

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“Determinación de parámetros cinéticos en la inactivación de *Trichuris suis* y remoción de compuestos orgánicos a nivel planta piloto”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

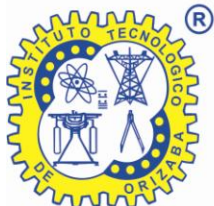
*I.Q. Maricruz Murillo Espinosa*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Juan Manuel Méndez Contreras*

CODIRECTOR DE TESIS:

*M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú*



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior  
Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Orizaba

FECHA: 08/11/2016  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

C. MARICRUZ MURILLO ESPINOZA  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS EN LA INACTIVACIÓN DE TRICHURIS SUIS Y REMOCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS A NIVEL PLANTA PILOTO".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

  
M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ggc







FECHA : 27/10/2016

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

MARICRUZ MURILLO ESPINOSA

la cual lleva el título de:

"DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS EN LA INACTIVACIÓN DE TRICHURIS SUIIS Y REMOCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS A NIVEL PLANTA PILOTO".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

SECRETARIO : M. I. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU

VOCAL : DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

VOCAL SUP. : DR. EUSEBIO BOLAÑOS REYNOSO

FIRMA  
FIRMA  
FIRMA  
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis



## DEDICATORIAS

*Dedico esta tesis principalmente a Dios mi creador y dador de vida, que a pesar de las dificultades y adversidades su mano, su presencia y su infinito amor siempre están conmigo.*

*A mis padres, quienes con amor y esfuerzo me han convertido en la persona que soy ahora, gracias a mi madre por toda su paciencia en los momentos difíciles, por su consejo cuando más lo necesito y por sus oraciones en todo tiempo, a mi padre quien ha sacrificado muchas cosas por siempre darnos lo mejor, por ese apoyo incondicional que siempre he encontrado y encontraré en él.*

*Gracias a mi novio, quien ha sido parte de todo este proceso por su apoyo, amor y cariño, a su familia por esa motivación que me han brindado todo este tiempo.*

*A mi hermano, con quien he encontrado risas y bromas en momentos de estrés, y a mi linda sobrina quien con una sonrisa siempre alegraba mis tardes. A mi mamá Ruth quien durante años me ha ofrecido ese café por la mañana para irme a la escuela y por ese amor que siempre me demuestra.*

*Gracias a todos por ayudarme al cumplimiento de mis sueños, los amo.*

## RECONOCIMIENTOS

Al **Dr. Juan Manuel Méndez Contreras**, por aceptarme e integrarme como parte de su excelente grupo de investigación de ambiental II, por su asesoría y apoyo en todo momento, por lo conocimientos compartidos no solo académicos, sino también de vida, que Dios siga bendiciendo su camino y lo lleve a cosas aun más grandes.

A la **M.I.Q Norma A. Vallejo Cantú**, al **Dr. Alejandro Alvarado Lassman** y al **Dr. Eusebio Bolaños Reynoso** por su tiempo dedicado a las revisiones y contribuciones que han sido de gran valor para la culminación de esta tesis.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el financiamiento otorgado para llevar a cabo este proyecto de investigación bajo el registro de beca No. 619081 durante el periodo Agosto 2014 - Julio 2016.

A mis compañeras y amigas del Laboratorio de Ambiental II Mimí, Glo, Maggie, Lilo, Rita y Betsy con quienes además de recibir su ayuda y apoyo durante las prácticas de laboratorio hasta los trámites necesarios para mi titulación, encontré a grandes personas que me brindaron una amistad divertida y llena de risas, gracias por compartir momentos importantes de sus vidas así como acompañarnos en tiempos difíciles y como no también por amenizar los tiempos de seminarios y exámenes.

A mis residentes, Gabriel, Julio, Eduardo, Isaac y Viri quienes siempre me brindaron su apoyo y disposición en todo momento para el cumplimiento de cada uno de los objetivos ustedes también son parte de este logro.

A mis compañeros Rosy, Ale, Emmanuel, Mariana, Lore, Leo y Adán por esa unidad y apoyo durante las materias, fueron la mejor generación.

---

---

## RESUMEN

### **Determinación de parámetros cinéticos en la inactivación de *Trichuris suis* y remoción de compuestos orgánicos a nivel planta piloto.**

**Realizado por: I.Q. Maricruz Murillo Espinosa**

**Dirigido por: Dr. Juan Manuel Méndez Contreras**

**MCIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú**

El cerdo o porcino se cría en casi todo el mundo principalmente como fuente de alimento. Los elevados requerimientos de producción ganadera han ocasionado su crianza en condiciones sanitarias inadecuadas provocando focos de infección.

El objetivo de este trabajo fue la inactivación de *Trichuris suis* presentes en la caracterización microbiológica de los residuos porcícolas provenientes de la zona centro del estado de Veracruz, encontrando hasta 187 HH/gST. Se realizó un tratamiento térmico con temperaturas de 70, 80 y 90 °C a tiempos de exposición de 60, 90 y 120 min, para el cumplimiento de la NOM-004-SEMARNAT-2002 y obtener un biosólido clase A, los huevos de Helminthos fueron inactivados a una temperatura de 80°C durante 120 min. Los parámetros cinéticos obtenidos mediante el modelo de Hom para una tiempo de 120 min fueron  $K^*=4.405 \times 10^{-3}$ ,  $n^*=1.585$  y  $R^2=0.89$ , la  $K$  menor a 0 indica una resistencia de los huevos al tratamiento térmico.

La digestión anaerobia con tratamiento térmico presentó una remoción de 38% en 12 días de operación reduciendo el TRH hasta en un 55%, esta misma presentó una  $V_{max}=23.98$  gSV/L·d lo cual representa que alcanza una velocidad más rápida respecto a  $V_{max}=18.79$  gSV/L·d de la digestión anaerobia sin tratamiento. La constante de Michaelis para la muestra cruda y tratada obtuvieron una  $K_m=947.08$  gSV/L y  $K_m=571.67$  gSV/L, respectivamente; este parámetro refleja la afinidad de los microorganismos anaerobios hacia el sustrato.

---

---

## ABSTRACT

### Determination of kinetic parameters of *Trichuris suis* inactivation and removal of organic compounds to pilot plant level

**By: I.Q. Maricruz Murillo Espinosa**

**Advisor: Dr. Juan Manuel Méndez Contreras**

**MCIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú**

Pork or pig breeding almost everyone mainly as a food source for its high nutritional. The high requirements of livestock production have caused aging in inadequate sanitary conditions causing outbreaks of infection.

The aim of this work was the inactivation of *Trichuris suis* present in the microbiological characterization of pig manure from the downtown area of Veracruz finding 187 HH / GST. A heat treatment was performed at temperatures of 70, 80 and 90 ° C for exposure times to 60, 90 and 120 min, for compliance with NOM- 004- SEMARNAT- 2002 and get a biosolids Class A. The eggs were inactivated a temperature of 80 ° C for 120 min. The kinetic parameters obtained by Hom model for time 120 min were  $K^* = 4.405 \times 10^{-3}$  ,  $n^* = 1.585$  and  $R^2 = 0.89$  ,  $K$  less than 0 indicates a resistance of helminth eggs to heat treatment.

Anaerobic digestion heat treated presented a removal of 38 % in 12 days of operation reducing the HRT to 55% and present a  $V_{max}=23.98$  gVS/L·d which represents reaching a faster rate compared to  $V_{max}=18.79$  gVS/L·d digestion anaerobic untreated . The Michaelis constant for raw and treated sample obtained a  $K_m=947.08$  gVS/L·d and  $K_m=571.67$  gVS/L·d respectively, this parameter reflects the affinity of anaerobic microorganisms to the substrat.

---

---

## INDICE

INDICE.....	I
LISTA FIGURAS .....	III
LISTA TABLAS .....	V
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	2
1.1. Estado actual e importancia de la producción de ganado porcino .....	2
1.1.1 Problemáticas en la producción y crianza de ganado porcino .....	2
1.2 Uso potencial de bioenergéticos .....	4
1.3 Organismos patógenos presentes en los cerdos.....	5
1.3.1 Bacterias .....	5
1.3.2 Protozoos .....	6
1.3.3 Virus.....	7
1.3.4 Helmintos .....	7
1.3.2 Helmintiasis .....	15
1.4 Inactivación de huevos de helmintos.....	15
1.4.1 Modelo de Hom.....	17
1.4.2 Modelo de Hom modificado para tratamiento térmico ...	18
1.5 Límites máximos permisibles para huevos de helmintos ....	19
1.6 Tratamiento de residuos y lodos .....	19
1.7 Digestión anaerobia.....	20
1.7.1 Hidrolisis .....	21
1.7.2 Acidogénesis.....	22
1.7.3 Acetogénesis.....	23
1.7.4 Metanogénesis .....	24
1.8 Clasificación de la digestión anaerobia .....	26



---

1.9 Factores que influyen en la digestión anaerobia .....	26
1.9.1 Temperatura.....	26
1.9.2 pH.....	27
1.9.3 Alcalinidad.....	28
1.9.4 Carga orgánica .....	28
1.9.5 Tiempo de retención hidráulico .....	29
1.9.6 Mezclado .....	29
1.9.7 Nutrientes.....	29
1.9.8 Metales pesados .....	30
1.10 Modelo cinético de Michaelis-Menten .....	31
1.10.1 Gráfico de lineweaver-Burke.....	31
1.11 Estudios realizados en la inactivación de huevos de helminthos .....	32
<b>CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
2.1 Metodología experimental.....	36
2.2 Obtención y acondicionamiento de residuos porcícolas ....	37
2.3 Caracterización de residuos porcícolas .....	37
2.3.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los residuos porcícolas .....	37
2.3.2 Caracterización microbiológica.....	40
2.4 Estudios de tratamiento térmico.....	41
2.4.1 Determinación de la tasa de hidrólisis .....	43
2.4.2 Determinación de la cinética de Inactivación de huevos de Helminthos .....	43
2.5 Determinación de parámetros cinéticos en la remoción de compuestos orgánicos .....	44
2.5.1 Arranque y monitoreo a nivel piloto del proceso de digestión anaerobia.....	44
2.5.2 Aplicación del tratamiento térmico .....	44

---

2.5.3 Evaluación de la calidad de los biósólidos .....	45
CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
3.1 Acondicionamiento de los residuos porcícolas .....	48
3.2 Caracterización de residuos porcícolas .....	50
3.3 Estudios de tratamiento térmico .....	54
3.3.1 Pruebas de inactivación de Trichuris suis .....	54
3.3.2 Tasa de hidrólisis .....	58
3.4 Determinación de parámetro cinéticos en la inactivación de Trichuris suis .....	59
3.5 Adecuación de los residuos porcícolas como inóculo para el proceso de digestión anaerobia .....	61
3.6 Remoción de compuestos orgánicos a nivel piloto .....	63
3.7 Evaluación de la calidad de los biosólidos de la digestión anaerobia térmica .....	67
CONCLUSIONES .....	70
RECOMENDACIONES .....	72
ANEXO A .....	74
BIBLIOGRAFÍA .....	77

---

---

## LISTA FIGURAS

Figura 1.1	Huevo de <i>Trichuris suis</i> .....	8
Figura 1.2	Ciclo biológico de <i>Trichuris suis</i> .....	9
Figura 1.3	Huevo de <i>Trichstrongylus</i> spp.....	10
Figura 1.4	Huevo de <i>Ascaris suum</i> .....	11
Figura 1.5	Huevo de <i>Strongyloide ransomi</i> .....	12
Figura 1.6	Huevo de <i>Oesophagostomum dentatum</i> .....	12
Figura 1.7	Huevo de <i>Macracanthorhynchus hirudinaceus</i> .....	13
Figura 1.8	Huevo de <i>Taenia solium</i> .....	14
Figura 1.9	Huevo de <i>Stephanurus dentatus</i> .....	14
Figura 1.10	Gráfica que representa el comportamiento de la inactivación térmica. ....	18
Figura 1.11	Clasificación de tratamientos para la estabilización de lodos residuales.....	20
Figura 1.12	Etapas y reacciones de la digestión anaerobia .....	21
Figura 2.1	Diagrama de bloques con la metodología general.....	36
Figura 2.2	Muestras en incubación.....	42
Figura 3.1	Monitoreo de ST y SV de los residuos porcícolas .....	49
Figura 3.2	Monitoreo de pH de residuos porcícolas .....	49
Figura 3.3	Huevo de <i>Trichuris suis</i> en un objetivo 10x .....	53
Figura 3.4	Huevo de <i>Trichuris suis</i> en un objetivo 40x .....	53
Figura 3.5	Inactivación de <i>Trichuris suis</i> a diferentes temperaturas y tiempos de contacto .....	56
Figura 3.6	Huevo de <i>Trichuris suis</i> a 70°C.....	57
Figura 3.7	Huevo de <i>Trichuris suis</i> a 80°C.....	57
Figura 3.8	Huevo de <i>Trichuris suis</i> a 90°C.....	57
Figura 3.9	Comportamiento de la DQO soluble en el tratamiento térmico .....	59

---

Figura 3.10 Inactivación de <i>Trichuris suis</i> con un tratamiento térmico a 120 min.....	60
Figura 3.11 Comportamiento del pH durante la adaptación de los residuos porcícolas como inóculo.....	62
Figura 3.12 Comportamiento del %SV durante la adaptación de residuos porcícolas como inóculo.....	62
Figura 3.13 Producción de biogás durante la digestión anaerobia de los residuos porcícolas.....	63
Figura 3.14 Comparación de la remoción de sólidos volátiles durante la digestión anaerobia.....	64
Figura 3.15 Degradación de sólidos volátiles de los residuos porcícolas.....	65
Figura 3.16 Gráfico de Lineweaver-Burke de la muestra porcícola cruda.....	66
Figura 3.17 Gráfico de Lineweaver-Burke de la muestra porcícola tratada.....	66

---

---

## LISTA TABLAS

Tabla 1.1 Principales diferencias entre las dos clases de helmintos patógenos.....	8
Tabla 1.2 Límites máximos permisibles para huevos de helmintos .....	19
Tabla 1.3 Reacciones acetogénicas que ocurren en los sistemas anaerobios.....	24
Tabla 1.4 Clasificación de la digestión anaerobia .....	26
Tabla 1.5 Temperaturas típicas para diversas bacterias.....	27
Tabla 2.1 Parámetros de monitoreo durante la digestión anaerobia .....	44
Tabla 3.1 Pruebas de dilución .....	48
Tabla 3.2 Caracterización de residuos porcícolas .....	50
Tabla 3.3 Resultados de inactivación térmica a tiempos de exposición de 60 min.....	55
Tabla 3.4 Resultados de inactivación térmica a tiempos de exposición de 90 min.....	55
Tabla 3.5 Resultados de inactivación térmica a tiempos de exposición de 120 min .....	55
Tabla 3.6 Concentración y degradación de los compuestos orgánicos de las excretas porcinas con el tratamiento térmico .....	58
Tabla 3.7 Parámetro cinéticos para el modelo Hom en la inactivación de <i>Trichuris suis</i> .....	61
Tabla 3.8 Resultados de parámetro cinéticos .....	67
Tabla 3.9 Evaluación de los biosólidos .....	68
Tabla A.1 Tratamientos 60 min (70, 80, 90 °C) .....	74
Tabla A.2 Análisis de varianza 60 min (70, 80, 90 °C) .....	74
Tabla A.3 Tratamiento 90 min (70, 80, 90 °C) .....	75
Tabla A.4 Análisis de varianza 90 min (70, 80, 90 °C) .....	75

Tabla A.5 Tratamiento 120 min (70, 80, 90 °C) ..... 76  
Tabla A.6 Análisis de varianza 120 min (70, 80, 90 °C)..... 76



---

---

## NOMENCLATURA

%SV	Porcentaje de Sólidos Volátiles
%ST	Porcentaje de Sólidos Totales
%SV <sub>rem</sub>	Porcentaje de Sólidos Volátiles removidos
g N-NH <sub>3</sub> /Kg ST	Gramos de nitrógeno amoniacal por kilogramo de sólido total
g N-NTK/Kg ST	Gramos de nitrógeno total por kilogramo de sólido total
g SV/L·d	Gramos de Sólidos Volátiles por litro por día
g/kg ST	Gramos por kilogramos de Sólidos Totales
g/L	Gramos por litro
HH/g ST	Huevos de Helmintos por gramo de sólido total
NMP/g ST	Número más probable por gramo de sólido total
mg/L	Miligramos por litro
pH	Potencial de hidrogeno
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
TT	Tratamiento térmico
YCH <sub>4</sub> rem	Rendimiento de metano por gramo de sólido total volátil removido
<i>K</i>	Constante de velocidad de inactivación de microorganismos
<i>n</i>	Coefficiente de transferencia de calor entre las fases sólido y líquido del lodo

## INTRODUCCIÓN

El cerdo o porcino se cría en casi todo el mundo, principalmente como fuente de alimento, por su alto valor alimenticio, alto en proteínas y por su exquisito sabor. Para cubrir las necesidades alimenticias de la población actual en México se tienen altos requerimientos de producción ganadera, la producción porcina ocupa el segundo lugar con el 37.6% mientras que el estado de Veracruz se encuentra dentro de los diez estados con mayor producción porcícola (INEGI, 2014). La producción intensiva de carne de cerdo principalmente en granjas no tecnificadas, han provocado impactos severos en el ambiente por la acumulación de desechos sólidos sin tratar y por la contaminación de diferentes cuerpos de agua, donde son descargadas sus aguas residuales, provocando problemas sanitarios y enfermedades parasitarias tales como las helmintiasis causadas por parásitos intestinales y que son transmitidas por: contacto directo con heces contaminadas o agua residual contaminada, consumo de cultivos contaminados e ingestión de carne contaminada. Actualmente, aproximadamente 1500 millones de personas, casi el 24% de la población mundial, está infectada por helmintos y están ampliamente distribuidas por zonas tropicales y subtropicales, especialmente en África, América, China y Asia oriental (OMS, 2014). Esto representa una preocupación mundial ya que en algunos casos se presenta mortalidad y graves implicaciones en el estado nutricional y tasas de crecimiento principalmente en la población infantil.

Por otro lado, la digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de grupos de bacterias específicas, se descompone en biogás, y un biosólido. Además, permite la reducción del volumen de los lodos mediante la destrucción de sólidos, la reducción de atracción de vectores y la reutilización de los lodos digeridos como remediadores de suelos o fertilizantes. Por lo que la presente investigación se centra en el empleo de un tratamiento térmico con la finalidad de inactivar microorganismos patógenos que afecten el proceso de digestión anaerobia y contaminen el biosólido producido.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros cinéticos en la inactivación de *Trichuris suis* y remover los compuestos orgánicos de residuos porcícolas a nivel piloto.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar en términos de huevos de helmintos los residuos porcícolas de la región centro del estado de Veracruz.
- Operar el tratamiento térmico para determinar las condiciones para la inactivación de huevos de helmintos presentes.
- Determinar el orden de reacción para la inactivación *Trichuris suis*.
- Determinar los parámetros cinéticos en la remoción de compuestos orgánicos a nivel piloto de la digestión anaerobia con un tratamiento térmico.

---

**CAPITULO 1**

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

---

## **CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **1.1. Estado actual e importancia de la producción de ganado porcino**

El cerdo o porcino se cría en casi todo el mundo, principalmente como fuente de alimento, por su alto valor alimenticio, alto en proteínas y por su exquisito sabor. Los cerdos están adaptados y desarrollados para la producción de carne, dado que crecen y maduran con rapidez, tienen un período de estación corto. Además de la carne, del cerdo también se aprovechan el cuero para hacer maletas, calzado y guantes, e incluso en México ésta es consumida en forma de chicharrón; las cerdas de la piel del animal, se utilizan para confeccionar cepillos. Son también fuente primaria de grasa comestible, aunque, en la actualidad, se prefieren las razas que producen carne magra. Además, proporcionan materia prima para la elaboración de embutidos como el jamón, salchichas y chorizo (Financiera Rural, 2012).

Durante 2013, el número de cabezas sacrificadas fue de 7.3 millones en el país, generando una producción de carne en canal de 915,073 toneladas, la cual se distribuyó de la siguiente manera: 63.5% de carne bovina, 36% porcina, 0.3% ovina y el restante 0.2% de caprina. En 2013, la producción de carne en canal porcina resultó de 329,581 toneladas, de las cuales Jalisco contribuyó con 16.2%, el Estado de México 15.5%, Guanajuato 8.2%, Michoacán de Ocampo 7.8%, Puebla 7.1%, Yucatán 6%, Veracruz de Ignacio de la Llave 5.5%, Querétaro 4.9%, Guerrero 3.6% y Morelos 2.8 por ciento. Este grupo de entidades aportó de forma agregada el 77.6% de la producción nacional de esta carne (INEGI, 2014).

#### **1.1.1 Problemáticas en la producción y crianza de ganado porcino**

La poca rentabilidad de las explotaciones porcinas es debida todavía a las diversas limitaciones sanitarias que impiden una producción óptima de estos animales.

Los cerdos son alojados en diferentes tipos de instalaciones de acuerdo con el sistema de producción en que se les explota:

- **Instalaciones tecnificadas:** Los porcinos son criados en granjas generalmente grandes que pueden llegar a tener hasta 100,000 cerdos de diferentes edades, están ubicados en instalaciones donde casi todo es automático, además de que utilizan lo último en tecnología para su producción.
- **Instalaciones tradicionales o semitecnificadas:** los cerdos son criados en explotaciones de diferente tamaño, donde se tienen desde 100 animales en adelante y su objetivo es la venta del ganado para abasto. A diferencia de las instalaciones tecnificadas, estas instalaciones son tradicionales y no usan lo último que hay en tecnología para esta especie.
- **Traspatio, sistema rural o de autoabastecimiento:** los porcinos que se producen en traspatio, también denominado sistema rural o de autoabastecimiento generalmente son mantenidos en corrales rústicos contruidos sin tecnología alguna con materiales de la región (Financiera Rural, 2012).

La crianza tradicional o no tecnificada de cerdos, está basada en conocimientos empíricos transmitidos generacionalmente caracterizada por la falta de recursos económicos de los propietarios y la falta de programas de alimentación, sanitarios y de reproducción; asimismo de equipos y materiales que permitan alcanzar parámetros productivos de la crianza tecnificada. Todos estos factores ponen en riesgo la salud pública debido a que las carnes de estos animales resultan ser contaminadas con agentes patógenos de naturaleza biológica (DIGESA, 2002).

Las parasitosis son indudablemente unos de los principales obstáculos en la obtención de una elevada eficacia en la explotación porcina. La explotación intensiva del cerdo con todas las variables derivadas de las condiciones climáticas



y zootécnicas, favorece la presentación de parásitos de ciclo directo al posibilitar la transmisión por la ruta fecal-oral (Sánchez-Murillo, 2002).

## **1.2 Uso potencial de bioenergéticos**

La bioenergía se define como la energía que se obtiene de la biomasa, es decir que se produce a partir de materiales orgánicos, los cuales pueden tener su origen en cultivos energéticos, productos y subproductos pesqueros, acuícolas, residuos forestales, residuos orgánicos municipales (basura orgánica), excremento de animales, grasas y aceites de origen vegetal o animal.

En el contexto global, la bioenergía se está convirtiendo en una industria altamente dinámica. El acelerado crecimiento en la producción y uso de los biocombustibles, a nivel global, requiere una detallada revisión de las implicaciones y oportunidades que tendrá su desarrollo en nuestro país. Considerando la relevancia y el interés que particularmente han cobrado los Bioenergéticos en nuestro país, el 1 de febrero de 2008 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el decreto por el que se expide la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual contempla la elaboración del Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico, así como del Programa de Introducción de Bioenergéticos (SAGARPA, 2012).

El biogás es una mezcla conformada principalmente por  $\text{CH}_4$  (50-70%) y  $\text{CO}_2$  (25-40 %), que se genera por el proceso biológico de digestión anaerobia, que consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que los residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos. La biodigestión es una alternativa para disminuir o eliminar flujos de materia orgánica proveniente de establos, granjas y residencias humanas hacia los cuerpos de agua, evitando problemas sanitarios y de contaminación. También representa oportunidades de ahorro económico para los productores agropecuarios, ya que se pueden utilizar los efluentes sólidos y líquidos de la digestión como fertilizantes. Si el biogás se

utiliza como bioenergético, se generan calor y electricidad evitando el uso de combustibles fósiles y los costos correspondientes (Red Mexicana de Bioenergía, 2011).

### **1.3 Organismos patógenos presentes en los cerdos**

#### **1.3.1 Bacterias**

Las bacterias son organismos unicelulares procariontes, es decir, que están formados por una sola célula carente de núcleo. Su ácido desoxirribonucleico (ADN) se encuentra libre en el citoplasma y no tienen organelos, como las mitocondrias, cloroplastos o aparato de Golgi. A pesar de su sencilla organización celular, cuentan con una pared celular (capa de polisacáridos) que envuelve la célula proporcionándole rigidez y protección.

Las bacterias se pueden clasificar en función de su morfología, las bacterias que tienen forma esférica u ovoide se denominan cocos. Y si se tiñen de azul con el Gram, se les llama grampositivos. Cuando los cocos se agrupan en cadenas, se les denomina estreptococos y cuando lo hacen en racimos, se les llama estafilococos; también se pueden agrupar en pares que reciben el nombre de diplococos. Las bacterias en forma de bastón reciben el nombre de bacilos. Si al teñirlos con el Gram quedan de color rojo, se les denomina gramnegativos. Los bacilos curvados que presentan espirales se llaman espirilos, rígidos; algunas bacterias en espiral presentan formas fácilmente reconocibles, como las espiroquetas, semejantes a un tornillo o sacacorchos, flexibles. Las bacterias que carecen de pared celular tienen gran plasticidad (micoplasmas) y adoptan una variedad de formas. Las bacterias esféricas tienen un tamaño promedio de 1 micrómetro de diámetro, mientras que los bacilos miden 1.5 de ancho por 6  $\mu\text{m}$  de largo (Molina y Uribarren, 2015).

##### **1.3.1.1 Coliformes fecales**

Las bacterias coliformes fecales forman parte del grupo coliforme. Estas son definidas como bacilos gram-negativos, no esporulados que fermentan la lactosa

con producción de ácido y gas a  $44.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dentro de las  $24 \pm 2$  horas. La mayor especie en el grupo de coliforme fecal es *Escherichia coli*.

Los coliformes fecales comúnmente son utilizados como indicadores de contaminación fecal. Su uso en lodos y biosólidos usualmente indica la eficiencia de los procesos de tratamiento en la destrucción de bacterias, y además regula la calidad de los biosólidos que pueden reusarse benéficamente. Generalmente, también son indicadores de la concentración de *Salmonella* spp., bacterias que usualmente se relacionan con enfermedades gastrointestinales y por lo tanto, la reducción de coliformes fecales idealmente refleja un decremento en *Salmonella* spp (López-Escobar, 2009).

#### **1.3.1.2 Salmonella spp**

*Salmonella* es un género de bacterias que pertenece a la familia Enterobacteriaceae formado por bacilos gram-negativos, anaerobios facultativos, con flagelos peritricos y que no desarrollan capsula ni esporas. Son bacterias móviles que producen ácido sulfhídrico. Emplean glucosa por poseer una enzima especializada, pero no lactosa, y no producen ureasa ni tienen metabolismo fermentativo. Existen tres especies: *Salmonella typhi*, *S. choleraesuis* y *S. enteritidis*. Esta última presenta más de 1,400 variedades distintas, la mayoría son patógenas tanto para el hombre como para los animales. Son responsables de diferentes cuadros clínicos como la fiebre tifoidea y paratifoidea. Además, existen personas que sufren una infección asintomática y otras que son portadoras sanas transitorias o crónicas (presentan el agente patógeno pero no sufren la infección) y que son responsables de la diseminación de los bacilos.

#### **1.3.2 Protozoos**

Los protozoos son seres eucariotas (con núcleo celular definido), unicelulares y heterótrofos (se alimentan de materia orgánica). Suelen ser de vida libre, aunque existen grupos que son parásitos. Se pueden distinguir distintos tipos de protozoos, si se observa su estructura pueden clasificarse en: flagelados, son

protozoos que para moverse utilizan flagelos, la mayoría de los flagelados tienen vida libre, pero hay algunos que son parásitos. Ciliados, son protozoos que utilizan cilios para moverse, los cilios son pequeñas estructuras que la célula mueve a modo de remos. Rizópodos, son protozoos que se mueven emitiendo prolongaciones de su cuerpo y deslizándose sobre la superficie sobre la que viven. Estas prolongaciones se llaman pseudópodos, y funcionan como falsos pies. Finalmente, los esporozoos que son protozoos inmóviles. Todos los individuos de este grupo son parásitos.

### **1.3.3 Virus**

Los virus son organismos con una estructura más sencilla que las células procarióticas y eucarióticas, por lo cual se consideran acelulares o acarióticos. Son partículas cuyo genoma es un ácido nucleico (DNA o RNA), el cual se replica en células vivas y utiliza su maquinaria metabólica para dirigir la síntesis de nuevos virus que a su vez infectarán más células. Los virus son estructuras extraordinariamente pequeñas, su tamaño oscila entre los 24 nm y está por debajo del límite de resolución del microscopio óptico por lo tanto se debe utilizar microscopio electrónico.

### **1.3.4 Helmintos**

Los helmintos son un grupo muy grande y variado de gusanos parásitos multicelulares. Algunos infectan a los seres humanos, otros a animales o plantas, mientras que muchos pueden ser de vida libre en el suelo. Algunos gusanos poseen diferenciación sexual, otros son hermafroditas. Hay tres grupos principales de helmintos: los trematodos (Trematoda), las tenias (Cestoda), y lombrices (Nematoda) (Moodley *et al.*, 2008).

Las principales diferencias en cuanto a morfología, tubo digestivo, sexo y organelos de fijación entre las clases de helmintos patógenos se muestran en la Tabla 1.1

**Tabla 1.1** Principales diferencias entre las dos clases de helmintos patógenos (Crites, R y Tchobanoglous, G., 2000)

Clase	Cestoda	Nematoda
Forma	Plana/segmentada	Cilíndrica
Tubo digestivo	Ausente	Presente
Sexo	Hermafrodita	Dioico
Organelos de fijación	Cuatro ventosas o dos botridias y a veces ganchos	Labios o dientes bucales

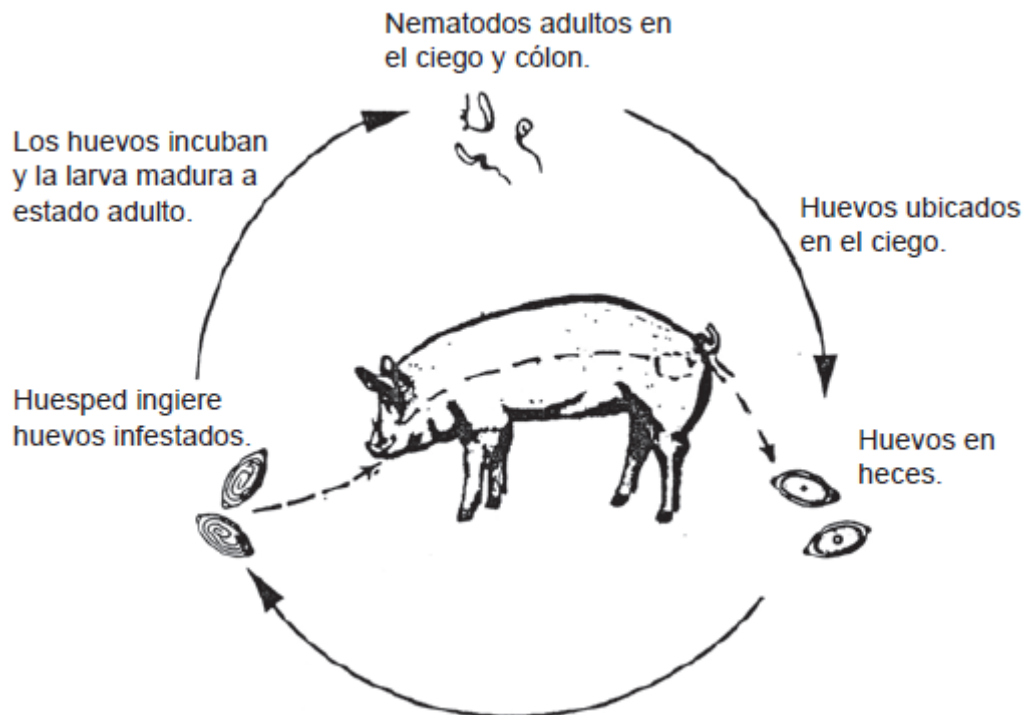
### 1.3.2.1 Principales tipos de helmintos en los cerdos

- *Trichuris suis*. Estos parásitos tienen una forma característica, su cuerpo está dividido en dos porciones una anterior muy delgada y otra posterior gruesa dando la apariencia de un látigo. El nematodo adulto se localiza sobre todo en el ciego y colon. Los machos miden de 30 a 40 mm de largo y las hembras entre 35 y 50 mm; los huevos salen con las heces al exterior y en condiciones favorables de humedad y temperatura alrededor de 18 días se forma en su interior una larva, estos huevos larvados son muy resistentes al medio ambiente por lo que pueden permanecer con carácter infestante hasta por 5 años. Los huevos son de color marrón, Figura 1.1, y miden de 50-68 mm por 21-31 mm.



**Figura 1.1** Huevo de *Trichuris suis*

El ciclo biológico de *Trichuris suis*, Figura 1.2, comienza cuando el cerdo se infesta al ingerir estos huevos larvados ya sea al tomar agua o alimentos contaminados; en el intestino delgado eclosionan y penetran en las paredes del mismo en la que permanece de 3 a 10 días alimentándose de sangre (acción hematófaga) y de las células de la mucosa (acción histófaga) hasta alcanzar la madurez sexual y salir a la luz intestinal, migrar hacia el ciego y colon para fijarse a la mucosa y continuar alimentándose de sangre y de secreciones de la mucosa, copular y poner huevo las hembras para repetirse de nuevo el ciclo.



**Figura 1.2** Ciclo biológico de *Trichuris suis*

En parasitaciones intensas los animales pueden tener debilidad general, fiebre, se miran pálidos (anemia), comen poco o dejan de comer (inapetencia), presentan diarrea con mucosidades y/o sangre en ocasiones, los animales rápidamente se deterioran, no crecen ni se desarrollan, debilitándose hasta morir si no son tratados a tiempo.



- *Trichostrongylus axei*. Las especies de *Trichostrongylus* son pequeños gusanos nematodos que se alojan en el estomago de los cerdos, son los miembros más pequeños de la familia Trichostrongylidae. Los gusanos adultos de *Trichostrongylus* no tienen partes bucales característicos, es decir, no tienen dientes o placas de corte y no superan los 6 mm de longitud, los adultos sexualmente activos viven libres en el exterior, son de menor talla y muestran una morfología ligeramente distinta de la de las hembras partenogénéticas. Los huevos de *Trichostrongylus* son muy similares a los de anquilostoma, pero son más grandes con los extremos más puntiagudos como se observa en la Figura 1.3, miden de 73-95  $\mu\text{m}$  por 40 - 50  $\mu\text{m}$ , estos forman una larva que entre 7 y 8 días se hace infestante.



**Figura 1.3** Huevo de *Trichstrongylus spp.*

- *Ascaris suum*. Es un parásito ubicado en el intestino delgado y puede ser quizás el nematodo más frecuente en el cerdo que provoca una infestación principalmente en animales jóvenes, su cuerpo es un muy elongado y fusiforme, de color rosado amarillento, la longitud del macho se sitúa entre los 15-31 cm, mientras que su anchura oscila de 2 a 4 mm, mientras que la hembra puede alcanzar unos 20-49 cm de longitud por 3-6 mm de anchura. Las larvas durante su migración causan daño en el hígado y en los pulmones se caracteriza por tres labios, los cuales forman una protuberancia oral definida. Estas larvas son mucho más pequeñas que otras y presentan distintos orgánulos, tales como aparato bucal, esófago,

anillo nervioso, glándulas esofágicas, célula excretora, intestino y primordio genital. Los huevos fertilizados son anchos y ovoides, ver Figura 1.4, con una cápsula gruesa y transparente, constituida por una membrana vitelina interna, relativamente impermeable y de naturaleza lipoidea, la cual no se encuentra en los huevos infértiles; una capa media transparente y gruesa y una capa externa, mamelonada albuminoide y generalmente teñida de un color café dorado. Miden 60-75  $\mu\text{m}$  por 50-55  $\mu\text{m}$  en su diámetro menor; cuando son esféricos tienen alrededor de 60  $\mu\text{m}$  de diámetro.



**Figura 1.4** Huevo de *Ascaris suum*

- *Strongyloide ransomi*. Es un género de gusanos redondos (nematodos) que parasitan el sistema digestivo de los porcinos generalmente en regiones cálidas. Los adultos son pequeños y filiformes, y no superan los 6 mm de longitud. Tienen un largo esófago característico. La hembra que parasita en el intestino (hembra de vida parasitaria) mide de 3.3 a 4.5 mm de largo, pone huevos que salen con las heces al exterior; en condiciones adecuadas de humedad y temperatura a las 6 horas salen del huevo (eclosionan). Los huevos, Figura 1.5, miden unas 25 por 50 micras y cuando abandonan el hospedador a través de las heces, cada uno contiene ya una larva completamente desarrollada.



**Figura 1.5** Huevo de *Strongyloide ransomi*

- *Oesophagostomum dentatum*. Es un género de gusanos redondos (nematodos) que parasita a porcinos. El parásito adulto se localiza en el intestino grueso, sus larvas provocan una reacción en las paredes del intestino donde permanecen durante su desarrollo (nódulos). El macho adulto mide de 8 a 10 mm y la hembra de 11 a 14 mm, la hembra después de copular pone huevos los que son expulsados por las heces al exterior, Los huevos son de forma ovalada y van desde 50 a 100 micrómetros de tamaño como se ve en la Figura 1.6 y son sensibles a la sequedad y a temperaturas bajas o altas, pero pueden sobrevivir hasta 2 o 3 meses en el pasto, y pueden resistir inviernos suaves.



**Figura 1.6** Huevo de *Oesophagostomum dentatum*

- *Macracanthorhynchus hirudinaceus*. Es la lombriz de mayor tamaño que se encuentra en los cerdos, en estado fresco son de color blanco lechoso o rojizas, es un parásito acantocéfalo con su cuerpo ligeramente enrollado y con la cubierta exterior arrugada, el macho puede medir de 5 a 10 cm de largo y la hembra entre 35 a 50 cm, la cual pone huevos con una larva ya formada dentro (huevos larvados) de gran tamaño miden alrededor de 90 a 100 micrómetros, Figura 1.7, es fácilmente reconocible al microscopio. Las hembras del parásito pueden poner 250, 000 huevos diarios por un período de 10 meses, son resistentes a las condiciones ambientales y pueden sobrevivir algunos años.



**Figura 1.7** Huevo de *Macracanthorhynchus hirudinaceus*

- *Taenia solium*. Es un platelminto parásito de la clase cestoda, *Taenia solium* en estado adulto parasita el intestino delgado del humano y puede medir de 3 a 5 metros, algunas veces hasta 8 metros de largo; su cuerpo es plano y dividido en anillos o segmentos (proglótidos) los cuales al madurar se hacen más grandes a medida que se alejan de la cabeza (escolex) con la que se fija a la mucosa, en cada anillo o proglotis existen órganos sexuales masculinos y femeninos los que se unen en un momento determinado del desarrollo (reproducción asexual o autofecundación) para formar huevos fértiles (entre 50 000 a 60 000), los cuales crecen y maduran dentro de los proglótidos hasta formarse dentro de ellos un gusanito o embrión conocido como oncósfera para convertirse en huevos infestantes

llegando a medir de 10 a 12 mm de largo por 5 a 6 mm de ancho, como se aprecia en la Figura 1.8 y son bastante resistentes al medio exterior, pueden mantenerse infestantes en pasto húmedo por 150 días y en suelo húmedo por 4 a 6 meses.



**Figura 1.8** Huevo de *Taenia solium*

- *Stephanurus dentatus*. Estos parásitos se encuentran con frecuencia en la grasa que envuelve los riñones en el interior de los riñones, hígado, páncreas y otros órganos y rara vez en los pulmones, musculatura lumbar y dentro de la médula espinal (canal raquídeo). El macho adulto mide de 20 a 30 mm de largo por 2 mm de ancho y la hembra de 30 a 45 mm por 2 mm de ancho. Los huevos son ovoides y miden aproximadamente 60 por 105 micras, ver Figura 1.9.



**Figura 1.9** Huevo de *Stephanurus dentatus*

### 1.3.2 Helmintiasis

Las helmintiasis o parasitosis son infecciones intestinales que pueden producirse por la ingestión de quistes de protozoos, huevos o larvas de gusanos o por la penetración de larvas por vía transcutánea desde el suelo. Cada uno de ellos va a realizar un recorrido específico en el huésped y afectará a uno o varios órganos, con lo que se puede según el tipo de parásito y la afectación que provoquen en los distintos órganos o sistemas (Medina *et al.*, 2013).

A nivel mundial existen 5 millones de personas que sufren helmintiasis, principalmente en países en desarrollo. La helmintiasis es particularmente común en regiones donde las tasas de incidencia pueden alcanzar el 90 %. Aunque la tasa de mortalidad es baja, la mayoría de las personas infectadas son niños menores de 15 años con problemas de falta de crecimiento y / o disminución de la condición física (WHO, 2006).

Los helmintos también representan una amenaza para los animales domésticos, de crianza y silvestres, ya que representan distintos cuadros clínicos desde diarreas, estreñimiento, retardo en el crecimiento, problemas de fertilidad, perforación de órganos e intestinos y hasta la muerte. Por otra parte representan un importante riesgo de transmisión de parásitos de los animales a humanos (zoonosis). Los géneros de nematodos gastrointestinales que han sido reportados en cerdos del estado de Yucatán son los siguientes con sus respectivas frecuencias: *Strongyloides* (9.92%), *Áscaris* (7.95%), *Oesophagostomun* (14.88%) y *Trichuris* (14.66%) (Rodríguez-Vivas *et al.*, 2001).

### 1.4 Inactivación de huevos de helmintos

Los huevos de helminto poseen un caparazón formado por 3 ó 4 capas, estas capas hacen muy resistentes a los huevos. Las funciones de las diferentes capas del huevo son:

**Permeabilidad:** la capa lípida es responsable de la extrema impermeabilidad de algunos helmintos. La penetración de colorantes por la destrucción de la barrera permeable de la capa a causa del incremento de la temperatura es evidencia de ello.

**Resistencia mecánica y química:** la capa quitinosa (estas capas consisten de sustancias químicas resistentes, como por ejemplo selerotín, quitina o queratina) al ataque químico y al estrés mecánico, lo que a su vez previene la destrucción de la barrera permeable.

**Resistencia a la desecación:** la baja permeabilidad de las capas de los helmintos asegura una baja tasa de pérdida de agua cuando los huevos son puestos a desecación.

**Presencia de poros en las capas:** estos actúan en conjunto con la capa lípida para controlar la tasa de pérdida de agua del huevo, restringiendo el área a través del cual intercambio gaseoso puede ocurrir (López-Escobar, 2009).

Los procesos de remoción y de inactivación de huevos de helminto se dividen en dos grandes grupos: biológicos y fisicoquímicos. Dentro del primer grupo se pueden mencionar: las lagunas de estabilización, los humedales artificiales y los reactores UASB. En el grupo de los procesos fisicoquímicos se tiene a la filtración rápida, embalses, coagulación- floculación, radiación con luz UV. Además de los procesos fisicoquímicos convencionales, destacan los procesos de oxidación avanzada en los que se pueden señalar: el ozono y el reactivo de Fenton. No todos estos procesos son capaces de inactivar los huevos de helmintos, eso depende de los mecanismos y las condiciones de operación de cada uno (Solís-López, 2009).

Para inactivar los huevos la temperatura debe elevarse por encima de los 40 °C de 10 a 20 días o la humedad debe reducirse por debajo del 5 % (Feachem *et al.*, 1983; Hays, 1997). Dichas condiciones son más favorables de evaluar en el tratamiento de lodos, por lo que en aguas residuales, es poco común inactivar huevos de helmintos aunque si removerlos.

### 1.4.1 Modelo de Hom

Para la cinética de inactivación existen modelos que describen la inactivación de microorganismos patógenos en lodos. El modelo de Hom es una variante del propuesto de Chick y Watson (Méndez *et al.*, 2004) donde introdujo una constante empírica como se muestra en la Ecuación (1.1):

$$\text{Log} \frac{N}{N_0} = -kC^n t^m \quad (1.1)$$

Donde:

N= Concentración de microorganismos en el tiempo final

$N_0$ = Concentración de microorganismos inicial en el tiempo 0

K= Constante de velocidad de inactivación de Microorganismos

C= Concentración del reactivo

n= Coeficiente de transferencia de calor en las fases sólido y líquido del lodo

t= tiempo de reacción

m= constante de Hom

Este tipo de ecuación cinética puede ser utilizada para evaluar las constantes y el modelo puede simplificarse como la Ecuación (1.2):

$$\text{Log} \frac{N}{N_0} = -k^* D^n \quad (1.2)$$

También puede evaluarse el tiempo de contacto a una dosis de desinfectante constante para obtener condiciones de operación óptimas (Méndez *et al.*, 2004).

El modelo de Hom puede ser utilizado mediante la Ecuación (1.3) modificada:

$$\text{Log} \frac{N}{N_0} = -k^* t^m \quad (1.3)$$



### 1.4.2 Modelo de Hom modificado para tratamiento térmico

El tratamiento térmico es una combinación de tiempo-temperatura. Las Ecuaciones (1.4) y (1.5) son requeridas para la inactivación de la mayoría de los patógenos resistentes al calor como se muestra en la Figura 1.10.

$$\text{Log} \frac{C}{C_0} = -k^* T^n \quad (1.4)$$

$$k^* = -k^* t^m \quad (1.5)$$

Donde:

C= Concentración de microorganismos en el tiempo final

C<sub>0</sub>= Concentración de microorganismos inicial en el tiempo 0

K= Constante de velocidad de inactivación de Microorganismos

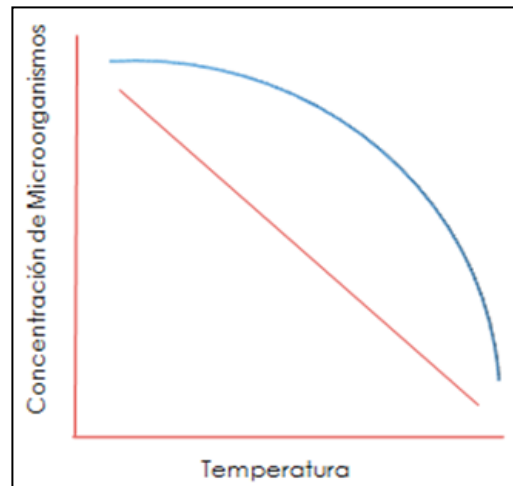
T= Temperatura para la inactivación

n= Coeficiente de transferencia de calor en las fases sólido y líquido del lodo

t= tiempo de reacción

m= constante de Hom

(Hom, 1972)



**Figura 1.10** Gráfica que representa el comportamiento de la inactivación térmica.

### 1.5 Límites máximos permisibles para huevos de helmintos

En materia de microorganismos patógenos los biosólidos que van a ser aplicados a suelos agrícolas, bosques, sitios de contacto público, o sitios de recuperación deben cumplir con los requerimientos de reducción de patógenos Clase A y Clase B.

Según la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental –lodos y biosólidos- establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final como se muestra en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2** Límites máximos permisibles para huevos de helmintos

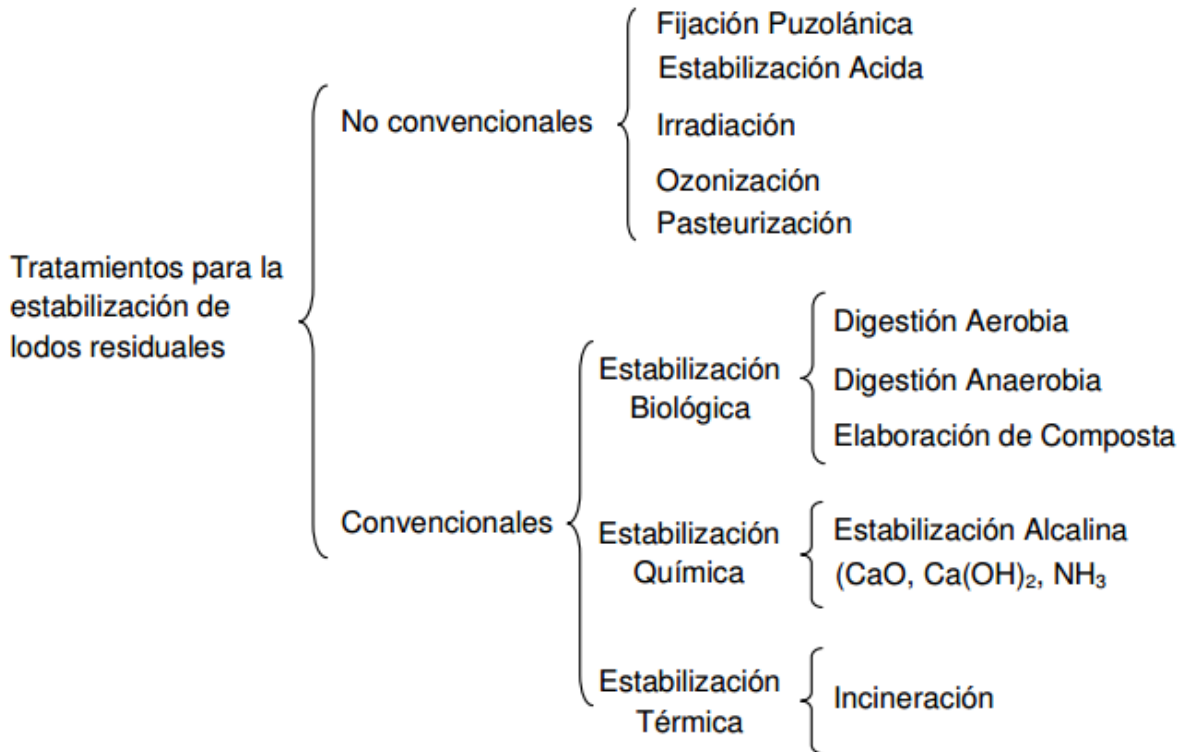
<b>Clase</b>	<b>Huevos de helmintos/ g en base seca</b>
A	Menor de 1 (a)
B	Menor de 10
C	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables

### 1.6 Tratamiento de residuos y lodos

De acuerdo a su naturaleza, los lodos deben ser tratados antes de disponerse. Al manejarlos, se deben tener ciertas consideraciones debido a su contenido de sólidos. Antes de poder aprovechar o disponer los lodos, éstos deben ser estabilizados para reducir la atracción de vectores, los olores y los riesgos a la salud.

Actualmente, existen diversos procesos de tratamiento y estabilización de residuos y de lodos como se aprecian en la Figura 1.11, dentro de los convencionales se encuentran la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la producción de composta y la estabilización alcalina; por otro lado se han desarrollado en los últimos años a nivel laboratorio tecnologías llamadas no convencionales dentro de las cuales se encuentra la estabilización ácida.

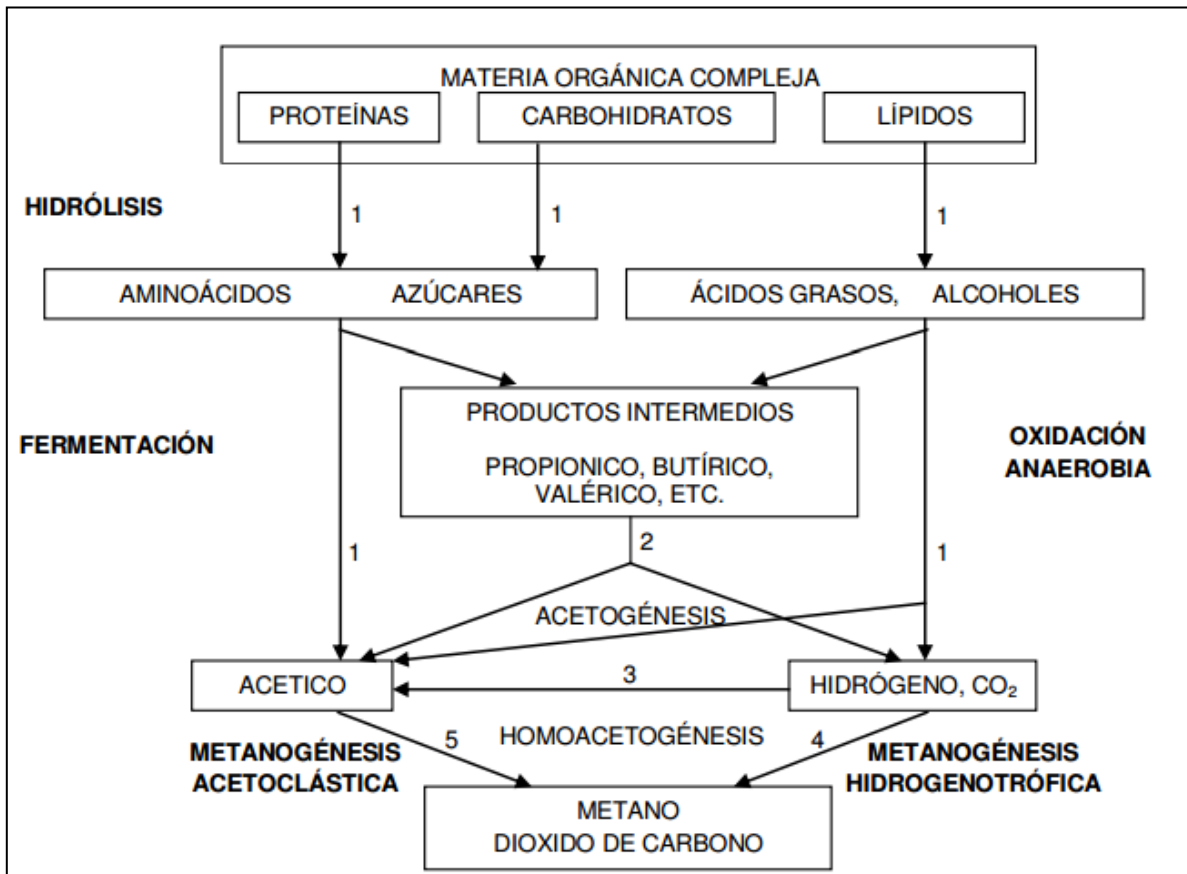


**Figura 1.11** Clasificación de tratamientos para la estabilización de lodos residuales (Girovich, 1996; Lue-Hing et al., 1992; Méndez 2003)

## 1.7 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia consiste en la degradación de la materia orgánica por la acción de microorganismos anaerobios, que por medio de reacciones bioquímicas da lugar a una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, conocida como biogás, y a una suspensión acuosa que sirve como fertilizante por el alto contenido de nutrientes (N, P, K, Ca, etc.). La digestión anaerobia se presenta como un proceso complejo por la cantidad de microorganismos involucrados en ella, por lo que requiere cierto control para asegurar su correcto funcionamiento (Ortega, 2006). Por lo tanto dicho proceso se reconoce como una de las tecnologías de base para reciclar energía, y contribuir a los progresos sostenibles.

La digestión anaerobia consta de diferentes etapas microbiológicas donde se descomponen las proteínas, glúcidos y lípidos en componentes más simples, las cuales son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, ver Figura 1.12. En el proceso de degradación del sustrato intervienen 5 grupos principales de bacterias, estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por organismos con diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor.



**Figura 1.12** Etapas y reacciones de la digestión anaerobia  
(Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991)

### 1.7.1 Hidrolisis

La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos. La materia orgánica polimérica no puede ser

utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la membrana celular. La hidrólisis es, por tanto, el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos. La hidrólisis de estas partículas orgánicas es llevada a cabo por enzimas extracelulares excretadas por las bacterias fermentativas. La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos, incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Esta etapa es relativamente lenta y por lo tanto puede ser la etapa limitante del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido de sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso. El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso depende de muchos factores, entre otros del pH, la temperatura, la concentración de biomasa hidrolítica, el tipo de materia orgánica particulada (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991), y del tamaño de partícula (Hills y Nakano, 1984). Angelidaki et al., (1999) consideran que la tasa de hidrólisis de carbohidratos y proteínas está limitada por la concentración total de ácidos grasos volátiles. Henze et al., (1995) consideran que la tasa de hidrólisis está inhibida por la concentración de oxígeno y nitrato.

### **1.7.2 Acidogénesis**

También llamada fermentación, es la degradación bacteriana de los sustratos solubles de bajo peso molecular como aminoácidos y azúcares, obtenidos en la etapa anterior que pueden degradarse sin un aceptor o donador de electrón externo; los productos son: bióxido de carbono, gas hidrógeno, ácidos orgánicos, alcoholes, algunos compuestos orgánicos nitrogenados y/o sulfurados.

Las Ácidos Grasos Volátiles (AGV's) son compuestos de cadena carbonada corta, que se producen durante la degradación fermentativa, el ácido fórmico, acético, propiónico, butírico, isobutírico, 2-metil butírico, valérico, isovalérico capríico y caprílico, se consideran generalmente ácidos grasos volátiles, produciéndose en mayor cantidad en el proceso de digestión anaerobia el acético, propiónico y butírico y en menor cantidad el capríico y el caprílico. El ácido acético, ácido fórmico y el gas hidrógeno producidos pueden ser utilizados por las bacterias metanogénicas mientras que los compuestos orgánicos como ácido láctico, propiónico, butírico y etanol, tienen que ser oxidados en la etapa acetogénica para que puedan ser utilizados por las bacterias metanogénicas. Debido a que la acidogénesis puede ocurrir en ausencia de un aceptor de electrón y a que los rendimientos de energía libre son mayores, las reacciones pueden ocurrir en presencia de altas concentraciones de H<sub>2</sub> o formiato con mayor rendimiento de biomasa (Stams, 1994).

### 1.7.3 Acetogénesis

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y acetato), otros (valerato, butirato, propionato, algunos aminoácidos, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas como se muestra en la Tabla 1.3. Los procesos acetogénicos son energéticamente difíciles, por lo que necesitan ser "ayudados" por los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno (Stams, 1994) y la energía libre de la reacción depende de la presión parcial de hidrógeno del medio. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados *homoacetogénicos*, que consumen H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y producen acetato. Los principales exponentes son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en azúcares, al contrario que los metanogénicos, siendo más parecidos a los fermentativos que a los metanogénicos, a pesar de utilizar los mismos substratos (Madigan *et al.*, 1998).

**Tabla 1.3** Reacciones acetogénicas que ocurren en los sistemas anaerobios (Stams, 1994)

Reacciones acetogénicas	$\Delta G^\circ$ (kJ)
Etanol y ácido láctico	
$\text{Etanol} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+9.6
$\text{Láctico}^{-1} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2 + \text{HCO}_3^{-}$	-4.2
Ácidos grasos	
$\text{Acetato}^{-1} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + 4\text{H}_2 + 2\text{HCO}_3^{-}$	+104.6
$\text{Propionato}^{-1} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + \text{HCO}_3^{-} + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$	+76.1
$\text{Butirato}^{-1} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Acetato}^{-1} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+48.1
$\text{Valerato}^{-1} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{Acetato}^{-1} + 2\text{H}^+ + 4\text{H}_2$	+96.2
Aminoácidos	
$\text{Alanina} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + \text{HCO}_3^{-} + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+7.5
$\text{Aspartato}^{-1} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + 2\text{HCO}_3^{-} + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	-14.0
$\text{Leucina} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Isovalerato}^{-1} + \text{HCO}_3^{-} + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+4.2
$\text{Glutamato}^{-1} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Propionato}^{-1} + 2\text{HCO}_3^{-} + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	-5.8
$\text{Glutamato}^{-1} + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + 3\text{HCO}_3^{-} + \text{NH}_4^+ + 3\text{H}^+ + 5\text{H}_2$	+70.3

El principal inhibidor de la acetogénesis, cuya acumulación provoca la rápida acumulación de los sustratos, es el hidrógeno molecular (Ahring y Westermann, 1987 y Fukuzaki *et al.*, 1990). Otros compuestos pueden inhibir también el correcto desarrollo de las poblaciones acetogénicas, como el propio ácido acético (producto de la acetogénesis) (Ahring y Westermann, 1988b; Angelidaki *et al.*, 1993; Siegrist *et al.*, 1993; Hyung *et al.*, 1998), o los ácidos grasos de cadena larga (Hanaki *et al.*, 1981; Angelidaki *et al.*, 1999), además de estar muy afectado por el valor de pH (Siegrist *et al.*, 1993; Angelidaki *et al.*, 1993).

#### 1.7.4 Metanogénesis

La metanogénesis es conocida como fase metano/metanogénica es la última fase de la digestión anaerobia, finalmente la mayoría de los productos generados a lo largo de las anteriores etapas y sólo un número limitado de compuestos pueden actuar como sustratos (acetato, metanol, hidrogeno o dióxido de carbono), estos serán convertidos a metano, dicha conversión se lleva a cabo por bacterias netamente metanogénicas de las que destacan los géneros *methanobacterium*,

*methanobacillus*, *methanococcus*, y *methanosarcina*, estas a su vez se pueden dividir en dos grupos; el primero de ellos son aquellas que consumen como sustrato al acetato y que dentro del proceso son conocidas como metanogénicas acetóclásticas, el otro grupo lo componen las bacterias que utilizan como sustrato al hidrogeno y dióxido de carbono y que son conocidas como metanogénicas hidrogenotróficas.

Es importante mencionar que esta ruta metabólica establecida por bacterias hidrogenotróficas requiere de presiones bajas, sin embargo es bien conocido que la ruta metabólica establecida por las bacterias acetoclásticas es más común que ocurra en la digestión anaerobia, pero existen limitaciones como los tiempos de generación o crecimiento de las bacterias en cada caso, por ejemplo para las bacterias acetoclásticas el tiempo mínimo requerido para su crecimiento y multiplicación se estima en no menos de 2.6 días que es superior comparado con el tiempo necesario para duplicarse por las bacterias hidrogenotróficas estimado en 6 horas, además de que el porcentaje de producción de metano por la vía acetoclástica es del 70%. En realidad, el desempeño y eficiencia del proceso depende mucho de cada etapa del proceso, sin embargo, existen factores que afectan y favorecen (pH, sólidos, alcalinidad, temperatura, mezclado, macro y micronutrientes, configuración del digester, etc.) el desempeño de esta última etapa, considerada por mucho la más importante en el proceso.

Los microorganismos metanogénicos pertenecen al grupo Archae, un único grupo de microorganismos filogeneticamente diferentes por el grupo principal de organismos procarióticos. Sólo un número limitado de compuestos pueden actuar como sustratos en la metanogénesis, entre estos esta el acetato,  $H_2/CO_2$ , metanol y formiato (Lovisa Björnsson, 2000). Las reacciones acetóclásticas son importantes en la digestión anaerobia en conjunto con la reducción del  $CO_2$ . El 70% de la producción de  $CH_4$  es generado por la vía acetato. Muy pocas especies pueden realizar esta producción acetóclástica de metano. Considerando que casi todas las especies son capaces de producir  $CH_4$  mediante la asimilación de  $H_2$ , la



vía con hidrogeno es más productiva energéticamente que la producción mediante acetato. Esto es de fundamental importancia debido a la facultad de mantener la presión de hidrógeno baja en el sistema. El consumo de hidrogeno de las bacterias metanogénicas permite un crecimiento más rápido de los microorganismos en el proceso de digestión anaerobia.

## 1.8 Clasificación de la digestión anaerobia

Existen diversos criterios para la clasificación de la digestión anaerobia generalmente en función a las condiciones de operación; la más frecuente es la que clasifica al proceso en función de la temperatura, sin embargo también se puede clasificar de acuerdo a la carga orgánica tratada, el número de digestores empleados en el proceso y el tipo de sustrato como se muestra en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4** Clasificación de la digestión anaerobia

<b>Criterio</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Temperatura</b>	Psicrofílica
	Mesofílica
	Termofílica
<b>Carga orgánica</b>	Alta
	Media
	Baja
<b>Número de etapas</b>	Una sola etapa
	Dos etapas
	Multi-etapa
<b>Tipo de sustrato</b>	Aguas residuales
	Lodos residuales
	Residuos sólidos orgánicos municipales e industriales
	Combinación de los anteriores

## 1.9 Factores que influyen en la digestión anaerobia

### 1.9.1 Temperatura

Juega un papel vital en la vida y muerte de las bacterias involucradas en el proceso. Cada grupo de bacterias metanogénicas tiene una temperatura óptima

de crecimiento en los diferentes rangos de operación en la que se alcanza la máxima actividad microbiana y, en consecuencia, la máxima remoción de los Sólidos Volátiles a ciertas condiciones dada en el proceso. Los intervalos típicos de temperatura para las bacterias en cada una de las categorías señaladas pueden observarse en la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5** Temperaturas típicas para diversas bacterias

Tipo	Temperatura °C	
	Intervalo	Óptimo
Psicrofílico	-2 – 30	12-18
Mesofílico	20-45	25-40
Termofílico	45-75	55-65

(Metcalf y Eddy, 2003)

Este aspecto es consecuencia de que las reacciones biológicas de transformación de los sustratos en productos, por parte de los microorganismos, son dependientes de la temperatura y requieren, por lo general, menor energía a mayor temperatura, lo que implica un proceso más rápido a mayor temperatura. Si la temperatura llega a fluctuar demasiado las bacterias metanogénicas no pueden desarrollarse adecuadamente y el resultado será una deficiencia en el proceso.

### 1.9.2 pH

El pH se considera un factor clave en el crecimiento de los microorganismos. La mayoría de estos no pueden tolerar niveles de pH por encima de 9.5, o por debajo de 4.0. Por lo general el tratamiento anaerobio trabaja dentro de un rango en el que el pH debe oscilar entre 6.5 y 7.5, con un óptimo entre 7.0 y 7.2. A un pH menor las bacterias se afectan seriamente (Girovich, 1996). Por otra parte, se necesita una alcalinidad del orden de 1000mg/L o mayor como  $\text{CaCO}_3$ , para evitar cambios en el pH, que provocarían un desequilibrio (Jih-Gaw *et al.*, 1997). Es

importante señalar que el descontrol del pH es el resultado de un desequilibrio debido a un cambio en el proceso, lo que debe ser corregido mediante la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ó  $\text{NaHCO}_3$  para dar tiempo de efectuar la corrección (Luna y Guyot, 1990).

El pH es también una importante variable de diagnóstico de los sistemas anaerobios, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Otros autores no consideran el pH como una buena variable de control por resultar demasiado lenta: una vez detectada una variación importante, la falla del sistema puede ser irreversible (Iza, 1995).

### **1.9.3 Alcalinidad**

La alcalinidad es una medida inespecífica de la capacidad reguladora del medio que puede ser proporcionada por un amplio rango de sustancias como: bicarbonatos de calcio, magnesio y amonio. En el intervalo de pH de 6 a 8, el principal equilibrio químico que la controla es el  $\text{CO}_2$ -bicarbonato. La relación de alcalinidad, se define como la relación entre la alcalinidad por AGV's y la debida al bicarbonato, recomendándose no sobrepasar un valor de 0.3-0.4 para evitar la acidificación (Iza, 1995), aunque (Noyola y Tinajero, 2005), establecieron valores aceptables de 0.46-0.48 para la estabilidad de la digestión anaerobia.

### **1.9.4 Carga orgánica**

Es uno de los parámetros más útiles para describir las condiciones de alimentación (concentración y volumen), se expresa típicamente como peso de materia orgánica expresada en concentración de Sólidos Volátiles o Demanda Química de Oxígeno (DQO) por unidad de volumen del reactor por día. Representa la medida exacta de alimento que un digestor necesita.

Otros parámetros como el TRH y la concentración de Sólidos Totales resultan falaces debido a que el primero varía significativamente cuando al concentración

de materia orgánica aumenta y el segundo aunque contribuye en el volumen de alimentación no lo indica de manera directa; por lo tanto no proveen la información básica para comparar costos de arranque y operación de un digestor (Chynoweth y Pullammanappallil, 1996).

### **1.9.5 Tiempo de retención hidráulico**

Es un parámetro muy importante, depende típicamente del tipo de reactor, en los sistemas de mezcla completa coincide con el tiempo de retención celular, por lo que debe ser suficientemente largo para que se desarrollen las bacterias, algunos tiempos reportados para la digestión anaerobia con cargas orgánicas convencionales van de 15 a 28 días y para alta tasa se encuentran reportados valores de hasta 60 días (Cabirol *et al.*, 2000; Girovich, 1996; Hobson, 1990).

### **1.9.6 Mezclado**

Generalmente se cree que al hablar de mezclado es incursionar en un ámbito electromecánico, sin embargo, la digestión anaerobia se ve beneficiada por la influencia que ejerce este trabajo electromecánico reforzando el proceso distribuyendo las bacterias, el sustrato, los nutrientes, y la temperatura a lo largo y ancho del digestor evitando zonas muertas y asegurando el contacto de las bacterias con todo el medio. Las bacterias acetogénicas y metanogénicas requieren de un mezclado eficiente para llevar a cabo sus actividades metabólicas.

### **1.9.7 Nutrientes**

La biodegradación eficiente requiere de nutrientes tales como, nitrógeno, fósforo y metales traza disponibles en suficiente cantidad. Los nutrientes son considerados los más importantes son el nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes generalmente están disponibles para las bacterias anaerobias incluyendo las bacteria metanogénicas como nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}^{+4}\text{-N}$ ) y como ortofosfato de fósforo ( $\text{HPO}^{-4}\text{-P}$ ) solo en forma soluble (Gerardi 2003). Aunque el  $\text{NH}^{+4}\text{-N}$  es la forma de nitrógeno preferida por las bacterias, también las bacterias metanogénicas pueden

obtener nitrógeno de otra fuente como el N<sub>2</sub> molecular y otras son capaces de usar el nitrógeno de aminoácidos como el de alanina (CH<sub>3</sub>CHNH<sub>2</sub>COOH). En la digestión anaerobia es necesario que exista acumulación de fósforo y nitrógeno para que la actividad de las bacterias sea asegurada. Las bacterias metanogénicas tienen requerimientos de micronutrientes diferentes a los de otras bacterias, la necesidad de varios micronutrientes especialmente cobalto, hierro, níquel y azufre es considerada una necesidad por el complejo de bacterias participantes en la digestión anaerobia. La incorporación de micronutrientes es esencial para los sistemas enzimáticos de las bacterias, ya que aseguran no sólo la apropiada degradación del sustrato si no también el eficiente funcionamiento del digestor. El cobalto, hierro, níquel y sulfuro son micronutrientes considerados como indispensables, ya que las bacterias metanogénicas los utilizan para convertir el acetato a metano, existen también algunos otros micronutrientes que son considerados como obligatorios (molibdeno, tungsteno, selenio) y algunos otros pueden ser (bario, calcio, magnesio y sodio), la inadecuada adición de micronutrientes también puede ocasionar deficiencia y toxicidad en el digestor anaerobio; por lo contrario la presencia adecuada de nutrientes y micronutrientes ayuda a minimizar las perturbaciones ocasionadas por la acumulación de ácidos grasos volátiles.

### **1.9.8 Metales pesados**

Se reportan comúnmente como causantes de la inhibición, bacteriana en los digestores de lodos debido a su carácter tóxico, aún en forma de sales metálicas en pequeñas concentraciones. Las sales tóxicas son: Cu, Zn, Ni, Pb, Cr hexavalente y Fe. Los principales efectos que producen los metales pesados sobre la digestión son: un incremento en la cantidad de ácidos grasos volátiles y, por consiguiente, la disminución de la producción de gas. Esto se debe a que las bacterias metanogénicas sufren alteraciones metabólicas, originadas por la presencia de sustancias tóxicas.

### 1.10 Modelo cinético de Michaelis-Menten

El modelo cinético de Michaelis – Menten, Ecuación (1.6) explica el comportamiento cinético de las enzimas. Este modelo describe la velocidad de reacción con la concentración de sustrato siempre y cuando la concentración del sustrato sea mayor a la concentración de la enzima, en condiciones de estado estacionario. La velocidad de reacción varía linealmente con la concentración de sustrato a concentraciones bajas, es decir, de primer orden respecto al sustrato, y se hace independiente de la concentración de sustrato, es decir de orden cero, a concentraciones elevadas. Este comportamiento se explica en base al siguiente mecanismo en el que se deriva la ecuación de Michaelis – Menten.



Las ecuaciones (1.7) y (1.8) de Michaelis y Menten describe como varia la velocidad de reacción con la concentración del sustrato (Levenspiel, 1998).

$$v_0 = \frac{v_{max}[S]}{k_m + [S]} \quad (1.7)$$

$$k_m = \frac{k_1 + k_2}{k_1} \quad (1.8)$$

**Donde:**

$V_0$  = a la velocidad inicial de la reacción

$V_{max}$  = es la velocidad máxima

$K_m$  = es la constante de Michaelis y Menten

$[S]$  = a la concentración del sustrato

#### 1.10.1 Gráfico de lineweaver-Burke

Cuando se gráfica la velocidad de reacción  $V_0$  contra la concentración de sustrato  $[s]$  no siempre es posible determinar la condición en que se ha llegado a la

velocidad máxima,  $V_{max}$ , debido al incremento de la pendiente en la hipérbola a concentraciones de sustrato elevadas.

El gráfico de Lineweaver-Burke, también denominada “dobles recíprocas”, se utiliza para calcular la  $K_m$  y la  $V_{max}$  en una línea recta. La ecuación (1.9) describe la gráfica.

$$\frac{1}{v_0} = \frac{k_m}{v_{max}[S]} + \frac{1}{v_{max}} \quad (1.9)$$

### 1.11 Estudios realizados en la inactivación de huevos de helmintos

Silva-Leal *et al.*, (2013) realizaron un secado térmico para la eliminación total de microorganismos en rangos de temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C y tiempos entre 8 y 12.5 h y redujeron el contenido de coliformes fecales, *E.Coli* y huevos de helmintos además de una conserva en el contenido de nutrientes de los biosólidos mientras que el tratamiento alcalino mostró que el uso de cal viva en dosis mayores al 9% con tiempo de contacto de 5 días es altamente eficiente en el proceso de eliminación de coliformes fecales, *E. coli* y huevos de helmintos; sin embargo, el proceso de alcalinización de los biosólidos afectó significativamente las variables carbono orgánico y calcio y redujo el contenido de nitrógeno total y amoniacal.

Ruiz-Espinoza *et al.*, (2012) aplicaron un pre-tratamiento térmico de lodos de aves de corral como una estrategia de pre-hidrólisis para el mejoramiento del proceso de digestión anaerobia y la inactivación de microorganismos patógenos, utilizando temperaturas de 70, 80 y 90 °C para 30, 60 y 90 min de exposición, obteniendo como condiciones eficientes una temperatura de 90°C y un tiempo de 90 min para un 10% de solubilización de compuestos orgánicos y una completa inactivación de huevos de helmintos, en la digestión anaerobia logró un aumento del 52% en el rendimiento de metano y una reducción de 52% del tiempo de retención hidráulica.

Bandala *et al.*, (2012) llevaron a cabo una inactivación de huevos del helmintos con un proceso de Fenton a diferentes concentraciones de Fe (II) y/o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Se encontró que los resultados más bajos de inactivación de huevo usando Fe (II) o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por separado (5 y 140 mmol L, respectivamente) en condiciones de oscuridad, que mostró un 28% de inactivación de los huevos de helmintos, con la combinación de Fe (II) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en las mismas concentraciones, se logró el 55% de inactivación de huevos de helmintos y al aumentar la concentración de dos veces del reactivo, 83% de inactivación de huevos se logró después de 120 min de tiempo de reacción. La eficiencia del proceso se ve reforzada por la excitación solar. El uso de la reacción de foto-Fenton mejoró el proceso hasta un 99% de inactivación de huevo después de 120 kJ L con las concentraciones más altas de Fe (II) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fue probado.

McKinley *et al.*, (2012) realizaron una inactivación *Ascaris* través de NH<sub>3</sub> en condiciones ambientales que se encuentran comúnmente en los baños ecológicos utilizando materiales disponibles, incluyendo compostaje (heces y aserrín), la orina y la ceniza. El compost mezclado con la orina almacenada y cenizas produjo una rápida inactivación con un 99 %. el almacenamiento de la orina y la ceniza constituye la combinación más eficaz de los materiales para la inactivación; orina fresca y ceniza también fueron efectivos después de un tiempo de retraso de 4 semanas; y la orina fresca y la cenizas solas, solo eran eficaces después de un tiempo de retraso de aproximadamente 11 semanas.

Méndez *et al.*, (2009) evaluaron el rendimiento del proceso de digestión anaerobia mesofílica y termofílica utilizando lodos municipales e industriales de una planta de tratamiento de aguas residuales en un reactor UASB. Durante el modo mesofílico obtuvieron una reducción de 60.3% a 37.5% de sólidos volátiles en un tiempo de 31 días, sin embargo el lodo digerido no presentaba inactivación de microorganismos patógenos por lo que requería de un post tratamiento. En el modo termofílico a 55°C se logro inactivar en su totalidad coliformes fecales,



Salmonella spp y huevos de helmintos cumpliendo así con los límites máximos permisibles para biosólidos de clase A.

---

**CAPITULO 2**

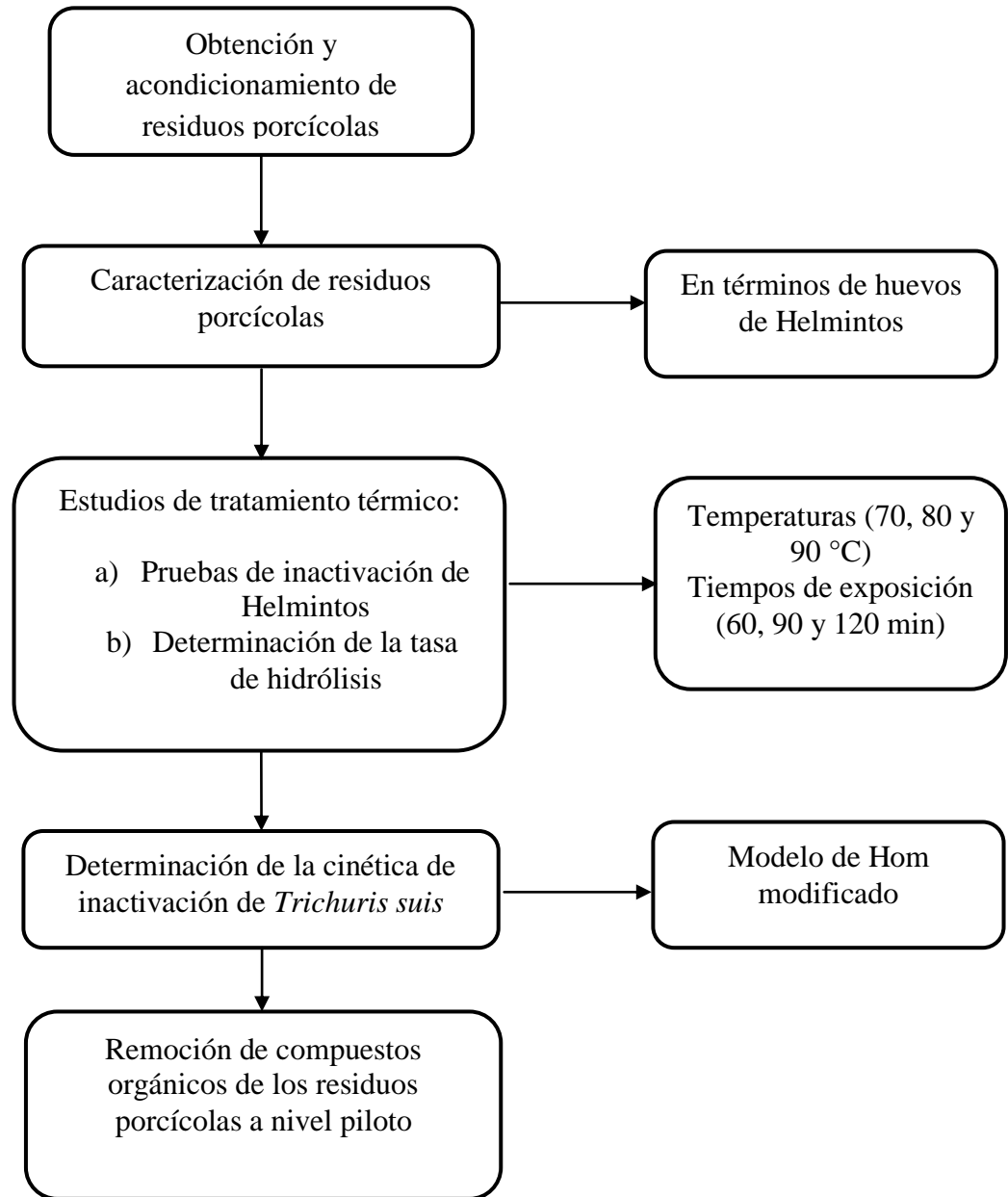
**MATERIALES Y MÉTODOS**

---

## CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología experimental

En el presente capítulo se presenta un diagrama de bloques (Figura 2.1) en el cual se describe la metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto.



**Figura 2.1** Diagrama de bloques con la metodología general

## 2.2 Obtención y acondicionamiento de residuos porcícolas

Las muestras de residuos porcícolas fueron obtenidas de una granja de cerdos localizada en el municipio de Mariano Escobedo, Veracruz, estas mismas se recolectaron en recipientes de 50 litros y fue removido cualquier tipo de residuo ajeno a las excretas que pudieran perjudicar su caracterización, así mismo se realizaron pruebas de dilución con la finalidad de obtener una muestra de 2.5 a 3.5% de Sólidos Totales para su caracterización.

## 2.3 Caracterización de residuos porcícolas

### 2.3.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los residuos porcícolas

#### 2.3.1.1 pH

Es un parámetro que indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución, este parámetro se midió directamente de la muestra con un potenciómetro Conductronic pH120, el cual se calibra con soluciones tampón de pH 7.0 y 12.00.

#### 2.3.1.2 Sólidos Totales

Los Sólidos Totales se definen como el material residual después de evaporación y secado de una muestra a cierta temperatura, esta determinación se realizó mediante la técnica gravimétrica descrita en el método estándar 2540 G de la APHA-AWWA-WPFC (1999). Se evaporó la muestra en un crisol a peso constante en una estufa marca Felisa a 103-105°C por un lapso de 24 h. El aumento de peso sobre el peso del crisol vacío representa los Sólidos Totales; y el cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$\% ST = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Donde:

$P_1$ = Peso del crisol a peso constante.

$P_2$ =Peso del crisol a peso constante + peso de la muestra antes de evaporación.

$P_3$ =Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco.

### 2.3.1.3 Sólidos Volátiles

El residuo producido en la determinación de Sólidos Totales según el método descrito anteriormente, se calcinó a 550°C en una mufla marca Termolyne, durante dos horas. El peso perdido en el crisol tras la incineración del residuo seco, representa el contenido en Sólidos Volátiles. De la misma forma que los Sólidos Totales, esta técnica analítica se realizó de acuerdo con el método estándar 2540 G de la APHA-AWWA-WPFC (1999), y el porcentaje se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\% SV = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Donde:

$P_1$ = Peso del crisol a peso constante.

$P_3$ =Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco.

$P_4$ =Peso del crisol a peso constante + peso de la muestra calcinada.

### 2.3.1.4 Nitrógeno total

El nitrógeno total se midió siguiendo la técnica analítica del método 4500-NTK C de la APHA-AWWA-WPFC (1999), en el que se utiliza un microdestilador y una parrilla digestora, este método determina el nitrógeno en estado tri-negativo y se basa en convertir el nitrógeno disponible como amino presente en la materia orgánica, en amonio, en presencia de ácido sulfúrico, sulfato de potasio y sulfato cúprico como catalizador, sin tomar en cuenta el nitrógeno en otras formas como: nitrato, nitrito, nitrilo, nitroso, etc.

### **2.3.1.5 Nitrógeno amoniacal**

Este parámetro se analizó por destilación siguiendo el método 4500-NH<sub>3</sub> B de la APHA-AWWA-WPFC (1999), que es similar a la determinación de nitrógeno total sin la previa digestión y utilizando óxido de magnesio como base; mientras el contenido de nitrógeno orgánico es la diferencia entre los valores de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal.

### **2.3.1.6 Carbohidratos**

Los carbohidratos presentes en la muestra se determinaron mediante el método de la antrona-sulfúrico. La reacción de antrona constituye la base de un método conveniente para la determinación de hexosas, aldo-pentosas y ácidos hexourónicos, bien sea que estén libres o formando parte de un polisacárido. La solución azul verdosa muestra una absorción máxima a 625 nm.

### **2.3.1.7 Lípidos**

El contenido de grasas se determinó mediante el método 5520 E de la APHA-AWWA-WPFC (1999), el cual consiste en acidificar una muestra para extraer las grasas, aceites y otras sustancias en solución, posteriormente se evapora el solvente y se cuantifica gravimétricamente el material.

### **2.3.1.8 Proteínas**

La Proteína Bruta o Materias Nitrogenadas Totales se determinó mediante el método Kjeldahl. Como consecuencia de su estructura a base de amino ácidos individuales, el contenido de nitrógeno de las proteínas varía sólo entre unos límites muy estrechos (15 a 18% y como promedio 16%). Para la determinación analítica del contenido en proteína total o "proteína bruta", se determinó el contenido de nitrógeno tras eliminar la materia orgánica con ácido sulfúrico, calculándose finalmente el contenido de proteína con ayuda de un factor.

---

## 2.3.2 Caracterización microbiológica

### 2.3.2.1 Coliformes fecales

Se utilizó el método descrito en la NOM-004-SEMARNAT-2002, el cual describe la técnica para llevar a cabo la cuantificación del grupo coliformes fecales en lodos y biosólidos, las muestras presentes en la muestra son separadas por agitación, dando por resultado una suspensión de células bacterianas, uniformemente distribuidas. A través de diluciones sucesivas se obtienen inóculos, al menos, de una célula para obtener crecimiento en el medio de cultivo (tubos positivos), y otros que al sembrarse dan resultado en por lo menos, un tubo de la serie. La combinación de resultados positivos y negativos permite realizar una estimación de la densidad bacteriana reportada como NMP.

El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio EC. Si se inoculan tres series de tres tubos y si se utilizan volúmenes decimales diferentes, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, siguiendo la fórmula (2.2).

$$NPM = \frac{NMP \text{ tablas} * 10}{\text{mayor volumen inoculado}} \quad (2.2)$$

### 2.3.2.2 Salmonella spp

El método se basó, en el enriquecimiento de la muestra con medios selectivos, que contienen sustancias inhibitoras, que favorecen el crecimiento de Salmonella spp.; reconstituyendo a su vez la vitalidad de las células dañadas y, de igual forma, impidiendo el desarrollo de bacterias coliformes asociadas. Una vez realizada la selección, las bacterias presentes en una muestra pueden ser separadas por agitación, dando por resultado una suspensión de células

bacterianas, uniformemente distribuidas, a través de diluciones sucesivas de la muestra.

El NMP de *Salmonella* spp; se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el caldo de selenito cistina. Se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente con la Ecuación 2.2

### **2.3.2.3 Huevos de helmintos**

El método se tomó de la NOM-004-SEMARNAT-2002, la cual tiene por objeto establecer la enumeración, determinación y la viabilidad, en caso requerido, de huevos de helmintos en muestras de lodos y biosólidos, con el fin de evaluar la calidad de estos subproductos y la eficiencia mediante la viabilidad de los huevos de helminto en los sistemas de tratamiento a los que están sujetos.

La prueba se basa en lavados continuos combinados con diversas etapas de filtración y flotación donde se logra la separación de huevos de helmintos del resto de las partículas de mayor y menor tamaño, así como su concentración. Permite, en caso de ser requerido, determinar la viabilidad de los huevos de helminto y con ello confirmar la calidad de diversos procesos de estabilización de lodos. Los resultados se expresan como sigue: H/2gST (Numero de huevos/2g de sólidos totales del volumen de muestra analizada)

## **2.4 Estudios de tratamiento térmico**

Estos estudios fueron realizados a nivel laboratorio en matraces de 1 L de capacidad, las pruebas se realizaron con temperaturas de 70, 80 y 90 °C con un tiempo de exposición de 60, 90 y 120 min, posteriormente se llevaron a cabo los análisis microbianos y bioquímicos para su análisis. Para el conteo y viabilidad de huevos de helmintos se aplicó la técnica de la NOM-004-SEMARNAT-2002 esta prueba se basa en lavados continuos combinados con diversas etapas de filtración



y flotación con esto se logró la separación de los huevos del resto de las partículas de menor y mayor tamaño, así como su concentración, con ello fue posible confirmar la calidad de los estudios de tratamiento térmico. Las muestras estuvieron en incubación de 40 a 45 días a  $26\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  dejando la tapa floja para que entre aire y, por lo menos una vez por semana, se verificó que el nivel del líquido no disminuyera agregando agua destilada ver Figura 2.2



**Figura 2.2** Muestras en incubación

Posteriormente, una vez transcurrido el tiempo de incubación se homogenizó la pastilla y se procedió a la cuantificación de huevos colocando la muestra en un disco Doncaster como se muestra en la Figura 2.3 en un microscopio óptico con objetivo 10x, solo aquellos huevos donde se observó una larva fueron considerados como viables.



**Figura 2.3** Disco Doncaster

### 2.4.1 Determinación de la tasa de hidrólisis

Un aspecto importante fue la determinación de la tasa de hidrólisis en términos de la DQO soluble para cuantificar la solubilización de la materia orgánica. El tratamiento térmico se evaluó mediante la determinación de la tasa de hidrólisis utilizando la Ecuación 2.3 (Appels *et al.*, 2010)

$$TH = \frac{\text{Concentración}_{SCTT} - \text{Concentración}_{SSTT}}{\text{Concentración}_{TSTT}} \quad (2.3)$$

Donde:

TH= Tasa de hidrólisis (%)

SCTT = Concentración soluble con tratamiento térmico (g/L)

SSTT = Concentración soluble sin tratamiento térmico (g/L)

TSTT = Concentración total sin tratamiento térmico (g/L)

### 2.4.2 Determinación de la cinética de Inactivación de huevos de Helminthos

Para describir el comportamiento de la inactivación de huevos de Helminthos se utilizó el modelo de Hom modificado Ecuaciones 2.4 y 2.5 que son una variante del modelo de Chick-Watson donde se evaluó la concentración inicial y final de HH en cada tratamiento respecto a la temperatura aplicada para poder evaluar las constantes de velocidad de inactivación a los diferentes tiempos.

$$\ln \frac{C}{C_0} = -k^* T^n \quad (2.4)$$

$$k^* = -k^* t^m \quad (2.5)$$

Donde:

C= Concentración de microorganismos en el tiempo final

C<sub>0</sub>= Concentración de microorganismos inicial en el tiempo 0

K= Constante de velocidad de inactivación de Microorganismos

T= Temperatura para la inactivación

n= Coeficiente de transferencia de calor en las fases sólido y líquido del lodo

t= tiempo de reacción

m= constante de Hom

## 2.5 Determinación de parámetros cinéticos en la remoción de compuestos orgánicos

### 2.5.1 Arranque y monitoreo a nivel piloto del proceso de digestión anaerobia

Se realizó la primera carga del reactor ovoide piloto con 2.4 L de inóculo y 5.6 L de sustrato, en este caso residuos porcícolas, ocupando un volumen útil de 80% del volumen total del reactor ovoide. Posteriormente, se realizó un monitoreo de los parámetros presentados en la Tabla 2.1

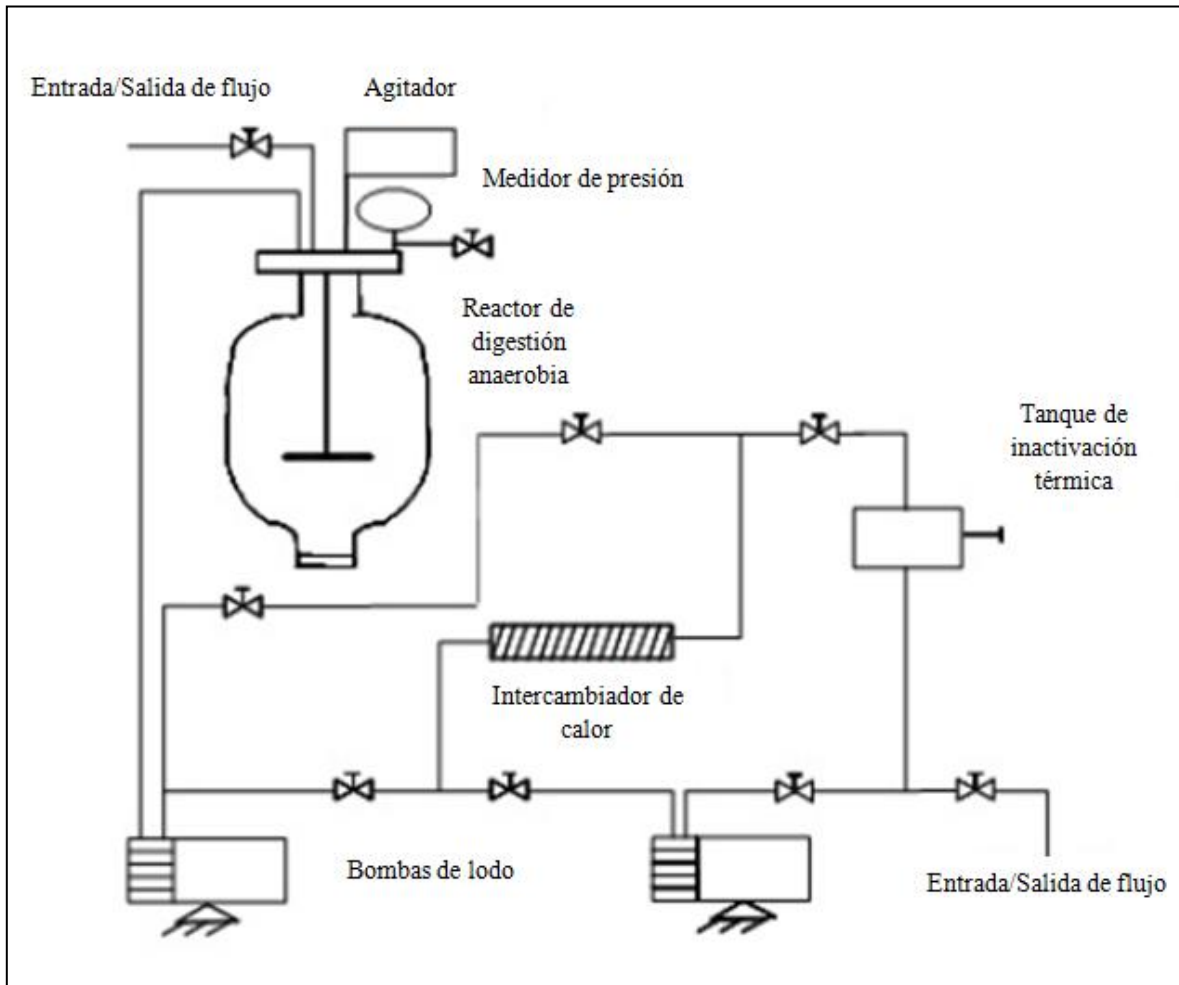
**Tabla 2.1** Parámetros de monitoreo durante la digestión anaerobia

Parámetros	Unidad	Método
pH	Unidades de pH	Potenciómetro
Sólidos Totales (ST)	% m/m	2540 B Standard Methods
Sólidos Totales Volátiles (STV)	% m/m	2540 E Standard Methods
Sólidos Totales Fijos (STF)	% m/m	2540 E Standard Methods
Nitrógeno Total	g N-NT/kgST	Standard Methods
Nitrógeno Amoniacal	g N-NH <sub>3</sub> /kgST	Standard Methods
Huevos de Helmintos	HHg/ST	NOM-004-SEMARNAT-2002

### 2.5.2 Aplicación del tratamiento térmico

Los mejores resultados del tratamiento térmico (2 h a 80 °C) fueron aplicados a los residuos porcícolas en un tanque de inactivación térmica para la alimentación del digestor anaerobio a nivel piloto (Figura 2.4) que se encuentra en el laboratorio de ambiental II dentro del Instituto Tecnológico de Orizaba para poder determinar los

parámetros cinéticos de la remoción de compuestos orgánicos con el modelo de Michaelis-Menten, para ello se llevó un monitoreo de los parámetros que se presentan en la Tabla 2.1. Cabe mencionar que el digester operó en un modo mesofílico.



**Figura 2.4** DTI del reactor piloto de digestión anaerobia

### 2.5.3 Evaluación de la calidad de los biósólidos

Al término de cada proceso se caracterizaron los productos finales de acuerdo a los requerimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final de las concentraciones

en cuanto a microorganismos patógenos así como señala el posible aprovechamiento de los biosólidos en función a su tipo y clase. Los resultados obtenidos en la metodología descrita en este capítulo se presentan y discuten en el siguiente capítulo.

---

**CAPITULO 3**

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

## CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los datos obtenidos en el cumplimiento de cada uno de los objetivos de la investigación en el orden como se mencionaron en la introducción.

### 3.1 Acondicionamiento de los residuos porcícolas

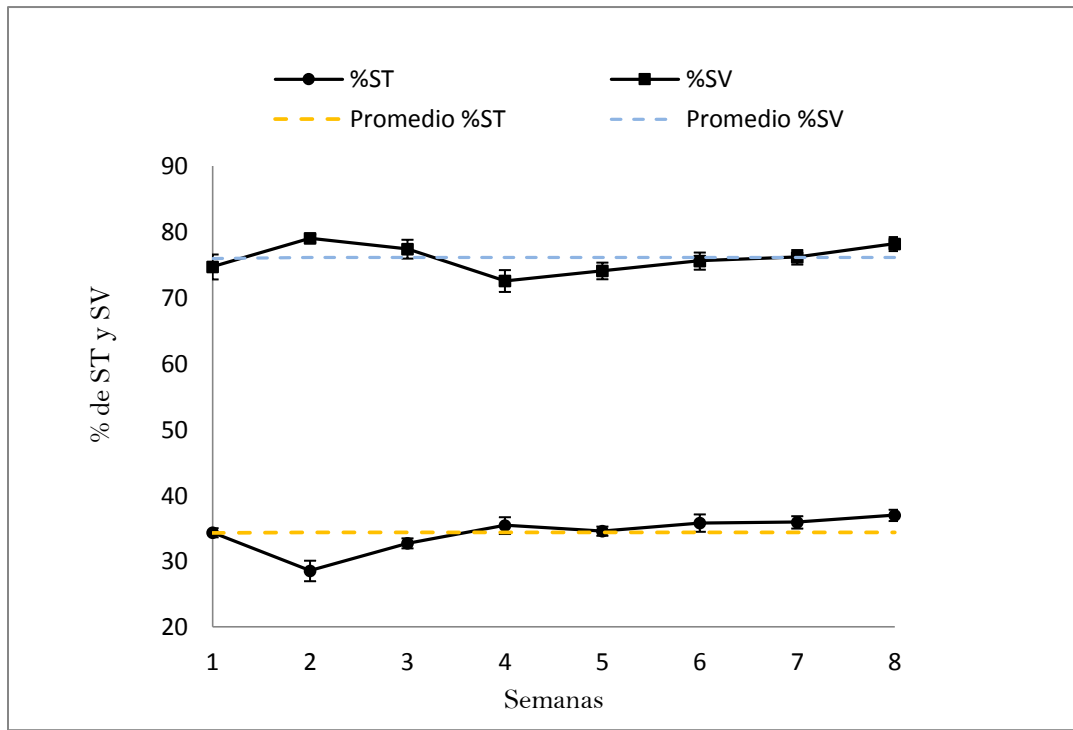
Durante el acondicionamiento se retiraron objetos ajenos a la muestra como fueron hojas, piedras, aserrín y otros materiales de gran tamaño. Debido a que la muestra es sólida se realizaron cuatro pruebas de dilución a las excretas porcinas (1:4, 1:5, 1:6 y 1:7) con la finalidad de encontrar una relación donde se obtuviera un valor de 2.5 a 3.5% de ST como se muestra en la Tabla 3.1, se observa que la relación 1:6 es la más favorable para la caracterización, manejo y operación con un valor de 2.88 %ST.

**Tabla 3.1** Pruebas de dilución

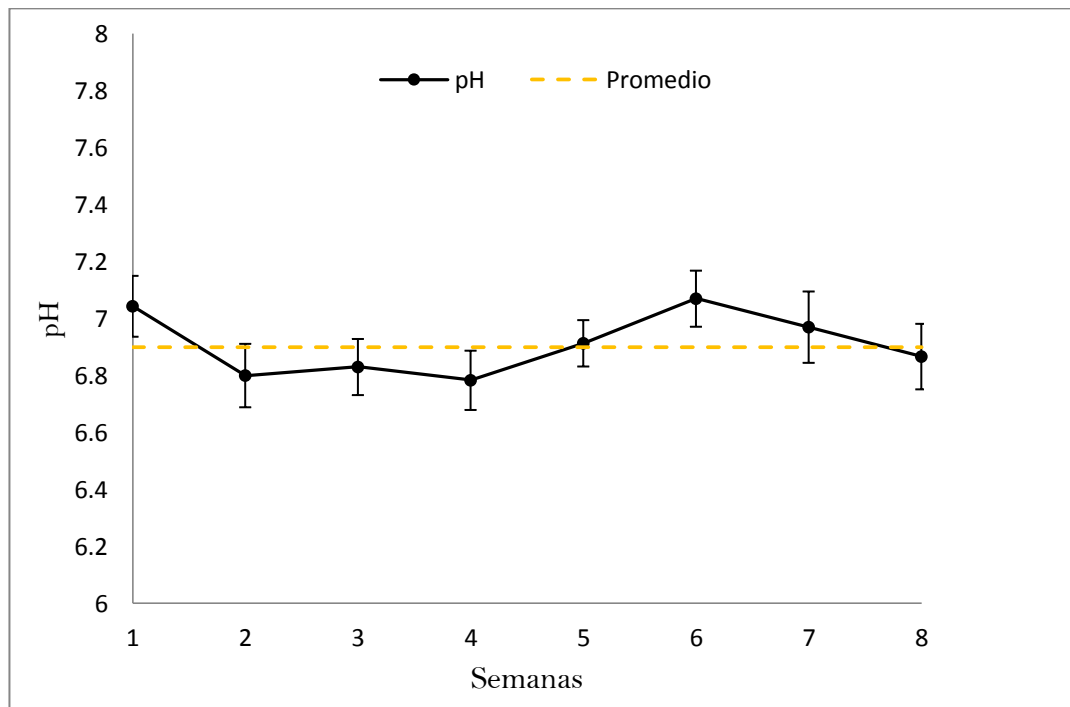
Relación	% ST
1:4	4.78
1:5	3.95
1:6	2.88
1:7	1.91

Los residuos porcícolas se monitorearon durante dos meses de forma semanal para verificar que la muestra no tuviera variaciones significativas en cuanto a %ST y %SV, ya que esto podría ocasionar una alteración al realizar la dilución con la relación establecida, sin embargo; durante los dos meses no se presentó una variación significativa como lo muestra la Figura 3.1, donde se obtuvieron promedios de  $34.29 \pm 1.3$  para %ST y  $76.99 \pm 1.1$  para %SV. Así mismo, la Figura 3.2 muestra el comportamiento del pH de los residuos, los cuales se mantuvieron

dentro de los rangos de la neutralidad con un promedio de  $6.91 \pm 0.1$ , por lo que se puede establecer que se trata de una muestra estable en estos parámetros.



**Figura 3.1** Monitoreo de ST y SV de los residuos porcícolas



**Figura 3.2** Monitoreo de pH de residuos porcícolas



### 3.2 Caracterización de residuos porcícolas

En la Tabla 3.2, se presentan los análisis realizados para la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los residuos porcícolas procedentes de la zona centro del estado de Veracruz antes de someter a cualquier tipo de tratamiento o proceso, cada parámetro se determinó por medio de una muestra y dos réplicas, en la Tabla 3.2 se reportan los promedios obtenidos.

**Tabla 3.2** Caracterización de residuos porcícolas

Parámetro	Unidad	Valor promedio	DE	Método
<b>Físicos</b>				
pH		6.91	0.1	Potenciómetro
Sólidos Totales	% m/m	2.52	1.3	2440 B SM
Sólidos Volátiles	% m/m	84.55	1.0	2540 E SM
<b>Químicos</b>				
Nitrógeno Amoniacal	gNH <sub>4</sub> /KgST	7	2.3	4500-NH <sub>3</sub> B SM
Carbohidratos	g/L	2.57	1.4	Antrona-Sulfúrico
Lípidos	g/L	10.05	2.6	5520 E SM
Proteínas	%	26.38	1.8	Micro Kjeldhal
<b>Microbiológicos</b>				
Coliformes fecales	NMP/gST	4.6x10 <sup>10</sup>	1.2	NOM-004-SEMARNAT-2002
<i>Salmonella</i> spp	NMP/gST	9x10 <sup>3</sup>	1.5	NOM-004-SEMARNAT-2002
Huevos de Helmintos	HH/gST	187	5.0	NOM-004-SEMARNAT-2002

### 3.2.1 Parámetros fisicoquímicos

El pH de 6.91 de la muestra se encuentra en valores ligeramente alcalinos este valor no afecta en el proceso de digestión anaerobia ya que por lo general los tratamientos anaerobios trabajan dentro de un rango en el que el pH debe oscilar entre 6.5 y 7.5, con un óptimo entre 7.0 y 7.2, a un pH menor las bacterias podrían verse afectadas seriamente (Girovich, 1996).

En términos de Sólidos Totales se presentó un valor de 2.52% tomando en cuenta que se trata de una muestra seca fue necesario realizar una dilución 1:6 para su manejo y caracterización. Para los Sólidos Volátiles el valor obtenido fue de 84.55%, lo cual indica que es un sustrato rico en materia orgánica apto para el proceso de digestión anaerobia y puede ser aprovechado en los suelos después del tratamiento.

Los resultados de carbohidratos 2.57 g/L, lípidos 10.05 g/L y proteínas 26.38% se encuentran por arriba de los reportados por Corte-Cano (2014) en un lodo fisicoquímico crudo de una planta de aguas residuales de una industria avícola los cuales fueron de 0.6 g/L, 9.1 g/L y 19.8%, respectivamente; lo anterior presenta una gran ventaja en términos de requerimientos de macronutrientes. Por otro lado, para el Nitrógeno amoniacal se presentó un valor bajo de 7 gNH<sub>4</sub>/KgST en comparación al propuesto de 16.6 gNH<sub>4</sub>/KgST y al reportado por Méndez (2009) de 14.54 gNH<sub>4</sub>/KgST. Las diferencias radican principalmente en el origen del sustrato.

### 3.2.2 Parámetros microbiológicos

Los aspectos microbiológicos son parámetros muy importantes a considerar al tratarse de una muestra de excretas porcinas procedentes de una granja no tecnificada por la presencia de microorganismos indicadores y huevos de Helminths.

Se encontró que los valores rebasaron los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para la clasificación de un lodo clase C para el caso de coliformes fecales el límite es de  $2 \times 10^6$  NMP/gST y se obtuvieron  $4.6 \times 10^{10}$  NMP/gST, para *Salmonella spp* el límite debe ser menor a  $3 \times 10^2$  NMP/gST y en la muestra se encontraron  $9 \times 10^3$  NMP/gST. Al tratarse de excretas porcinas para el caso de coliformes fecales se encontró un valor ligeramente por arriba del encontrado por Ruiz-Espinoza *et al.* (2012), en lodo fisicoquímico de  $2.9 \times 10^{10}$  NMP/gST, mientras que para *Salmonella spp* se encontró por debajo del valor de  $2.9 \times 10^4$  NMP/gST, sin embargo, al no cumplir con la categoría de biosólido clase C a estos residuos se les considera altamente contaminados microbiológicamente.

Los huevos de Helmintos, representan uno de los grupos de microorganismos patógenos más resistentes a la inactivación por factores ambientales y diferentes tipos de tratamientos. Para huevos de Helmintos la NOM-004-SEMARNAT-2002 establece como límite 35 HH/gST para un biosólido clase C, se obtuvo un valor de 187 HH/gST en los residuos porcícolas de una granja no tecnificada, dicho valor representa la contaminación de cerdos con estos parásitos.

Rodríguez-Vivas *et al.* (2001), en un estudio realizado a 3232 heces de porcinos en Mérida, Yucatán, México encontraron que un 45.05% se encuentran contaminados con *Coccidia*, 14.88% con *Oesophagostomum sp* y 14.66% con *Trichuris sp*. Estos datos representan la situación actual de la crianza de cerdo en condiciones sanitarias no adecuadas y el impacto en la salud tanto animal como al ser humano. Cabe destacar que durante la determinación de huevos de Helmintos la especie encontrada fue *Trichuris suis* parásito propio del cerdo como se muestra en las Figuras 3.3 y 3.4 mediante objetivos 10x y 40x, respectivamente; este nemátodo provoca en los cerdos desde una reducción en su crecimiento y falta de desarrollo hasta muertes ocasionales ocasionadas por la perforación de las larvas en los intestinos.



**Figura 3.3** Huevo de *Trichuris suis* en un objetivo 10x



**Figura 3.4** Huevo de *Trichuris suis* en un objetivo 40x

Los resultados promedios obtenidos de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los residuos porcícolas sirvieron como indicadores de la calidad del sustrato para el proceso de digestión anaerobia. De acuerdo con la calidad microbiológica identificada, es necesario aplicar un tratamiento pre o post complementario para la inactivación de microorganismos patógenos y parásitos en todos aquellos residuos que pueden producirse en países en vías de desarrollo para poder alcanzar la sustentabilidad en los diferentes procesos para su tratamiento y para el cumplimiento de los límites máximos permisibles para un biosólido clase A.

### 3.3 Estudios de tratamiento térmico

#### 3.3.1 Pruebas de inactivación de *Trichuris suis*

Las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los promedios con logaritmo natural (Ln) de los resultados de inactivación de *Trichuris suis* con un tratamiento térmico con diferentes temperaturas (70, 80 y 90 °C) a diferentes tiempos de contacto (60, 90 y 120 min) mediante cuatro tratamientos. Se realizó un análisis de varianza (Ver anexo A) con la finalidad de validar los datos experimentales, se tiene que el valor crítico de  $F_{0.05,3,12}$  es de 3.49, el cual al compararlo con los valores de  $F_0=244.5$  para 60 min,  $F_0=174.4$  para 90 min y  $F_0=120.6$  para 120 min, se concluye que el factor temperatura afecta significativamente la inactivación del huevo de *Trichuris suis*.

Las pruebas Duncan para la comparación de medias en el anexo A muestra que para un tiempo de 60 min existen diferencias significativas entre todos los tratamientos, es decir, que para ese tiempo no existe una inactivación eficiente de los huevos de Helminthos, sin embargo para 120 min se logra una importante inactivación al no existir diferencias significativas entre las temperaturas de 70, 80 y 90 °C.

Para las pruebas de inactivación de los huevos de Helminthos fue necesario realizar una incubación durante 4 semanas a  $26\text{ °C} \pm 0.2$  después del tratamiento térmico para verificar la viabilidad. Durante la cuantificación en el microscopio en un disco Doncaster se consideró como un huevo viable a aquel que presentó una larva en su interior mientras que aquel en el que no se observó un desarrollo larvario se le consideró como un huevo inactivo o inactivado al presentar cambios en su estructura morfológica como afectaciones en la membrana lipoproteica o ruptura permitiendo la entrada de agua y otros elementos, o la salida de material celular del huevo.

**Tabla 3.3** Resultados de inactivación térmica a tiempos de exposición de 60 min

Temperatura	1	2	3	4	Promedio
25	5.23	4.62	5.02	4.52	4.85
70	2.01	1.79	1.87	1.61	1.82
80	1.10	1.39	1.25	0.69	1.11
90	0	0	0	0	0

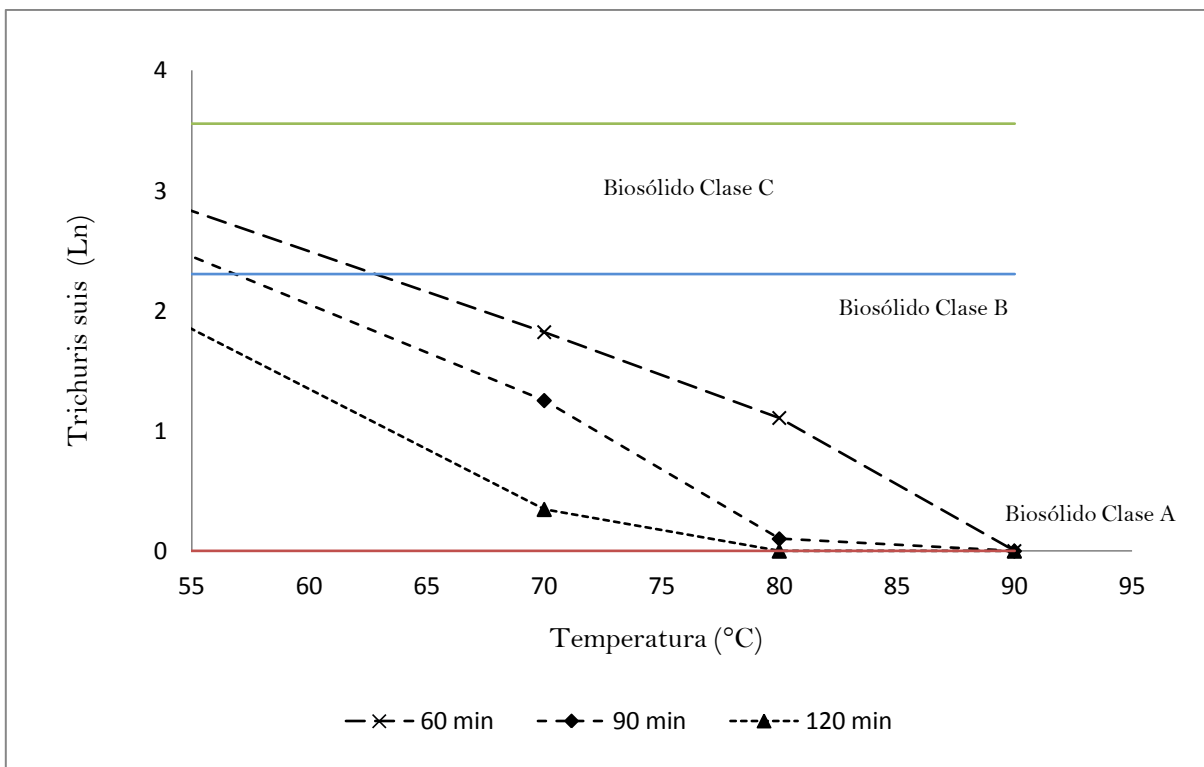
**Tabla 3.4** Resultados de inactivación térmica a tiempos de exposición de 90 min

Temperatura	1	2	3	4	Promedio
25	5.23	4.62	5.02	4.52	4.85
70	1.10	1.37	1.61	0.91	1.25
80	0	0.40	0	0	0.10
90	0	0	0	0	0

**Tabla 3.5** Resultados de inactivación térmica a tiempos de exposición de 120 min

Temperatura	1	2	3	4	Promedio
25	5.23	4.62	5.02	4.52	4.85
70	0	0.69	0	0.69	0.35
80	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0

La alta concentración de estos microorganismos patógenos en las excretas porcinas se ve reflejada en la Figura 3.5 con 1.5 unidades de Ln de diferencia para ser clasificado como un biosólido clase C esto es, más de 35 HH/gST. Para la obtención de un biosólido clase A es decir, menos de 1 HH/gST se obtuvo que con un tiempo de 60 min requiere de una temperatura de 90 °C, mientras que para 90 min una temperatura de 88 °C y para un tiempo de 120 min se necesitan 80 °C.



**Figura 3.5** Inactivación de *Trichuris suis* a diferentes temperaturas y tiempos de contacto

Después del tiempo de incubación al finalizar las pruebas de tratamiento térmico de *Trichuris suis* se observaron algunas diferencias en la estructura morfológica del huevo con respecto a los tratamientos aplicados. La muestra observada a través del microscopio en objetivo 10x se encontró que a 70 °C el huevo presentaba una larva en su interior tal como se muestra en la Figura 3.6 lo que indicó la viabilidad de crecimiento de este parásito. A temperaturas de 80 °C el huevo presentó burbujas en su interior lo que indica un daño en la membrana lipoproteica del mismo permitiendo la entrada de aire y agua como lo muestra la Figura 3.7 impidiendo el desarrollo de la larva, finalmente a temperaturas de 90 °C como se ve en la Figura 3.8 el huevo presentó una deformación total y una salida de material celular debido a las altas temperaturas que también impidió el crecimiento de la larva.



**Figura 3.6** Huevo de *Trichuris suis* a 70°C



**Figura 3.7** Huevo de *Trichuris suis* a 80°C



**Figura 3.8** Huevo de *Trichuris suis* a 90°C



### 3.3.2 Tasa de hidrólisis

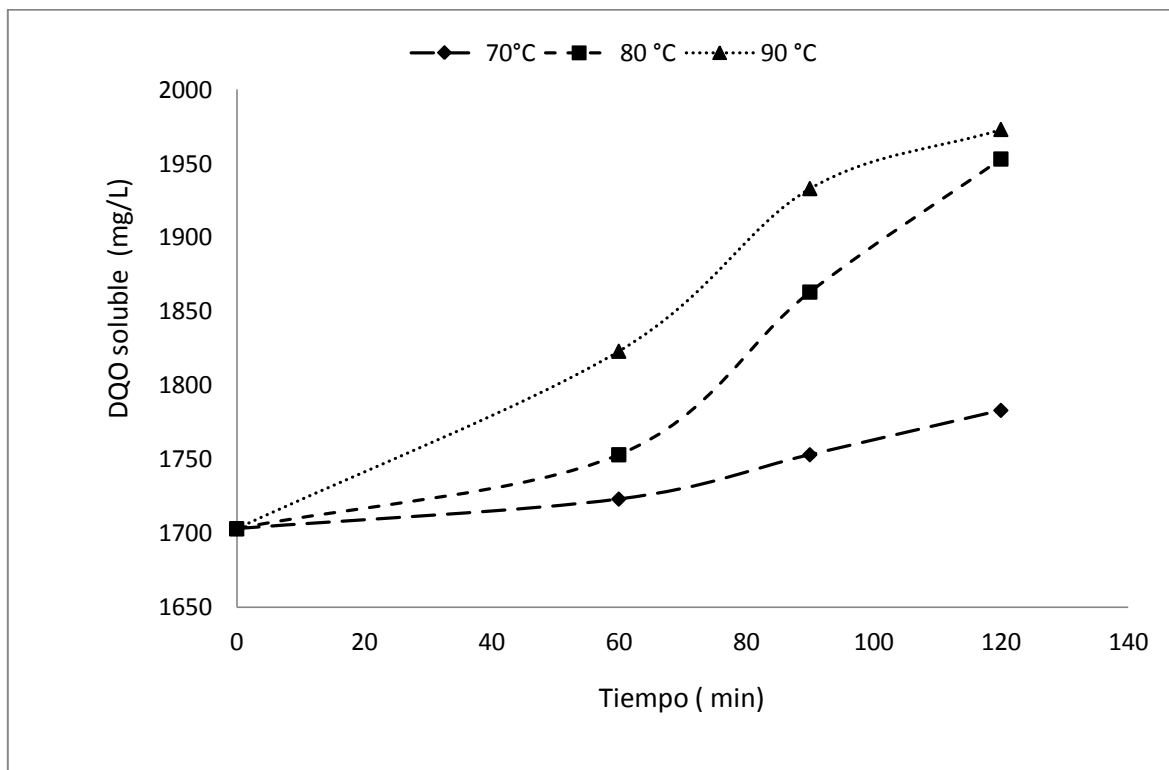
La tasa de hidrólisis se empleó para evaluar la solubilización de los compuestos orgánicos, para lo cual se determinó la DQO soluble y la DQO total a cada tratamiento térmico, la solubilización de estos compuestos orgánicos incrementó con el aumento de la temperatura y el tiempo, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.6 como puede observarse a 70 °C por 60 min el tratamiento térmico creó un ligero incremento en la DQO<sub>s</sub> obteniendo un 0.93% que comparado con los resultados obtenidos a temperaturas más altas y tiempos de exposición más largos es mínimo.

**Tabla 3.6** Concentración y degradación de los compuestos orgánicos de las excretas porcinas con el tratamiento térmico

Parámetros	70 °C			80°C			90°C		
	60 min	90 min	120min	60 min	90 min	120min	60min	90min	120min
DQO Soluble (mg/L)	1723	1753	1783	1753	1863	1953	1823	1933	1973
%	0.93	2.33	3.73	2.33	7.46	11.66	5.59	10.73	12.59

Los porcentajes de solubilización más altos fueron obtenidos con los tratamientos de 90°C a 90 min y 120 min con 10.73% y 12.59%, respectivamente. Estos valores se encuentran ligeramente por arriba de los obtenidos por Ruiz-Espinoza *et al.* (2012), en lodos avícolas donde obtuvo a 90°C por 90 min 9.21% de solubilización. Por otro lado Nava *et al.* (2016), alcanzó un valor de 6.59% para un tratamiento térmico de 90°C a 90 min en una mezcla de lodo residual, residuo agroindustrial cañero y pollinaza.

El incremento de la solubilización de los compuestos orgánicos es atribuido a la ruptura de los enlaces químicos en las membranas y paredes celulares dando lugar al daño celular provocado por las altas temperaturas liberando de esta manera el material celular como se muestra en la Figura 3.9 mediante una gráfica puede observarse el incremento de la DQO soluble a través del tiempo y el aumento de la temperatura.

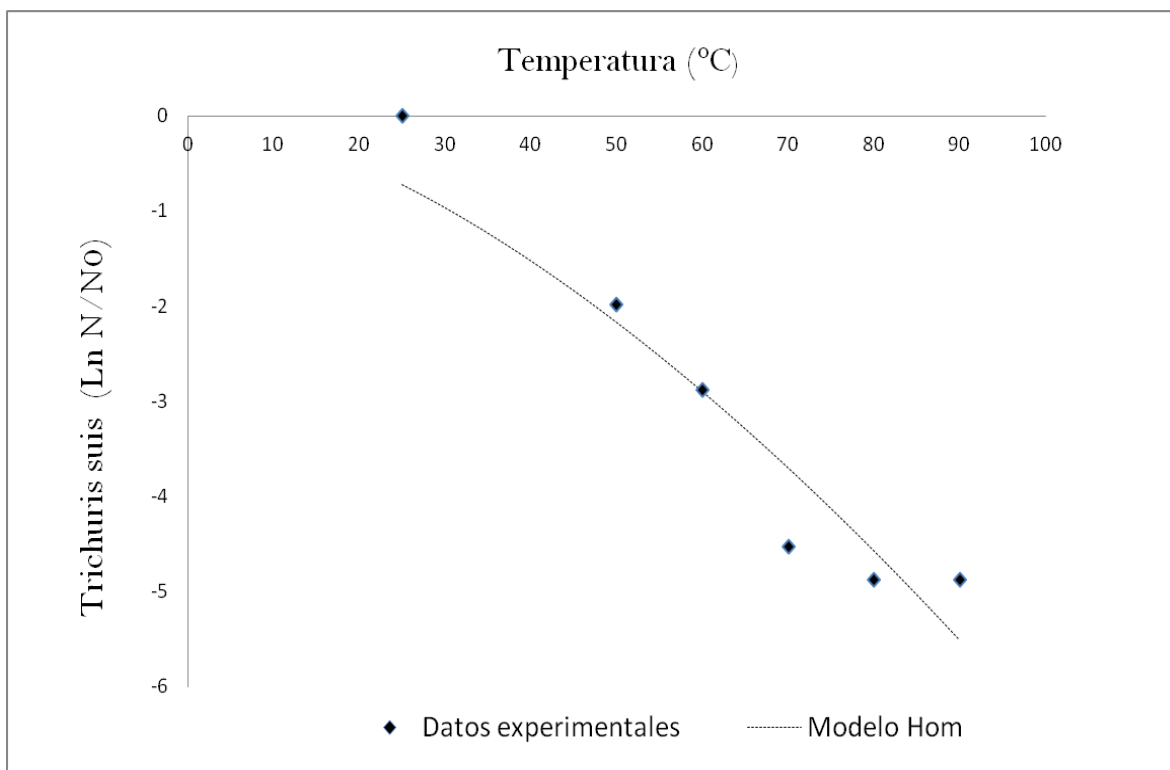


**Figura 3.9** Comportamiento de la DQO soluble en el tratamiento térmico

### 3.4 Determinación de parámetro cinéticos en la inactivación de *Trichuris suis*

Mediante el modelo de Hom Figura 3.10 se realizó la determinación de los parámetros cinéticos en la inactivación de *Trichuris suis* para el cumplimiento de la NOM-004-SEMARNAT-2002 para un biosólido clase A, para ello se necesitó una temperatura de 80 °C durante 120 min, el modelo presentó una  $R^2$  de 0.89

teniendo un comportamiento de “hombros” lo que muestra la resistencia de estos parásitos al tratamiento térmico.



**Figura 3.10** Inactivación de *Trichuris suis* con un tratamiento térmico a 120 min

En la Tabla 3.7 se muestran los parámetros cinéticos para la inactivación térmica, Méndez (2004), mencionó que para la inactivación química los patógenos en lodos fisicoquímicos presentaban valores de  $k$  mayores a 1, lo cual indica que los microorganismos no son muy resistentes a la inactivación, en este caso se obtuvo un valor menor a 0, una  $k^* = 4.405 \times 10^{-3}$ , la cual confirma una resistencia de *Trichuris suis* al tratamiento térmico, sin embargo se encontró que a partir de temperaturas de  $75^{\circ}\text{C}$  se obtiene una inactivación significativa de esta especie de Helminthos. Estos valores resultan semejantes a los propuestos por Atenodoro-Alonso *et al.* (2015), quien realizó una inactivación térmica del parásito *Ascaris suum* donde obtuvo una  $k^* = 1.311 \times 10^{-2}$  y una  $R^2 = 0.79$  para un tratamiento de 120 min.

**Tabla 3.7** Parámetro cinéticos para el modelo Hom en la inactivación de *Trichuris suis*

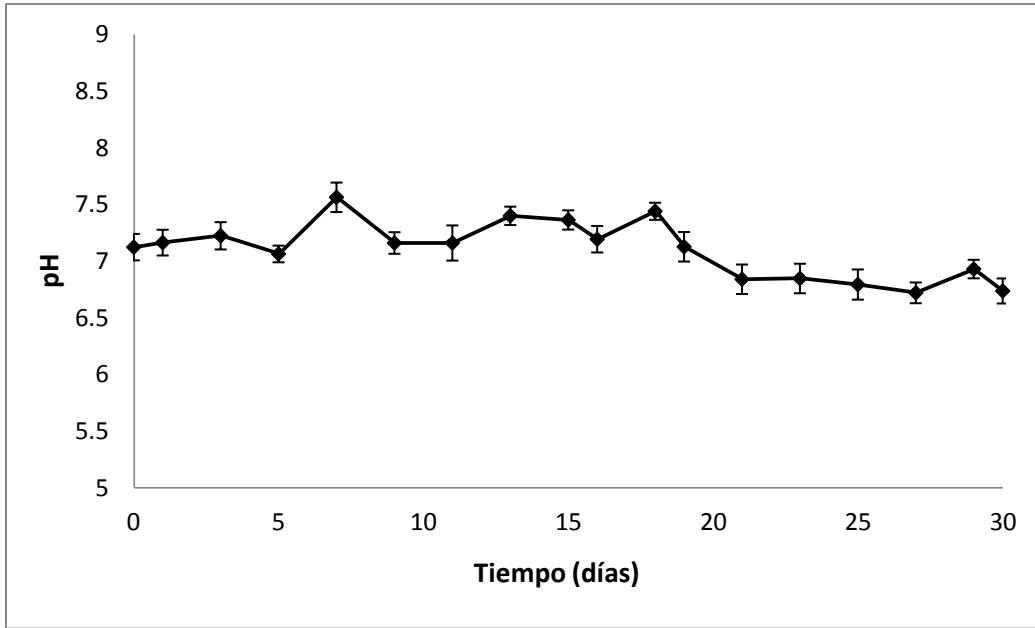
Microorganismo	Tiempo (min)	Tratamiento térmico		
		$k^*$	$n^*$	$R^2$
<i>Trichuris suis</i>	120	$4.405 \times 10^{-3}$	1.585	0.89

### 3.5 Adecuación de los residuos porcícolas como inóculo para el proceso de digestión anaerobia

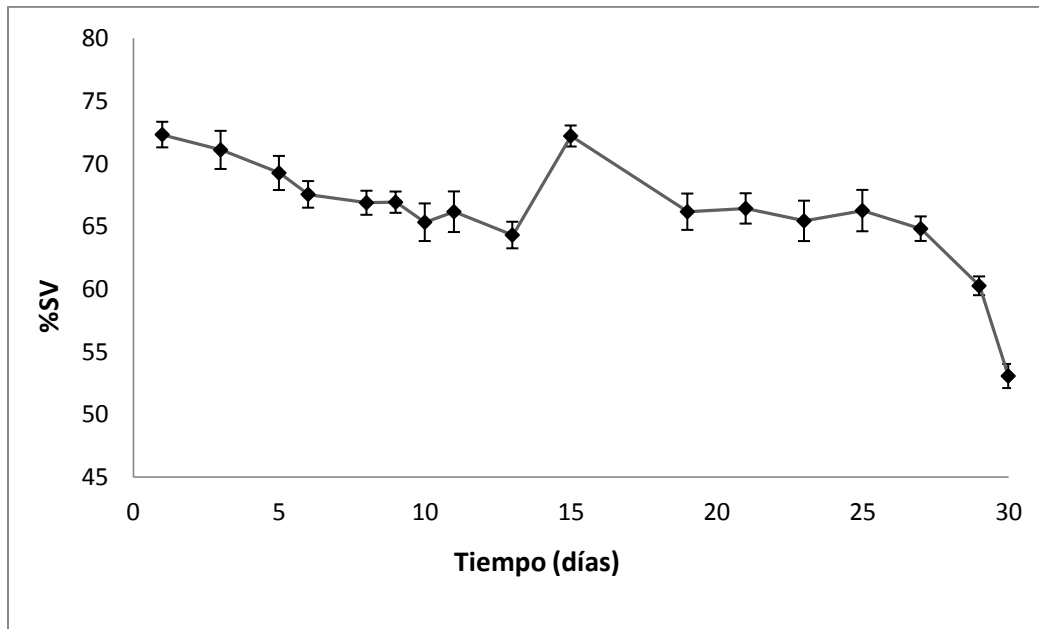
Se utilizó el efluente de biosólidos digeridos de un biorreactor de frutas y verduras que contenían bacterias propias de la digestión anaerobia para la inoculación. Para el arranque se utilizó la proporción de 30% inóculo y 70% sustrato para un balance entre el sustrato y las bacterias metanogénicas.

Se utilizó un reactor de 6 L con un volumen de operación de 4.5 L cerrado herméticamente, se evaluaron los parámetros de pH, SV y mL de biogás generado captado en recipientes de 2.5 L mediante desplazamiento de agua en un período de 30 días de operación en modo mesofílico (35 °C) con una alimentación de 0.5 L en el día 15.

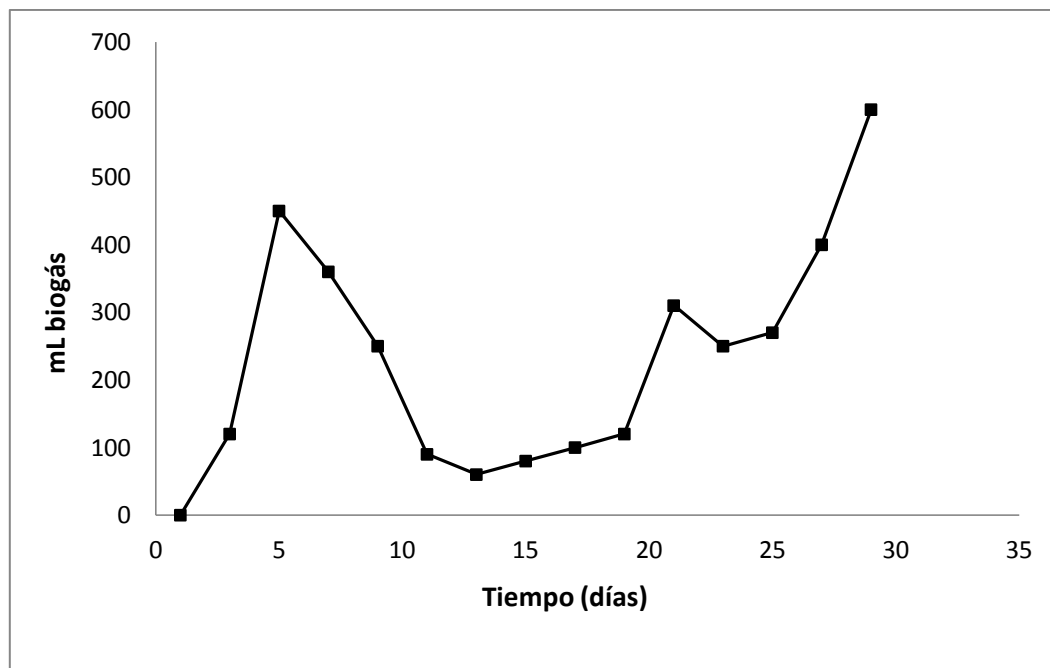
Durante la digestión de los residuos porcícolas el pH, Figura 3.11, se mantuvo cercano a la neutralidad para un adecuado desarrollo del proceso. Se alcanzó una remoción de 27% SV en tan sólo 30 días, Figura 3.12. El promedio de producción total de biogás fue de 0.247 L biogás/d, Figura 3.13, con un rendimiento de 0.37 L biogás/g  $SV_{rem}$  el rendimiento propuesto por Nava *et al.* (2016), en un proceso de digestión anaerobia con un pre tratamiento térmico obtuvo 1.0 L biogás/g  $SV_{rem}$  y 0.85 L  $CH_4$  /g $SV_{rem}$  que comparado se encuentra por debajo, sin embargo, los residuos porcícolas se encuentran en fase de adaptación y no presenta ningún tipo de pre tratamiento.



**Figura 3.11** Comportamiento del pH durante la adaptación de los residuos porcícolas como inoculo



**Figura 3.12** Comportamiento del %SV durante la adaptación de residuos porcícolas como inoculo

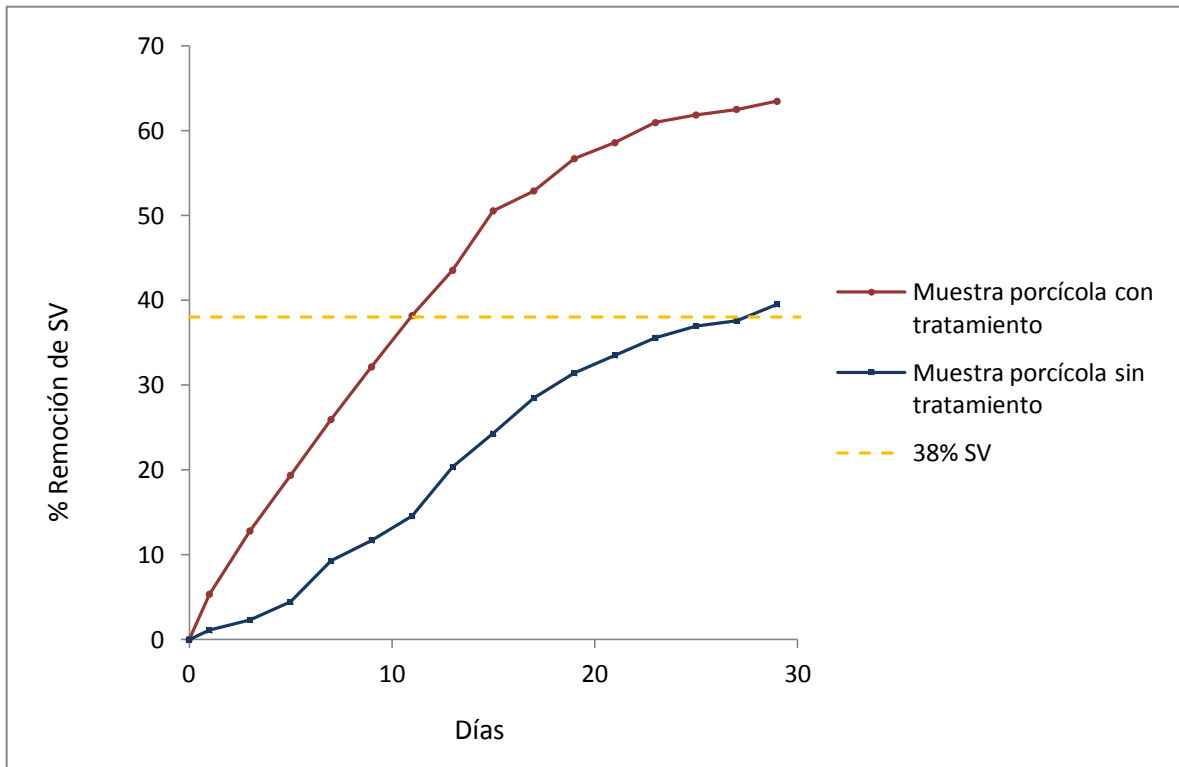


**Figura 3.13** Producción de biogás durante la digestión anaerobia de los residuos porcícolas

### 3.6 Remoción de compuestos orgánicos a nivel piloto

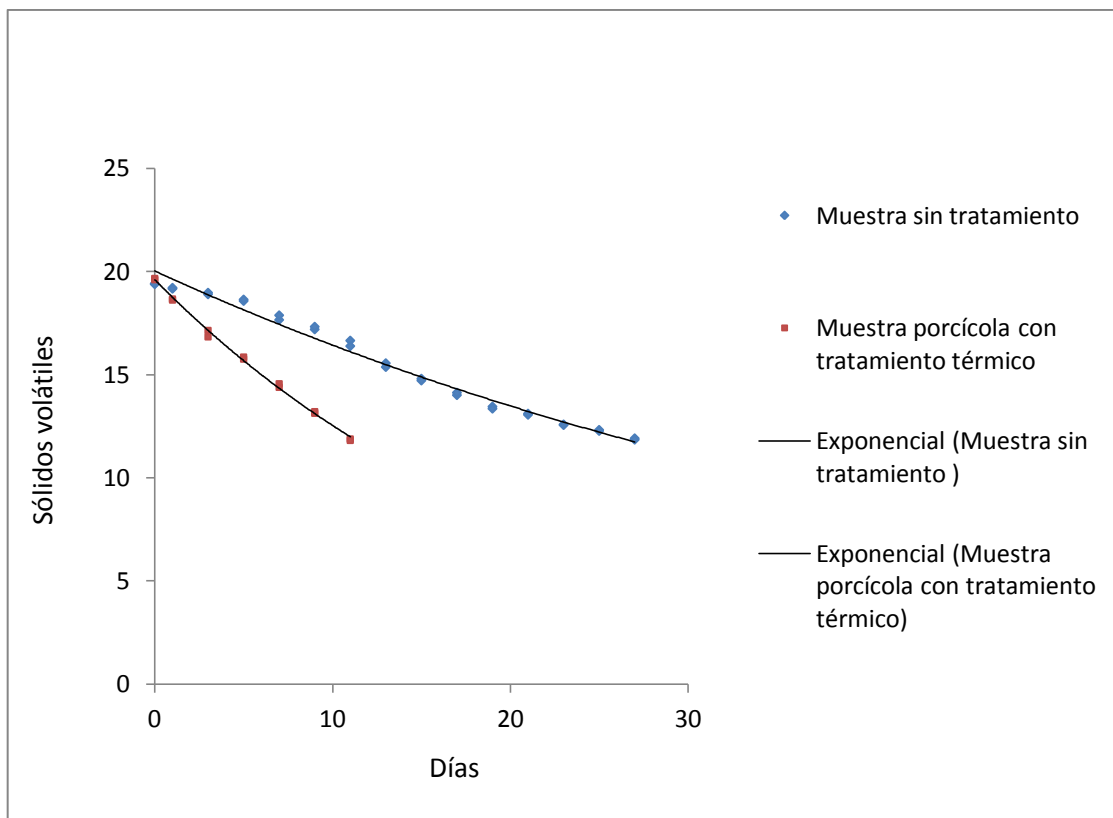
Se realizó el monitoreo del %SV de la digestión anaerobia mesofílica de los residuos porcícolas aplicando el tratamiento térmico de 80°C a un tiempo de exposición de 120 min en un reactor piloto en una proporción de 70% de muestra y 30% de inoculo, en la Figura 3.14 se observa la comparación entre un proceso de digestión anaerobia mesofílica sin tratamiento que alcanza una remoción de 40% de SV, y uno con tratamiento térmico que alcanzó una remoción de 65% de SV en 30 días de operación.

Se observó que el tratamiento térmico redujo hasta un 55% del TRH para la obtención del 38% de remoción de sólidos volátiles como lo marca la NOM-004-SEMARNAT-2002 para el control de atracción de vectores.



**Figura 3.14** Comparación de la remoción de sólidos volátiles durante la digestión anaerobia

Mediante los parámetros obtenidos de la digestión anaerobia se realizó el modelo cinético de Michaelis-Menten para el cálculo de la velocidad de reacción, la Figura 3.15 muestra la degradación de sólidos volátiles hasta llegar a un 38% de remoción durante un período de tiempo donde los residuos porcícolas crudos y los tratados térmicamente presentan un modelo de primer orden, sin embargo, cuando se grafica la velocidad de reacción ( $V_r$ ) contra la concentración de sustrato ( $C_a$ ) no es posible determinar la condición en que se ha llegado a la velocidad máxima ( $V_{max}$ ), debido al incremento exponencial de las muestras, por lo que el gráfico de Lineweaver-Burke se utiliza como una transformación matemática conocida como dobles recíprocas, esto es la inversa de la velocidad frente a la inversa de la concentración para calcular los parámetros cinéticos en una línea recta.

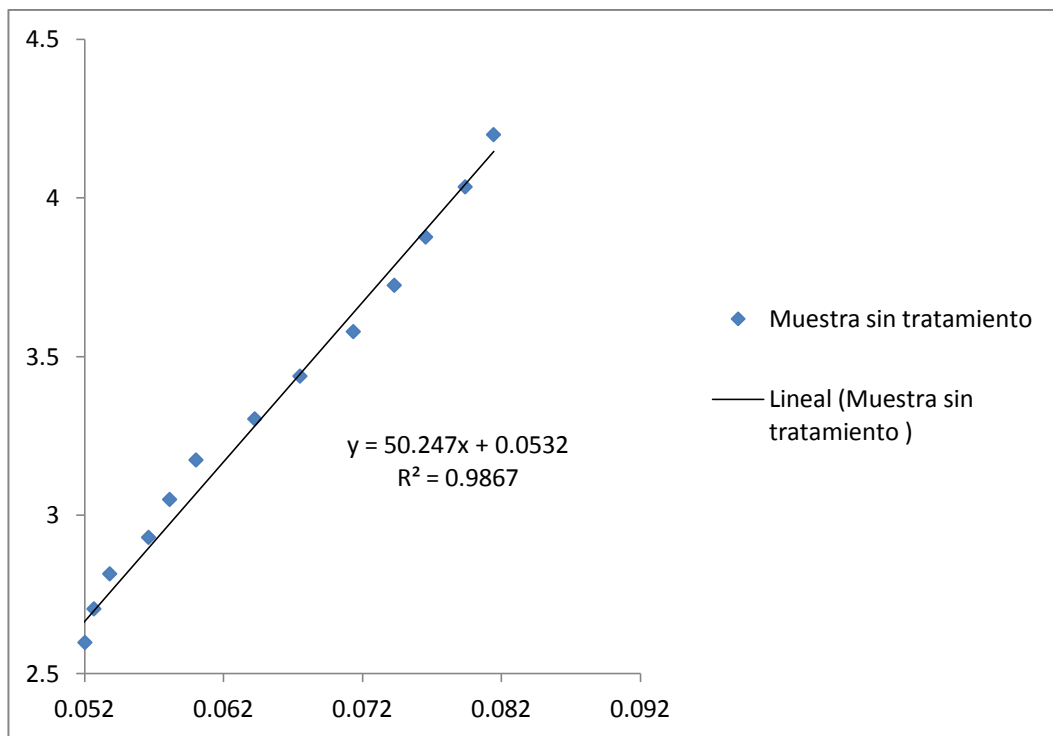


**Figura 3.15** Degradación de sólidos volátiles de los residuos porcícolas

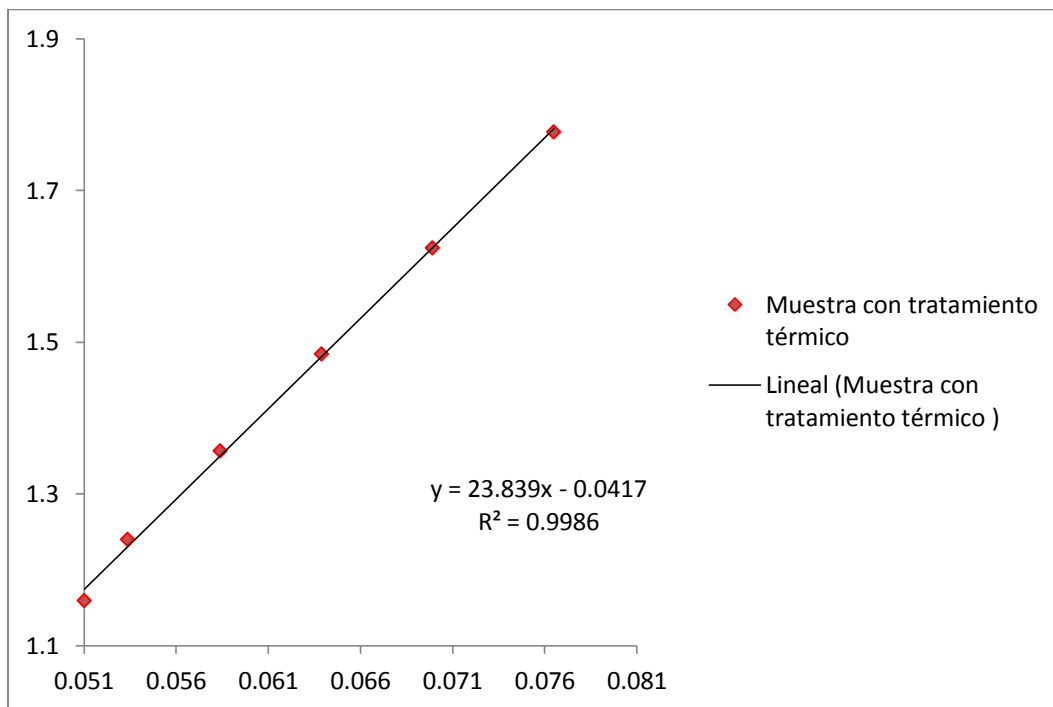
La muestra porcícola cruda, Figura 3.16 presentó una  $V_{max} = 18.79$  gSV/L·d mientras que la muestra tratada, Figura 3.17 obtuvo una  $V_{max} = 23.98$  gSV/L·d, lo cual representa que la muestra a la que se le aplicó el tratamiento térmico alcanza una velocidad de reacción más rápida respecto a la cruda, es decir se hace independiente más rápido de la concentración del sustrato, esto debido a la solubilización de algunos compuestos orgánicos.

La constante de Michaelis para la muestra cruda y tratada fue de  $K_m = 947.08$  gSV/L y  $K_m = 571.67$  gSV/L, respectivamente, indica la concentración del sustrato a la cual la velocidad de reacción es la mitad de la velocidad máxima (Sánchez, 2004).





**Figura 3.16** Gráfico de Lineweaver-Burke de la muestra porcícola cruda



**Figura 3.17** Gráfico de Lineweaver-Burke de la muestra porcícola tratada

La Tabla 3.8 muestra la comparación de los parámetros cinéticos obtenidos en la digestión anaerobia mesofílica donde se observa que la muestra porcícola tratada presenta una mayor velocidad, es decir, el tratamiento térmico ayudó en la solubilización de la materia orgánica lo cual se ve reflejado en una degradación más rápida de los sólidos volátiles, respecto a la constante  $K_m$  cuanto menor sea esta, mayor será la afinidad de los microorganismos hacia el sustrato tal como sucede con el tratamiento térmico, ya que menor será la cantidad de sustrato necesario para alcanzar la mitad de la velocidad máxima, este parámetro es independiente de su concentración y es característico de cada grupo de microorganismos según el sustrato utilizado Nelson (2000).

**Tabla 3.8** Resultados de parámetro cinéticos

<b>Parámetros cinéticos</b>	<b>Vmax (gSV/L·d)</b>	<b>Km(gsv/L)</b>
Muestra porcícola cruda	18.79	947.08
Muestra porcícola tratada	23.98	571.67

### **3.7 Evaluación de la calidad de los biosólidos de la digestión anaerobia térmica**

La Tabla 3.9 presenta los datos obtenidos del lodo digerido previamente tratado térmicamente en el reactor ovoide piloto al término de su operación en modo batch después de 30 días de operación.

En base a los valores de pH se encontró dentro de los valores representativos (6.5-8) para biosólidos anaerobios mostrados por Girovich (1996) al igual que los Sólidos Totales (0.5-2 %ST), mientras que los SV se encontraron por debajo de los valores típicos al tratarse de un biosólido operado en modo batch y no en modo semicontinuo o continuo. El valor de nitrógeno amoniacal (6.3 gNH<sub>4</sub>/KgSV) mostró que se trata de un biosólido rico en este nutriente.

De acuerdo con las características que presentó el biosólido, se alcanzó una inactivación total de bacterias y microorganismos patógenos que cumplen con las normas para un biosólido clase A establecidas por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

**Tabla 3.9** Evaluación de los biosólidos

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor promedio</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Clasificación</b>
pH		7.09	6.5-8	Biosólido típico
Sólidos Totales	% m/m	1.95	0.5-2	Biosólido típico
Sólidos Volátiles	% m/m	40.07	50-60	Biosólido agotado
Nitrógeno Amoniacal	gNH <sub>4</sub> /KgSV	6.3	2.4-5	Biosólido rico
Coliformes fecales	NMP/gST	0	<1000 NMP/gST	No contaminado
<i>Salmonella</i> spp	NMP/gST	0	< 3 NMP/gST	No contaminado
Huevos de helmintos	HH/gST	0	<1 HH/gST	No contaminado

Los biosólidos ricos y estabilizados pueden ser aplicados como remediación de suelos para mejorar sus características, como la textura, la capacidad de absorción de agua y la provisión de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal (EPA, 2000).

---

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## CONCLUSIONES

- Los residuos porcícolas provenientes de la zona centro de Veracruz se encontraron altamente contaminados en aspectos microbiológicos, se encontró una gran cantidad de huevos de Helmintos: 187 HH/gST, dato que representa la deficiencia de granjas porcícolas no tecnificadas en la crianza y manejo de los cerdos.
- Los parámetros cinéticos del modelo de Hom reflejan una resistencia de *Trichuris suis* al tratamiento térmico, sin embargo; a una temperatura de 80°C a un tiempo de exposición de 120 min es posible inactivar estos huevos y de esta manera cumplir con las características de un biosólido clase A, a su vez el tratamiento térmico brindó la ventaja de obtener una tasa de hidrólisis de 11.66%, lo cual indica una buena solubilización de la materia orgánica para el proceso de digestión anaerobia.
- Durante el estudio se encontró que los huevos de *Trichuris suis* a temperaturas de 80°C presentan daños internos y a la membrana lipoproteica del huevo que permitiendo la entrada de agua y aire, mientras que temperaturas de 90 °C causan una deformación del huevo, en ambos casos se impide el desarrollo de la larva obteniendo un huevo inactivo.
- Para el acondicionamiento de los residuos porcícolas, se obtuvo un pH estable entre 6.6 a 7.5, con una remoción de 27%SV en 30 días de operación y un promedio de 0.247 L de biogás/d.
- La digestión anaerobia con tratamiento térmico presentó una remoción de 38% en 12 días de operación y en 30 días se obtuvo una remoción de 65% reduciendo el TRH hasta en un 55%

- El modelo de Michaelis-Menten mostró que durante la digestión anaerobia de residuos porcícolas sometida al tratamiento térmico ocasionó un aumento en la velocidad máxima de 18.79 gSV/L·d a 23.98 gSV/L·d
- Los biosólidos generados en la digestión anaerobia térmica presentaron una estabilización y principalmente una inactivación total de microorganismos patógenos.
- El tratamiento térmico en los residuos porcícolas ocasionó la permeabilidad de las paredes lipoproteicas de *Trichuris suis* permitiendo la entrada de agua y agentes externos provocando la inactivación del huevo al impedir el desarrollo de la larva. La crianza de porcinos en granjas no tecnificadas son propensos al desarrollar microorganismos patógenos por lo que la aplicación de un pre tratamiento térmico en el uso de sus residuos para procesos de digestión anaerobia resulta de gran importancia para evitar contaminación en el biosólido además de aportar beneficios en la reducción del TRH y la solubilización de la materia orgánica.

## RECOMENDACIONES

- Para facilitar el manejo de la muestra después de la dilución se sugiere realizar un tamizado para retirar aquellos sólidos de gran tamaño que no logran diluirse, estos sólidos ocasionan que las tuberías se tapen impidiendo la salida de la muestra.
- Se recomienda el uso de agitación durante el tratamiento, esto para obtener una mayor homegenización del calor en la muestra tratada, por otro lado se recomienda tratar la mezcla utilizando no más del 60% de la capacidad del recipiente ya que durante el proceso se generan espumas y vapores.
- Para facilitar el arranque de la digestión anaerobia puede utilizarse un inóculo adaptado posiblemente de una planta de tratamiento de aguas residuales que agilice la actividad biológica.

---

## **ANEXOS**

---



## ANEXO A ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Inactivación de *Trichuris suis*

**Tabla A.1** Tratamientos 60 min (70, 80, 90 °C)

Temperatura (°C)	Bloques			
	1	2	2	4
25	0	0	0	0
70	-3.2162056	-2.83321334	-3.14547766	-2.91235066
80	-4.13249633	-3.23867845	-3.76451687	-3.8286414
90	-5.23110862	-4.62497281	-5.01727984	-4.52178858

**Tabla A.2** Análisis de varianza 60 min (70, 80, 90 °C)

Analysis of Variance Table						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Power
<b>Term (Alpha=0.05)</b>						
A: Temp	3	51.72482	17.24161	244.58	0.000000*	1.000000
S	12	0.8459441	7.049534E-02			
Total (Adjusted)	15	52.57077				
Total	16					
* Term significant at alpha = 0.05						
<b>Duncan's Multiple-Comparison Test</b>						
Response: C3						
Term A: C1						
Alpha=0.050 Error Term=S(AB) DF=9 MSE=3.856616E-02						
Group	Count	Mean	Different From Groups			
90	4	-4.848787	80, 70, 25			
80	4	-3.741083	90, 70, 25			
70	4	-3.026812	90, 80, 25			
25	4	-4.440892E-16	90, 80, 70			

**Tabla A.3** Tratamiento 90 min (70, 80, 90 °C)

Temperatura (°C)	Bloques			
	1	2	2	4
25	0	0	0	0
70	-4.13249633	-3.23867845	-3.40784192	-3.60549785
80	-5.23110862	-4.21950771	-5.01727984	-4.52178858
90	-5.23110862	-4.62497281	-5.01727984	-4.52178858

**Tabla A.4** Análisis de varianza 90 min (70, 80, 90 °C)

<b>Analysis of Variance Table</b>						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Power
<b>(Alpha=0.05)</b>						
A: C1	3	61.88579	20.6286	174.45	0.000000*	1.000000
S	12	1.418961	0.1182467			
Total (Adjusted)	15	63.30475				
Total	16					
* Term significant at alpha = 0.05						
<b>Duncan's Multiple-Comparison Test</b>						
Response: C2						
Term A: C1						
Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=12 MSE=0.1182467						
Group	Count	Mean	Different From Groups			
90	4	-4.848787	70, 25			
80	4	-4.747421	70, 25			
70	4	-3.596129	90, 80, 25			
25	4	4.440892E-16	90, 80, 70			

**Tabla A. 5** Tratamiento 120 min (70, 80, 90 °C)

Temperatura (°C)	Bloques			
	1	2	2	4
25	0	0	0	0
70	-5.23110862	-3.93182563	-5.01727984	-3.8286414
80	-5.23110862	-4.62497281	-5.01727984	-4.52178858
90	-5.23110862	-4.62497281	-5.01727984	-4.52178858

**Tabla A.6** Análisis de varianza 120 min (70, 80, 90 °C)

<b>Analysis of Variance Table</b>						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Power
A: Temp	3	67.53164	22.51055	120.66	0.000000*	1.000000
S	12	2.238784	0.1865653			
Total (Adjusted)	15	69.77042				
Total	16					
* Term significant at alpha = 0.05						
<b>Duncan's Multiple-Comparison Test</b>						
Response: C2						
Term A: C1						
Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=12 MSE=0.1865653						
Group	Count	Mean	Different From Groups			
80	4	-4.848787	25			
90	4	-4.848787	25			
70	4	-4.502214	25			
25	4	4.440892E-16	80, 90, 70			

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

Ahring, B. K. and Westermann, P. 1987. Thermophilic anaerobic degradation of butyrate by a Butyrate-utilizing bacterium in coculture and triculture with methanogenic bacteria. *Applied Environmental Microbiology*. **53**(2):434-439.

Angelidaki, I., Ellegaard, L. and Ahring, B.K. 1999. A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas. *Biotechnology and Bioengineering*. **63**(3):363-372.

Appels L., Degreve J., Van der Bruggen B., Van Impe, J., Dewil R. 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.*, 101(15), 5743–5748.

Bandala, R.E, González L., Sanchez-Salas J.L. and Castillo H.J. 2012. Inactivation of *Ascaris* eggs in water using sequential solar driven photo-Fenton and free chlorine. *Journal of Water and Health*, **10**(1):20-30.

Cabirol, N., Rojas, O. M. and Noyola, A. 2002b. Fecal removal of helminth eggs and coliforms by anaerobic thermophilic sludge digestion. *Water Science and Technology*. **45**(10): 264–274.

Chynoweth, D.P. and Pullammanappallil, P. 1996. *Microbiology of solid waste*. A. C. Palmisano and M. A. Barlaz editors, Florida, U.S.A.

Corte-Cano, N.G. 2014. Evaluación del desempeño de la tecnología de digestión anaerobia-térmica con dualidad de operación a nivel planta piloto. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Crites, R., Tchobanoglous, G. 2000. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Tomo I. Editorial McGraw-Hill. Colombia.

---

DIGESA, 2002. Guía para la crianza sanitaria de cerdos. Dirección ejecutiva de higiene alimentaria y control de zoonosis. Lima, Perú.

Financiera Rural. 2012. Monografía de ganado porcino.  
<http://www.financierarural.gob.mx/>

Feachem, R., Bradley, D., Garelick, H. and Mara, D. 1983. Sanitation and disease: Health aspects of excreta and wastewater management. John Wiley and Sons. New York, NY.

Fukuzaki, S., Nishio, N., Shobayashi, M. y Nagai, S. 1990. Inhibition of fermentation of propionate to methane by hydrogen, acetate, and propionate. *Applied and Environmental Microbiology*, **56**(3): 719-723.

Gerardi, M. H. 2003. The microbiology of anaerobic digesters. Wiley-interscience. USA.

Girovich, M. J. 1996. Biosolids Treatment and Management. Ed Marcel Decker, Inc . N. Y., E.U.A.

Hanaki, K., Matsuo, T y Nagase, M. 1981. Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnology and Bioengineering*. **23**:1591-1610.

Hays, B. D. 1977. Potential for parasitic disease transmission with land application of sewage plant effluents and sludge. *Water Research*, **11**(1997): 583-595.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. and Marais, G. 1995. *Activated Sludge model n° 2*. IAWQ Scientific and Technical Report n°3. Int. assoc. Water Qual. Londres.

---

Hills, D. J. y Nakano, K. 1984. Effects of particle size on anaerobic digestion of tomato solid wastes. *Agricultural Wastes*. **10**:285-295.

Hobson, P. N. 1990. The treatment of agricultural wastes, in anaerobic digestion: a waste treatment technology. Editado por Wheatley, A. *Critical reports on applied chemistry*. Elsevier applied science LTD., **31**:93-138.

Hom, L. W. 1972. "Kinetics of chlorine disinfection in an ecosystem". *J. Sanit. Engrg. Div., ASCE*, **98**(1): 183-193

Hyung, S. H., Young, J. C., and Kim, Y. S. 1998. Inhibition kinetic for propionate degradation using propionate enriched mixed cultures. *Water science and technology*. **38**(8-9): 443-452.

INEGI. 2014. Estadística de sacrificio de ganado en rastros municipales por entidad federativa 2008-2013. <http://www.inegi.org.mx/>

Iza, J. 1995. Control del proceso anaerobio. I curs d'enginyeria ambiental. Universitat de Lleida. Lleida.

Jih-Gaw, L., Cheng-Nan, Ch. and Shou-Chung, Ch. 1997. Enhancement of anaerobic digestion of waste activate sludge by alkaline solubilization. *Bioresource Technology*., **62**:85-90.

Levenspiel, O.1998. Ingeniería de las reacciones Químicas. Tercera Edición. Wiley. New York

López-Escobar, L. A. 2009. Tratamiento ácido y alcalino para la inactivación de huevos de helmintos presentes en lodos fisicoquímicos de origen agroindustrial. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana. México

Luna, H. R. G. y Guyot, P. J. 1990. Arranque de un reactor anaerobio con lodos adaptados como inóculo y un influente industrial de la industria agroalimenticia (ingenio azucarero). Reporte técnico realizado en el laboratorio de microbiología ambiental Depto. Biotecnología, UAM-I.

Madigan, M. T., Martinko, J. M. y Parker, J. 1998. Biología de los microorganismos. Edit. Prentice Hall International (UK) Ltd.

McKiley, W.J., Parzen E.P. and Mercado-Guzman, A. 2012. Ammonia Inactivation of Ascaris Ova in Ecological Compost by Using Urine and Ash. Applied and Environmental Microbiology, **78**(15): 5133-5137.

Medina-Claros, A.F., Mellado-Peña, M.J., García-López, M., H., Piñero-Pérez, R., y Martín-Fontelos, P. 2013. Parasitosis intestinales. UGC Pediatría. Hospital Axarquía, Vélez-Málaga. Servicio de Pediatría. Unidad de Enfermedades Infecciosas y Pediatría Tropical. Consejo al Niño Viajero y Vacunación Internacional. Hospital Carlos III. Madrid.

Méndez J. M., Jimenez, B. and Maya C. 2004. Disinfection kinetics of pathogens in physicochemical sludge treated with ammonia. Water Science and Technology **50**(9):67-47.

Méndez-Contreras, J. M., Rendón-Sagardi, J. A., Ruiz-Espinoza, J. E., Alvarado-Lassman, A. and Martínez-Delgadillo, S. A. 2009. Behavior of the mesophilic and thermophilic anaerobic digestion in the stabilization of municipal wastewater sludge (Part 1). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **8**(3):283–290.

Metcalf & Eddy, Inc. 1985. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Ed. Labor S.A. Barcelona.

---

Molina, L.J y Uribarren, B.T. 2015. Generalidades de bacterias. Departamento de microbiología y parasitología. Recursos en bacteriología. Facultad de medicina. UNAM. <http://www.facmed.unam.mx>

Moodley, P., Archer, A., Hawksworth, D. 2008. Standard Methods for the Recovery and Enumeration of Helminth Ova in Wastewater, Sludge, Compost and Urine-Diversion Waste in South Africa - . Report to the Water Research Commission, WRC Report No. TT322/08, South Africa.

Nava-Valente, N., Alvarado-Lassman, A., Nativitas-Sandoval, L.S. and Mendez-Contreras, J.M. 2016 Improved anaerobic digestion of a thermally pretreated mixture of physicochemical sludge; broiler excreta and sugar cane wastes (SCW): Effect on organic matter solubilization, biodegradability and bioenergy production, Journal of Environmental Science and Health, Part A, **51**(5): 446-453

Nelson D.L andd Cox, M.M. 2000 Lehninger Principles of Biochemistry. 3<sup>rd</sup> ed. Worth Publishers. New York, NY

Noyola, A., and Tinajero, A. 2005. Effect of biological additives and micronutrients on the anaerobic digestion of physicochemical sludge. Water Science and Technology. **52**(1-2):275–281.

OMS. 2014. Helmintiasis transmitidas por el suelo. [www.who.int](http://www.who.int)

Ortega, N. 2006. Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Dissertation.com. Florida.

Pavlostathis, S.G. y Giraldo-Gómez, E. 1991. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. Critical reviews in environmental control. **21**(5-6):411-490.



---

Red Mexicana de Bioenergía. 2011. La bioenergía en México. Situación actual perspectivas. <http://rembio.org.mx>

Rodríguez-Vivas, R. I., Cob-Galera, L. A y Domínguez-Alpizar J. L. 2001. Frecuencia de parásitos gastrointestinales en animales domésticos diagnosticados en Yucatán, México. Rev Biomed 2001; **12**:19-25.

Ruiz-Espinoza, J.E.; Méndez-Contreras, J.M.; Alvarado-Lassman, A. and Martínez-Delgadillo, S.A. 2012. Effect of low temperature thermal pre-treatment on the solubilization of organic matter, pathogen inactivation and mesophilic anaerobic digestion of poultry sludge, J. Environ. Sci. Heal. A. **47**(12):1795–1802.

SAGARPA. 2012. Programa de Introducción de bioenergéticos. <http://www.sagarpa.gob.mx>

Sánchez G.F. 2004. Matemáticas y química: una mirada a la cinética química desde la matemática. Edit. CIMAT-Sociedad Matemática Mexicana.

Sánchez-Murillo, J.M. 2002. Etiología y epidemiología de la ascariosis porcina. Mundo ganadero, 06/2002. España.

Siegrist, H., Renggli, D. y Gujer, W. 1993. Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. Water Science and Technology. **27**(2):25-36.

Silva-Leal, J., Bedoya-Ríos, D. y Torres-Lozada, P. 2013. Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Quim. Nova. **36**(2): 207-214

Solís-López, M. 2009. Inactivación de huevos de *Ascaris suum* presentes en agua mediante el proceso de fenton y con luz UV. Tesis de maestría. UNAM. México.

Stams, A. J. M. 1994. Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antoine Van Leeuwenhoek*. **66**:271-294.

US EPA. 1994. A Plain English Guide to the EPA, Part 503 Biosolids Rule. US EPA/832/R-93-003.

WHO. 2006. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. World Health Organization, Geneva.