
	11.21	6.52	6.64	0.12	2.71	0.02	0.32
	16.86	7.64	6.56	1.08	1.27	0.17	0.10
Promedio	12.18	6.71	6.42	0.80	2.94	0.13	0.52
Coef.correl			0.38				

NOI 2001  
 168-B

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 25

Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones

Modelo lineal

Etapa 1.2

	a	b	Coef correl X/	% de error
Excel				
y1 (mm)	0.10	5.31	0.51	26.56
y2(gm)	-0.22	12.79	-0.47	54.76

$y = 0.1047x + 5.3133$

$y1 = -0.2195 X + 12.79$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
8.07	6.16	11.02	2.04	13.33	4.12	2.31	2.02	0.17	201.87	17.3%	
17.54	7.15	8.94	8.73	16.00	1.58	7.06	0.18	0.44	18.10	44.1%	
15.24	6.91	9.44	6.08	13.33	0.83	3.89	0.14	0.29	13.63	29.1%	
18.37	7.24	8.76	7.13	2.67	0.11	6.09	0.01	2.28	1.50	227.9%	
15.68	6.95	9.35	6.83	13.33	0.12	3.98	0.02	0.30	1.83	29.8%	
20.07	7.41	8.38	5.62	5.33	1.79	3.05	0.32	0.57	31.93	57.2%	
12.92	6.67	9.95	5.22	8.00	1.45	1.95	0.28	0.24	27.70	24.4%	
13.61	6.74	9.80	9.31	5.33	2.57	4.47	0.28	0.84	27.62	83.9%	
13.04	6.68	9.93	7.09	8.00	0.41	1.93	0.06	0.24	5.80	24.0%	
10.20	6.38	10.55	8.22	16.00	1.84	5.45	0.22	0.34	22.37	34.0%	
11.47	6.51	10.27	7.86	13.33	1.35	3.06	0.17	0.23	17.12	22.9%	
15.47	6.93	9.39	8.58	8.00	1.65	1.39	0.19	0.17	19.20	17.4%	
9.46	6.30	10.71	5.16	5.33	1.14	5.38	0.22	1.01	22.17	100.9%	
26.21	8.06	7.04	9.77	2.67	1.71	4.37	0.18	1.64	17.53	163.5%	
41.65	9.67	3.65	8.33	5.33	1.34	1.68	0.16	0.32	16.14	31.5%	
22.04	7.62	7.95	7.25	8.00	0.37	0.05	0.05	0.01	5.12	0.61%	
39.24	9.42	4.18	9.60	5.33	0.18	1.15	0.02	0.22	1.86	21.6%	
Promedio	18.25	7.22	8.78	7.22	8.78	1.33	3.37	0.27	0.55	26.56	54.7%
Coef correl.			0.51	-0.47							

Modelo poligonal de primer orden con promedios

Etapa 1.2

	a	b	Coef.correl X/	% de error
y1 (mm)	0.86	-4.36	0.51	67.77
y2(gm)	-1.54	29.38	-0.47	168.34

$y = 0.8609 X - 4.3563$

$y1 = -1.5437 X + 29.3761$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error	
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%
8.07	2.59	16.92	2.04	13.33	0.55	3.59	0.27	0.27	27.02	26.9%
17.54	10.74	2.30	8.73	16.00	2.01	13.70	0.23	0.86	23.07	85.6%
15.24	8.76	5.85	6.08	13.33	2.68	7.48	0.44	0.56	44.14	56.1%
18.37	11.46	1.02	7.13	2.67	4.33	1.65	0.61	0.62	60.71	61.8%
15.68	9.14	5.17	6.83	13.33	2.31	8.16	0.34	0.61	33.86	61.2%
20.07	12.92	-1.61	5.62	5.33	7.30	6.94	1.30	1.30	129.93	130.1%
12.92	6.77	9.43	5.22	8.00	1.55	1.43	0.30	0.18	29.63	17.8%
13.61	7.36	8.37	9.31	5.33	1.95	3.04	0.21	0.57	20.94	56.9%
13.04	6.87	9.25	7.09	8.00	0.22	1.25	0.03	0.16	3.11	15.5%
10.20	4.42	13.63	8.22	16.00	3.80	2.37	0.46	0.15	46.17	14.8%
11.47	5.52	11.67	7.86	13.33	2.34	1.66	0.30	0.12	29.79	12.4%
15.47	8.96	5.50	8.58	8.00	0.38	2.50	0.04	0.31	4.45	31.3%
9.46	3.79	14.77	5.16	5.33	1.37	9.44	0.27	1.77	26.59	177.1%
26.21	18.21	-11.08	9.77	2.67	8.44	13.75	0.86	5.15	86.37	515.1%
41.65	31.50	-34.92	8.33	5.33	23.17	40.25	2.78	7.55	278.15	755.1%
22.04	14.62	-4.65	7.25	8.00	7.37	12.65	1.02	1.58	101.63	158.1%
39.24	29.43	-31.20	9.60	5.33	19.83	36.53	2.07	6.85	206.51	685.1%
Promedio	18.25	11.36	7.22	8.78	5.27	9.79	0.68	1.68	67.77	168.3%
Coef Correl			0.51	-0.47						

100 21221  
MEDIO JO ALLEN

168-C

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tabla 26

Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones

Modelo lineal

Excel

Etapas 2.0

	a	b	c.c x /	% de error
y(mm)	0.08	10.54	0.11	14.45
y1(gm)	0.62	6.97	0.45	18.09

$Y = 0.08 X + 10.54$

$y1 = 0.62 X + 6.97$

X1	Res.modelo teórico		Result. medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
14.71	11.66	16.16	12.90	20.21	1.24	4.05	0.10	0.20	9.63	20.05	
13.80	11.59	15.59	12.01	13.69	0.42	1.90	0.04	0.14	3.51	13.87	
20.97	12.13	20.07	10.18	24.00	1.95	3.93	0.19	0.16	19.17	16.38	
18.73	11.96	18.67	15.00	14.85	3.04	3.82	0.20	0.26	20.25	25.72	
15.42	11.71	16.60	13.20	12.94	1.49	3.66	0.11	0.28	11.28	28.30	
13.81	11.59	15.60	11.73	16.00	0.14	0.40	0.01	0.03	1.20	2.53	
14.71	11.66	16.16	13.32	21.00	1.66	4.84	0.12	0.23	12.48	23.06	
12.90	11.52	15.03	10.73	12.86	0.79	2.17	0.07	0.17	7.37	16.85	
11.79	11.44	14.33	9.63	16.00	1.81	1.67	0.19	0.10	18.76	10.42	
16.82	11.82	17.48	8.39	14.12	3.43	3.36	0.41	0.24	40.85	23.77	
Promedio	15.37	11.71	16.57	11.71	16.57	1.60	2.98	0.14	0.18	14.45	18.09
Coef.correl			0.11	0.45							

Modelo Polinomial de primero orden (promedios)

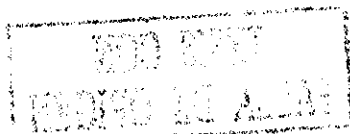
Etapas 2.0

	a	b	c.c x /	% de error
y1 (mm)	0.90	-1.28	0.11	18.29
y2(gm)	1.90	-13.91	0.45	26.19

$y = 0.90 X - 1.279$

$y1 = 1.90 X - 13.907$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
14.71	11.96	14.04	12.90	20.21	0.94	6.17	0.07	0.31	7.29	30.52	
13.80	11.14	12.31	12.01	13.69	0.87	1.38	0.07	0.10	7.24	10.06	
20.97	17.59	25.94	10.18	24.00	7.41	1.94	0.73	0.08	72.83	8.07	
18.73	15.58	21.68	15.00	14.85	0.58	6.83	0.04	0.46	3.85	45.99	
15.42	12.60	15.39	13.20	12.94	0.60	2.45	0.05	0.19	4.55	18.94	
13.81	11.15	12.33	11.73	16.00	0.58	3.67	0.05	0.23	4.94	22.93	
14.71	11.96	14.04	13.32	21.00	1.36	6.96	0.10	0.33	10.21	33.13	
12.90	10.33	10.60	10.73	12.86	0.40	2.26	0.04	0.18	3.72	17.55	
11.79	9.33	8.49	9.63	16.00	0.30	7.51	0.03	0.47	3.09	46.91	
16.82	13.86	18.05	8.39	14.12	5.47	3.93	0.65	0.28	65.18	27.84	
Promedio	15.37	12.55	15.29	11.71	16.57	1.85	4.31	0.18	0.26	18.29	26.19
Coef.correl			0.11	0.45							



168-D



Tabla 27 Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones

Modelo Lineal

Excel

	a	b	c.c y /ycal	% de error	Etapa 3.0
y1 (mm)	0.45	4.75	0.51	12.33	
y2(gm)	-0.23	20.77	-0.20	12.32	

$y = 0.4491x + 4.7464$

$y = -0.2264x + 20.77$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error	
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/%	%	%
17.69	12.69	16.71	15.12	14.63	2.43	2.08	0.16	0.14	16.06	14.23
15.38	11.65	17.24	6.76	15.89	4.89	1.35	0.72	0.09	72.39	8.51
14.09	11.07	17.54	10.33	16.55	0.74	0.99	0.07	0.06	7.20	5.97
13.16	10.66	17.75	9.46	16.94	1.20	0.81	0.13	0.05	12.65	4.79
15.10	11.53	17.31	11.22	16.94	0.31	0.37	0.03	0.02	2.74	2.16
16.06	11.96	17.09	9.89	18.00	2.07	0.91	0.21	0.05	20.92	5.08
12.35	10.29	17.94	11.80	24.00	1.51	6.06	0.13	0.25	12.77	25.26
14.67	11.33	17.40	11.30	17.63	0.03	0.23	0.00	0.01	0.31	1.28
12.36	10.30	17.93	9.64	13.09	0.66	4.84	0.07	0.37	6.82	37.01
14.18	11.11	17.52	13.39	19.64	2.28	2.12	0.17	0.11	16.99	10.81
14.65	11.33	17.41	12.52	20.33	1.19	2.92	0.10	0.14	9.54	14.37
21.34	14.33	15.87	14.50	17.28	0.17	1.41	0.01	0.08	1.17	8.13
10.66	9.53	18.32	9.41	15.91	0.12	2.41	0.01	0.15	1.32	15.18
12.13	10.19	17.99	8.64	20.57	1.55	2.58	0.18	0.13	17.99	12.56
13.92	11.00	17.58	10.82	18.99	0.18	1.41	0.02	0.07	1.64	7.44
15.15	11.55	17.29	12.26	13.88	0.71	3.41	0.06	0.25	5.79	24.60
13.55	10.83	17.66	10.90	18.00	0.07	0.34	0.01	0.02	0.63	1.88
12.56	10.39	17.89	12.62	19.86	2.23	1.97	0.18	0.10	17.66	9.93
13.60	10.85	18.46	12.02	14.77	1.17	3.69	0.10	0.25	9.70	24.99

Prom

14.35	11.19	17.52	11.19	17.52	1.24	2.10	0.12	0.12	12.33	12.32
-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	------	-------	-------

Coef.correl

0.51	-0.20
------	-------

Modelo Polinomial de primero orden (promedios)

Etapa 3.0

	a	b	c.c y /ycal	% de error
y1 (mm)	0.18	8.10		13.84
y2(gm)	-0.50	24.91		12.61

$y = 0.1828 X + 8.099$

$y1 = -0.5026 X + 24.91$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error	
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/%	%	%
17.69	11.33	16.02	15.12	14.63	3.79	1.39	0.25	0.09	25.05	9.49
15.38	10.91	17.18	6.76	15.89	4.15	1.29	0.61	0.08	61.40	8.12
14.09	10.67	17.83	10.33	16.55	0.34	1.28	0.03	0.08	3.34	7.72
13.16	10.50	18.30	9.46	16.94	1.04	1.36	0.11	0.08	11.04	8.00
15.10	10.86	17.32	11.22	16.94	0.36	0.38	0.03	0.02	3.21	2.25
16.06	11.03	16.84	9.89	18.00	1.14	1.16	0.12	0.06	11.58	6.45
12.35	10.36	18.70	11.80	24.00	1.44	5.30	0.12	0.22	12.23	22.07
14.67	10.78	17.54	11.30	17.63	0.52	0.09	0.05	0.01	4.60	0.53
12.36	10.36	18.70	9.64	13.09	0.72	5.61	0.07	0.43	7.45	42.84
14.18	10.69	17.78	13.39	19.64	2.70	1.86	0.20	0.09	20.16	9.45
14.65	10.78	17.55	12.52	20.33	1.74	2.78	0.14	0.14	13.92	13.69
21.34	12.00	14.18	14.50	17.28	2.50	3.10	0.17	0.18	17.24	17.91
10.66	10.05	19.55	9.41	15.91	0.64	3.64	0.07	0.23	6.78	22.89
12.13	10.32	18.81	8.64	20.57	1.68	1.76	0.19	0.09	19.40	8.54
13.92	10.64	17.91	10.82	18.99	0.18	1.08	0.02	0.06	1.63	5.67
15.15	10.87	17.30	12.26	13.88	1.39	3.42	0.11	0.25	11.35	24.61
13.55	10.58	18.10	10.90	18.00	0.32	0.10	0.03	0.01	2.97	0.55
12.56	10.40	18.59	12.62	19.86	2.22	1.27	0.18	0.06	17.58	6.38
13.60	10.59	18.07	12.02	14.77	1.43	3.30	0.12	0.22	11.94	22.37

Promedio

14.35	10.72	17.70	11.19	17.52	1.49	2.11	0.14	0.13	13.84	12.61
-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	------	-------	-------

Coef.correl

0.51	-0.20
------	-------

168 - E

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

168-F

Tabla 28 Modelo polinomial de segundo grado

Excel

Coeficientes

Etapa	Infl. SSV X(m)	Eflue. biogás y1(gm)	a1	b1	c1	a2	b2	c2
1.1	9.90	12.20	4.90	0.12	-2.87	23.64	0.56	-11.94
1.2	14.71	7.46	5.86	-0.05	3.46	-31.44	-0.2	8.74
2	10.69	7.84	5.71	-0.48	14.90	-101.44	-0.83	26.66
3	11.21	6.64	6.56	0.04	-1.16	18.88	-3.10	80.85

Tabla 29 Modelo cuadrático

Excel (ajuste)

TIEMPO = 20 DIAS

$y = +0.2643x^2 - 3.2893x - 0.2943$

Etapa	Infl. SSV X(m)	Eflue. biogás y1(gm)	a1	b1	c1	a2	b2	c2
1.1	9.90	12.20	4.90	0.14	-1.34	-3.80	0.26	-3.29
1.2	14.71	7.46	5.86	0.14	-1.34	-3.80	0.26	-3.29
2	10.69	7.84	5.71	0.14	-1.34	-3.80	0.26	-3.29
3	11.21	6.64	6.56	0.14	-1.34	-3.80	0.26	-3.29

Prom: 12.18, Desv. est: 2.67, Coef. corre: 0.38

Modelo Polinomial de segundo orden (promedios)

$y = 0.1158 X^2 - 2.8657 X + 23.638$

Etapa	Infl. SSV X(m)	Eflue. biogás y1(gm)	a1	b1	c1	a2	b2	c2
1.1	9.90	12.20	4.90	0.05	-0.59	6.29	1.05	-23.31
1.2	14.71	7.46	5.86	0.11	-2.45	18.70	1.40	-32.79
2	10.69	7.84	5.71	-0.07	2.03	-7.50	0.00	1.32
3	11.21	6.64	6.56	0.37	-10.45	77.05	-0.22	7.02

Prom: 12.60, Desv. est: 2.67, Coef. corre: 0.29

ETAPA 1.2

Excel

Tabla 30 Modelo cuadrático

TIEMPO = 20 DIAS

$y = -0.0115x^2 + 0.4105x + 4.7351$

$y1 = 0.0151x^2 - 0.6905x + 13.41$

$y = -0.0526x^2 + 3.458x - 31.74$

$y1 = -0.2009x^2 + 8.7412x - 66.42$

Modelo Polinomial de segundo orden (promedios)

Etapa	Infl. SSV X(m)	Eflue. biogás y1(gm)	a1	b1	c1	a2	b2	c2
1.1	8.07	17.54	2.04	-0.01	0.41	4.74	-0.02	-0.69
1.2	15.24	18.37	6.08	0.06	-0.89	5.14	0.12	-2.86
2	15.68	20.07	6.83	-0.23	7.87	-80.52	-1.27	39.15
3	20.07	12.92	5.62	-0.19	2.01	-53.03	0.56	-18.76

Promedio: 18.25, Desv. Est: 9.56, Coef. corre: 0.51

Modelo Polinomial de segundo orden (promedios)

Etapa	Infl. SSV X(m)	Eflue. biogás y1(gm)	a1	b1	c1	a2	b2	c2
1.1	8.07	17.54	2.04	0.06	-0.89	5.14	0.12	-2.86
1.2	15.24	18.37	6.08	-0.51	17.44	-141.52	-1.27	39.15
2	15.68	20.07	6.83	-0.12	4.02	-26.65	-0.52	16.95
3	20.07	12.92	5.62	-1.09	96.08	-276.63	0.56	-18.76

Promedio: 18.30, Desv. Est: 9.87, Coef. corre: 0.52

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 31 Modelo cuadrático

TIEMPO = 20 DIAS

Excel

$y = -0.16x^2 + 1.2273x + 10.734$

$y_1 = 0.0253x^2 - 0.6879x + 19.452$

Infl. SSV X(m)	Eflue. SSV y(mm)	a1	b1	c1	Eflue. biogás y1(gm)	a2	b2	c2	
14.71	12.9	-0.16	1.22	10.73	20.21	0.025	-0.69	19.45	
13.8	12.01			13.69	24				
20.97	10.18				14.85				
18.73	15				12.94				
15.42	13.2				16				
13.81	11.73				21				
14.71	13.32				12.86				
12.9	10.73				16.74				
11.79	5.8				14.12				
16.82	8.39								
Promedio	15.366	11.326	-0.16	1.22	10.73	16.641	0.025	-0.69	19.45
Coef. Correl.		0.28238				0.42457			

Promedio

Desv. Est.

Coef. correl

Modelo poligonal de segundo orden (promedios)

$y = -0.483 X^2 + 14.895 X - 101.436$

$y_1 = -0.829 X^2 + 26.677 X - 195.68$

Infl. SSV X(m)	Eflue. SSV y(mm)	a1	b1	c1	Eflue. biogás y1(gm)	a2	b2	c2	
14.71	12.90	-0.20	6.59	-41.48	20.21	-0.91	33.25	-270.90	
13.80	12.01	-0.24	8.20	-54.81	13.69	0.44	-14.03	122.56	
18.73	15.00	-0.08	3.11	-16.86	14.85	0.50	-16.62	149.49	
15.42	13.20	-1.20	36.06	-256.91	12.94	-10.50	305.08	-2194.08	
13.81	11.73	0.37	-8.76	62.28	16.00	1.16	-27.61	175.53	
14.71	13.32	-1.03	29.90	-203.37	21.00	2.74	-71.08	474.26	
12.90	10.73	-1.00	29.17	-198.91	12.86	0.76	-22.23	173.36	
11.79	5.80				16.74				
16.82	8.39				14.12				
Promedio	14.74	11.45	-0.48	14.90	-101.44	15.82	-0.83	26.88	-195.68
Desv Est.	2.08	2.82	0.59	16.78	118.17	3.01	4.40	126.47	907.61
Coef. correl		0.56				-0.10			

Tabla 33 Desviación Estandar

Etapa	Infl. SSV X(m)	Eflue. SSV y(mm)	a1	b1	c1	Eflue. biogás y1(gm)	a2	b2	c2
1.1	2.67	1.07	0.19	5.38	37.18	4.56	0.79	19.14	111.43
1.2	9.87	2.00	0.49	13.73	98.44	4.23	0.68	33.24	340.41
2	2.08	2.82	0.59	16.78	118.17	3.01	4.40	126.47	907.61

Tabla 32 Modelo Cuadrático

TIEMPO = 20 DIAS

Excel

$y = 0.0029x^2 - 0.005x + 10.803$

$y = -0.0598x^2 + 1.0569x + 13.503$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Infl. SSV X(m)	Eflue. SSV y(mm)	a	b	c	Eflue. biogás y1(gm)	a	b	c
17.69	15.12	0.003	-0.005	10.80	14.63	-0.06	1.06	13.50
15.38	6.76				15.89			
14.09	10.33				16.55			
13.16	9.46				16.94			
15.10	11.22				16.94			
16.06	9.89				18.00			
14.67	11.30				17.63			
12.36	9.64				13.09			
14.18	13.39				19.64			
14.65	12.52				20.33			
21.34	14.50				17.28			
10.66	9.41				15.91			
12.13	8.64				20.57			
13.92	10.82				18.99			
15.15	12.26				13.88			
13.55	10.90				18.00			
13.74	11.46				9.00			
13.60	12.02				14.77			
Promedio	14.52	11.09	0.003	-0.005	10.80	-0.06	1.06	13.50
Desv. Est.	2.31	2.06			2.83			
Coef. correl.		0.59			0.03			

Modelo poligonal de segundo orden (promedios)

$y = 0.044x^2 - 1.157x + 18.877$

$y_1 = -3.086 X^2 + 80.85X - 508.30$

Infl. SSV X(m)	Eflue. SSV y(mm)	a1	b1	c1	Eflue. biogás y1(gm)	a2	b2	c2	
17.69	15.12	1.77	-55.05	-433.76	14.63	-0.01	-0.23	21.72	
15.38	6.76	-1.67	46.39	-312.14	15.89	-0.04	0.71	14.75	
14.09	10.33	-0.03	-1.70	-8.04	16.55	0.42	-11.73	99.45	
13.16	9.46	0.82	-23.66	-179.76	16.94	2.44	-70.93	527.82	
15.10	11.22	-0.32	8.48	-44.63	16.94	0.99	-29.73	240.25	
16.06	9.89	-0.22	5.60	-24.55	18.00	0.81	-24.68	204.99	
14.67	11.30	-2.74	74.74	-495.78	17.63	-3.33	92.08	-615.68	
12.36	9.64	-1.71	47.39	-315.19	13.09	-0.93	28.29	-194.47	
14.18	13.39	-1.71	47.39	-315.19	19.64	-3.00	79.98	-510.72	
14.65	12.52	-0.04	-1.85	-5.39	20.33	-0.14	4.61	-17.28	
21.34	14.50	0.11	-3.00	29.04	17.28	-0.33	10.70	-60.59	
10.66	9.41	0.53	-12.70	84.08	15.91	-1.24	31.50	-178.63	
12.13	8.64	-0.02	1.61	-8.65	20.57	-1.08	27.25	-151.12	
13.92	10.82	0.87	-24.03	177.33	18.99	-4.27	119.94	-823.43	
15.15	12.26	1.00	-27.76	204.06	13.88	-0.27	5.14	-2.29	
13.55	10.90	4.05	-107.47	723.57	18.00	-39.55	1030.78	-6687.68	
13.74	11.46				9.00				
13.60	12.02				14.77				
Promedio	14.52	11.09	0.04	-1.16	18.88	-3.10	80.85	-508.31	
Desv. Est.	2.31	2.06	1.60	43.95	301.55	2.83	9.87	257.75	1681.16
Coef. correl.		0.59			-0.04				

168-6

Tabla 34 Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones  
Modelo Poligonal de Segundo Orden

Excel

Etapa 1.1

	a	b	c	C.C. X/	% error
y1 (mm)	-0.136	1.337	3.8	0.38	287.68
y2(gm)	-0.264	3.289	0.294	0.69	226.45

$$y = -0.1362 + 1.3367x + 3.8014$$

$$y = -0.2643x^2 + 3.2893x + 0.2943$$

	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
X1											
9.90	3.69	6.95	4.90	2.93	1.21	4.02	0.25	1.37	24.78	137.35	
12.20	-12.04	-8.46	5.86	2.67	17.90	11.13	3.05	4.17	305.38	416.86	
14.71	-25.88	-25.63	7.46	15.06	33.34	40.69	4.47	2.70	446.96	270.20	
9.68	-1.85	3.37	5.71	8.00	7.56	4.63	1.32	0.58	132.32	57.86	
10.69	-5.48	-0.72	7.84	7.44	13.32	8.16	1.70	1.10	169.93	109.68	
11.21	-7.59	-3.17	6.64	8.53	14.23	11.70	2.14	1.37	214.28	137.11	
16.86	-40.68	-44.62	6.56	12.53	47.24	57.15	7.20	4.56	720.11	456.09	
Promedio	12.18	-12.83	-10.32	6.42	8.17	19.26	19.64	2.88	2.26	287.68	226.45
Coef.correl				0.38	0.69						

Cambio de signo a ambas ecuaciones y su comparación

Excel

Etapa 1.1

	a	b	c	C.C. X/	% error
y1 (mm)	0.136	-1.337	-3.8	0.38	115.38
y2(gm)	0.264	-3.289	-0.294	0.69	155.03

$$y = +0.1362x^2 - 1.3367x - 3.8014$$

$$y = +0.2643x^2 - 3.2893x - 0.2943$$

	Infl. SSV	Eflue. SSV		Eflue. Gas met.	
X(m)	y(mm)	calc y	y1(gm)	calc y1	
9.90	4.90	-3.69	2.93	-6.95	
12.20	5.86	0.16	2.67	-1.09	
14.71	7.46	6.01	15.06	8.51	
9.68	5.71	-3.98	8.00	-7.37	
10.69	7.84	-2.53	7.44	-5.25	
11.21	6.64	-1.67	8.53	-3.95	
16.86	6.56	12.38	12.53	19.38	
Prom	12.18	6.42	0.96	8.17	0.47
Coef.correl		0.38		0.69	

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
X1											
9.90	-3.69	-6.95	4.90	2.93	8.59	9.88	1.75	3.37	175.22	337.35	
12.20	0.16	-1.09	5.86	2.67	5.70	3.76	0.97	1.41	97.22	140.65	
14.71	6.01	8.51	7.46	15.06	1.45	6.55	0.19	0.43	19.47	43.49	
9.68	-3.98	-7.37	5.71	8.00	9.69	15.37	1.70	1.92	169.67	192.11	
10.69	-2.53	-5.25	7.84	7.44	10.37	12.69	1.32	1.71	132.22	170.61	
11.21	-1.67	-3.95	6.64	8.53	8.31	12.48	1.25	1.46	125.16	146.36	
16.86	12.38	19.38	6.56	12.53	5.82	6.85	0.89	0.55	88.69	54.65	
Promedio	12.18	0.96	0.47	6.42	8.17	7.13	9.65	1.15	1.55	115.38	155.03
Coef.correl				0.38	0.69						

Modelo poligonal de 2o.orden

Etapa 1.1

	a	b	c	C.C. X/	% error
y1 (mm)	0.12	-2.87	23.64	0.37	17.31
y2(gm)	0.56	-11.94	69.46	0.69	64.91

$$y = 0.1158x^2 - 2.8657x + 23.638$$

$$y1 = 0.5575x^2 - 11.939x + 69.46$$

	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
X1											
9.90	6.62	5.90	4.90	2.93	1.72	2.97	0.35	1.02	35.04	101.52	
12.20	5.91	6.78	5.86	2.67	0.05	4.11	0.01	1.54	0.89	154.03	
14.71	6.54	14.47	7.46	15.06	0.92	0.59	0.12	0.04	12.32	3.91	
9.68	6.75	6.13	5.71	8.00	1.04	1.87	0.18	0.23	18.19	23.38	
10.69	6.24	5.54	7.84	7.44	1.60	1.90	0.20	0.26	20.45	25.52	
11.21	6.07	5.68	6.64	8.53	0.57	2.85	0.09	0.33	8.65	33.39	
16.86	8.24	26.64	6.56	12.53	1.68	14.11	0.26	1.13	25.60	112.64	
Promedio	12.18	6.62	10.16	6.42	8.17	1.08	4.06	0.17	0.65	17.31	64.91
Coef.correl				0.376	0.694						

168-H

Tabla 35 Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones  
Modelo Poligonal de Segundo Orden

Etapa 1.2  
Excel

	a	b	c	C.C. X /	% error
y1 (mm)	-0.01	0.41	4.73	0.51	41.53
y2(gm)	0.02	-0.69	13.41	-0.47	51.43

$$y = -0.0115x^2 + 0.4105x + 4.7351$$

$$y1 = 0.0151x^2 - 0.6905x + 13.41$$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error	
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	alc Y1-Y1/Y	%	%
8.07	7.30	8.82	2.04	13.33	5.26	4.51	2.58	0.34	257.79	33.83
17.54	8.40	5.94	8.73	16.00	0.33	10.06	0.04	0.63	3.81	62.85
15.24	8.32	6.39	6.08	13.33	2.24	6.94	0.37	0.52	36.84	52.03
18.37	8.40	5.82	7.13	2.67	1.27	3.15	0.18	1.18	17.75	118.02
15.68	8.34	6.30	6.83	13.33	1.51	7.03	0.22	0.53	22.17	52.77
20.07	8.34	5.63	5.62	5.33	2.72	0.30	0.48	0.06	48.43	5.70
12.92	8.12	7.01	5.22	8.00	2.90	0.99	0.56	0.12	55.54	12.38
13.61	8.19	6.81	9.31	5.33	1.12	1.48	0.12	0.28	12.01	27.75
13.04	8.13	6.97	7.09	8.00	1.04	1.03	0.15	0.13	14.70	12.83
10.20	7.73	7.94	8.22	16.00	0.49	8.06	0.06	0.50	6.01	50.39
11.47	7.93	7.48	7.86	13.33	0.07	5.85	0.01	0.44	0.90	43.91
15.47	8.33	6.34	8.58	8.00	0.25	1.66	0.03	0.21	2.87	20.73
9.46	7.59	8.23	5.16	5.33	2.43	2.90	0.47	0.54	47.08	54.39
26.21	7.59	5.69	9.77	2.67	2.18	3.02	0.22	1.13	22.27	112.93
41.65	1.88	10.84	8.33	5.33	6.45	5.51	0.77	1.03	77.39	103.47
22.04	8.20	5.53	7.25	8.00	0.95	2.47	0.13	0.31	13.05	30.92
39.24	3.14	9.57	9.60	5.33	6.46	4.24	0.67	0.79	67.34	79.46
Promedio	7.41	7.14	7.22	8.78	2.22	4.07	0.42	0.51	41.53	51.43
Desv. Estan.	1.89	1.51	1.98	4.50	2.04	2.80	0.60	0.35	60.50	34.68
Coef. Correl.			0.51	-0.47						

Modelo poligonal de 2o orden

Etapa		a	b	c	CC. X /	% error
1.2	y1 (mm)	-0.05	3.46	-31.44	0.52	118.66
	y2(gm)	-0.20	8.74	-66.42	-0.50	324.01

$$y = -0.0526X^2 + 3.458X - 31.44$$

$$y1 = -0.2009X^2 + 8.7412X - 66.42$$

X1	Resul. del modelo teórico		Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	alc Y1-Y1/Y	%	%	
8.07	-6.96	-8.96	2.04	13.33	9.00	22.29	4.41	1.67	441.15	167.24	
15.24	9.04	20.13	6.08	13.33	2.96	6.80	0.49	0.51	48.74	51.03	
18.37	14.33	26.36	7.13	2.67	7.20	23.69	1.01	8.87	101.03	887.16	
15.68	9.85	21.25	6.83	13.33	3.02	7.92	0.44	0.59	44.20	59.38	
20.07	16.77	28.09	5.62	5.33	11.15	22.76	1.98	4.27	198.48	426.99	
12.92	4.46	12.98	5.22	8.00	0.76	4.98	0.15	0.62	14.62	62.23	
13.61	5.88	15.33	9.31	5.33	3.43	10.00	0.37	1.88	36.84	187.65	
13.04	4.71	13.40	7.09	8.00	2.38	5.40	0.34	0.68	33.59	67.52	
10.20	-1.64	1.84	8.22	16.00	9.86	14.16	1.20	0.89	119.96	88.52	
11.47	1.30	7.41	7.86	13.33	6.56	5.92	0.83	0.44	83.42	44.42	
15.47	9.47	20.72	8.58	8.00	0.89	12.72	0.10	1.59	10.34	159.05	
9.46	-3.43	-1.71	5.16	5.33	8.59	7.04	1.67	1.32	166.56	132.06	
26.21	23.06	24.67	9.77	2.67	13.29	22.00	1.36	8.24	136.03	823.99	
41.65	21.34	-50.86	8.33	5.33	13.01	56.19	1.56	10.54	156.17	1054.28	
22.04	19.22	28.64	7.25	8.00	11.97	20.64	1.65	2.58	165.15	258.03	
39.24	23.26	-32.76	9.60	5.33	13.66	38.09	1.42	7.15	142.29	714.72	
Promedio	9.42	7.91	7.13	8.33	7.36	17.54	1.19	3.24	118.66	324.02	
Desv. Estan.	9.87	9.58	22.48	2.00	4.23	4.60	13.86	1.05	3.45	105.06	345.23
Coef. correl.			0.52	-0.50							

168 - I

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 36 Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones  
Modelo Poligonal de Segundo Orden

Excel	a	b	c	CC X/	% error	Etapa 2 0					
y1 (mm)	-0.16	1.23	10.73	0.11	201.62						
y2(gm)	0.03	-0.69	19.45	0.42	15.20						
$y = -0.16x^2 + 1.2273x + 10.734$						$y1 = 0.0253x^2 - 0.6879x + 19.452$					
Resul. del modelo teórico			Resultados medidos		Comparación		Obtención del error			Obtención del error	
X1	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
14.71	-7.95	14.81	12.90	20.21	20.85	5.40	1.62	0.27	161.63	26.73	
13.80	-4.71	14.78	12.01	13.69	16.72	1.09	1.39	0.08	139.21	7.94	
20.97	-37.43	16.15	10.18	24.00	47.61	7.85	4.68	0.33	467.65	32.70	
18.73	-25.44	15.44	15.00	14.85	40.44	0.59	2.70	0.04	269.59	3.99	
15.42	-10.66	14.86	13.20	12.94	23.86	1.92	1.81	0.15	180.78	14.84	
13.81	-4.74	14.78	11.73	16.00	16.47	1.22	1.40	0.08	140.44	7.64	
14.71	-7.95	14.81	13.32	21.00	21.27	6.19	1.60	0.29	159.69	29.49	
12.90	-1.76	14.79	10.73	12.86	12.49	1.93	1.16	0.15	116.44	14.99	
11.79	1.51	14.86	9.63	16.74	8.12	1.88	0.84	0.11	84.31	11.24	
16.82	-16.48	15.04	8.39	14.12	24.87	0.92	2.96	0.07	296.48	6.51	
Promedio	15.37	-11.56	15.03	11.71	16.64	23.27	2.90	2.02	0.16	201.62	15.61
Coef. correl				0.11	0.42						

Excel	a	b	c	CC X/	% error	Etapa 2 0					
y1 (mm)	0.16	-1.23	-10.73	0.11	271.20						
y2(gm)	0.03	-0.69	19.45	0.42	15.61						
$y = 0.16x^2 - 1.2273x - 10.734$						$y1 = 0.0253x^2 - 0.6879x + 19.452$					
Resul. del modelo teórico			Resultados medidos		Comparación		Obtención del error			Obtención del error	
X1	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
14.71	37.37	14.81	12.90	20.21	24.47	5.40	1.90	0.27	189.69	26.73	
13.80	32.31	14.78	12.01	13.69	20.30	1.09	1.69	0.08	169.02	7.94	
20.97	79.37	16.15	10.18	24.00	69.19	7.85	6.80	0.33	679.64	32.70	
18.73	62.90	15.44	15.00	14.85	47.90	0.59	3.19	0.04	319.33	3.99	
15.42	41.50	14.86	13.20	12.94	28.30	1.92	2.14	0.15	214.42	14.84	
13.81	32.36	14.78	11.73	16.00	20.63	1.22	1.76	0.08	175.90	7.64	
14.71	37.37	14.81	13.32	21.00	24.05	6.19	1.81	0.29	180.56	29.49	
12.90	27.56	14.79	10.73	12.86	16.83	1.93	1.57	0.15	156.89	14.99	
11.79	22.07	14.86	9.63	16.74	12.44	1.88	1.29	0.11	129.17	11.24	
16.82	50.12	15.04	8.39	14.12	41.73	0.92	4.97	0.07	497.43	6.51	
Promedio	15.37	42.29	15.03	11.71	16.64	30.58	2.90	2.71	0.16	271.20	15.61
Coef. correl				0.11	0.42						

Modelo poligonal de 2o orden						Etapa 2 0					
	a	b	c								
y1 (mm)	-0.48	14.89	-101.44	14.92							
y2(gm)	-0.83	26.68	-195.68	25.36							
$y = -0.483 X^2 + 14.895 X - 101.436$						$y1 = -0.829 X^2 + 26.677 X - 195.68$					
Resul. del modelo teórico			Resultados medidos		Comparación		Obtención del error			Obtención del error	
X1	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y1	%	%	
14.71	13.16	17.36	12.90	20.21	0.26	2.85	0.02	0.14	1.98	14.12	
13.80	12.13	14.59	12.01	13.69	0.12	0.90	0.01	0.07	1.02	6.56	
18.73	8.10	13.16	15.00	14.85	6.90	1.69	0.46	0.11	45.97	11.41	
15.42	13.40	18.56	13.20	12.94	0.20	5.62	0.02	0.43	1.51	43.45	
13.81	12.15	14.63	11.73	16.00	0.42	1.37	0.04	0.09	3.56	8.59	
14.71	13.16	17.36	13.32	21.00	0.16	3.64	0.01	0.17	1.23	17.35	
12.90	10.33	10.50	10.73	12.86	0.40	2.36	0.04	0.18	3.70	18.36	
11.79	7.04	3.61	9.63	16.00	2.59	12.39	0.27	0.77	26.93	77.45	
16.82	12.45	18.49	8.39	14.12	4.06	4.37	0.48	0.31	48.41	30.97	
Promedio	14.74	11.32	14.25	11.88	15.74	1.68	3.91	0.15	0.25	14.92	25.36
Coef. Correl.				0.44	-0.06						

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

168 - J

Tabla 37 Valores promedios de los coeficientes y sus predicciones  
Modelo Poligonal de Segundo Orden

Excel

	a	b	c	CC X /	% error	Etapa 3					
y1 (mm)	0.003	-0.005	10.80	0.56	16.66						
y2(gm)	-0.06	1.06	13.50	-0.09	18.78						
$y = 0.0029x^2 - 0.005x + 10.803$						$y = -0.0598x^2 + 1.0589x + 13.503$					
Result del modelo teórico			Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
X1	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y	%	%	
17.69	11.62	13.52	15.12	14.63	3.50	1.11	0.23	0.08	23.13	7.58	
15.38	11.41	15.64	6.76	15.89	4.65	0.25	0.69	0.02	68.82	1.55	
14.09	11.31	16.55	10.33	16.55	0.98	0.00	0.09	0.00	9.47	0.01	
13.16	11.24	17.08	9.46	16.94	1.78	0.14	0.19	0.01	18.81	0.84	
15.10	11.39	15.86	11.22	16.94	0.17	1.08	0.02	0.06	1.50	6.39	
16.06	11.47	15.09	9.89	18.00	1.58	2.91	0.16	0.16	15.98	16.19	
12.35	11.35	16.17	11.80	24.00	0.45	7.83	0.04	0.33	3.78	32.64	
14.67	11.18	17.46	11.30	17.63	0.12	0.17	0.01	0.01	1.02	0.99	
12.36	11.32	16.49	9.64	13.09	1.68	3.40	0.17	0.26	17.38	26.01	
14.18	11.35	16.18	13.39	19.64	2.04	3.46	0.15	0.18	15.22	17.61	
14.65	12.02	8.87	12.52	20.33	0.50	11.46	0.04	0.56	4.02	56.38	
21.34	11.08	18.00	14.50	17.28	3.42	0.72	0.24	0.04	23.59	4.14	
10.66	11.17	17.55	9.41	15.91	1.76	1.64	0.19	0.10	18.69	10.30	
12.13	11.30	16.66	8.64	20.57	2.66	3.91	0.31	0.19	30.73	19.03	
13.92	11.39	15.82	10.82	18.99	0.57	3.17	0.05	0.17	5.29	16.69	
15.15	11.27	16.87	12.26	13.88	0.99	2.99	0.08	0.22	8.09	21.55	
13.55	11.28	16.76	10.90	18.00	0.38	1.24	0.04	0.07	3.50	6.87	
13.74	11.27	16.84	11.46	9.00	0.19	7.84	0.02	0.87	1.65	87.15	
13.60	6.51	18.46	12.02	14.77	5.51	3.69	0.46	0.25	45.81	24.99	
Promedio	14.41	11.10	16.10	11.13	16.95	1.73	3.00	0.17	0.19	16.66	18.78
Coef.correl			0.56	-0.09							

modelo poligonal de 2o.orden

	a	b	c	CC X /	%error	Etapa 3					
y1 (mm)	0.044	-1.16	18.87	14.33	14.32						
y2(gm)	-3.09	80.85	-508.3	132.43	132.43						
$y = 0.044 x^2 - 1.157 X + 18.877$						$y1 = -3.096 X^2 + 80.85X - 508.30$					
Result. del modelo teórico			Resultados medidos		Comparación		Obtención del error		Obtención del error		
X1	calcY	calc. Y1	Y	Y1	calcY- Y	calc Y1-Y1	calcY- Y/y	calc Y1-Y1/Y	%	%	
17.69	12.18	-46.91	15.12	14.63	2.94	61.54	0.19	4.21	19.45	420.67	
15.38	11.49	2.83	6.76	15.89	4.73	13.06	0.70	0.82	69.97	82.18	
14.09	11.31	16.23	10.33	16.55	0.98	0.32	0.09	0.02	9.49	1.91	
13.16	11.27	19.50	9.46	16.94	1.81	2.56	0.19	0.15	19.14	15.13	
15.10	11.44	6.62	11.22	16.94	0.22	10.32	0.02	0.61	1.95	60.94	
16.06	11.64	-8.38	9.89	18.00	1.75	26.38	0.18	1.47	17.74	146.56	
14.67	11.37	11.48	11.30	17.63	0.07	6.15	0.01	0.35	0.65	34.87	
12.36	11.30	18.03	9.64	13.09	1.66	4.94	0.17	0.38	17.20	37.75	
14.18	11.32	15.63	13.39	19.64	2.07	4.01	0.15	0.20	15.47	20.40	
14.65	11.37	11.68	12.52	20.33	1.15	8.65	0.09	0.43	9.18	42.54	
21.34	14.22	-192.87	14.50	17.28	0.28	210.15	0.02	12.16	1.90	1216.12	
10.66	11.54	1.75	9.41	15.91	2.13	14.16	0.23	0.89	22.67	89.03	
12.13	11.32	16.87	8.64	20.57	2.68	3.70	0.31	0.18	30.98	17.96	
13.92	11.30	17.23	10.82	18.99	0.48	1.76	0.04	0.09	4.41	9.26	
15.15	11.45	5.98	12.26	13.88	0.81	7.90	0.07	0.57	6.63	56.95	
13.55	11.28	18.78	10.90	18.00	0.38	0.78	0.03	0.04	3.47	4.36	
13.74	11.29	18.09	11.46	9.00	0.17	9.09	0.02	1.01	1.51	101.03	
13.60	11.28	18.62	12.02	14.77	0.74	3.85	0.06	0.26	6.16	26.09	
Promedio	14.52	11.58	-2.71	11.09	16.56	1.39	21.63	0.14	1.32	14.33	132.43
Coef.correl			0.59	0.03							

NOO 21827  
MAR 20 1994

168-K

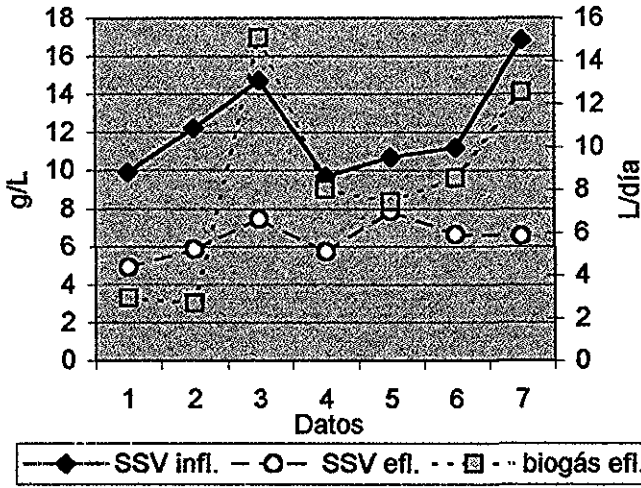
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **ANEXO 4**

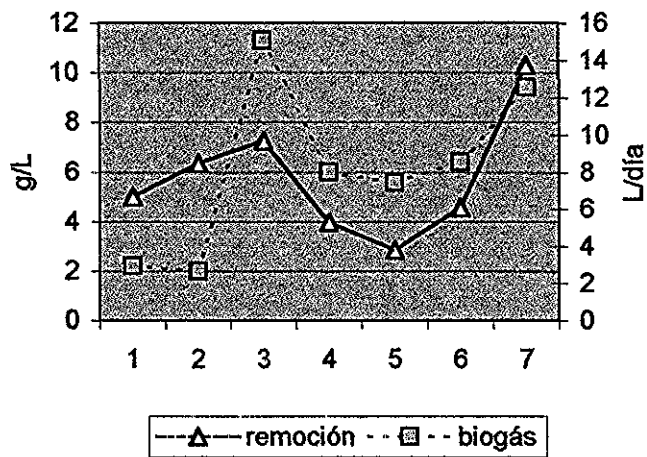
Gráfica 1: Etapa 1.1

Valores obtenidos experimentalmente



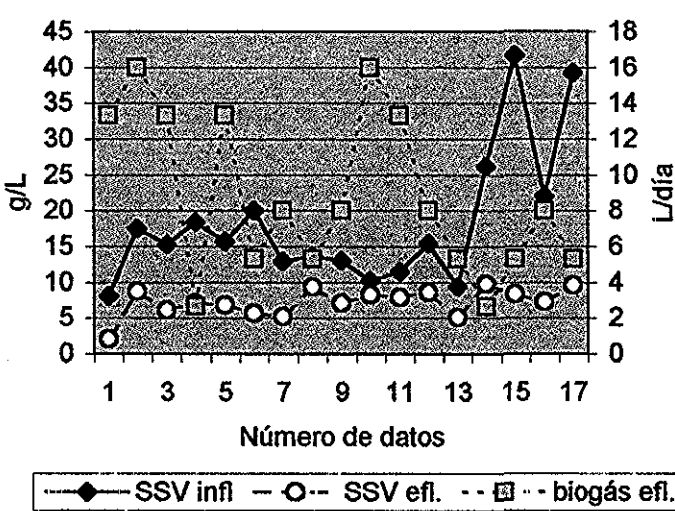
Gráfica 2 : Etapa 1.1

Remoción contra producción de biogás



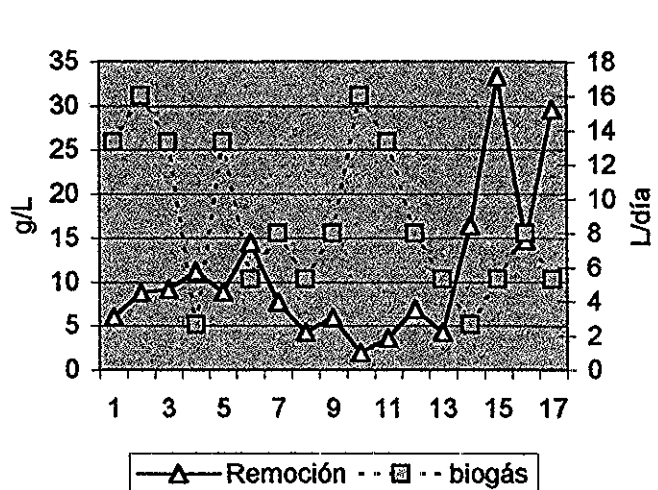
Gráfica 3: Etapa 1.2

Valores obtenidos experimentalmente



Gráfica 4: Etapa 1.2

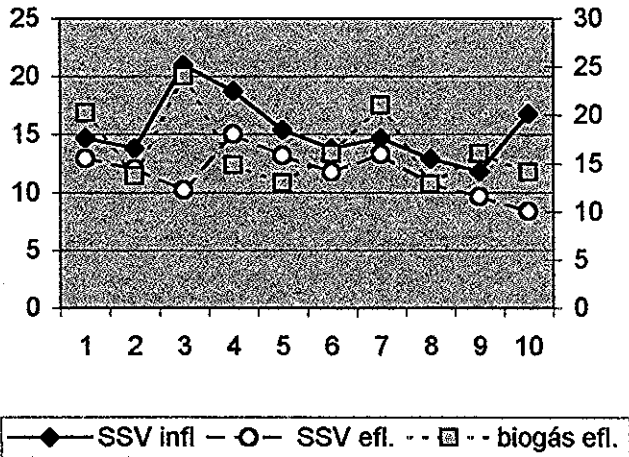
Remoción contra producción de biogás



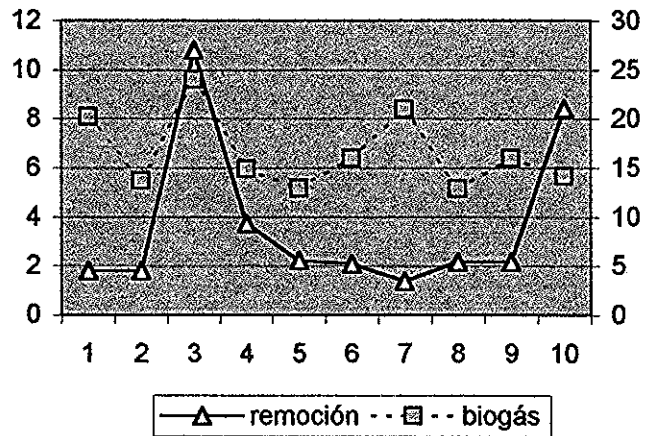
NOO ZIENT  
MEDANO ST ALBERT

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

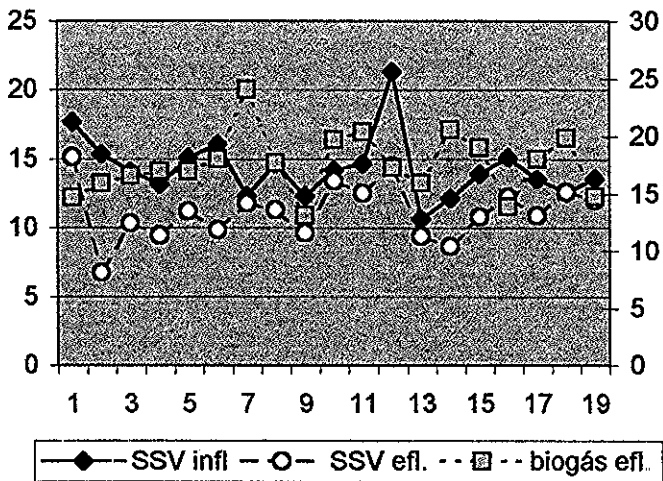
Gráfica 5 : Etapa 2  
Valores obtenidos experimentalmente



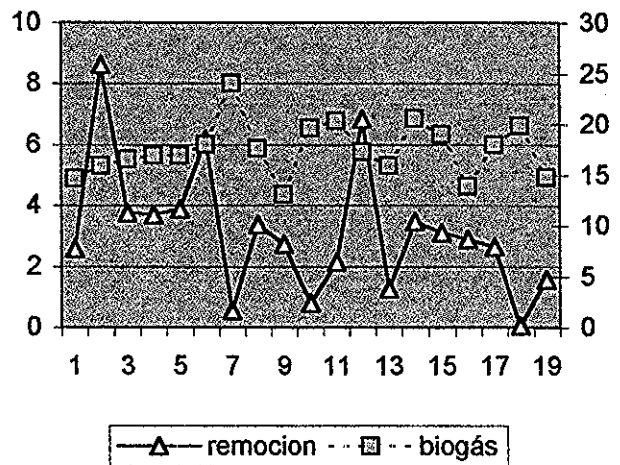
Gráfica 6 : Etapa 2  
Remoción contra producción de biogás



Gráfica 7:Etapa 3  
Valores obtenidos experimentalmente



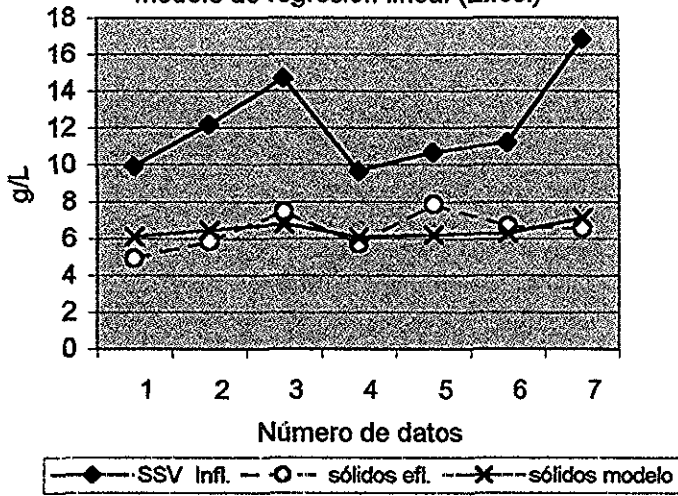
Gráfica 8: Etapa 3  
Remoción contra producción de biogás



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

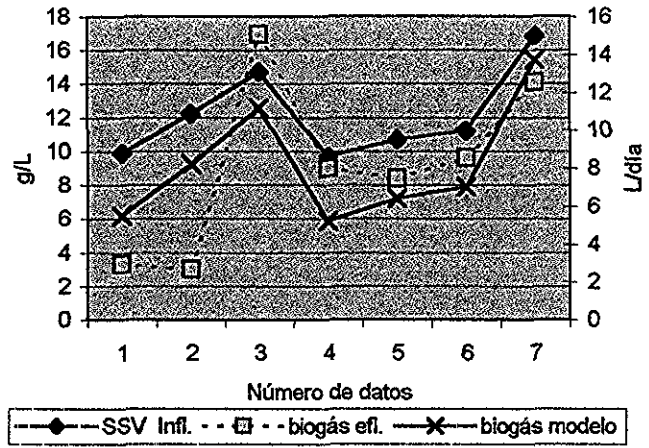
Gráfica 9: Etapa 1.1

Comparación de datos obtenidos aplicando el modelo de regresión lineal (Excel)



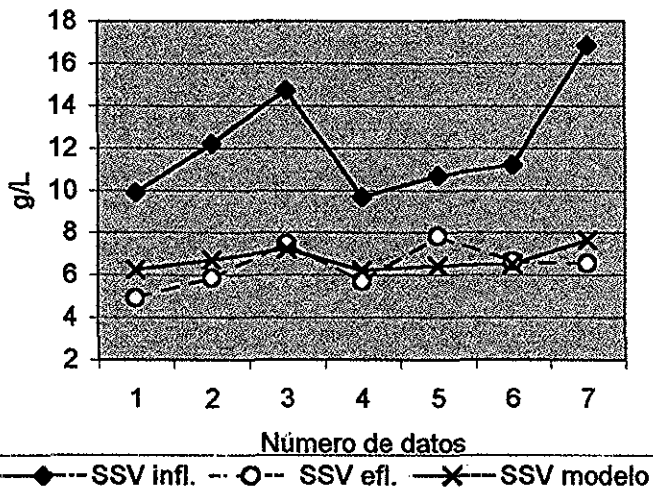
Gráfica 10: Etapa 1.1

Comparación de datos obtenidos aplicando el modelo de regresión lineal (Excel)



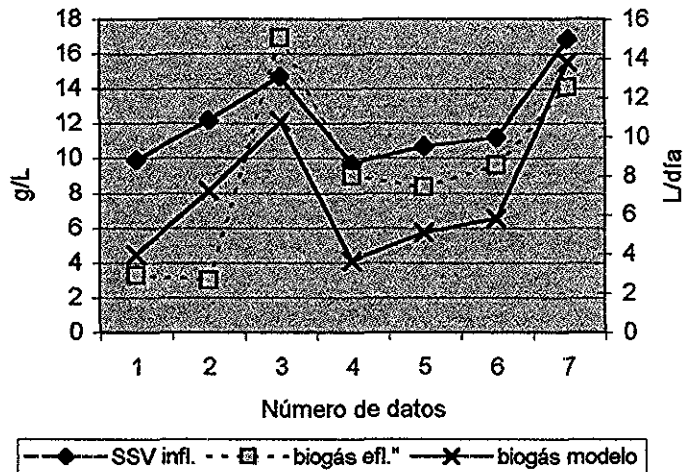
Gráfica 11: Etapa 1.1

Comparación de resultados aplicando la ecuación del modelo lineal (promedios)



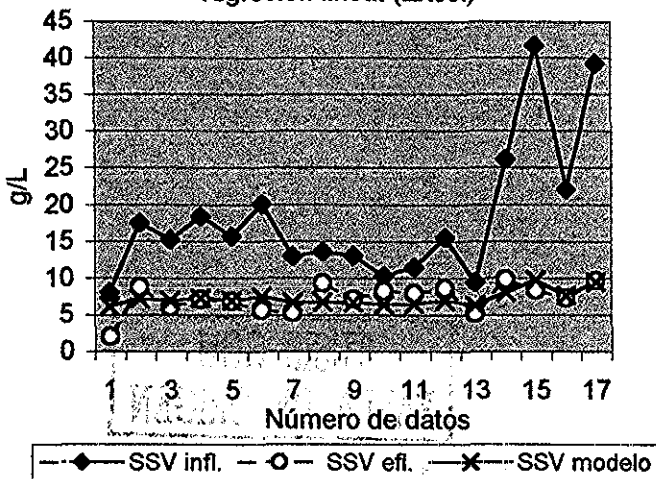
Gráfica 12: Etapa 1.1

Comparación de resultados aplicando la ecuación del modelo lineal (promedios)



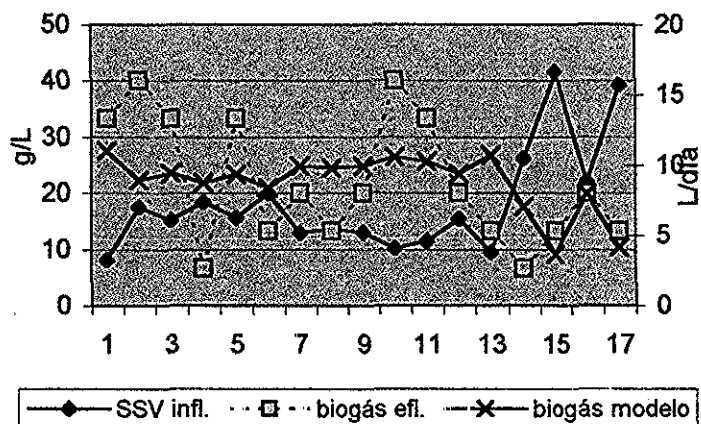
Gráfica 13: Etapa 1.2

Comparación de datos utilizando la curva de regresión lineal (Excel)



Gráfica 14 : Etapa 1.2

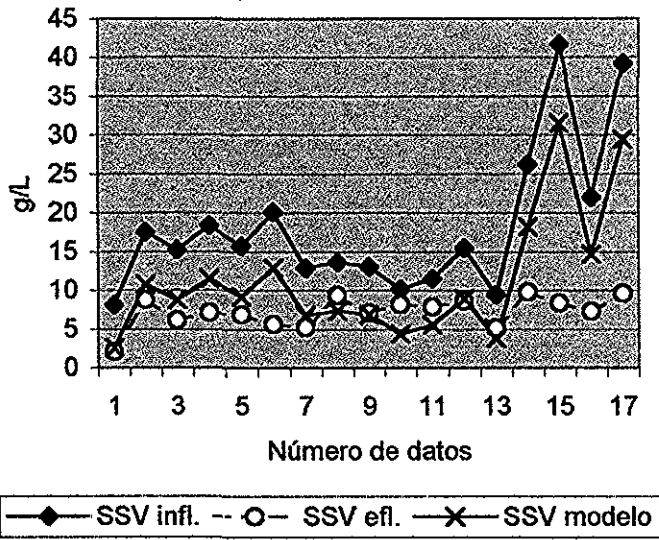
Comparación de datos utilizando la curva de regresión lineal (Excel)



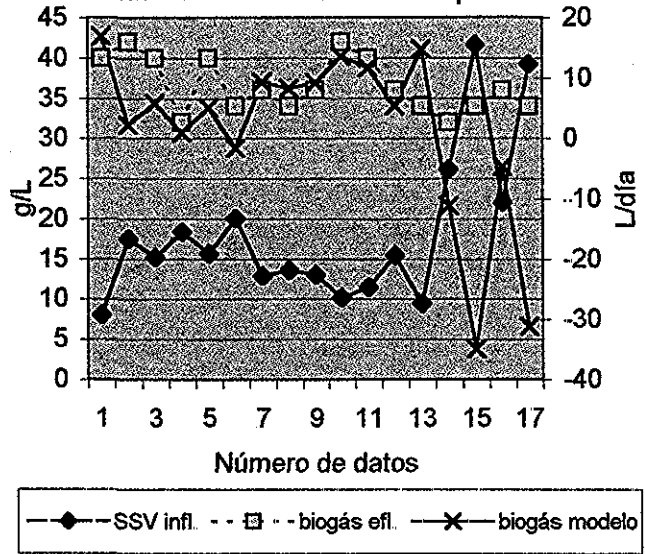
172

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

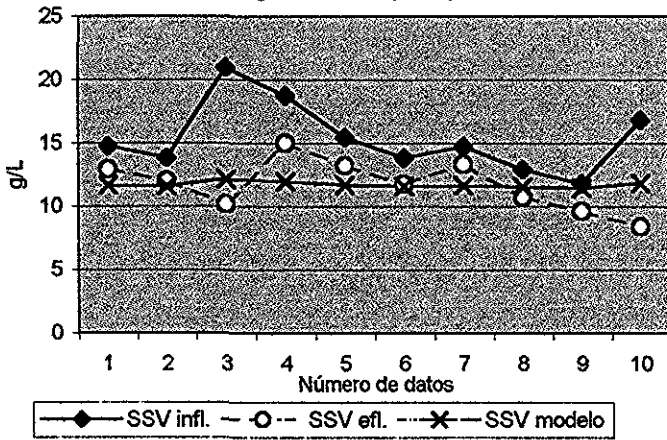
Gráfica 15: Etapa 1.2  
Comparación de resultados, aplicando la ecuación del modelo lineal con promedios



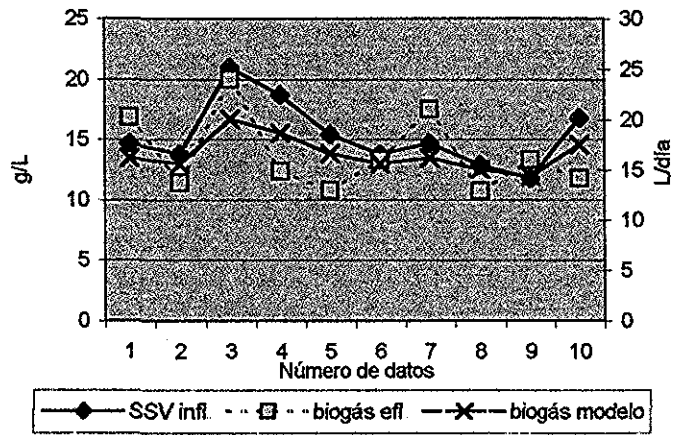
Gráfica 16: Etapa 1.2  
Comparación de resultados, aplicando la ecuación del modelo lineal con promedios



Gráfica 17: Etapa 2  
Comparación de datos obtenidos utilizando el modelo de regresión lineal (Excel)



Gráfica 18: Etapa 2  
Comparación de datos obtenidos utilizando el modelo de regresión lineal (Excel)



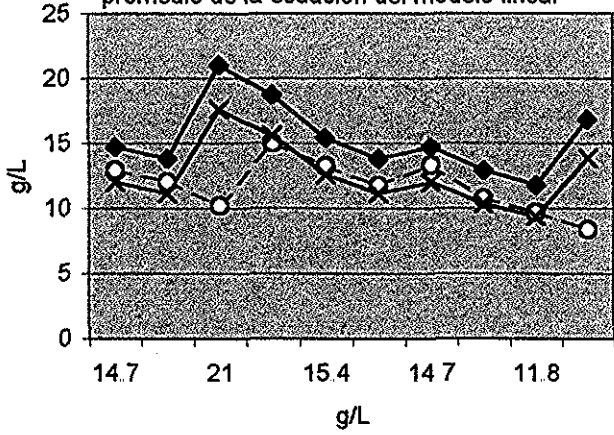
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE LA PLATA



Gráfica 19: Etapa 2:

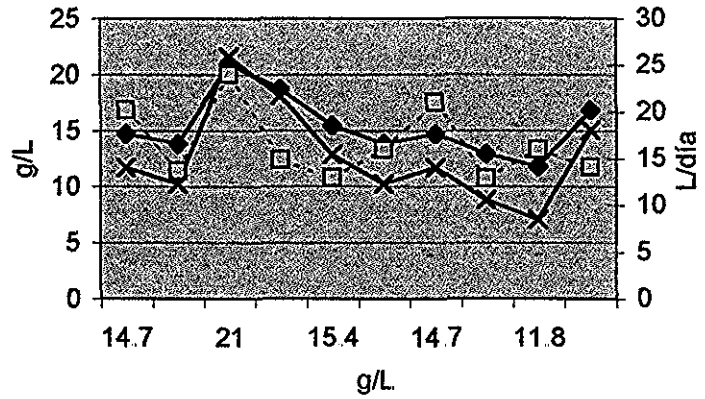
Comparación de resultados aplicando el promedio de la ecuación del modelo lineal



SSV infl. --○-- SSV efl. --x-- SSV modelo

Gráfica 20: Etapa 2

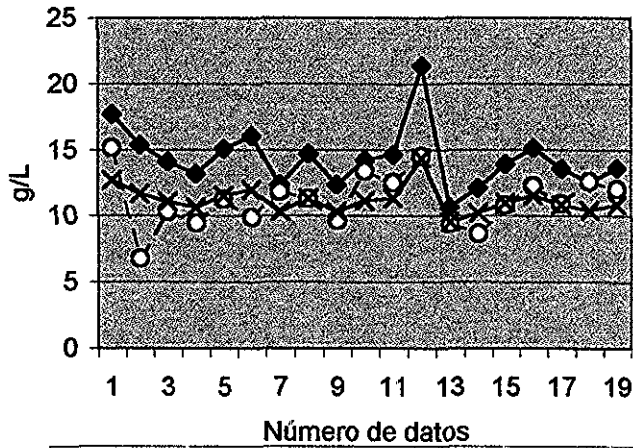
Comparación de resultados aplicando el promedio de la ecuación del modelo lineal



SSV infl. --□-- biogás efl. --x-- biogás modelo

Gráfica 21: Etapa 3

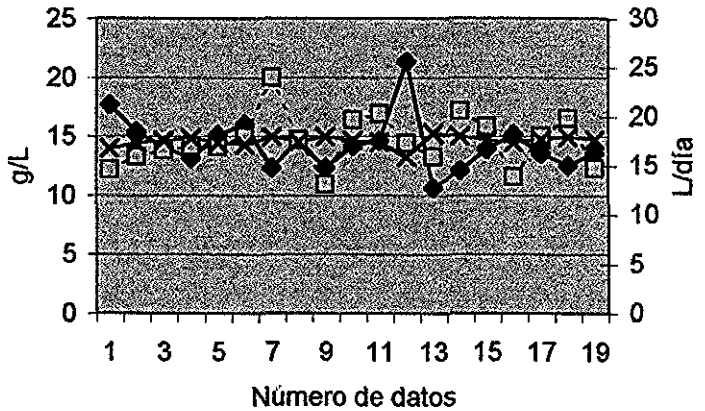
Comparación de datos obtenidos utilizando el modelo de regresión lineal (Excel)



SSV infl. --○-- SSV efl. --x-- SSV modelo

Gráfica 22: Etapa 3

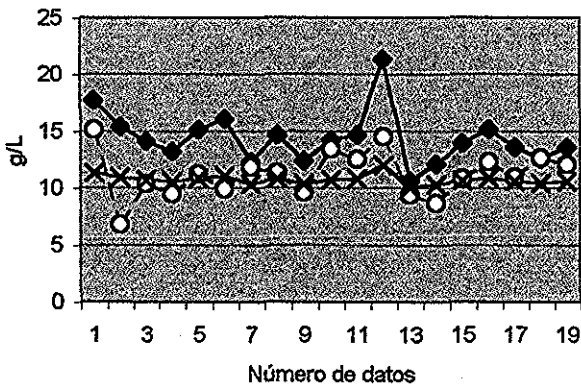
Comparación de datos obtenidos utilizando el modelo de regresión lineal (Excel)



SSV infl. --□-- biogás efl. --x-- biogás modelo

Gráfica 23: Etapa 3

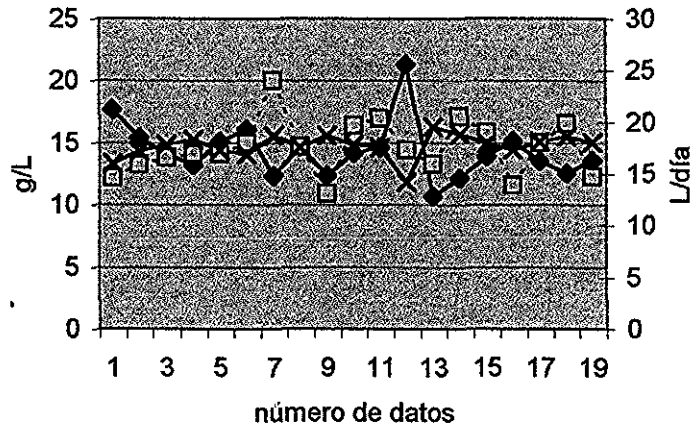
Comparación de resultados aplicando el promedio de la ecuación del modelo lineal



SSV infl. --○-- SSV efl. --x-- SSV modelo

Gráfica 24 Etapa 3

Comparación de resultados aplicando el promedio de la ecuación del modelo lineal



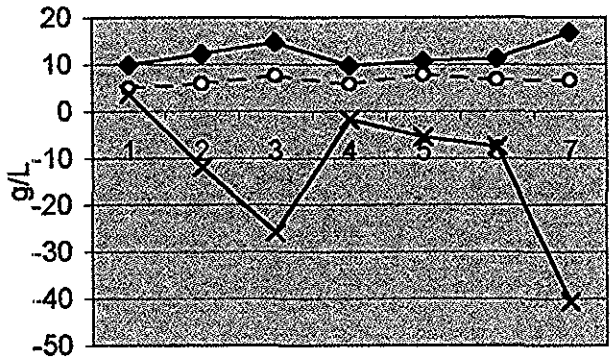
SSV infl. --□-- biogás efl. --x-- biogás modelo

UNIVERSIDAD DE CALDAS

174

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

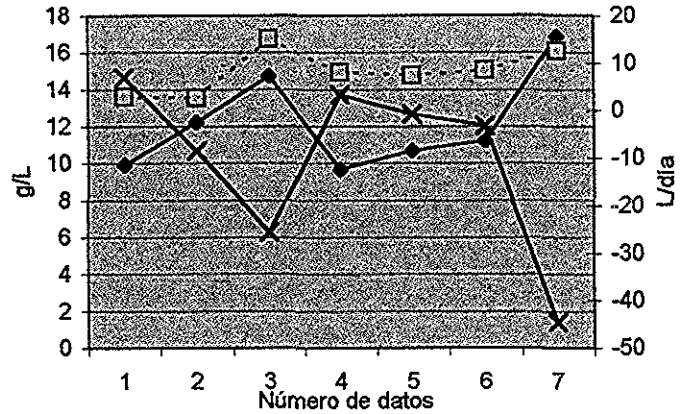
Gráfica 25: Etapa 1.1  
Comparación de curvas de 2o.orden  
aplicando el paquete Excel



Número de datos

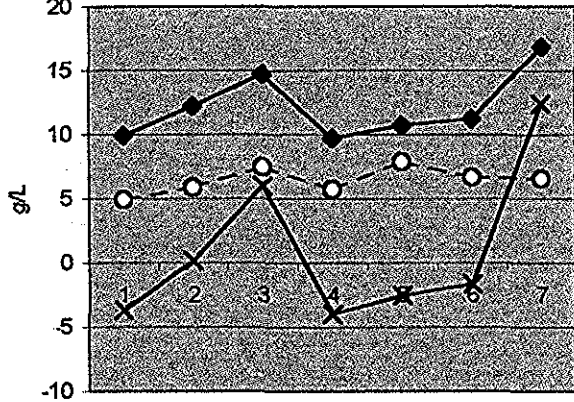
—●— SSV infl. —○— SSV efl. —x— SSV modelo

Gráfica 26 : Etapa 1.1  
Comparación de curvas de 2o.orden aplicando el  
paquete Excel



—●— SSV infl. —□— biogás efl. —x— biogás modelo

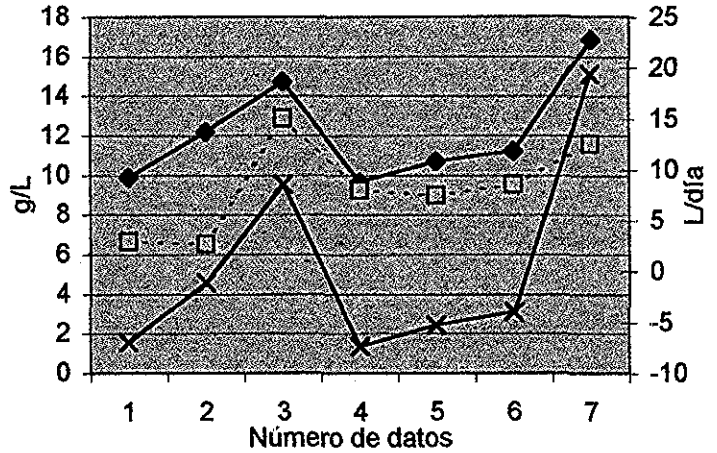
Gráfica 27: Etapa 1.1  
Comparación de curvas de 2o.orden  
aplicando el paquete Excel (cambio signo)



Número de datos

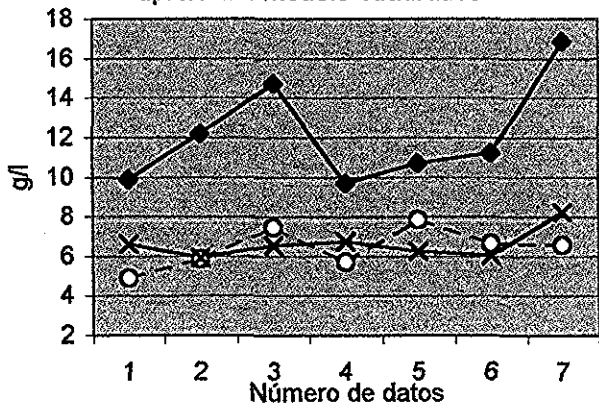
—●— SSV infl. —○— SSV efl. —x— SSV modelo

Gráfica 28: Etapa 1.1  
Comparación de curvas de 2o.orden  
aplicando el ajuste de Excel (cambio signo)



—●— SSV infl. —□— biogás efl. —x— biogás modelo

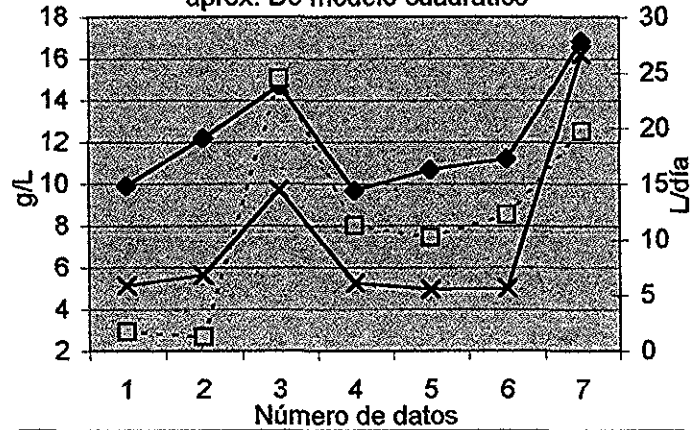
Gráfica 29: Etapa 1.1  
Promedio de la poligonal para obtener otra  
aprox. del modelo cuadratico



Número de datos

—●— SSV infl. —○— SSV efl. —x— SSV modelo

Gráfica 30: Etapa 1.1  
Promedio de la poligonal para obtener otra  
aprox. De modelo cuadratico



Número de datos

—●— SSV influyente —□— biogás efl. —x— biogás modelo

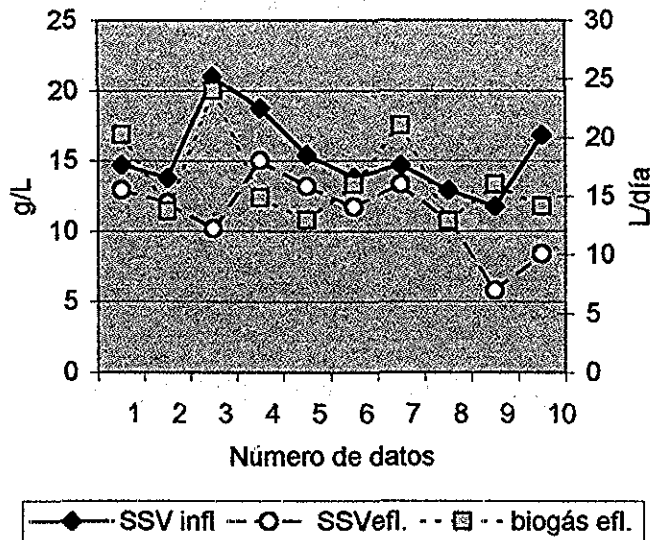
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

175

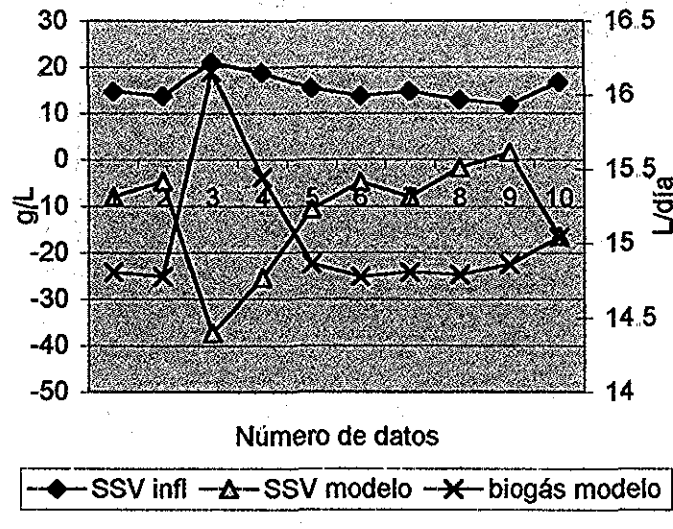
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica 37: Etapa 2

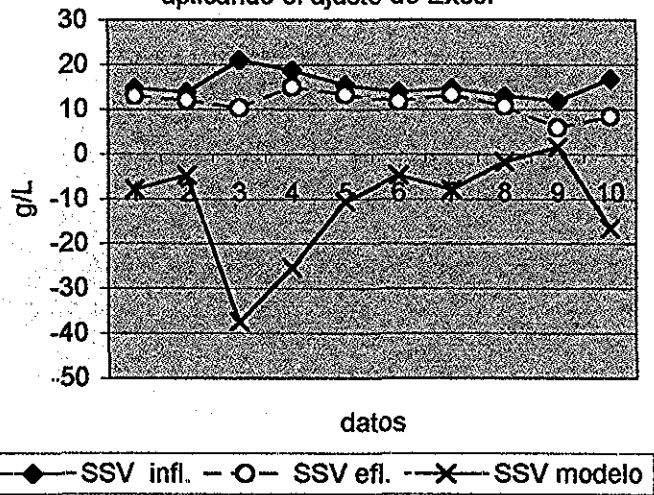
Valores obtenidos experimentalmente



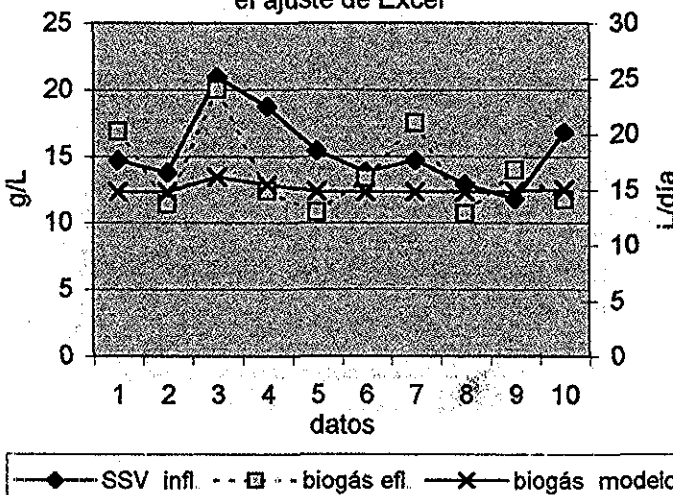
Etapa 2 Datos originales



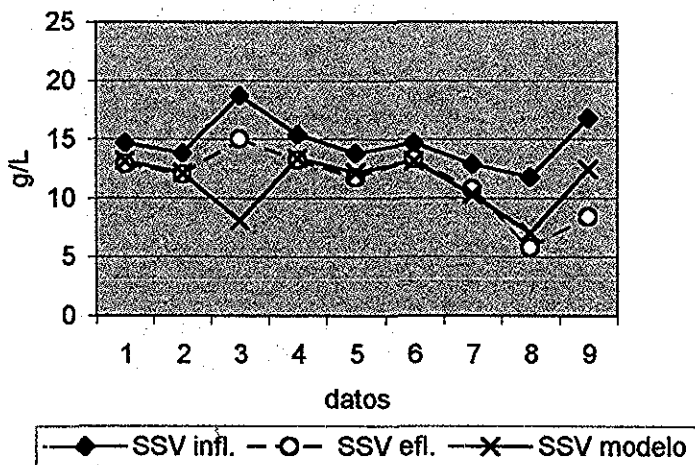
Gráfica 39: Etapa 2  
Comparación de curvas de 2o.orden  
aplicando el ajuste de Excel



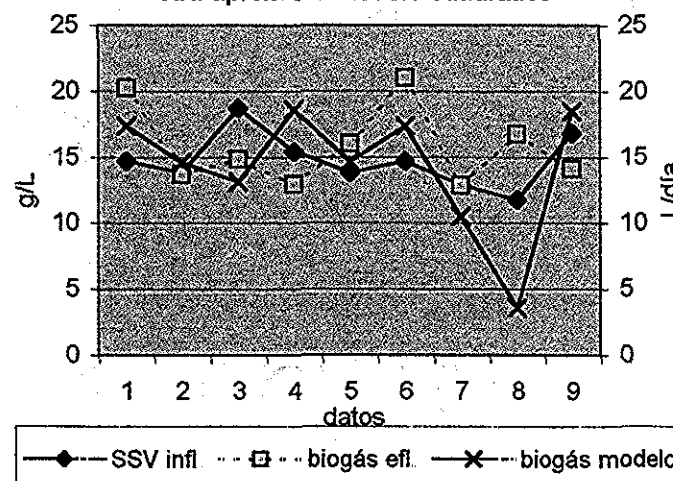
Gráfica 40: Etapa 2  
Comparación de curvas de 2o.orden aplicando  
el ajuste de Excel



Gráfica 41: Etapa 2  
Uso del promedio de la poligonal para obtener  
otra aprox. De modelo cuadrático



Gráfica 42: Etapa 2  
Uso del promedio de la poligonal para obtener  
otra aprox. De modelo cuadrático



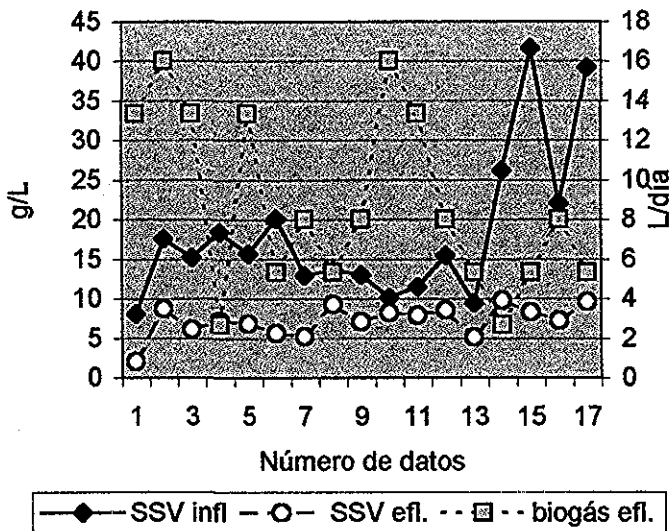
VOU 2287  
ANEXO 80 2287

177

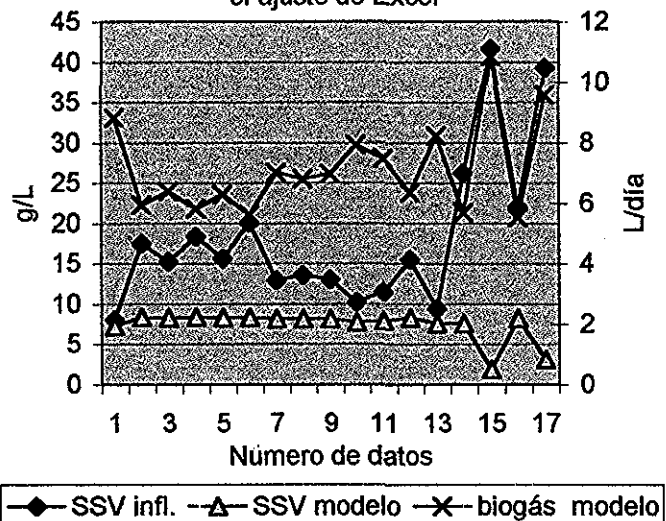
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



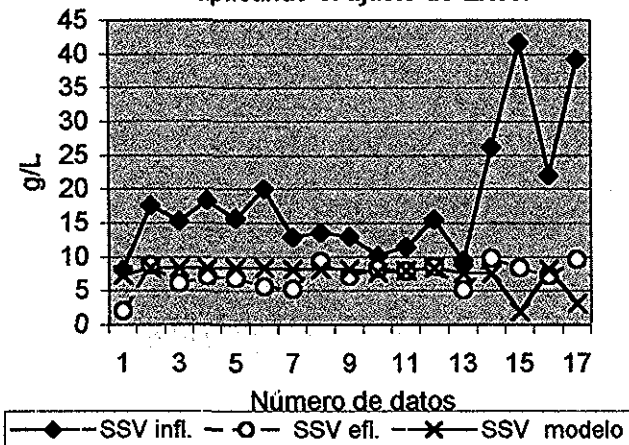
Gráfica 31: Etapa 1.2  
Valores obtenidos experimentalmente



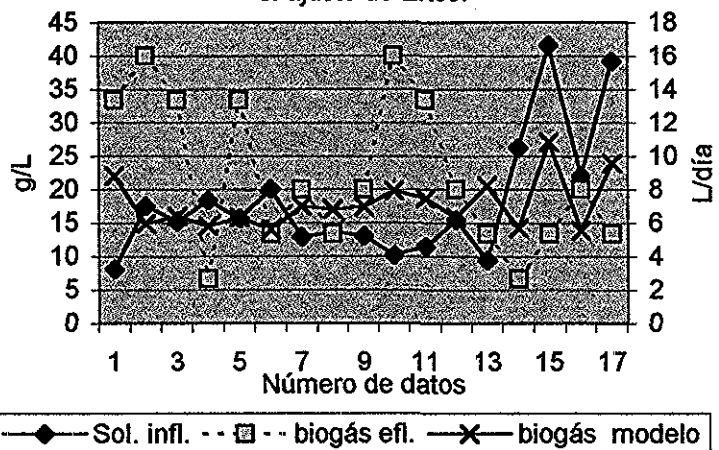
Gráfica 32: Etapa 1.2  
Comparación de curvas de 2o.orden aplicando el ajuste de Excel



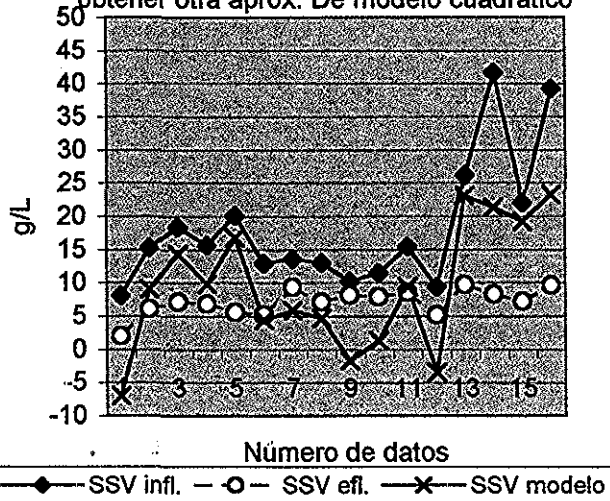
Gráfica 33: Etapa 1.2  
Comparación de curvas de 2o.orden aplicando el ajuste de Excel



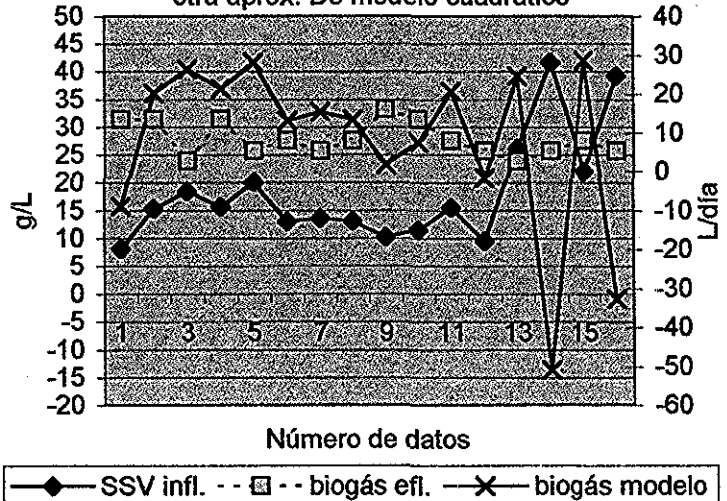
Gráfica 34 : Etapa 1.2  
Comparación de curvas de 2o.orden aplicando el ajuste de Excel



Gráfica 35: Etapa 1.2  
Uso del promedio de la poligonal para obtener otra aprox. De modelo cuadratico

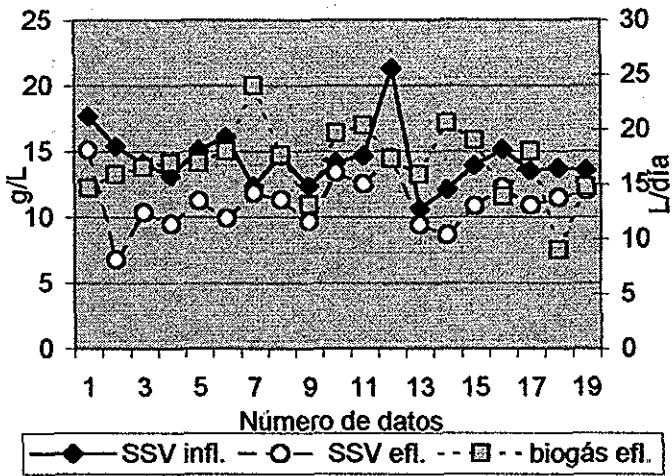


Gráfica 36: Etapa 1.2  
Uso del promedio de la poligonal para obtener otra aprox. De modelo cuadratico

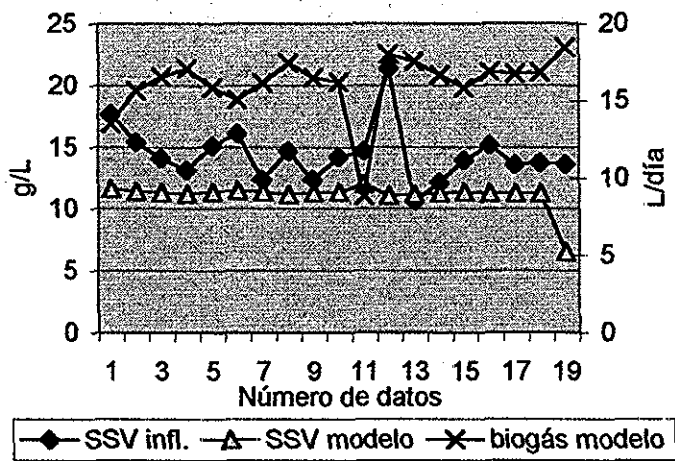


NOV 2007  
BIBLIOTECA DE LA UNAM

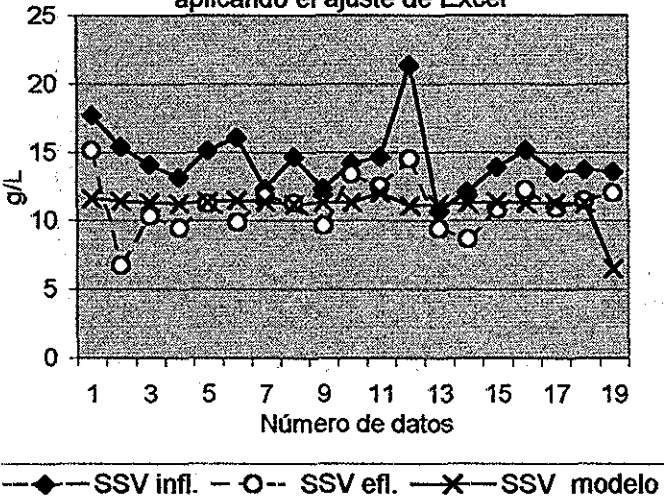
Gráfica 43: Etapa 3  
Valores obtenidos experimentalmente



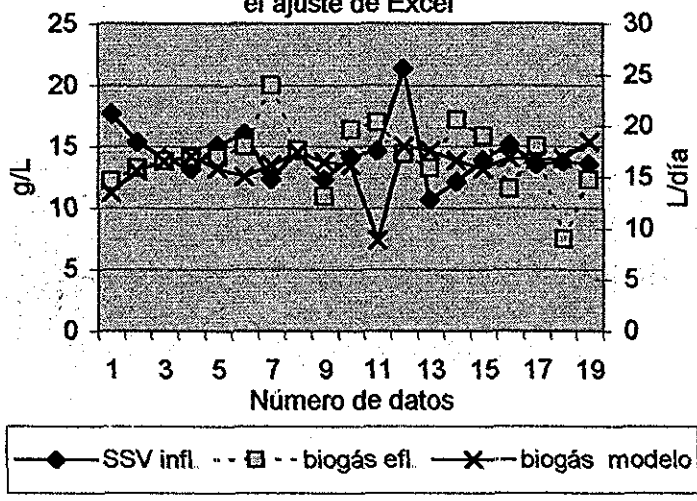
Gráfica 44: Etapa 3  
Aplicación modelo de 20. orden Excel



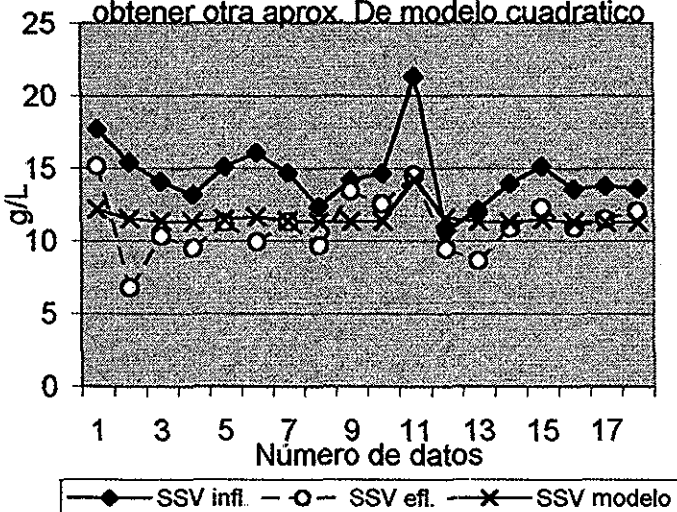
Gráfica 45: Etapa 3  
Comparación de curvas de 20.orden  
aplicando el ajuste de Excel



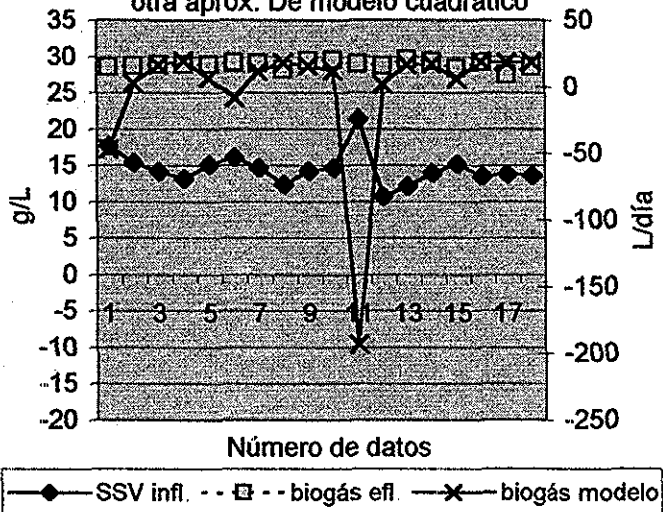
Gráfica 46: Etapa 3  
Comparación de curvas de 20.orden aplicando  
el ajuste de Excel



Gráfica 47 Etapa 3  
Uso del promedio de la poligonal para  
obtener otra aprox. De modelo cuadrático



Gráfica 48:Etapa 3  
Uso del promedio de la poligonal para obtener  
otra aprox. De modelo cuadrático



178

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN