

81



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LODO FÍSICOQUÍMICO CON ÁCIDOS ACÉTICO Y PERACÉTICO PARA PRODUCIR BIOSÓLIDOS

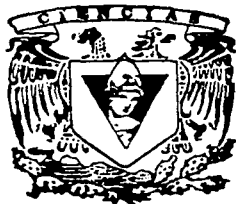
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A :

**ANTONIO ERNESTO GONZÁLEZ GONZÁLEZ**



DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. JOSÉ ANTONIO BARRIOS PÉREZ



FACULTAD DE CIENCIAS  
MÉXICO, D. F. SECCIÓN ESCOLAR

2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA**  
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito: "Evaluación del Tratamiento de lodo  
Fisicoquímico con ácidos acético y peracético para producir biosólidos"

realizado por Antonio Ernesto González González

con número de cuenta 8622600-6 , quién cubrió los créditos de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario M. en I. José Antonio Barrios Pérez

Propietario Dra. Martha González Gutiérrez

Propietario M. en C. Elvia Josefina Jiménez Fernández

Suplente Bióloga Juana Margarita Garza Castro

Suplente Bióloga Claudia Vallejo Albarrán

Consejo Departamental de Biología

Dra. Patricia Ramos Morales

FACULTAD DE CIENCIAS  
U.N.A.M.



DEPARTAMENTO  
DE BIOLOGÍA

## Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo brindado para la elaboración de este trabajo a través del proyecto 27770-T

A mi director de tesis M. en I. José Antonio Barrios Pérez por su paciencia y tiempo dedicado para la elaboración de esta tesis.

A la Dra Blanca Jiménez por haberme brindado la oportunidad de hacer la tesis en el grupo.

A mis sinodales por el tiempo empleado y su disposición para revisar este trabajo muchísimas gracias.

A todos mis compañeros del Grupo Tratamiento y Reuso por compartir sus alegrías y preocupaciones y haberme enseñado que la amistad no tiene valor.

A todas las personas que de alguna forma colaboraron con este trabajo en especial a Catalina Maya y Abelardo Rodríguez porque sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible

## Dedicatorias

A mis padres porque se que pase lo que pase siempre puedo contar con ellos y con su infinito amor, por esta segunda oportunidad de vivir.

A Marisa, Natalia y mis dos hermanos que alegran mi vida por el simple hecho de existir.

A mis compañeros que al igual que yo saben que aún en las noche más oscuras hay luz y que cualquier día es bueno para reír.

A Belinda por compartir su vida conmigo.

A todos los hombres y mujeres que cada día dan su vida por construir un mundo mejor.

# INDICE

<b>RESUMEN</b>		<b>I</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>		<b>II</b>
<b>OBJETIVOS</b>		<b>V</b>
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>		<b>1</b>
1.1. DEFINICIÓN DE LODOS		1
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS		1
1.2.1. Características físicas de los lodos		2
1.2.2. Características químicas de los lodos		3
1.2.2.1. Contaminantes		3
1.2.2.2. Propiedades como fertilizante de los biosólidos		3
1.2.3. Características biológicas de los lodos		5
1.2.3.1. Bacterias		6
1.2.3.2. Descripción de los géneros de bacterias patógenas más comunes en lodos residuales		7
1.2.3.3. Actinomicetos		8
1.2.3.4. Rotíferos		9
1.2.3.5. Virus		9
1.2.3.6. Protozoarios		10
1.2.3.7. Hongos		10
1.2.3.8. Helmintos		11
1.2.3.9. Descripción de los helmintos parásitos más comunes encontrados en lodos		13
1.2.3.10. Organismos indicadores		19
1.2.3.11. Viabilidad y sobrevivencia de los microorganismos en suelo y agua		20
<b>1.3. TRATAMIENTO DE LOS LODOS</b>		<b>21</b>
1.3.1. Acondicionamiento		21
1.3.1.1. Acondicionamiento con polímeros orgánicos (polielectrolitos)		21
1.3.1.2. Acondicionamiento con químicos inorgánicos		21
1.3.1.3. Acondicionamiento térmico		22
1.3.2. Espesamiento		22

1.3.3.	Desaguado	22
<b>1.4.</b>	<b>ESTABILIZACIÓN DE LODOS</b>	<b>22</b>
1.4.1.	Procesos de estabilización convencionales	24
1.4.1.1.	Estabilización alcalina	24
1.4.1.2	Digestión anaerobia	26
1.4.1.3	Digestión aerobia	29
1.4.1.4	Composteo	30
1.4.2	Procesos de estabilización no-convencionales	33
1.4.2.1	Procesos de fijación termofílica puzolánica	34
1.4.2.2	Procesos de desinfección / oxidación ácida	34
1.4.2.3	Procesos de digestión ácida / tratamiento con calor	35
1.4.2.4	Procesos de oxidación / tratamiento con calor	35
1.4.2.5	Proceso de pasteurización de lodos	35
1.4.2.6	Proceso de Irradiación de lodos	36
1.4.2.7	Rayos gamma	36
1.4.2.8	Rayo de electrones (radiación beta)	37
1.4.2.9	Estabilización ácida	37
<b>1.5</b>	<b>ACIDO PERACÉTICO</b>	<b>37</b>
1.5.1	Uso del ácido peracético (APA) como desinfectante en agua residual	39
1.5.2	Desinfección de microorganismos patógenos con APA en lodo residual	41
1.5.3	Mecanismos de desinfección del ácido peracético (APA)	44
<b>1.6</b>	<b>ÁCIDO ACÉTICO</b>	<b>45</b>
1.6.2	Uso del ácido acético como desinfectante	45
1.6.3	Mecanismo de desinfección del acético y ácidos orgánicos débiles	47
<b>1.7</b>	<b>DISPOSICIÓN DE LODOS</b>	<b>49</b>
<b>1.8</b>	<b>MANEJO DE LODOS EN EL MUNDO</b>	<b>50</b>
1.8.2	Estados Unidos de América	50
1.8.3	Europa	51
1.8.1	Asia	52
1.8.2	Manejo de lodos en México	52
<b>1.9</b>	<b>NORMATIVIDAD</b>	<b>53</b>
1.9.1.	Estados Unidos de América	53

1.9.1.1	Regulación de los biosólidos de acuerdo a su contenido de metales	53
1.9.1.2	Regulación de los biosólidos en relación a su contenido de organismos patógenos	55
1.9.1.3	Regulación de la atracción de vectores	57
1.9.2	Otros países	59
1.9.3	México	60
<b>2</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>63</b>
<b>2.1</b>	<b>MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DEL LODO CRUDO DE ESTUDIO</b>	<b>63</b>
2.1.1	Pruebas de estabilización con ácidos acético y peracético	65
<b>2.2</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL LODO CRUDO Y TRATADO</b>	<b>66</b>
2.2.1	Solubilidad de metales en lodo tratado por vía ácida	66
<b>2.3</b>	<b>SIMULACIÓN DEL TREN COMPLETO DE TRATAMIENTO DE LODO TRATADO CON ÁCIDO ACÉTICO Y PERACÉTICO Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD</b>	<b>67</b>
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>68</b>
<b>3.1.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS</b>	<b>68</b>
3.1.1.	Coliformes fecales, Salmonella spp. y huevos de helmintos	69
<b>3.2.</b>	<b>ESTABILIZACIÓN DE LODO DE SAN PEDRO ATOCPAN TRATADO CON ÁCIDO ACÉTICO Y PERACÉTICO</b>	<b>70</b>
3.2.1.	Coliformes fecales	70
3.2.2.	<i>Salmonella</i> spp.	72
3.2.3.	Huevos de Helmintos	73
3.2.4.	Determinación general de las eficiencias de los dos ácidos	74
<b>3.3.</b>	<b>SOLUBILIDAD DE METALES EN LODO DE SAN PEDRO ATOCPAN TRATADO CON ÁCIDO ACÉTICO Y PERACETICO</b>	<b>75</b>
<b>3.4.</b>	<b>SIMULACIÓN DE UN TREN COMPLETO DE TRATAMIENTO DE UN LODO ESTABILIZADO CON ÁCIDO ACÉTICO Y PERACÉTICO Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL LODO</b>	<b>77</b>



3.4.1.	Evaluación de la estabilidad del lodo	78
4.	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>83</b>
	Literatura citada	85
	Anexo 1 Por ciento de Sólidos Totales	91
	Anexo 2. Por ciento Sólidos Volátiles Totales	92
	Anexo 3. Determinación de coliformes fecales	93
	Anexo 4 Técnica para la determinación y cuantificación de huevos de helminto	95
	Anexo 5 Determinación de <i>Salmonella</i> spp.	99
	Anexo 6 Resistencia específica a la filtración	104

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.1</b>	<b>Características de los lodos según su origen</b>	<b>1</b>
<b>TABLA 1.2</b>	<b>Comparación de los lodos y del estiércol como fertilizante</b>	<b>4</b>
<b>TABLA 1.3</b>	<b>Microorganismos que se encuentran en los lodos y función que desempeñan en el tratamiento</b>	<b>5</b>
<b>TABLA 1.4</b>	<b>Bacterias patógenas encontradas en agua residual y lodos así como enfermedades que producen</b>	<b>7</b>
<b>TABLA 1.5</b>	<b>Principales virus encontrados en aguas residuales y lodos</b>	<b>9</b>
<b>TABLA 1.6</b>	<b>Principales protozoarios patógenos de interés en aguas residuales municipales y lodos</b>	<b>10</b>
<b>TABLA 1.7</b>	<b>Nematodos parásitos encontrados en lodos</b>	<b>11</b>
<b>TABLA 1.8</b>	<b>Cestodos parásitos encontrados en lodos</b>	<b>12</b>
<b>TABLA 1.9</b>	<b>Helminfos más frecuentes en lodos</b>	<b>13</b>
<b>TABLA 1.10</b>	<b>Frecuencia de ascariasis y teniasis en México durante 1999 y 2000</b>	<b>13</b>
<b>TABLA 1.11</b>	<b>Tiempos de sobrevivencia de patógenos en suelo y vegetación</b>	<b>21</b>
<b>TABLA 1.12</b>	<b>Características no deseables de los lodos</b>	<b>23</b>
<b>TABLA 1.13</b>	<b>Reducción de microorganismos mediante el composteo</b>	<b>32</b>
<b>TABLA 1.14</b>	<b>Tiempo de retención en los procesos convencionales de estabilización</b>	<b>33</b>
<b>TABLA 1.15</b>	<b>Remoción de microorganismos patógenos llevado a cabo por procesos de estabilización convencionales (en unidades logarítmicas y porcentaje)</b>	<b>33</b>
<b>TABLA 1.16</b>	<b>Destrucción de microorganismos en lodo y agua cruda a través de los rayos gamma</b>	<b>36</b>
<b>TABLA 1.17</b>	<b>Destrucción de microorganismos en lodo por medio de los rayos de electrones</b>	<b>37</b>

<b>TABLA 1.18</b>	<b>Relación de componentes en el ácido peracético</b>	<b>38</b>
<b>TABLA 1.19</b>	<b>Propiedades físicas del ácido peracético</b>	<b>39</b>
<b>TABLA 1.20</b>	<b>Reducción de microorganismos por ácido peracético</b>	<b>39</b>
<b>TABLA 1.21</b>	<b>Efectividad de desinfección de coliformes fecales usando varios procesos uv, APA y ozono</b>	<b>40</b>
<b>TABLA 1.22</b>	<b>Efectividad de desinfección hacia parásitos selectos en agua residual por distintos procesos Ozono, APA y UV</b>	<b>40</b>
<b>TABLA 1.23</b>	<b>Desinfección de algunos virus con ácido peracético</b>	<b>41</b>
<b>TABLA 1.24</b>	<b>Destrucción de microorganismos en lodo tratado con ácido peracético</b>	<b>41</b>
<b>TABLA 1.25</b>	<b>Reducción de Salmonella spp. en lodo crudo tratado con apa esparcido en suelo</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 1.26</b>	<b>Inactivación de huevos de helmintos de Taenia saginata en lodo crudo esparcido en suelo</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 1.27</b>	<b>Propiedades físicas del ácido acético</b>	<b>45</b>
<b>TABLA 1.28</b>	<b>Disposición de biosólidos en la Unión Europea</b>	<b>52</b>
<b>TABLA 1.29</b>	<b>Descripción de los sub- apartados incluidos en el apartado 503 de la US EPA</b>	<b>53</b>
<b>TABLA 1.30</b>	<b>Metales que son regulados por el apartado 503 de la EPA y sus concentraciones límites</b>	<b>54</b>
<b>TABLA 1.31</b>	<b>Contaminantes orgánicos en lodo</b>	<b>55</b>
<b>TABLA 1.32</b>	<b>Procesos que reducen sustancialmente los patógenos (PFRP)</b>	<b>56</b>
<b>TABLA 1.33</b>	<b>Procesos que reducen los patógenos (PSRP)</b>	<b>57</b>
<b>TABLA 1.34</b>	<b>Requisitos para reducir la atracción de vectores de la US EPA</b>	<b>58</b>
<b>TABLA 1.35</b>	<b>Condiciones fijadas en diferentes países para la adición de lodo al suelo</b>	<b>59</b>

<b>TABLA 1.36</b>	<b>Guía para la adición de metales en lodo aplicado a suelos agrícolas</b>	<b>59</b>
<b>TABLA 1.37</b>	<b>Concentraciones máximas permitidas de metales en lodos residuales para uso en agricultura propuesto por la CEE</b>	<b>60</b>
<b>TABLA 1.38</b>	<b>Reglamentos vigentes para lodos residuales en México</b>	<b>60</b>
<b>TABLA 1.39</b>	<b>Requerimientos para biosólidos clase A y B</b>	<b>61</b>
<b>TABLA 1.40</b>	<b>Límites de metales para lodos Excelente y Bueno</b>	<b>61</b>
<b>TABLA 1.41</b>	<b>Opciones de aprovechamiento de biosólidos clase A según el anteproyecto de Norma Mexicana</b>	<b>62</b>
<b>TABLA 2.1</b>	<b>Parámetros medidos al lodo crudo durante la realización del estudio</b>	<b>64</b>
<b>TABLA 3.1</b>	<b>Caracterización del lodo crudo de la planta de san pedro atocpan, milpa alta</b>	<b>68</b>
<b>TABLA 3.2</b>	<b>Porcentaje de géneros de helmintos encontrados en el lodo de san pedro atocpan</b>	<b>70</b>
<b>TABLA 3.3</b>	<b>Resumen de remoción de microorganismos en lodo tratado con ácido acético y peracético</b>	<b>75</b>
<b>TABLA 3.4</b>	<b>Resultados de los parámetros microbiológicos medidos al lodo estabilizado con ácido acético y peracético</b>	<b>79</b>

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1	a)Huevo viable con larva de <i>Ascaris lumbricoides</i> y b) huevo no viable de <i>Ascaris lumbricoides</i>	15
FIGURA 1.2	Ciclo de vida de <i>Ascaris lumbricoides</i>	15
FIGURA 1.3	Trichuris trichiura adulto	16
FIGURA 1.4	Ciclo de vida de <i>Taenia solium</i>	18
FIGURA 1.5	Representación esquemática del movimiento de los ácidos orgánicos en bacterias	48
FIGURA 1.6	Opciones de manejo de lodos en E.U.	51
FIGURA 2.1	Diagrama de flujo de la planta de San Pedro Atocpan	63
FIGURA 2.2	Purga del sedimentador primario de la planta de tratamiento de San Pedro Atocpan	64
FIGURA 2.3	Equipo de prueba de jarras para la estabilización del lodo	65
FIGURA 3.1	Destrucción de coliformes fecales en lodo tratado con ácidos acético y peracético	71
FIGURA 3.2	Destrucción de salmonella spp en lodo tratado con ácidos acético y peracético	72
FIGURA 3.3	Inactivación de huevos de helmintos en lodo tratado con ácidos acético y peracético	73
FIGURA 3.4	Solubilidad de metales en lodo crudo y tratado con ácido acético	76
FIGURA 3.5	Solubilidad de metales en lodo crudo y tratado con ácido peracético	77
FIGURA 3.6	Evolución de la concentración de coliformes fecales en lodo tratado con ácidos acético y peracético	80
FIGURA 3.7	Evolución de la concentración de Salmonella spp. en lodo tratado con ácidos acético y peracético	81
FIGURA 3.8	Inactivación de huevos de helmintos durante la prueba de estabilización de lodo con ácido acético y peracético	82

## RESUMEN

En este trabajo se evaluó un proceso de estabilización no convencional utilizando dos ácidos orgánicos (acético y peracético) que inactiven el alto contenido de organismos patógenos y parásitos presentes en el lodo y además cumplan con los límites para biosólidos clase A (libre de patógenos y sin restricciones de uso) o B (para disposición o reuso en zonas de acceso restringido) que establece la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA por sus siglas en inglés) en el apartado 503.

Los resultados de la estabilización con estos dos ácidos nos demuestran que es posible obtener biosólidos que cumplan con los límites para clase B con restricción de uso empleando tiempos de contacto más cortos que los procesos convencionales. Con ácido peracético es posible reducir 6 unidades logarítmicas de coliformes fecales y 5.2 de *Salmonella* spp mientras que de helmintos se inactiva el 93 % de huevos viables. Por su parte el ácido acético reduce 3.2 unidades logarítmicas de coliformes fecales y 3 de *Salmonella* spp e inactiva el 74 % de huevos de helmintos viables ambos en media hora. El ácido peracético resulto ser un mejor biocida que el ácido acético ya que obtuvo mayores reducciones de microorganismos e inactivo un mayor porcentaje de huevos de helmintos viables que este.

Otro de los objetivos de este trabajo fue medir el contenido de metales presentes en el lodo de San Pedro Atocpan y la solubilidad de estos cuando son tratados con ácido. En cuanto a los metales el lodo utilizado no rebasa los límites máximos para metales impuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA) lo que se atribuye al origen de las aguas residuales que son tratados en esta planta. Para medir la factibilidad del proceso de tratamiento también se realizaron pruebas de desaguado del lodo acondicionándolo una vez estabilizado el porcentaje de sólidos totales (ST) resulto ser bajo lo que nos indica que la torta de lodo sigue conservando mucha humedad por lo que se recomiendan pruebas posteriores de desaguado. También se evaluó la concentración de microorganismos a través del tiempo (0.5 y 1.5 horas, y 8, 21 y 42 días) para asegurar su estabilidad, sin que se registrara aumento alguno en la concentración de microorganismos.

## Introducción

El 67 % del territorio mexicano es árido o semiárido y solamente el 33 % es húmedo o subhúmedo. Esta escasez de recursos hídricos acompañada de la explosión demográfica, así como del desarrollo industrial explican el porqué las aguas residuales son una importante alternativa como fuente adicional del suministro, particularmente para fines de riego agrícola (Blumental *et al.*, 1992; Kandiah, 1993 citado en Jiménez *et al* 1996), ya que en México el consumo de agua para la agricultura representa el 90 % del total (Jiménez *et al.*, 1996). De acuerdo con el plan hidráulico 1995-2000 se estima que el 93 % del agua residual doméstica y el 92 % de la industrial se vierten sin pasar por una planta depuradora (Jiménez, 2001). En México las primeras plantas de tratamiento se construyeron en la segunda mitad del siglo XX.

Cualquiera que sea el sistema de tratamiento del agua residual, éste produce lodo como subproducto, en el cual se concentran los contaminantes extraídos y deben ser regresados al ambiente sin alterar los ecosistemas. Debido a las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lodos producidos durante el tratamiento de las aguas residuales, se han implementado diferentes métodos para tratarlos de manera que puedan ser dispuestos sin impactar negativamente al ambiente o poner en riesgo la salud humana. Los lodos producidos en nuestro país tienen el problema de que poseen un alto contenido de microorganismos patógenos, por lo que es necesario desarrollar tecnologías y procedimientos propios para estabilizarlos con el objeto de que puedan ser considerados dentro de la categoría de biosólidos para ser reusados como mejoradores de suelos, para rehabilitar terrenos o como fertilizantes aprovechando su contenido de nutrientes y materia orgánica.

La planta de tratamiento de San Pedro Atocpan trata aguas residuales principalmente de origen domésticas que provienen de zonas habitacionales y su principal problema es el alto contenido de organismos patógenos y no de contaminantes químicos ya sea inorgánicos (metales) u orgánicos característicos de aguas industriales o de zonas donde se realiza gran actividad industrial, por lo que este trabajo se enfoca en la remoción e inactivación de organismos patógenos.

En México no existe una reglamentación que norme el tratamiento y disposición de los lodos y éstos son descargados al drenaje tal y como se producen además de que son considerados residuos peligrosos debido al alto contenido de microorganismos patógenos de acuerdo con la NOM-052-ECOL-1993.

En la actualidad el manejo integral de los lodos residuales ha cobrado gran importancia debido al potencial de reúso benéfico que estos

presentan. En nuestro país esta por publicarse la Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL-2001 que establecerá los límites máximos permisibles de contaminantes y de microorganismos patógenos presentes en el lodo así como la reducción de la atracción de vectores. En este trabajo sin embargo se intenta cumplir con los límites que marca el Apartado 503 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) ya que la norma mexicana para lodos aun está en proceso de elaboración.

Para lograr cumplir con los límites de microorganismos que establece el Apartado 503 de la US EPA es necesario aplicar algún proceso de tratamiento que reduzca considerablemente los contenidos de coliformes fecales, *Salmonella* spp., y huevos de helmintos contenidos en los lodos. Dentro de las opciones de tratamiento existen los procesos convencionales (digestión anaerobia, aerobia, elaboración de composta y estabilización alcalina) y los no convencionales. De los procesos convencionales sólo la estabilización alcalina y el composteo remueven la mayor parte de los organismos patógenos presentes en el lodo, pero a su vez poseen desventajas, ejemplo de esto es que la estabilización alcalina aumenta el volumen de la torta de lodo dificultando su transporte además de liberar amoníaco por la elevación del pH. Mientras que el composteo requiere de más de 60 días de tiempo de retención lo que eleva el costo de tratamiento del lodo. Por su parte los procesos no convencionales se incluyen procesos que no se conoce a detalle su eficiencia en la estabilización de lodos. Uno de estos procesos es la estabilización ácida, la cual ya ha sido reportada en la literatura en estudios que han empleado ácido sulfúrico, clorhídrico, peracético, acético, y propiónico principalmente (Roth y Keenan, 1971; Fraser *et al.*, 1984; Godfree *et al.*, 1984; Owen, 1984; y Kiff y Lewis-Jones, 1984).

Para desarrollar un proceso de estabilización no convencional por vía ácida Barrios *et al.* (2000) probaron 4 ácidos diferentes: dos ácidos inorgánicos (sulfúrico y perclórico) y dos ácidos orgánicos (acético y peracético). En los resultados de este trabajo, obtuvieron que tanto el ácido acético como el peracético presentan importantes ventajas y mayor eficiencia sobre los otros dos ácidos en lo que se refiere a los niveles de destrucción alcanzados en coliformes fecales y huevos de helmintos, lo mismo sucede en el pH del lodo estabilizado, ya que la importancia del pH radica en el efecto que tiene sobre la floculación de los lodos para su acondicionamiento y posterior deshidratación con el objeto de facilitar su manejo y disminuir los costos de transporte. Una excesiva acidificación puede acarrear problemas durante el deshidratado.

De esta forma el presente trabajo se basa en los estudios realizados por Barrios *et al.* (2000) y es una continuación de los mismos para desarrollar un proceso de estabilización no convencional por vía ácida que cumpla con los requerimientos para biosólidos ya sea clase A o clase B de la US EPA y de la NOM-004-ECOL-2001, ya que los resultados obtenidos por



este autor justifican el uso del ácido acético y peracético en pruebas de estabilización, sobre otro tipo de ácidos principalmente los inorgánicos, que en este caso tuvieron resultados menos satisfactorios y su aplicación es menos factible. Adicionalmente el ácido peracético ha demostrado su gran poder bactericida y virucida en agua residual empleando tiempo de contactos cortos (5min) en condiciones ligeramente ácidas (Baldry y French, 1989).

## **Objetivos:**

### **General.**

- Evaluar un proceso de estabilización no convencional de lodos residuales fisicoquímicos que cumpla con los requerimientos establecidos en el apartado 503 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), para reúso y disposición de lodos.

### **Particulares:**

- Probar un proceso de estabilización no convencional utilizando ácido acético y peracético independientemente y observar si cumplen con los requerimientos microbiológicos para un biosólido clase A o clase B del apartado 503 de la US EPA.
- Evaluar la concentración de metales totales en lodos fisicoquímicos crudos de San Pedro Atocpan y comparar con los límites permisibles dentro del apartado 503 de la EPA
- Observar si existe solubilidad de metales cuando los lodos son sometidos a estabilización con ácido acético y peracético.
- Medir la concentración de microorganismos en lodos estabilizados con ácido acético y peracético a diferentes tiempos de contacto.
- Simular un tren completo de tratamiento que incluya la estabilización ácida, el acondicionamiento y la deshidratación de lodos fisicoquímicos.

## **CAPITULO 1**

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

### 1.1. Definición de lodos

Se denomina lodo al residuo sólido, semisólido o líquido que se genera debido al tratamiento de las aguas residuales. Según su estado o tratamiento los lodos reciben el nombre de crudos o frescos, digeridos, elutriados, húmedos o secos y por su origen reciben el nombre de primarios, secundarios, o químicos (Tabla 1.1)

Tabla 1.1 Características de los lodos según su origen

Tipo de Lodo	Descripción
Primario	Los lodos primarios provienen de un sedimentador primario, no han sufrido descomposición y por lo tanto son inestables y putrescibles, son de color gris y contienen fragmentos de desperdicios sólidos fecales y otros desechos además de tener un olor nauseabundo.
Secundario Lodos activados	Los lodos activados tienen por lo general un color café pardo y apariencia floculante. Si el color es oscuro, el lodo puede estarse aproximando a condiciones sépticas. Si el color es más claro que de costumbre, puede haber habido una menor aireación con una tendencia de los sólidos para sedimentar lentamente. El lodo en buenas condiciones tiene un olor inofensivo semejante a tierra. Concentración de sólidos de 0.5-2.5 % sólidos totales (ST)
Secundario Lodos de filtro percolador	El lodo de un filtro percolador es café pardo, floculante y de olor relativamente inofensivo cuando está fresco. Generalmente se descompone más lentamente que otros lodos sin digerir. Concentración de sólidos 1-3 % sólidos totales (ST).
Químicos	Son por lo general de color negro. El olor puede ser desagradable pero menos que el de un primario, se descompone o digiere con más lentitud que los lodos de otros procesos. En este proceso se producen gran cantidad de lodos siendo más difícil de manejar además de que pueden contener gran abundancia de Fe, Al, Ca, Cl y S dependiendo de los reactivos empleados para la floculación. Concentración de sólidos de 0.5-16 % ST.

(Adaptados de Metcalf y Eddy, 1991)

El término de **Biosólidos** se utiliza para designar al producto sólido del tratamiento de aguas residuales domésticas que después de ser estabilizado o tratado apropiadamente puede reusarse benéficamente como fertilizante, mejorador de suelo u otros usos ya que proviene básicamente de compuestos orgánicos así como de elementos inorgánicos que tienen un potencial de reúso.

### 1.2. Características de los lodos

La caracterización de los lodos por su origen (primario, secundario etc.) sólo provee una limitada información acerca de sus propiedades. Es por esto que se utilizan otros parámetros físicos, químicos y microbiológicos

para caracterizar los lodos, los cuales son importantes para el tratamiento de los biosólidos y su manejo.

### 1.2.1. Características físicas de los lodos

Sólidos totales. Una característica de los lodos es la relación entre el contenido de sólidos y el volumen de lodo. La concentración de sólidos son medidos y expresados como mg/L o como porcentaje de sólidos. El procedimiento para determinar la concentración de sólidos emplea el secado de un volumen medido de sólidos a un peso constante a 103 °C – 105 °C. Los sólidos totales son la suma de los sólidos disueltos y suspendidos.

Sólidos volátiles. Los sólidos volátiles son ampliamente usados en el tratamiento de biosólidos y practicas de manejo como una medida para determinar la cantidad de materia orgánica (combustible) en los biosólidos. Se determina mediante la ignición de sólidos secos a 550 °C en una mufla.

Distribución del agua. El agua en los biosólidos es caracterizada como sigue:

- **Agua libre.** Es el agua adherida a las partículas de biosólidos y puede ser separada por sedimentación gravitacional.
- **Agua de flóculos.** Es el agua atrapada dentro de los flóculos y puede ser removida solo por fuerzas mecánicas, las cuales son usualmente más grandes que la fuerza gravitacional.
- **Agua capilar.** Se encuentra adherida a partículas individuales y puede también ser separada por fuerzas mecánicas.
- **Agua unida química e intracelularmente.** Es parte del material celular y esta unida química y biológicamente a la materia orgánica e inorgánica de los biosólidos.

Tamaño de la partícula. Afecta directamente la facilidad de eliminar el agua de un lodo. Si la mayor parte de las partículas tienen un tamaño entre 1 y 10 micras, el secado es más difícil puesto que el tamaño de partícula influye directamente sobre la sedimentación de los sólidos.

Propiedades de fluido. Que los clasifica en cuatro: **lodos líquidos** son aquellos que fluyen por gravedad, **lodos plásticos** pueden ser bombeados, **lodos sólidos susceptibles de ser compactados** no se pueden bombear pero su volumen decrece a medidas que se secan y **lodos con volumen constante** no reducen de volumen al perder agua.

**Drenabilidad.** Se relaciona directamente con la necesidad de transporte, de secado o la posibilidad de incineración.

### **1.2.2. Características químicas de los lodos**

Las características químicas de un lodo definen las necesidades de tratamiento, disposición final y su posible utilización. La composición química de los biosólidos varía dependiendo de su origen y métodos de tratamiento. Como resultado de los procesos de tratamiento, los elementos químicos contaminantes del influente pasan a formar parte de los lodos ya sea por precipitación en forma de sulfuros, óxidos, bicarbonatos; por absorción; por quelación con compuestos orgánicos; o por partición entre la fase líquida durante el proceso de separación de los sólidos (Girovich, 1996).

#### **1.2.2.1. Contaminantes**

Los lodos contienen compuestos orgánicos e inorgánicos los cuales pueden afectar la vida de las plantas y animales así como la de los humanos si se encuentran en niveles excesivos. Entre los contaminantes inorgánicos se incluyen diez metales que son: arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, nickel, selenio y zinc. Entre los compuestos orgánicos se encuentran el benceno, tretracloroetileno, plaguicidas, disolventes industriales, los colorantes, los plastificantes, los agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, que tienden a acumularse en los lodos. En Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental (US EPA por sus siglas en inglés) regula los límites de estos contaminantes en biosólidos que van a ser dispuestos o reusados en el apartado 503.

#### **1.2.2.2. Propiedades como fertilizante de los biosólidos**

Además de contener sustancias contaminantes los biosólidos poseen nutrientes esenciales para que las plantas crezcan. En los biosólidos se encuentran 16 elementos esenciales para el crecimiento de las plantas. Estos elementos son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, magnesio, hierro, boro, manganeso, cobre, zinc, molibdeno y cloro.

**Macronutrientes.** Los elementos reconocidos como macronutrientes son: carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Aunque los biosólidos contienen niveles relativamente bajos de macro y micronutrientes, a pesar de esto cuando son aplicados en suelo pueden suministrar todo el nitrógeno necesario, así como también fósforo, calcio, magnesio y muchos otros elementos, este valor fertilizante del lodo esta basado primordialmente en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio.

Así estos elementos juegan un papel muy importante en el uso benéfico de los biosólidos.

**Nitrógeno.** En los biosólidos el nitrógeno se encuentra tanto en forma orgánica e inorgánica, pero predominando el nitrógeno orgánico por lo que es necesaria la acción de las bacterias para convertirlo a amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y eventualmente oxidarlo a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) para que llegue a ser biológicamente disponible para las plantas. El porcentaje de nitrógeno en biosólidos se muestran en la Tabla 1.2 y se hace una comparación con el contenido de nutrientes del estiércol.

**Fósforo.** Las cantidades de fósforo en biosólidos varían y depende de la concentración de éste en el influente así como el tipo de tratamiento de aguas residuales usado para eliminarlo. Un tratamiento primario convencional y de lodos activados remueven 20 a 30% del fósforo presente en el agua por lo tanto los biosólidos resultantes contienen pequeñas cantidades (0.1 a 5.7 %) (Girovich 1996 ; Jiménez , 2001).

**Potasio.** Los biosólidos contiene pequeñas cantidades de potasio de 0.02 a 2.5 en base seca. Este elemento es necesario para varias funciones de la planta, en suelo el potasio puede encontrarse en formas no disponibles por lo que en ocasiones es necesario utilizar fertilizantes.

**Tabla 1.2 Comparación de los lodos y del estiércol como fertilizante**

Elemento	Lodo	Estiércol
Nitrógeno total %	3.9	2.2
Fósforo total %	5.7	1.3
Potasio %	0.48	2.8

(Jiménez , 2001)

**Micronutrientes.** Los micronutrientes tales como el fierro, zinc, cobre, manganeso, boro, molibdeno, sodio, vanadio y cloro son necesarios para las plantas en pequeñas cantidades. El suelo y el pH de los biosólidos influyen en la biodisponibilidad, todos los metales excepto el molibdeno son más biodisponibles en pH ácido. En ambientes neutros o alcalinos, los metales forman óxidos insolubles o hidróxidos y no se encuentran disponibles.

**Materia Orgánica.** Otra propiedad importante de los biosólidos es que poseen materia orgánica que tiene un efecto sobre las propiedades físicas del suelo como la agregación de partículas, porosidad y retención de agua. El alto contenido de carbono orgánico de los biosólidos proveen una inmediata fuente de energía para los microorganismos del suelo, en su mineralización se liberan al suelo los productos de su descomposición tales como bióxido de carbono, metano, orgánicos, amoníaco, nitrógeno y agua. Cuando la calidad del biosólido es satisfactoria la materia orgánica

que aporta puede participar activamente en los procesos de humificación del suelo.

### 1.2.3. Características biológicas de los lodos

En los lodos se concentran una gran cantidad de organismos de los cuales algunos pueden ser parásitos y patógenos del hombre, mientras que otros cumplen con un papel benéfico en el tratamiento de los lodos estos se muestran en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3 Microorganismos que se encuentran en los lodos y función que desempeñan en el tratamiento**

Organismo	Característica
Virus	Patógeno
Bacterias	Benéfico o perjudicial en el tratamiento de los lodos
Actinomicetos	Benéfico
Protozoarios	Patógenos o benéfico
Rotíferos	Benéfico
Hongos	Benéfico o perjudicial
Helmintos	Patógenos

El alto contenido de organismos patógenos presentes en los lodos es una de sus propiedades más importantes que limita su manejo pues puede provocar problemas de salud. El tipo y cantidad de microorganismos patógenos presentes en un lodo dependen básicamente del estado epidemiológico de la comunidad de donde proviene (Jiménez , 1999).

Además de los organismos patógenos en el lodo hay diversas formas de vida que pueden tener un papel benéfico (como los transformadores del suelo) en los tratamientos de biosólidos y practicas de uso, estos organismos incluyen algunos géneros de bacterias, actinomicetos y rotíferos los cuales se describen más adelante (Girovich, 1996).

En general la aplicación de lodos residuales sobre el suelo tiene una alta probabilidad de que los microorganismos patógenos contaminen los pozos y las aguas subterráneas debido a la infiltración y ya sea tanto los humanos como los animales estén expuestos directa o indirectamente a estos microorganismos.



**Contacto directo:**

- Contacto inadvertido con lodo residual
- Caminando sobre el área poco tiempo después de la aplicación del lodo
- Inhalando microorganismos que pueden ser portados por el viento

**Contacto indirecto:**

- Consumo de productos contaminados por patógenos que han sido cultivados con suelos en rellenos de lodo residual
- Consumo de leche y otros productos alimentarios contaminados por patógenos que se extraen de animales que pastan o se alimentan de plantas sembradas en suelo con disposición de suelos
- Por ingerir agua contaminada proveniente de la filtración del lodo residual del suelo hacia un acuífero
- Consumo de peces no bien cocidos contaminados que vivían en lugares cerca de los sitios de disposición
- Contacto con lodo residual transportado fuera del terreno de aplicación por roedores, insectos u otros vectores, incluyendo animales que pastan

**1.2.3.1. Bacterias**

Son organismos procariotas (sin organelos celulares) unicelulares. El tamaño de las bacterias por lo general tiene un rango de aproximadamente de 5  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  pero pueden ser más grandes o pequeñas. Tienen tres formas básicas: cocos que tienen forma esférica (ejemplo *Streptococos*); los bacilos en forma de barra (ejemplo *Bacillus subtilis*) y espiroquetas en forma de espiral (ejemplo *Vibrio cholera*, *Spirillum volutans*) (Girovich 1996).

Las bacterias en aguas residuales y lodos han sido caracterizadas y caen dentro de los siguientes grupos según Dott y Kamfer(1988 citado en Bittou 1994):

1. Bacterias gram-negativas anaerobias facultativas (ejemplo *Aeromonas*, *Plesiomonas*, *Vibrio*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella* y *Shigella*).

2. Bacterias aerobias gram-negativas (ejemplo *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium* y *Acinetobacter*).
3. Bacterias formadoras de esporas gram-positivo (ejemplo *Bacillus* spp.)
4. Bacterias no formadoras de esporas gram-positiva (ejemplo *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Rhodococcus*).

Además de las bacterias benéficas para los lodos en estos se encuentran bacterias que son patógenos de humanos y pueden ser transmitidas directa o indirectamente algunas se muestran en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4 Bacterias patógenas encontradas en agua residual y lodos así como enfermedades que producen**

Bacteria	Enfermedad	Reservorio	Principal sitio afectado
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Heces fecales humanas	Tracto gastrointestinal
<i>Salmonella paratyphi</i>	Fiebre paratifoidea	Heces fecales humanas	Tracto gastrointestinal
<i>Shigella</i>	Disentería bacilar	Heces fecales humanas	Intestino bajo
<i>Vibrio cholera</i>	Cólera	Heces fecales humanas	Tracto gastrointestinal
<i>Escherichia coli</i> Enteropatógena	Gastroenteritis	Heces fecales humanas	Tracto gastrointestinal
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenteritis	Heces fecales humanas y animales	Tracto gastrointestinal
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis	Heces fecales humanas y animales	Tracto gastrointestinal
<i>Legionella pneumophila</i>	Enfermedades respiratorias	Agua	Pulmones
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberculosis	Exudados respiratorios	Pulmones
<i>Leptospira</i>	Leptospirosis	Heces fecales animales y orina	Generalizado

(Adaptado de Sobsey y Olson, 1983 citado en Bitton 1994)

### 1.2.3.2. Descripción de los géneros de bacterias patógenas más comunes en lodos residuales

*Salmonella* spp. *Salmonellae* son enterobacteriaceae ampliamente distribuidos en el ambiente incluyen más de 2,000 serotipos, son bacilos móviles. Es la bacteria patógena predominante en aguas residuales y causa tifoidea, fiebre paratifoidea así como gastroenteritis. La fuente de

infección es la contaminación fecal del agua o comida. La prevención es la desinfección, filtración y otros procesos de purificación del agua así como el tratamiento de las aguas residuales puede ayudar a controlar los brotes de tifoidea (WEF, 1995b).

*Shigella* spp. *Shigella* es el agente que causa la disentería bacilar, una enfermedad diarreica que produce sangrado como resultado de la inflamación y ulceración de la mucosa intestinal. Existen cuatro especies patógenas: *Shigella flexneri*, *S. Dysenteriae*, *S. boydii* y *S. sonnei*. Las distintas especies del género *Shigella* son transmitidas de persona a persona por ruta fecal-oral a través de la comida y agua contaminada, la dosis infectiva es baja. Una persona infectada puede excretar  $10^9$  de *Shigella* spp. por gramo de heces, su sobrevivencia en el ambiente es menor que la de los coliformes fecales (Bytton, 1994).

*Vibrio cholera*. Es una bacteria gram-negativa curvada que es casi siempre exclusivamente transmitida por agua. Esta bacteria libera una enterotoxina que causa de suave a profusa diarrea, vómito y una rápida pérdida de los fluidos, lo cual puede resultar en la muerte en un periodo de tiempo corto. Este patógeno se encuentra en aguas residuales en niveles de  $10$  a  $10^4$  organismos por 100 ml de agua residual durante una epidemia. Esta bacteria también se encuentra en el ambiente y unida al zooplancton y fitoplancton (Bitton, 1994).

*Escherichia coli*. Varias cepas de *E. coli* no son dañinas y se encuentran en el tracto digestivo de humanos y animales de sangre caliente, pero hay cepas de *E. Coli* que son virulentas y causan diarrea. Estas pueden ser enterotoxigénicas, enteropatogénicas, enterohemorrágicas, y enteroinvasivas (Levine, 1987). *Escherichia coli* enterotoxigénica causa gastroenteritis con diarrea profusa acompañada por náusea, calambres abdominales y vómito. Aproximadamente del 2 al 8 % de *E. Coli* presente en el agua es enteropatogénicas. El agua y comida juegan un papel importante en la transmisión de este patógeno.

### 1.2.3.3. Actinomicetos

Los actinomicetos son un grupo muy grande de bacterias que crecen como células elongadas o filamentos, su crecimiento es más lento que otros géneros de bacterias encontradas en aguas residuales y lodos (WEF, 1995b). Los actinomicetos son comunes en biosólidos y suelos y cumplen con un papel benéfico ya que son saprófitos y descomponen un amplio rango de compuestos orgánicos tales como hidrocarburos de cadena larga, compuestos aromáticos complejos, pesticidas, y biomasa microbiana muerta. Pueden ser aerobios o anaerobios y crecen en pHs de 6.0 a 8.5. Los géneros más frecuentemente encontrados en lodos activados son: *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, *Nocardia* y *Rhodococcus* (WEF, 1995b).

**1.2.3.4. Rotíferos**

Son metazoarios libres nadadores y su tamaño varía de 40 a 500 µm y tienen un promedio de vida de 6 a 45 días. Se encuentran tanto en aguas residuales como en biosólidos pero no en gran número. Los más comunes caen dentro de dos órdenes Bdeloidea y Monogonta. Los rotíferos producen muchos beneficios al estabilizar los desechos orgánicos de lagunas de estabilización y en procesos de lodos activados. Entre su papel incluyen estimular la microflora y la descomposición, realzar la penetración de oxígeno y reciclar nutrientes minerales, en lagunas de estabilización los rotíferos se alimentan de fitoplancton o algas manteniendo la población de algas en un estado saludable mientras que en un proceso de lodos activados los rotíferos consumen grandes cantidades de bacterias y promueven la formación de flóculos (WEF, 1995b).

**1.2.3.5. Virus**

Los virus pueden tener una cadena de ADN o ARN (ácido desoxirribonucleico o ácido ribonucleico), rodeada por una cubierta de proteínas o cápside. La capsida está compuesta de varias subunidades de proteínas que son llamadas capsómeros. Su replicación se lleva a cabo dentro de la célula hospedera y la importancia de los virus es su potencial para producir enfermedades. En biosólidos no tratados hay más de 100 virus diferentes de los cuales los enterovirus se encuentran comúnmente en el influente y efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales (Bitton, 1994). El principal medio de trasmisión es la ingestión de agua contaminada con heces fecales que contengan virus. En la Tabla 1.5 se muestran algunos virus encontrados en aguas residuales.

**Tabla 1.5 Principales virus encontrados en aguas residuales y lodos**

<b>Virus</b>	<b>Enfermedad</b>
<b>Virus entéricos:</b>	
Hepatitis A virus <i>Norwalk</i> y tipo <i>Norwalk</i>	Hepatitis infecciosa/Inflamación aguda del hígado Gastroenteritis epidémica con diarrea severa
<i>Rotavirus</i>	Gastroenteritis aguda con diarrea severa
<b>Enterovirus</b>	
<i>Poliovirus</i>	Poliomielitis
<i>Coxsackievirus</i>	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, etc.
<i>Echovirus</i>	Meningitis, encefalitis, síntomas de catarro, diarrea, etc.
<i>Reovirus</i>	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
<i>Callicivirus</i>	Gastroenteritis epidémica (Jiménez, 1999)

### 1.2.3.6. Protozoarios

Los protozoarios son organismos unicelulares que esencialmente pueden ser de vida libre siendo en su mayoría acuáticos ya sea de agua dulce o en ambientes marinos. También pueden ser parásitos de animales incluyendo humanos por lo cual tienen importancia en salud pública (Tabla 1.6). Forman quistes bajo condiciones ambientales adversas los cuales son más resistentes a la desecación, altas temperaturas, carencia de oxígeno, carencia de alimento y daño químico. Se reproducen por fisión binaria aunque en algunas especies de protozoarios exista reproducción sexual (*Paramecium* sp; Bytton 1994). Su tamaño varía entre 5 a 1000  $\mu\text{m}$  (WEF, 1995b). El pH óptimo para su crecimiento es de 6.0 a 8.0, por debajo de 5.0 y más alto de 8.0 su población se ve afectada. Los protozoarios ayudan a eliminar bacterias patógenas de las aguas residuales tales como difteria, cólera, tifoidea, y streptococos ya que utilizan a las bacterias como suministro de alimento (WEF, 1995b).

**Tabla 1.6 Principales protozoarios patógenos de interés en aguas residuales municipales y lodos**

Tipo de organismo	Enfermedad y sitio afectado	Reservorio / Modo de transmisión
<i>Giardia lamblia</i> Flagelado	Giardiasis Tracto gastrointestinal	Heces fecales humanas y animales. Contacto ingestión de agua y alimentos
<i>Entamoeba histolytica</i> Amiba	Disentería ambiana Tracto gastrointestinal	Heces fecales humanas. Ingestión de agua y alimentos.
<i>Toxoplasma gondii</i>	Encefalitis, enfermedad retinal y neumonía	Heces fecales de gatos
<i>Balantidium coli</i> Ciliado	Disentería/úlceras intestinales. Tracto gastrointestinal	Heces fecales humanas Ingestión de agua y alimentos.
<i>Cryptosporidium parvum</i> Sporozooario (coccidia)	Diarrea profusa y aguda, pérdida de peso, náusea.	Heces fecales humanas y animales. Contacto o ingestión de agua y alimentos.

(EPA, 1991)

### 1.2.3.7. Hongos

Los hongos son organismos eucariontes y heterótrofos, algunos de los cuales pueden ser patógenos de plantas o humanos donde producen enfermedades llamadas micosis, los principales hongos patógenos aislados de aguas residuales y lodos son:

*Aspergillus fumigatus*. Está asociado con la aspergilosis que afecta los oídos, pulmones y piel, la mayor fuente de potencial infección para el

personal que se encuentra en contacto es el lodo composteado (WEF, 1995b).

*Candida albicans*. Es un patógeno oportunista y produce una enfermedad llamada candidiasis. Esta enfermedad es de las micosis más frecuentemente encontradas y causa infección pulmonar, bronquitis, vaginitis, uretritis e infecciones superficiales de piel y uñas.

### 1.2.3.8. Helmintos

Los helmintos pueden ser de vida libre o parásitos. Los helmintos parásitos del hombre pertenecen a dos phyla del reino animal: platyhelminthes (dentro de los cuales se encuentran la clase cestoda) y nematoda.

Estos helmintos parásitos se encuentran presentes en aguas residuales y lodo como huevos que constituyen el estado infectivo de los parásitos y son excretados en heces fecales y esparcidos mediante las aguas residuales, suelo o alimento. El número y variedad de formas parásitas presentes en aguas residuales o lodos depende del origen de sus influentes.

Los estadios larvarios de los helmintos casi siempre migran a través del cuerpo antes de madurar en el intestino y pueden causar daño severo a tejidos y órganos. Las formas adultas causan primariamente mal nutrición y anemia mientras residen en el intestino (EPA, 1991).

Los nematodos parásitos más comúnmente encontrados en lodos se muestran en la Tabla 1.7 mostrando también la enfermedad que producen, así como su modo de transmisión.

**Tabla 1.7 Nematodos parásitos encontrados en lodos**

Parásito	Enfermedad	Reservorio no humano	Estado infectivo humano	Modo de transmisión
<i>Ancylostoma duodenale</i>			Larva de vida libre	Penetración por la piel, contacto con el suelo.
<i>Ancylostoma braziliense</i>	Migración cutánea de larvas	Perro, gato	Larva de vida libre	Penetración por la piel
<i>Ancylostoma caninum</i>	Migración cutánea de larvas	Perro	Larva de vida libre	Penetración por la piel, contacto con el suelo
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis		Huevo embrionado	Ingestión de agua, alimento y suelo

Continuación

<i>Ascaris suum</i>	Ascariasis	Puerco	Huevos embrionados	Ingestión de agua, alimento y suelo
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis		Huevo	Ingestión del huevo
<i>Necator americanus</i>	Necatoriasis		Huevo embrionado	Penetración por la piel, contacto con el suelo
<i>Strongyloides stercoraris</i>	Strongyloidiasis	Perro	Larva de vida libre	Penetración por la piel
<i>Toxocara canis</i>	Migración visceral de larvas	Perro	Huevo embrionado	Ingestión de agua, alimento y suelo
<i>Toxocara cati</i>	Migración visceral de larva	Gato	Huevos embrionados	Ingestión de agua, alimentos y suelo
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis		Huevo	Ingestión de alimentos

(EPA, 1991)

Mientras que para la clase cestoda los parásitos más comunes en aguas residuales y lodos se muestran en la Tabla 1.8 así como su modo de transmisión y enfermedad que producen.

Tabla 1.8 Cestodos parásitos encontrados en lodos

Parásito	Enfermedad	Reservorio no humano	Estado infectivo	Modo de transmisión
<i>Echinococcus granulosus</i>	Enfermedad unilocular	perro	Huevo	Ingestión de agua y alimento
<i>Echinococcus multilocularis</i>	Enfermedad alveolar	Perro, zorra	Huevo	Ingestión de agua y alimento
<i>Hymenolepis nana</i>	Teniasis	Rata, ratón	Huevo	Ingestión de agua y alimento
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	-	Huevo, al igual que la larva que proviene de un hospedero intermediario	Ingestión de agua y alimentos
<i>Taenia solium</i>	Teniasis y cisticercosis		Huevo, larva que proviene de un hospedero intermediario	Ingestión de agua y alimento

(EPA, 1991)

Según los estudios realizados por Reimers *et al.*, (1986) encontraron que los parásitos más comunes en muestras de lodo provenientes de 4 plantas

de distintas partes de E.U. fueron *Ascaris spp*, *Trichuris trichiura*, *Trichuris vulpis*, y *Toxocara spp*. con uno o más parásitos detectados en 89 % de las muestras examinadas, por su parte Jiménez (1999) encontraron que los helmintos parásitos más abundantes en lodo proveniente de un TPA son los que se muestran en la Tabla 1.9.

**Tabla 1.9 Helmintos más frecuentes en lodos**

Género	% de huevos en lodo crudo
<i>Ascaris</i>	90.6
<i>Trichuris</i>	3.8
<i>Hymenolepis</i>	3.5
<i>Toxocara</i>	1.7
<i>Taenia</i>	0.4

(Jiménez ,1999)

La Tabla 1.10 nos muestra el número de casos de dos enfermedades provocadas por helmintos (ascariasis y teniasis) así como de otras helmintiasis.

**Tabla 1.10 Frecuencia de ascariasis y teniasis en México durante 1999 y 2000**

Año	Ascariasis	Teniasis	Otras helmintiasis
1999	413,515	3,195	737,240
2000	334,100	1,102	639,044

Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (2001)

### 1.2.3.9. Descripción de los helmintos parásitos más comunes encontrados en lodos

**Ascaris.** *Ascaris lumbricoides* es un parásito del intestino delgado del humano. Las hembras miden de 200 a 400 milímetros de largo, mientras que los machos de 150 a 300 milímetros. Los huevos fértiles son ovoides y miden de 45 a 70 micras de largo por 35-50 micras de ancho. El nemátodo del puerco *Ascaris suum* tiene un estrecho parecido a *Ascaris lumbricoides*, sólo que para el caso de *A. lumbricoides* el reservorio es el hombre, pero el puerco y el perro pueden dispersar los huevos no desarrollados comiendo heces fecales humanas y excretándolas en otro lugar. Las hembras pueden poner cerca de 200,000 huevos por día siendo cerca del 15 % infértiles, el reservorio para *A. suum* es el puerco (Feachem *et al.* , 1983).

**Ascariasis.** La ascariasis es ocasionada por el nematodo *Ascaris lumbricoides* de distribución cosmopolita. Es una infección de particular importancia por ser extremadamente común en la mayor parte del mundo y porque los huevos de *Ascaris* son muy persistentes en el ambiente y difíciles de eliminar de los desechos y procesos de tratamiento de suelos.

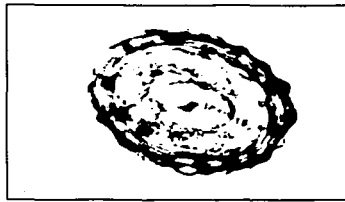


Patología. Los primeros síntomas son neumonitis con tos, disnea, dolor, fiebre, eosinofilia moderada, y esputo con sangre. Estos síntomas son causados por la migración de la larva y su desarrollo. La invasión de adultos en el intestino delgado puede causar desordenes digestivos, náusea, dolor abdominal, vómito, y disturbios para dormir. Los adultos pueden pasar a través de las heces fecales o por la boca.

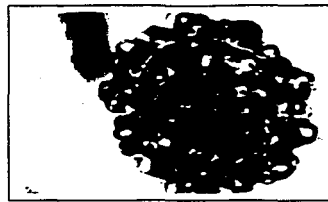
Transmisión. El hombre se contamina por vía oral – fecal al ingerir los huevos larvados. Bajo condiciones de humedad y sombra en 22 a 33°C es necesario un mínimo de 10 a 15 días para que el 75% de los huevos recién expulsados lleguen a ser infectivos. Mientras que en condiciones desfavorables como la desecación o la exposición al sol el desarrollo se retardará o puede interrumpirse por completo y recomenzar cuando las condiciones ambientales sean favorables. Los vehículos para la ingestión de los huevos de *Ascaris* son los dedos contaminados, objetos colocados en el suelo, polvo y vegetales contaminados. También se puede llevar a cabo por la inhalación de partículas de polvo que tengan unidos huevos de helmintos. Existe ahora la evidencia para indicar que la ascariasis en áreas altamente endémicas es una infección familiar y la mayor transmisión ocurre cuando la casa, el piso, el jardín o el área alrededor de la casa esta contaminada por heces fecales con lo cual este suelo contaminado reinfecta a niños y adultos en la misma familia (Feachem *et al.*, 1983).

Incidencia. La ascariasis está ampliamente expandida en el mundo especialmente en climas calientes y entre la población pobre. Es uno de los helmintos de humanos más difundido e infecta de 700 a 1000 millones de personas. La intensidad de la infección es particularmente alta en pre-escolar y niños chicos, siendo la tasa de mortalidad de 0.02 % y más alta en niños (Feachem *et al.*, 1983). Biagi (1990) estima que 33 % de la población en México esta infectada con *Ascaris* sp.

Los huevos de *Ascaris* son los más duros y resistentes de los huevos que son excretados y sobreviven a una variedad de condiciones ambientales por periodos de meses o años (Figura 1.1.) Necesitan pequeñas cantidades de oxígeno para desarrollarse pero pueden permanecer viables por largos periodos en condiciones anaerobias (Feachem *et al.*, 1983). El ciclo de vida de *Ascaris lumbricoides* se muestra en la Figura 1.2.

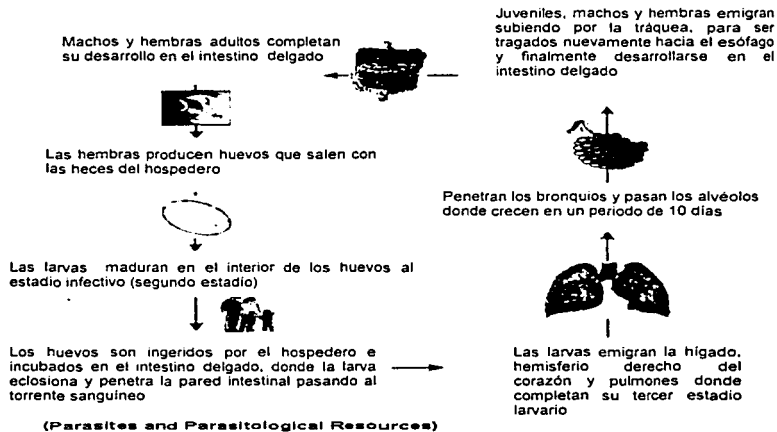


a)



b)

**Figura 1.1 a) Huevo viable con larva de *Ascaris lumbricoides* y b) Huevo no viable de *Ascaris lumbricoides* (Tomada del Instituto de Ingeniería de la UNAM).**

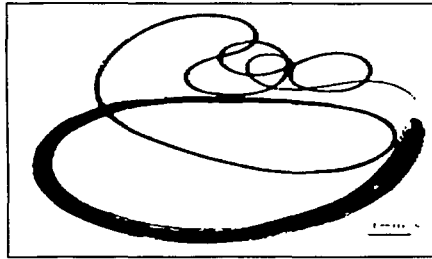


**Figura 1.2 Ciclo de vida de *Ascaris lumbricoides* (Tomada de la Universidad Estatal de Ohio, Colegio de Ciencias Biológicas).**

***Trichuris trichiura*.** La hembra de *Trichuris trichiura* es ligeramente más grande que el macho ya que mide entre 30 y 50 mm de largo mientras que el macho mide entre 25 y 45 mm (Figura 1.3). La hembra tiene un ovario y un útero, se estima que una sola hembra es capaz de producir entre 1,000

y 7,000 huevos diarios, los cuales miden entre 40 y 50 micras de largo por 23 de ancho. El embrión se desarrolla en el suelo en aproximadamente 21 días. Los huevos de *T. trichiura* son menos resistentes que los de *Ascaris* a la desecación, el calor y el frío.

**Tricocefalosis.** La tricocefalosis es una enfermedad producida por *Trichuris trichiura* esta infección se adquiere por vía oral-fecal al ingerir huevos totalmente embrionados que han permanecido en suelo húmedo de 10 a 14 días después de su expulsión. Al eclosionar la larva penetra en las criptas de los segmentos inferiores del intestino y colon para luego introducirse en otras porciones del intestino grueso, el cual es su habitat definitivo. Los huevecillos son expulsados por medio de las heces fecales y maduran en la tierra permaneciendo viables por meses o años, siendo el ciclo de maduración de 3 meses en el hombre.



**Figura 1.3** *Trichuris trichiura* adulto (Tomada de productos The Life Tree).

**Patología.** En general las infecciones por tricocéfalos son asintomáticas. La aparición del cuadro clínico esta condicionada por la carga parasitaria y es común en niños desnutridos. Entre los síntomas se encuentran crisis disintéricas repetidas, deposiciones mucosanguinolientas, dolores abdominales, diarrea y eosinofilia. Se cree que *T. trichiura* afecta al humano por dos mecanismos: mecánico y alérgico. En el mecánico los parásitos adultos se introducen en el epitelio del ciego, la lesión de la pared es de poca importancia, pero puede presentarse obstrucción de la luz apendicular resultando en un cuadro de apendicitis. Al irritarse la mucosa, se descama constantemente con la consiguiente pérdida de hierro, lo que aunado a la escasa ingestión de proteínas es la causa de la anemia. Por otro lado la presencia de los gusanos en la mucosa irrita el plexo nervioso de la misma y origina diarrea y espasmos.

**Tricocefalosis en México.** En México la prevalencia estimada es de 28.4 % (Biagi,1990). Las tasas más altas (superiores a 10 %) se concentran en

Morelos, Sinaloa, Campeche, Oaxaca, Veracruz, Nayarit, Quintana Roo, Colima, Puebla y Tabasco.

***Toxocara***. Se distinguen dos especies del género *Toxocara* que son: *Toxocara canis* cuyo hospedero definitivo es el perro y *Toxocara cati* del cual el hospedero definitivo es el gato.

***Toxocara canis***. Los machos miden entre 4 y 10 cm de largo y entre 2 y 2.5 mm de diámetro, mientras que las hembras entre 5 y 18 cm de largo y de 2.5 a 3.5 mm de diámetro. Los huevos miden entre 85 y 95 micras.

***Toxocara cati***. Los machos miden de 3 a 7 cm de largo y de 1 a 1.1 mm de diámetro y las hembras de 4 a 12 cm de largo por 1.2 mm de diámetro. Los huevos miden de 65 a 75 micras.

#### Ciclo de vida

Los gusanos adultos viven en los intestinos delgados de sus hospederos definitivos (perros y gatos) después de la fecundación, liberando los huevos embrionados con las heces. Después de 5 o 6 días las larvas se transforman en larvas de segundo estadio y los huevos al ser ingeridos eclosionan y liberan las larvas que viajan por la vía hepato-cardiopulmonar donde ocurre una segunda muda (en los pulmones), para después dirigirse al intestino donde completan su desarrollo después de sufrir dos mudas más.

#### Patología en el humano

La infección ocurre cuando se ingieren alimentos contaminados con huevos embrionados. Los síntomas son fiebre elevada, eosinofilia, hepatomegalia, tos, disnea y neumonía, las larvas generalmente se alojan en los ojos o en el sistema nervioso central. La respuesta inmunológica que ocasionan impide que completen su migración normal por el cuerpo y son encapsulados, de esta manera forman un granuloma eosinofílico en cualquier órgano que se encuentren, principalmente en el hígado, pulmones, ojos y cerebro.

#### Céstodos

***Taenia solium***. Es un gusano largo y aplanado que no posee intestino, además de ser hermafrodita y poseer un cuerpo segmentado, el estróbila, compuesto por una serie de proglótidos. Los proglótidos se encuentran unidos a través de un cuello a un órgano anterior de adherencia, llamado escólex, compuesto por ventosas, surcos, espinas, glándulas o combinaciones de éstos.

**Teniasis**. Es el agente causal de dos enfermedades distintas: 1) la teniasis, causada por el céstodo adulto, solo se aloja en el intestino del

hombre que es su hospedero definitivo y 2) la cisticercosis, ocasionada por la larva de la tenia. La forma larvaria ocurre naturalmente en los cerdos, los cuales son el huésped intermediario principal. La teniasis ocurre cuando el hombre se infecta al consumir carne de puerco mal cocida (Figura 1.4).

**Patología.** La teniasis cuando llega a presentar síntomas suelen ser falta o exceso de apetito y, en ocasiones, pérdida de peso. Debido a los escasos síntomas que ocasiona la teniasis, la infección suele pasar inadvertida convirtiéndose al enfermo en un transmisor que puede infectarse a si mismo y a otros con los huevecillos liberados en las heces fecales. En cuanto a la cisticercosis, ésta es causada por la infección del estado larvario (cisticerco) de *Taenia solium* y afecta principalmente al sistema nervioso central, el ojo, el músculo esquelético y el tejido subcutáneo.

La cisticercosis es común en los países donde se consume carne de cerdo. Se localiza en el este de Europa, Asia, México y Sudamérica. En México la frecuencia de la teniasis y la cisticercosis (incluyendo *Taenia saginata*) varía de 0.2 a 3.4 % y la prevalencia de la cisticercosis porcina se ha estimado entre 0.1 hasta un 12 % (Sarti, 1997).

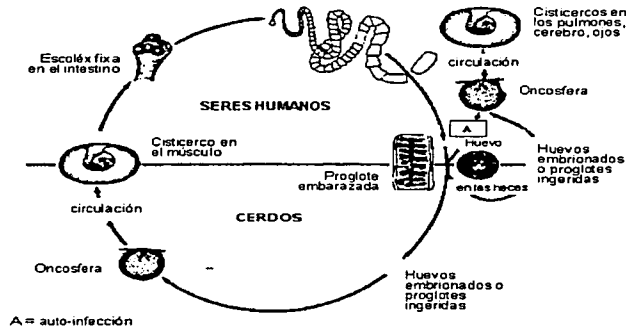


Figura 1.4 Ciclo de vida de *Taenia solium* (Tomado de INPPAZ-OPS-OMS, 2001)

***Taenia saginata.*** *T. Saginata* se localiza sólo en el intestino delgado del hombre, la forma larvaria no infecta al hombre. El hospedero intermediario es el ganado y se infecta por ingestión de los huevecillos al alimentarse con pastura contaminada con heces fecales, mientras que el hombre se infecta al comer carne de res mal cocida infectada con cisticercos. El

gusano libera alrededor de 300,000 huevecillos diariamente y la patología que presenta es dolor abdominal, náusea y aumento en el apetito.

### 1.2.3.10. Organismos indicadores

El riesgo asociado con la presencia de organismos patógenos en agua contaminada con materia fecal es valorado determinando la concentración de un organismo indicador, que provee una medida del número relativo de patógenos presentes y un asociado riesgo a la salud. Varios microorganismos se han usado para indicar la presencia de contaminación fecal.

Existen ciertos requerimientos para considerar a un organismo indicador de contaminación fecal:

- 1) Debe ser miembro de la microflora intestinal de animales de sangre caliente.
- 2) Debe estar presente cuando los patógenos también estén presentes y ausentes en aguas no contaminadas.
- 3) Debe estar presente en números más grandes que los patógenos.
- 4) Debe ser igualmente resistente que los patógenos a las condiciones ambientales y a la desinfección de agua y plantas de tratamiento de aguas residuales.
- 5) No debe multiplicarse en el ambiente.
- 6) Debe ser detectable por medios fáciles, rápidos y no costosos.
- 7) Los organismos indicadores no deben ser patógenos.

**Coliformes totales.** El grupo de coliformes totales incluye bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram-negativas, no formadoras de esporas, con forma de barra que fermentan la lactosa con producción de gas dentro de 48 hr en 35 °C (APHA, 1989). Los coliformes totales son descargados en grandes cantidades en heces fecales humanas y animales, pero no todos ellos son de origen fecal, algunos crecen en la vegetación, en suelos y en algunos procesos industriales. Algunas especies que forman parte de este grupo son: *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Citrobacter* (WEF, 1995).

**Coliformes fecales.** Los coliformes fecales son un subgrupo de los coliformes totales que incluyen a todos los coliformes que pueden fermentar la lactosa en 44.5 °C siendo termotolerantes. Tienen varias características de un buen organismo indicador se encuentran

relacionados estrechamente con contaminación fecal, son relativamente fáciles de identificar y cuantificar, están presentes usualmente en grandes números cuando existe contaminación fecal. Los coliformes fecales son el principal grupo de organismo indicadores para evaluar la contaminación de aguas recreativas. Este grupo incluye bacterias como *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae* y la presencia de coliformes fecales indican la presencia de materia fecal de animales de sangre caliente. Otra característica de los coliformes fecales es que muestran una sobrevivencia igual a las bacterias patógenas, pero su utilidad como indicadores de protozoarios o contaminación viral es limitada, son menos resistentes a la desinfección que los virus o quistes de protozoarios.

**Bacteriófagos.** Los bacteriófagos son similares a los enterovirus pero son más fáciles y rápidos de detectar y son encontrados en números más altos que estos en aguas residuales y el ambiente (Bytton, 1980; Goyal *et al.*, 1987; Grabow, 1986 citado por Bitton 1994).

#### 1.2.3.11. Viabilidad y sobrevivencia de los microorganismos en suelo y agua

Los microorganismos patógenos perecen en suelo a tasas que varían según el tipo de organismo, el grado de depredación por otros microorganismos, la cantidad de luz solar y la composición física y química del suelo, incluyendo el contenido de humedad, pH y temperatura (Gerba *et al.*, 1975; Kowal, 1985 citado en EPA, 1991).

La humedad y los suelos fríos contribuyen a la sobrevivencia de quistes de protozoarios y huevos de helmintos, también los suelos con un alto porcentaje de materia orgánica, los cuales tienen la capacidad para retener más agua, pueden ser un conducto para una mayor sobrevivencia de los parásitos (EPA, 1991). Por lo tanto los huevos de helmintos y larvas susceptibles mueren cuando son expuestas a la desecación y luz del sol, pero en un suelo húmedo y fresco pueden permanecer infectivos por varios años (Kowal, 1985 citado en EPA 1991).

Los huevos de helmintos tienen tiempos de sobrevivencia más largos que la mayoría de los microorganismos de interés en lodos. Los huevos de *Ascaris* y *Toxocara* mostraron persistir en suelo o pastizal por varios años (Feachem *et al.*, 1983). En la Tabla 1.11 se muestran los tiempos de sobrevivencia para algunos patógenos y parásitos

**Tabla 1.11 Tiempos de sobrevivencia de patógenos en suelo y vegetación**

Organismo	Suelo		Vegetación	
	Máximo absoluto	Máximo común	Máximo absoluto	Máximo común
Bacterias	1 año	2 meses	6 meses	1 mes
Virus	1 año	3 meses	2 meses	1 mes
Quistes de protozoarios	10 días	2 días	5 días	2 días
Huevos de helmintos	7 años	2 años	5 meses	1 mes

Nota: los períodos pueden aumentar si hay condiciones climáticas favorables  
(Fuente: EPA, 1991)

### 1.3. Tratamiento de los lodos

#### 1.3.1. Acondicionamiento

El acondicionamiento es el paso donde se prepara a los biosólidos líquidos cambiando sus propiedades físicas y químicas para permitir la separación de las fracciones sólidas y líquidas. Este paso tiene gran importancia ya que el desaguado de la mayoría de los lodos no es práctico sin un acondicionamiento previo por medios ya sea físicos o químicos que incluyen:

- Adición de químicos orgánicos e inorgánicos
- Tratamiento térmico (con o sin incremento de presión)
- Congelación/Descongelación
- Adición de material para formar volumen

##### 1.3.1.1. Acondicionamiento con polímeros orgánicos (polielectrolitos).

Los polímeros usados para acondicionar biosólidos pueden ser categorizados por carga, peso molecular y forma. Este tipo de polímeros se encuentran disponibles como catiónicos (positivo), aniónicos (negativo) o no iónicos (neutral).

##### 1.3.1.2. Acondicionamiento con químicos inorgánicos

Los químicos inorgánicos usados para el acondicionamiento de biosólidos previo al desaguado incluyen sales de fierro (cloruro férrico, cloruro ferroso y sulfato ferroso) y cal. La cal ( $\text{CaO}$  y  $\text{Ca(OH)}_2$ ) y el cloruro férrico son los más ampliamente usados de los químicos inorgánicos.



### **1.3.1.3. Acondicionamiento térmico**

El acondicionamiento térmico se lleva a cabo por dos procesos

1. Acondicionamiento térmico de alta presión. Este proceso altera las propiedades físicas de los biosólidos, resultando en una torta de lodo más seca que la obtenida por medio del acondicionamiento químico.

2.- Aumento del desaguado térmico El desaguado de sólidos biológicos pueden realizarse pre-calentando los sólidos a 60 °C a presión atmosférica previo al desaguado.

### **1.3.2. Espesamiento**

El espesamiento de los biosólidos reduce el volumen del material que va a ser manejado en subsecuentes pasos confiriendo ventajas de operación en el tratamiento de los lodos por ejemplo el espesamiento previo a la digestión reduce el tamaño de los digestores, reduce los requerimientos de calentamiento de los digestores anaerobios e incrementa la eficiencia en la digestión.

Los procesos de espesamiento son:

1. Espesamiento por gravedad
2. Espesamiento por flotación con aire disuelto
3. Centrifuga de espesamiento
4. Espesadores de gravedad con cinta corrediza

### **1.3.3. Desaguado**

El desaguado ayuda a un mejor manejo y procesamiento de los biosólidos. Las máquinas donde se lleva a cabo el desaguado pueden alcanzar hasta 20-50 % de concentración de sólidos (Girovich 1996). Los procesos de desaguado pueden llevarse a cabo por desaguado mecánico que incluye máquinas como filtros prensa con correa transportadora, centrifugas, filtros de presión, filtros de vacío, prensas de tornillos y prensas rotatorias, o por sistemas pasivos los cuales incluyen lechos de secado convencionales o asistidos con vacío, lagunas de congelamiento/deshielo y bolsas de desaguado.

### **1.4. Estabilización de lodos**

La estabilización es definida como el proceso o serie de procesos que producen un lodo con características tales que su último uso será aceptable en términos de impacto ambiental y salud pública (Vesilind, 1986).

Las características que hacen de un lodo un material no aceptable para disposición o reúso se muestran en la Tabla 1.12. Los lodos son estabilizados con tres objetivos: 1) reducir el contenido de organismos patógenos, 2) eliminar olores e 3) inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción. Los medios para alcanzar estos objetivos a través de la estabilización son: a) reducción biológica de contenido volátil, b) la oxidación química de materia volátil, c) la adición de químicos al lodo para hacerlo no apto para la sobrevivencia de microorganismos y d) la aplicación de calor para desinfectar o esterilizar el lodo (Metcalf y Eddy, 1991).

**Tabla 1.12 Características no deseables de los lodos**

<p><b>Olor.</b> La medición cuantitativa de la intensidad del olor es posible utilizando un panel de jueces y diluir gases oloríferos hasta que el olor no es detectado. El número de diluciones necesarias para obtener un aire libre es el número de olor. Esta es una técnica tomada de la industria de tratamiento del agua.</p>
<p><b>Patógenos.</b> Los lodos contienen gran cantidad de organismos patógenos por lo que existe el riesgo de transmisión de enfermedades. La densidad y viabilidad de parásitos y patógenos en el lodo se basa en: a) la fuente de los desechos, b) las especies de parásitos presentes, c) clima y d) la eficacia de los procesos de tratamiento del lodo.</p>
<p><b>Toxinas.</b> Las toxinas presentes en el lodo pueden ser orgánicas e inorgánicas. De las inorgánicas, los metales pesados son los de mayor interés, mientras que para las toxinas orgánicas el PCB o los hidrocarburos policlorados son los más importantes (Vesilind, 1986).</p>
<p><b>Desaguado.</b> El desaguado es de gran interés para la mayoría de los operadores de las plantas de tratamiento y los lodos son casi siempre tratados (estabilizados) para el solo propósito de realzar su desaguado. En el presente se aplican diferentes procesos de desaguado basados en tres principios: filtración, centrifugación, evaporación.</p>

La selección de un proceso de estabilización requiere el conocimiento de qué destino se le dará al lodo y que características debe cumplir, por ejemplo si el lodo es para ser reusado por completo en jardines privados, el olor y los patógenos así como las toxinas serán de gran importancia y las técnicas de estabilización seleccionadas reflejarán estos requerimientos. Cuando se diseña un proceso de estabilización de lodo es importante considerar la cantidad del lodo a ser tratado, la integración de los procesos de estabilización con otros tratamientos y el objetivo de los procesos de estabilización.

Una vez que se han seleccionado el uso o la disposición de los lodos y las características del lodo en cuestión han sido determinadas, es necesario definir los parámetros para definir la estabilidad del lodo. Con la promulgación del apartado 503 de la US EPA (1994) se establecen estándares para el uso y disposición de los lodos, entre los que se encuentran: los límites de contaminantes, prácticas de manejo, contenido de microorganismos patógenos y atracción de vectores entre otros.

También se han utilizado otros parámetros para medir la estabilidad del lodo como son: sólidos volátiles, DBO del filtrado, incremento en la DBO durante el almacenamiento, consumo de oxígeno, producción de gas, ácidos volátiles, ATP, DNA y actividad enzimática (Vesilind, 1986). Debe ser notado que ninguna de las técnicas provee una estabilización completa, incluyendo la incineración, la cual resulta en un residuo alto en metales pesados.

#### **1.4.1. Procesos de estabilización convencionales**

Los procesos de estabilización convencionales son:

- Estabilización alcalina
- Digestión anaerobia
- Digestión aerobia
- Composteo

##### **1.4.1.1. Estabilización alcalina**

Los objetivos de la estabilización alcalina son: reducir el número de microorganismos patógenos, reducir a los microorganismos productores de olores y por consiguiente prevenir cualquier peligro a la salud asociado con los biosólidos. Para llevar a cabo estos objetivos en la estabilización alcalina se emplean principalmente dos productos: cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o cal viva ( $\text{CaO}$ ) debido a que la cal es el material alcalino más ampliamente usado y el de más bajo costo en la industria de las aguas residuales. Los parámetros usados para diseñar un sistema de estabilización alcalina son el pH, tiempo de contacto y dosis de cal.

En los procesos de estabilización alcalina, la cal es añadida al lodo crudo en cantidad suficiente para elevar el pH a un valor de 12 o más. La reducción significativa de patógenos y olores se lleva a cabo cuando se alcanza un pH de 12.5 en media hora y es mantenido durante más de dos horas (Lue-Hing *et al.*, 1998). El no proporcionar una dosis suficiente para elevar a 12 el pH por más de dos horas puede originar la reactivación de problemas de olores durante el almacenamiento. Además la alcalinidad residual debe mantenerse alta durante varios días antes de la disposición para evitar el recrecimiento de organismos patógenos (Lue-Hing *et al.*, 1998). El valor del pH decae paulatinamente cuando el bióxido de carbono es absorbido (formando un ácido débil al entrar en contacto con el agua) consumiendo gradualmente la alcalinidad residual.

La dosis de cal es un factor importante en este proceso y depende del tipo de lodo (primario, lodo activado, etc.) de su composición química y de su concentración de sólidos (Lue-Hing *et al.*, 1998).

Las ventajas de este proceso son:

- sirve para fijar o inmovilizar iones metálicos específicos
- reduce los problemas de patógenos y olores
- los lodos pueden ser aplicados a la agricultura y proveer una buena fuente de nitrógeno y calcio así como materia orgánica benéfica
- así mismo la cal es más segura, barata y fácil de manejar que otros productos como el cloro (Lue-Hing *et al.*, 1998).

Las desventajas son:

- la cal no destruye la materia orgánica que promueve el crecimiento de microorganismos
- comparado con los procesos de digestión la cal no reduce la masa de lodo, lo cual puede resultar en un aumento en el costo de transporte y disposición.
- los lodos estabilizados con cal no son apropiados para los suelos que son inherentemente alcalinos (Lue-Hing *et al.*, 1998).

El proceso de estabilización alcalina puede llevarse a cabo en dos modalidades dependiendo del punto de aplicación de la cal:

1. Adición de cal al lodo previo al desaguado o pre-tratamiento con cal

En el pre-tratamiento, el lodo líquido es mezclado con cal ya sea hidratada o viva. Esta modalidad del proceso tiene desventajas sobre el post-tratamiento ya que es necesaria una mayor cantidad de cal por unidad de peso de lodo procesado, a su vez que requiere una dosis más alta de cal para alcanzar el pH adecuado.

2. Adición con cal al lodo después del desaguado o post-tratamiento con cal

En este proceso ya sea la cal hidratada o la cal viva es mezclada con el lodo desaguado para elevar el pH de la mezcla. La cal viva es preferida porque la reacción exotérmica con el agua puede elevar la temperatura de la mezcla por arriba de 50 °C, suficiente para inactivar huevos de helmintos (Metcalf y Eddy, 1991). El post-tratamiento con cal presenta algunas ventajas con relación al pre-tratamiento como pueden ser el uso de cal seca por lo que no es necesario añadir agua al lodo desaguado, y la eliminación de los problemas asociados al mantenimiento del equipo de desaguado de lodo con cal.

## Reducción de patógenos

La estabilización con cal obtiene reducciones significativas de entre uno a siete unidades logarítmicas en bacterias indicadoras y patógenos además de poliovirus. La efectividad de esta técnica depende del pH alcanzado en la estabilización (Pedersen, 1983).

Farell *et al.*, (1974 citado en Pedersen, 1983) determinaron que a un valor de pH de 10.5 los coliformes fecales y estreptococos fecales no son afectados pero si son reducidos al incrementar los valores de pH entre 11.5 y 12.5.

A un valor de pH de 10.5 los organismos patógenos *Salmonella* sp., y *Pseudomonas aeruginosa* son reducidos por dos o más ordenes de magnitud mostrando una mayor sensibilidad que los organismos indicadores ya que ningún organismo patógeno muestra una respuesta de sobrevivencia pronunciada a pH por arriba de 11, estando aparentemente su umbral de sensibilidad por debajo de ese valor (Counts y Shuckrow, 1974; Farell *et al.*, 1974 citado en Pedersen, 1983).

En cuanto a los virus se ha logrado una inactivación de 4 unidades logarítmicas con respecto al conteo inicial presente en el lodo de  $3.3 \times 10^7$  a  $1.3 \times 10^3$  (UFP de virus) (Sattar *et al.*, 1976 citado en Pedersen, 1983). La destrucción de virus no solo es causada por efectos directos de pH alto sino también por la liberación de amoníaco en valores cercanos a 12.

Con respecto a los huevos de helmintos parásitos para llevar a cabo una destrucción completa de huevos de *Ascaris* es necesario añadir cal viva al lodo desaguado, para elevar la temperatura hasta 70 u 80 °C. Jiménez (1999) determinaron que utilizando cal en un lodo proveniente de un Tratamiento Primario Avanzado es posible inactivar el 90 % de los huevos de helminto viables.

### 1.4:1.2 Digestión anaerobia

Los objetivos de la digestión anaerobia son producir biosólidos estabilizados, reducir la cantidad de organismos patógenos, reducir la cantidad de biomasa destruyendo parcialmente los sólidos volátiles y producir gas que pueda ser utilizado (WEF, 1995). A su vez los parámetros que deben ser considerados en la digestión anaerobia incluyen tiempo de retención, contenido de sólidos, la temperatura y el mezclado. El tiempo de retención común en este proceso es de 15 a 20 días y la reducción de sólidos volátiles esta en función del tiempo de retención de sólidos y la temperatura. Se requiere que la temperatura sea mantenida constante ya que pronunciadas y frecuentes fluctuaciones afectan el rendimiento de las bacterias metanogénicas.

La digestión anaerobia es la degradación de sustancias orgánicas complejas por microorganismos en la ausencia de oxígeno. Los productos de la digestión anaerobia son: metano, bióxido de carbono, gases traza y biosólidos estabilizados. La población microbiana responsable de este proceso de conversión se divide en tres grupos, cada uno responsable de una función por separado las cuales son: solubilización, formación de ácido y formación de metano.

#### Formación de ácidos orgánicos

Compuestos orgánicos solubles que comprenden proteínas, lípidos, carbohidratos, ácidos grasos volátiles y alcoholes son fermentados por bacterias productoras de ácido a ácidos orgánicos (acético, fórmico, propiónico, butírico y otros), bióxido de carbono e hidrógeno en forma de gas. Las bacterias que intervienen en esta fase son principalmente facultativas, con algunas anaerobias obligadas y representan una amplia variedad de géneros microbianos, son relativamente tolerantes al cambio del pH y temperatura. También pueden usar el oxígeno molecular introducido por el suministro de lodo que entra en el sistema y de esta manera ayudan a proteger a las bacterias formadoras de metano, pues estas son estrictamente anaerobias (Lue-Hing *et al.*, 1998).

#### Formación de metano

Los ácidos orgánicos son convertidos principalmente a metano por bacterias metanógenas, que son estrictamente anaerobias y producen metano de la fermentación anaerobia de compuestos orgánicos simples. En contraste con las bacterias formadoras de ácido los metanógenos son sensibles a los cambios de temperatura, pH (son inhibidas por debajo de pH de 6) y composición del sustrato, además de que su crecimiento es bajo combinado con su poca tolerancia a condiciones ambientales desfavorables que pueden afectar el proceso (WEF, 1995).

Hay dos tipos de procesos de digestión anaerobia:

**Tasa-baja.**- También llamados tasa-estándar o digestores anaerobios convencionales. No hay mezclado en el sistema y debido a esto se forma una condición estratificada dentro del gestor. Tiene un tiempo de retención de 30 a 60 días.

**Tasa-alta.**- Este se caracteriza por tener calentamiento, mezclado y uniforme alimentación. Durante el calentamiento se incrementa la tasa de crecimiento de los microorganismos, la producción de gas y la tasa de digestión. Los sistemas de tasa alta son operados en el rango mesofílico (30 a 38 °C) o el rango termofílico (50 a 60°C). Una importante ventaja de la digestión termofílica es la mayor destrucción de patógenos que los

reportados para la mesofílica (Lue-Hing *et al.*, 1998). El mezclado ayuda a reducir la estratificación a dispersar el sustrato para un mejor contacto con la biomasa activa, reduciendo la acumulación de espuma y diluyendo cualquier sustancia inhibitoria o pH adverso. Un digestor de tasa alta reducirá los sólidos volátiles a un 40 a 50% (WEF, 1995).

Las ventajas de la digestión anaerobia son:

- El gas producido en los digestores contiene entre 60 a 75 % de metano por volumen y este es una fuente de energía que puede ser utilizada.
- Aproximadamente el 25-45 % (peso base) de los sólidos del influente son reducidos lo que resulta en una reducción de la masa y volumen del lodo, esto ayuda a que el costo asociado a la disposición se reduzca.
- El lodo digerido anaerobiamente contiene nitrógeno y fósforo y otros nutrientes además de materia orgánica lo cual puede ser aprovechado para mejorar la fertilidad de los suelos y la textura.

Las principales desventajas de la digestión anaerobia son:

- El costo de inversión es alto ya que son necesarios grandes tanques cubiertos con bombas para introducir lodo crudo, compresora de gas y bombas para mezclado
- Tiempos de retención largos para obtener una adecuada estabilización del lodo así como una buena producción de metano e inactivación de patógenos.

### **Reducción de patógenos**

La digestión anaerobia reduce virus de 1 a 4 ordenes de magnitud, mientras que coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales, *Salmonella* sp y enterovirus son reducidos 2 unidades log en sistemas operados a 35 °C con un tiempo de retención 15 días (Lue-Hing *et al.*, 1977; Stern y Farrell, 1977; Sacramento Area Consultants, 1979; Berg y Berman, 1980 y Jewell *et al.*, 1980 citados en Pedersen 1983). Con respecto a los parásitos, los quistes de protozoarios comúnmente no sobreviven a la digestión anaerobia, sin embargo los huevos de helmintos son capaces de sobrevivir (Cram, 1943; Reimers *et al.*, 1980 citados en Pedersen 1983). Según Berg y Berman, (1980); Stern y Farrell, (1977 citados en Pedersen 1983) la temperatura es el factor primario en la muerte de bacterias indicadoras y patógenos, virus entéricos y parásitos.

Plachy *et al.*, (1997) obtuvieron mediante la digestión anaerobia termofílica (54 °C) de lodos primarios una reducción de 82 % a 9 % en diez minutos

en la viabilidad de huevos de *Ascaris summ* no embrionados, así como una eliminación total después de 20 min.

Dado que no se lleva a cabo una completa eliminación de patógenos a través de la digestión anaerobia en los biosólidos, se deben imponer más restricciones para su reúso, limitando el contacto.

#### 1.4.1.3 Digestión aerobia

En la digestión aerobia el objetivo es destruir la fracción orgánica volátil suspendida y esto se lleva a cabo permitiendo el suficiente tiempo de contacto entre los organismos aerobios y la materia orgánica volátil (Vesilind, 1988). De este modo el tiempo de retención es el parámetro principal en el diseño de un sistema de digestión aerobia llegando a ser de 15 a 30 días. Otros factores que influyen en el éxito de este proceso son el tipo de lodo y la temperatura.

La digestión aerobia se basa en el principio biológico de respiración endógena y está ocurriendo cuando el suministro de sustrato disponible es limitado con lo cual los microorganismos comienzan a consumir su propio protoplasma para obtener energía y mantener las reacciones celulares. Durante este proceso de digestión los tejidos celulares son oxidados aerobiamente a bióxido de carbono, agua y amoníaco o nitratos, siendo esta oxidación exotérmica y produciendo una liberación neta de calor. En la digestión aerobia sólo 75 a 80 % del tejido celular es oxidado, el restante 20 a 25 % está compuesto de componentes inertes y orgánicos que no son biodegradables (Lue-Hing *et al.*, 1998). No es inusual encontrar reducciones de sólidos volátiles tan altas como el 50 y 60 % aunque una reducción de 40% es la más comúnmente lograda (Vesilind, 1988).

En la digestión aerobia el mezclado del lodo en el digestor es necesario para mantener los sólidos en suspensión y mejorar la oxigenación, según recientes investigaciones el desaguado de lodos digeridos aerobiamente es difícil y las características muestran un deterioro conforme se incrementa el tiempo de retención (WEF, 1995).

Existen variaciones a los sistemas de digestión aerobia estandar (mesofílico), siendo uno de ellos la digestión aerobia termofílica.

#### Digestión aerobia termofílica

El proceso consiste en que el calor liberado por la degradación biológica de sólidos orgánicos eleven la temperatura del líquido en el digestor a 60 °C. Las ventajas de este proceso serían la disminución en el tiempo de retención requerido para alcanzar una reducción de sólidos suspendidos, una mayor reducción de sólidos volátiles, un requerimiento menor de



oxígeno y la producción de un producto libre de patógenos debido a las temperaturas a las que es operado el sistema (WEF, 1995).

Las ventajas que ofrece la digestión aerobia ya sea mesofílica o termofílica son:

- Bajo costo de inversión, fácil de operar, problemas de olor mínimos
- Destrucción de sólidos volátiles igual a la obtenida en la digestión anaerobia
- Un producto final biológicamente estable.

Las desventajas son:

- Alto costo en el suministro de oxígeno
- Rendimiento afectado por el tipo de lodo, temperatura, localidad y tipo de material del tanque (Lue-Hing *et al.*, 1998).

#### Reducción de patógenos

Algunas bacterias incluyendo *E. Coli* y *Salmonella sp.* pueden ser reducidas 1 unidad logarítmica después de varios días, mientras que para enterovirus se obtiene la misma reducción después de 90 días (Pedersen, 1983). La digestión aerobia en temperaturas mesofílicas parece no ser efectiva para disminuir el número de huevos viables de *Ascaris sp.*, en tanto que huevos de *Toxocara sp* decrecen en alrededor de 1 log en 35 °C con un tiempo de retención de 10 días (Reimers *et al.*, 1980 citado en Pedersen, 1983).

Con la estabilización aerobia mesofílica (36 °C) a 20 días, se encontró una inactivación de huevos viables de 94% a 77 % y a 30 días de 94% a 76 % (Plachy *et al.*, 1997), en tanto que la estabilización aerobia termofílica (54 °C) redujo los huevos viables no embrionados de *Ascaris summ* de 82 % a 9 % en 10 minutos, mientras que después de este tiempo los huevos fueron eliminados (Plachy *et al.*, 1997).

#### 1.4.1.4 Composteo

El objetivo del composteo es reducir el contenido de organismos patógenos del lodo así como producir un producto similar al humus del suelo que pueda ser reusado. Es un sistema de estabilización del tipo biológico que degrada la materia orgánica por medio de la actividad microbiana a un producto estable. El lodo una vez que ha sido composteado es higiénico, parecido al humus y aproximadamente de 20 a 30% de sólidos volátiles son convertidos a bióxido de carbono y agua. El composteo puede ser llevado a cabo bajo condiciones anaerobias o aerobias, siendo el aerobio el más usado (Metcalf y Eddy, 1991).

Este proceso depende de varios parámetros operacionales los cuales incluyen: disponibilidad del oxígeno dentro de la composta, contenido de humedad, temperatura y contenido de sólidos volátiles biodegradables de la composta. Si el oxígeno no es suficiente para la sobrevivencia de los organismos aerobios los anaerobios serán predominantes lo que resultará en la producción de olores (Lue-Hing *et al.*, 1998).

Tres estados separados en actividad y asociados a la temperatura se observan en el composteo : mesofílico, termofílico y enfriamiento. En el estado inicial mesofílico la temperatura de la composta se incrementa de temperatura ambiente a 40 °C, con la aparición de hongos y bacterias. Como la temperatura en la composta se incrementa de 40 a 70 °C estos microorganismos son remplazados por bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos termofílicos, siendo en este rango de temperatura en el que ocurre la máxima degradación y estabilización de materia orgánica. El enfriamiento se caracteriza por una reducción en la actividad microbiana y el remplazamiento de organismos termofílicos con bacterias mesofílicas y hongos. Durante este periodo hay liberación de vapor de agua del material de composta donde ocurrirá también la estabilización del pH y consumación de la formación de ácido húmico. Estas temperaturas deben ser mantenidas por un tiempo mínimo de 60 días para asegurar un buen funcionamiento del sistema y una buena eliminación de microorganismos patógenos.

Es importante notar que la temperatura dentro del volumen de composta puede no ser uniforme por la pérdida de calor, característica de la mezcla y flujo de aire. Además, esta elevación de la temperatura transforma formas orgánicas de nitrógeno y fósforo en formas inorgánicas, las cuales son más biodisponibles para ser asimiladas por las plantas ( Polprasert, 1989; Walker y Wilson, 1973 citado en Shaban 1999).

La operación del composteo consiste en los siguientes pasos básicos:

- Mezclado del lodo desaguado con un agente de abultamiento
- Aireación de la composta por adición de aire o por movimiento mecánico.
- Recuperación del agente de abultamiento (si es práctico)
- Almacenamiento
- Disposición final

El agente de abultamiento es un material orgánico e inorgánico usado para proveer soporte estructural e incrementar la porosidad de la mezcla para una efectiva aireación.

El lodo proveniente de la composta puede ser usado en la agricultura para control de la erosión y mejoramiento de las propiedades físicas del suelo

además en reforestación de tierras alteradas, esto sujeto a cualquier limitación basado en sus constituyentes (WEF, 1995).

### Procesos microbiológicos

Los procesos microbiológicos del composteo involucran la destrucción de materia orgánica asociada con la producción de ácido húmico para lograr un compuesto final estabilizado esto involucra a los siguientes microorganismos:

**Bacterias.** La actividad de las bacterias es la responsable de la descomposición de proteínas, lípidos y grasas en temperaturas termofílicas, así como de la energía calorífica producida (Metcaif y Eddy, 1991). El calor producido durante el composteo es generado por la conversión de carbono orgánico a bióxido de carbono y vapor de agua (WEF, 1995) Inicialmente en temperaturas mesofílicas (por debajo de 40 °C) ellas metabolizan carbohidratos, azúcares y proteínas, mientras que en temperaturas termofílicas (mas altas de 40 °C) descomponen proteínas, lípidos y fracciones de hemicelulosa (Lue-Hing *et al.*, 1998).

**Actinomicetos.** Los actinomicetos según Waksman y Cordon (1939 citado en WEF 1995) atacan la hemicelulosa pero no la celulosa, metabolizando una amplia variedad de compuestos orgánicos como azúcares, almidones, lignina, proteínas, ácidos orgánicos y polipéptidos.

**Hongos.** Están presentes en ambos rangos de temperatura mesofílico y termofílico. Chang (1967 citado en WEF 1995) indicó que los hongos mesofílicos metabolizan la celulosa y otras fuentes de carbono complejas.

### Reducción de patógenos

La reducción de bacterias indicadoras y patógenas a través del composteo se muestra en la Tabla 1.13

**Tabla 1.13 Reducción de microorganismos mediante el composteo**

Organismo	Reducción	Tiempo (días)
<sup>1</sup> Salmonella spp	Hasta límites no detectables	10 - 14
<sup>2</sup> Coliformes totales	3	---
<sup>2</sup> Coliformes fecales	4	---
<sup>1</sup> Estreptococos fecales	62 %	73

--- datos no disponibles <sup>1</sup>Shaban (1999) <sup>2</sup>Lue-Hing et al., (1998)

Los virus parecen ser bastantes vulnerables a la temperatura del composteo, y los echovirus, reovirus, y coxsackievirus pueden ser reducidos tres ordenes de magnitud debido a la temperatura dentro del rango mesofílico al igual que los adenovirus (Cramer y Burge, 1975 citado en Pedersen 1983).

En helmintos Wiley y Westerberg (1969 citado en WEF 1995) no detectaron huevos viables de *Ascaris* 1 hr después de haberlos sembrado en un sistema de composteo de alta-tasa operando a 60-65 °C. Asimismo Cramer y Burge (1975 citado en Pedersen 1983) reportaron una reducción de 3 unidades logarítmicas de *Ascaris lumbricoides* en una hora a 50 °C y Branen *et al.*, (1975 citado en Pedersen 1983) lograron una reducción en huevos viables de 1 log mantenida en 50 °C por 15 min, lo cual implicaría una inactivación casi total de huevos en el composteo mesofílico una vez que la densidad inicial de huevos en lodo es raramente mayor a un orden de magnitud (Pedersen, 1983).

En la Tabla 1.14 se muestra el tiempo de retención que necesitan los procesos convencionales para cumplir con sus objetivos y en la Tabla 1.15 se observa la reducción de microorganismos llevada a cabo por estos procesos.

**Tabla 1.14 Tiempo de retención en los procesos convencionales de estabilización**

Procesos de estabilización	Tiempo de retención
Estabilización alcalina	>2 horas
Digestión aerobia	15 a 30 días
Digestión anaerobia	15 a 20 días
Composteo	60 días

(Lue-Hing *et al.*, 1998)

**Tabla 1.15. Remoción de microorganismos patógenos llevado a cabo por procesos de estabilización convencionales (en unidades logarítmicas y porcentaje)**

Procesos de estabilización	Coliformes fecales	<i>Salmonella</i> sp	Virus	Huevos de Helmintos
Digestión anaerobia	1-3 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>	.25 a 1 <sup>1</sup>	18 % <sup>3</sup>
Digestión aerobia	2 <sup>1</sup>	>1 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>	17 % <sup>6</sup>
Composteo	3-4 <sup>1</sup>	> 4 <sup>1</sup>	1-3 <sup>2</sup>	> 3 <sup>6</sup>
Estabilización con cal	1-7 <sup>3</sup>	2 <sup>4</sup>	4 <sup>5</sup>	90 % <sup>7</sup>

<sup>1</sup>Lue-Hing *et al.*, (1998) <sup>2</sup>Cramer y Burge, (1975 citado en Pedersen) <sup>3</sup>Pedersen (1983) <sup>4</sup>Jiménez, (1999) <sup>5</sup>Sattar *et al.*, (1976 citado en Pedersen 1983) <sup>6</sup>Plachy (1997) <sup>7</sup>Farrell *et al.*, (1974 citado en Pedersen 1983)

#### 1.4.2 Procesos de estabilización no-convencional

Un proceso de estabilización de lodos no-convencional es aquel que ha sido aplicado en escala de laboratorio o piloto y tiene potencial aplicación en plantas de tratamiento de aguas residuales (WEF, 1995). Estos

procesos han exhibido ventajas técnicas y económicas sobre los procesos convencionales y pueden haber sido usados en industrias y a nivel piloto, pero no en el tratamiento de biosólidos municipales donde pueden ser aplicados. Además de que pueden producir biosólidos Clase A (libre de patógenos) según la normatividad de la US EPA. Entre los procesos no-convencionales de estabilización de biosólidos que han sido desarrollados en los últimos 5 años a continuación se describen algunos según WEF (1995).

#### 1.4.2.2 Procesos de fijación termofílica puzolánica

Este proceso usa agentes alcalinos tales como la cal y cementos puzolánicos basados en el silicato de sodio soluble. El hidróxido de calcio es el reactivo catalítico que al actuar con aluminio, sílice y óxidos de hierro y complejos de óxido puzolanos liberan calor. El incremento en la temperatura, pH, agentes alcalinos y silicatos causa el incremento en la producción de amoníaco, el cual ayuda en la inactivación de patógenos, especialmente parásitos. El producto es libre de patógenos e inmoviliza metales tóxicos presentes en el lodo crudo (WEF, 1995).

El proceso requiere de un sistema cerrado para controlar el uso efectivo del amoníaco y olores. Es una tecnología relativamente simple y económica, tiene un formato móvil que permite un rápido montaje, y el producto tratado es estable, no es infeccioso ni tóxico.

#### 1.4.2.3 Procesos de desinfección / oxidación ácida

Estos son procesos fisicoquímicos que involucran una secuencia de pasos para producir un biosólido equivalente a Clase A. El proceso necesita de un acondicionamiento del lodo previo a la utilización de ozono, lo cual puede ocurrir en un tanque o conducto de pre-tratamiento, en el cual también se lleva a cabo el calentamiento del lodo a temperatura de más de 20 °C y si es necesario la adición de  $H_2SO_4$  hasta llegar a un pH de 2.5.

La ozonación se lleva a cabo por exposición de lodo acondicionado a un gas enriquecido con ozono este paso inactiva ciertos patógenos y consigue un grado indicado de oxidación por la elevación en el potencial de reducción de oxígeno del lodo, el tiempo de contacto requerido en este proceso es de 30 a 60 minutos con un suministro de ozono al conducto en una tasa de aproximadamente 30 g/min.

La biomasa ozonada se descarga a un tanque donde el gas disuelto sale de la solución a presión atmosférica, se hace pasar por un filtro de carbón y se ventila a la atmósfera. Este lodo luego es bombeado a un tanque de contacto de nitratos donde se reduce a los microorganismos indicadores por debajo de los límites de detección.

Puesto que los sólidos volátiles no son consumidos en este proceso puede haber posibilidad de putrefacción de los biosólidos tratados, sin embargo si se almacena el lodo a pH 3 o menos, inhibirá la putrefacción, el recrecimiento de organismos y disminuirá también el problema de atracción de vectores.

#### **1.4.2.4 Procesos de digestión ácida / tratamiento con calor**

Para este proceso de estabilización se utiliza una torta de lodo desaguada aproximadamente de 15 a 20 % (sólidos totales) repartida en un tanque de almacenamiento cerrado, bombeado después a un conducto acidificado de flujo cerrado. Antes de que entre al conducto, el pH es ajustado a 3 con ácido sulfúrico y el vapor es inyectado para elevar la temperatura aproximadamente a 160 °C. El proceso opera a 690 Kpa y el material tiene un tiempo de residencia de 1 hr en el conducto ácido. La cal es añadida a un arroyo presurizado saliendo del conducto ácido para llevar el pH a aproximadamente 6. Después la torta de lodo pasa a un conducto en el cual tiene un tiempo de residencia de 15 minutos. Los biosólidos son filtrados en un filtro-prensa produciendo 60 a 70 % de sólidos secos. La torta de lodo resultante es mezclada con aproximadamente 4 a 6 % de cal.

#### **1.4.2.5 Procesos de oxidación / tratamiento con calor**

Es un proceso de destrucción que oxida materiales orgánicos contenidos en los sólidos a CO<sub>2</sub>, agua y ácidos orgánicos débiles biodegradables. El producto de este proceso es libre de patógenos y con sólidos inertes que pueden ser reciclados en un gran número de productos, incluyendo ladrillos de construcción contra fuego. Hay una reducción de 75 a 85 % de sólidos totales y 95 a 97 % de sólidos volátiles.

Los metales pesados solubles en el torrente son convertidos a óxido de metales sólidos estables y son eliminados con el torrente de sólidos residuales. El producto residual sólido es no peligroso y puede ser reusado en un número de materiales de construcción o puede ser usado sin riesgo como cubierta de tierra.

#### **1.4.2.6 Proceso de pasteurización de lodos**

Para un rendimiento óptimo del proceso, el lodo deberá contener de 4 a 8 % de sólidos totales para facilitar el bombeo en la planta de procesamiento. El proceso consiste en mezclar el lodo con amoníaco para elevar su pH a 11.5 en un reactor durante 1 hr ya que el amoníaco libre (30%) inactiva todos los parásitos, bacterias y virus. Después se adiciona ácido fosfórico a la mezcla produciendo una reacción exotérmica que eleva la temperatura aproximadamente 65 a 70 °C en 2 minutos, la cual inactiva todos los patógenos que restaron. Esta misma reacción provoca la caída del pH de 11.5 a 7.

Este proceso fue desarrollado para producir un fertilizante orgánico, disminuyendo así la demanda de fertilizante inorgánico, el fertilizante orgánico se saca a través de una ventila de intercambio de calor para poder capturar este calor producido y precalentar la entrada de lodo crudo.

#### 1.4.2.7 Proceso de Irradiación de lodos

La radiación gamma y los rayos de electrones (rayos beta) son definidas como radiaciones ionizantes, lo que significa que poseen la suficiente energía para eliminar las uniones entre electrones de los átomos en la materia por la cual atraviesan creando así iones cargados. En sistemas acuosos los principales iones que se forman son los electrones hidratados, los radicales libres hidrógeno y radicales libres hidróxido. Estos pueden ejercer un poder desinfectante dañando el DNA y el RNA en bacterias, virus y otros patógenos, además de reaccionar con oxígeno y otras moléculas en sistemas acuosos para producir ozono y peróxidos los cuales también atacan patógenos en el lodo a través de varias reacciones de oxidación y disociación (Lue-Hing *et al.*, 1998).

#### 1.4.2.8 Rayos gamma

Los rayos gamma se producen durante la descomposición de ciertos elementos radiactivos, los radioisotopos usados en la desinfección de lodos son el cobalto-60 que tiene una vida media es de 5.26 años y el cesio-137 es un siendo su vida media de 30 años (Lue-Hing *et al.*, 1998).

Los rayos gamma tienen un gran poder de penetración y así pueden proporcionar una dosis uniforme al volumen de material. Las principales desventajas de los rayos gamma es que la fuente de los isótopos requeridos son de disponibilidad limitada, además de la legislación impuesta por la comisiones reguladoras nucleares de cada país y el hecho de que la radiación no puede ser apagada cuando no se esté usando. El tiempo de irradiación depende de las características del lodo, siendo los típicos de 3 a 5 horas, dependiendo de la dosis (Lue-Hing *et al.*, 1998). La destrucción de microorganismos que se logra mediante los rayos gamma se muestra en la Tabla 1.16 en pruebas realizadas en plantas piloto y agua cruda.

**Tabla 1.16 Destrucción de microorganismos en lodo y agua cruda a través de los rayos gamma**

Organismo	Dosis (Krad)	Destrucción (log)
<sup>1</sup> Bacterias totales	300	2
<sup>1</sup> Enterococos	300	2
<sup>1</sup> Enterobacteriaceae	300	4
<sup>2</sup> Coliformes	2 (KGy)	3.6

<sup>1</sup>Lue-Hing *et al.*, (1998)

<sup>2</sup>Rawat *et al.*, (1997)

### 1.4.2.9 Rayo de electrones (radiación beta)

La radiación beta solamente puede penetrar cerca de 1 cm de agua lo que dificulta el diseño de un proceso de desinfección de lodo siendo su principal desventaja, su ventaja es que la fuente de radiación puede ser prendida y apagada con un switch de contacto. Los niveles de destrucción de microorganismos logrados para un lodo digerido anaerobiamente con los rayos de electrones se muestran en la Tabla 1.17.

**Tabla 1.17 Destrucción de microorganismos en lodo por medio de los rayos de electrones (rayos beta)**

Organismo	Dosis (Krad)	Reducción (log)
Bacterias totales	280	4
Coliformes totales	200	5 a 6

Lue-Hing *et al.*, (1998)

Además de los procesos de estabilización no convencionales descritos anteriormente existen otros procesos que están siendo desarrollados los cuales incluyen la estabilización ácida, la digestión anóxica/aerobia, la estabilización alcalina de inyección de dióxido de carbono, hidrólisis termal y vermicomposteo.

### 1.4.2.10 Estabilización ácida

Dentro de los procesos no convencionales se incluye a la estabilización ácida y aunque ha sido reportada en la literatura no se han reportado las condiciones de operación del proceso. Se han reportado estudios de estabilización ácida empleando ácido sulfúrico, clorhídrico, peracético, perclórico, acético y propiónico principalmente (Roth y Keenan, 1971; Fraser *et al.*, 1984; Godfree *et al.*, 1984; Owen, 1984; Kiff y Lewis-Jones, 1984 y Barrios *et al.*, 2000). De ellos el ácido peracético demostró importantes reducciones en la densidad de bacterias así como en la viabilidad de los huevos de helmintos, lo cual resulta importante en nuestro país al contener el lodo grandes cantidades de ellos.

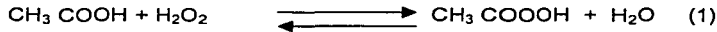
## 1.5 Acido peracético

El ácido peracético ( $\text{CH}_3\text{COOOH}$ ) es de la clase de compuestos denominados peróxidos que contienen un átomo de oxígeno unido a otro átomo de oxígeno. Es un poderoso agente antimicrobiano y recientemente también ha sido propuesto para utilizarse en la desinfección de agua potable y aguas residuales (Liberti *et al.*, 1999). Ha sido utilizado como esterilizante para una gran cantidad de equipo en plantas de



procesamiento de alimentos (Chemetrics Inc. 2000) y como agente antiviral (Kline y Hull, 1960 citado por Haraken, 1984).

El ácido peracético es un peróxido orgánico comercializado como una mezcla de equilibrio cuaternario de ácido acético ( $\text{CH}_3 \text{COOH}$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), ácido peracético y agua como se presenta en la ecuación 1

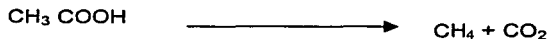
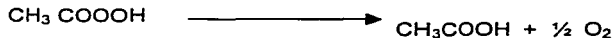
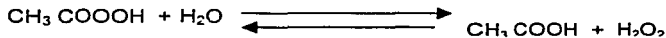


por lo tanto no existe ni puede ser fabricado al 100%. Según las concentraciones y cantidades de los productos de reacción este equilibrio da lugar a concentraciones variables de peracético, disponibles comercialmente entre 1 y 15 %. En una solución de ácido peracético al 38% p/p la relación de sus componentes se muestra en la Tabla 1.18 según Fraser *et al.*, (1984).

Tabla 1.18. Relación de componentes en el ácido peracético

Componente	% p/p
Ácido peracético (APA)	38
Peróxido de hidrógeno	3.3
Ácido acético	44.9
Agua	13.1

Las rutas en las que se descompone el ácido peracético son las siguientes:



No es mutagénico o carcinogénico, su actividad desinfectante se incrementa en condiciones de pH ácidas donde prevalece como ácido no disociado, y su poder de desinfección está basado en la liberación de oxígeno activo (Liberti *et al.*, 1999), pero su espectro de aplicación es muy amplio ya que puede actuar en un intervalo que va de pH ácido hasta un pH básico de 9 y es relativamente poco sensible a la materia orgánica

(Interox- Solvay, 1999). Las propiedades físicas del ácido peracético se muestran en la Tabla 1.19

**Tabla 1.19 Propiedades físicas del ácido peracético**

Líquido casi incoloro
Gravedad específica (20 °C) 1.135
Soluble en agua / solventes orgánicos polares
Punto de congelación -30 °C aprox
Punto de ebullición 105 ° C
Perdida de APA 1 % al mes
Oxígeno total disponible 9,5 % p/p (Fraser <i>et al.</i> , 1984)

Las desventajas del ácido peracético son que incrementa el contenido orgánico en el efluente tratado, además de incrementar el potencial microbiano debido al ácido acético residual (Baldry y Fraser, 1988; Lefevre *et al.*, 1992).

### 1.5.1 Uso del ácido peracético (APA) como desinfectante en agua residual

La mayoría de los trabajos realizados sobre desinfección con ácido peracético se han hecho en efluentes durante el tratamiento de aguas residuales.

En la Tabla 1.20 se muestra la reducción de microorganismos lograda por ácido peracético en agua residual, como se puede observar tratando un efluente de agua residual con ácido peracético se logran reducciones que van de 3 a 4 log de organismos indicadores como los coliformes totales y estreptococos fecales.

**Tabla 1.20 Reducción de microorganismos por ácido peracético**

Organismo	Dosis mg / L	Tiempo (minutos)	Reducción (log)
<sup>1</sup> Coliformes totales	5	20	4
<sup>2</sup> Estreptococos fecales	10	10	3 a 4

<sup>1</sup> Morris, (1993)

<sup>2</sup> Lazarova *et al.*, (1998)

En la Tabla 1.21 se compara la eficiencia de desinfección llevada a cabo mediante varios procesos los cuales son: rayos ultravioleta (UV), APA y Ozono (O<sub>3</sub>) en agua residual sobre coliformes fecales. Se puede ver que hay una eficiencia similar e inclusive una mayor reducción en unidades log desinfectando con APA que las obtenidas por los otros dos procesos, así lo demuestran los resultados de Liberti *et al.*, (1999).

**Tabla 1.21 Efectividad de desinfección de coliformes fecales usando varios procesos UV, APA y Ozono (O<sub>3</sub>)**

Proceso	Dosis y tiempo de contacto	Iniciales (UFC/100ml)	Finales (UFC/100ml)	Log remoción
UV	100mws/cm <sup>2</sup>	1.2x10 <sup>5</sup>	1	4.7
APA	400 mg/l 20 min	3.6x10 <sup>5</sup>	2	5.2
	10 mg/l 30 min	4.4x10 <sup>5</sup>	240	3.4
O <sub>3</sub>	15 mg/l 10 min	8.0x10 <sup>5</sup>	97	3.9

Liberti et al., (1999) (modificada)

Liberti *et al.*, (1999) probaron la eficiencia desinfectante de tres procesos en agua residual hacia varios organismos parásitos, el ácido peracético es efectivo hacia dos de ellos mientras que para *Cryptosporidium parvum* no mostró ningún efecto (Tabla 1.22). En cuanto a los otros dos parásitos su eficiencia es similar a los otros procesos

**Tabla 1.22 Efectividad de desinfección hacia parásitos selectos en agua residual por distintos procesos: O<sub>3</sub>, APA y UV**

Patógeno	UV 100 o 160mW.s/cm <sup>2</sup>			APA 10 mg/l, 30 min.			Ozono 15 mg/l, 10 min.		
	Inf	Efl	%	Inf	Efl	%	Inf	Efl	%
<i>Giardia lamblia</i> (N/I)	113	43	62	42	16	62	33	10	69.7
<i>Cryptosporidium parvum</i> (N/I)	14	5	64	1	1	0	1	1	0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (UFC/100 ml)	6.6x10 <sup>4</sup>	1	99.9	7900	9	99.9	1466	8	99.5

(Liberti *et al.*, 1999) (modificada)

También el ácido peracético ha sido probado con éxito contra la bacteria *Vibrio cholerae* causante del cólera como lo demostraron Baldry *et al.*, (1995) que obtuvo resultados satisfactorios con una dosis de 50 mg/L y una temperatura alrededor de 20 °C, la eficiencia puede mejorarse si se aumenta la temperatura.

En lo que se refiere a virus el ácido peracético tiene una actividad de desinfección que varía de acuerdo al virus ya que una dosis puede ser adecuada para eliminar cierto virus mientras que no sea suficiente para destruir otro tipo de virus. Con esto se puede deducir que cada virus tiene una resistencia distinta a la desinfección con ácido peracético. En la Tabla 1.23 se muestra la actividad del ácido peracético sobre distintos tipos de virus y el tiempo que tarda en su desinfección en aguas residuales.

Tabla 1.23 Desinfección de algunos virus con ácido peracético

Virus	Dosis mg / L	Reducción	Tiempo (min)
<sup>1</sup> Rotavirus humano	140	99.99 %	30
<sup>1</sup> Rotavirus simio	20	99.99 %	30
<sup>2</sup> Enterovirus	5-7	27.5 %	60
<sup>3</sup> Fagos de DNA	25	5 log	10
<sup>3</sup> Fagos de RNA	25	2 log	10
<sup>3</sup> Fago Ø X174	10	7.5 log	120
<sup>3</sup> Fago MS2	500	3.5 log	120

<sup>1</sup>Haraken, (1984)<sup>3</sup>Rajala et al., (1997)<sup>2</sup>Lefevre et al., (1992)<sup>4</sup>Lazarova et al., (1998)

### 1.5.2 Desinfección de microorganismos patógenos con APA en lodo residual

Uno de los trabajos sobre estabilización de lodos con ácido peracético (APA) es el realizado por Fraser et al., (1984) quienes utilizaron lodo crudo y lodo digerido para las pruebas de estabilización. El lodo crudo fue recolectado el mismo día de las pruebas con un porcentaje de sólidos totales de 3.5 a 4.5 %. El ácido peracético usado en estas pruebas tenía una concentración de 36 a 40 % p/p. Para determinar las propiedades bactericidas del ácido peracético fue necesario contaminar artificialmente los lodos con *Salmonella* spp. además se midió su eficiencia sobre *Escherichia coli* y estreptococos fecales. Los resultados obtenidos en lodo crudo se muestran en la Tabla 1.24.

Tabla 1.24 Destrucción de microorganismos en lodo tratado con ácido peracético

Organismo	Dosis mg / L	Concentración de microorganismo log / cm <sup>3</sup>		Tiempo (min)
		Inicial	Final	
<i>Escherichia coli</i>	600	5.9	1.5	10
Estreptococos fecales	600	4.4	1	10
<i>Salmonella</i> spp	600	4.4	1.4	10

Fraser et al., (1983)

La reducción bacteriana llevada a cabo por el ácido peracético en lodo se efectúa en un tiempo de contacto reducido (10 minutos), a partir de este tiempo no hay un impacto bactericida evidente.

En este trabajo se midieron otros parámetros que fueron el pH de lodo crudo (5.1) y acidificado (4.5) con APA, evaluando también los efectos del APA sobre el olor del lodo. Los resultados reportados por Fraser et al., (1983) indican que en un rango de 380 a 760 mg APA / L los olores del lodo fueron reducidos en alrededor de diez veces en comparación con los emitidos de lodos no tratados.

Aparte de realizar investigaciones de laboratorio Fraser *et al.*, (1983) también llevaron a cabo pruebas de campo en zonas rurales. El lodo fué esparcido en varios lotes donde algunos de ellos no habían sido trabajados en diez años, mientras que otros eran regularmente podados y se eliminaba la hierba seca. El esparcimiento del lodo se lleva a cabo manualmente. El volumen de lodo añadido al suelo fué de 590 L / 35 m<sup>2</sup>.

En esta prueba se evaluaron parámetros microbiológicos que incluyeron *Salmonella* spp y huevos del helminto *Taenia saginata* y fué evaluada su concentración con respecto al tiempo. En *Salmonella* spp (Tabla 1.25) se obtuvieron reducciones de 99.9 % con dosis de 250 mg / L a 28 días, pero la mayor reducción de este microorganismo se logró con 1000 mg / L a 28 días de haber sido esparcido.

**Tabla 1.25 Reducción de *Salmonella* spp. en lodo crudo tratado con APA esparcido en suelo**

Tratamiento	Tiempo	<i>Salmonella</i> spp (organismos / 100 g suelo)	% reducción
Inicial (control)	0	7.2	-----
	7	4.7	99.1
	14	4.5	99.8
	28	3.7	99.9
250 mg APA / L	7	3.6	99.7
	14	3.6	99.7
	28	1.5	99.9
500 mg APA / L	7	4.1	99.93
	14	4.6	99.74
	28	1.6	99.99
1000 mg APA / L	7	2.6	99.99
	14	1.5	99.99
	28	1.4	99.999

Fraser *et al.*, (1983)

En cuanto a *Taenia saginata* Fraser *et al.*, (1983) lograron una inactivación del 100 % con 1000 mg de APA / L en lodo crudo a 1 hora de tiempo de contacto, mientras que a dosis menores sigue habiendo un porcentaje de huevos viables e infectivos (Tabla 1.26).

**Tabla 1.26 Inactivación de huevos de helminto de *Taenia saginata* en lodo crudo esparcido a suelo**

Tratamiento	% Incubados e inactivos	Incubados y activos	% Incubados
Pre-dosis control	15	62	77
Control	69	25	94
250 mg APA / L	39	41	80
500 mg APA / L	60	33	93
1000 mg APA / L	1	0	1

Fraser *et al.*, (1983)

La reducción lograda por el APA en *Salmonella* spp. y huevos de *Taenia saginata* ayudan a reducir significativamente el riesgo de transmisión de estos patógenos cuando el lodo es aplicado en suelo.

También Fraser *et al.*, (1983) realizaron estudios sobre la preservación de las propiedades como fertilizante del lodo al ser tratado con APA y se llegó a la conclusión que el APA no altera estas propiedades ya que no interfiere con el humus del lodo.

Por su parte en lodos aplicados a suelos con dosis de 1000 mg de APA / L el remanente residual es insuficiente para una acción fitotóxica en la vegetación o interferir con comunidades microbianas asociadas con las raíces de plantas o endomicorrizas. Además Fraser *et al.*, (1984) demostraron que los productos de descomposición biodegradables de APA que va a ser dispuesto en suelo no tuvieron efectos deletéreos sobre los ciclos geoquímicos realizados por microorganismos, los cuales incluyen la mineralización del carbono orgánico, nitrógeno, y sulfuros. A su vez, las lombrices de tierra (*Lumbricus terrestris*) que son indicadores de la fertilidad del suelo no muestran diferencias en tamaño, número, condición o actividad en suelos con lodo tratado con APA y en suelos no tratados con lodo

Godfree *et al.*, (1984) realizaron estudios utilizando un producto comercial de ácido peracético (36 a 40 % de APA) para estabilizar lodo crudo que fue recolectado el mismo día de la prueba, uno de los parámetros microbiológicos que midieron fue la concentración de *Salmonella* spp en lodo tratado con este ácido donde lograron una reducción del 90 % con una dosis de 250 mg / L en 1 h de contacto y con 1000 mg / L lograron 99 % de reducción en el mismo periodo de tiempo. En este mismo estudio el APA logró una inhibición de la viabilidad en huevos de helminto de *Taenia saginata* pero no reportaron cifras. Los autores recomienda dosis de entre 500 a 1000 mg / L de APA en lodo con tiempos de contacto cercanos a diez minutos para lograr una reducción significativa de bacterias y huevos de helmintos.

Owen *et al.*, (1984) consideraron al ácido peracético en un trabajo realizado en lodo como compuesto de actividad variable en cuanto a la inactivación del parásito *Taenia saginata* ya que se observaron resultados anómalos relacionados al tiempo de contacto y a la concentración, en todas las dosis de APA probadas (100, 500 y 1000 mg / L). A 7 días incubaron el 100% de huevos de helmintos, mientras que para dosis mas pequeñas en tiempos de contacto menores (30 min. y 24 h) la incubación pareció inhibirse.

Barrios *et al.*, (2000) realizaron un estudio de estabilización de lodo proveniente de un Tratamiento Primario Avanzado (TPA) de una planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de México por vía ácida,

utilizando cuatro diferentes ácidos (acético, peracético, sulfúrico y perclórico). Uno de los objetivos de este trabajo fue producir biosólidos y cumplir con los límites de microorganismos establecidos por la US EPA (1994). Con dosis de entre 1,000 y 5,000 mg de ácido peracético / L de lodo obtuvieron valores de pH que van de 4 a 3.5 logrando reducir el nivel de coliformes fecales por abajo del límite de detección cumpliendo de esta manera con los requerimientos para biosólido Clase A según la US EPA empleando dosis menores a las utilizadas con los otros ácidos. En lo que respecta a huevos de helmintos el ácido peracético cumplió con los requerimientos para un biosólido clase B con un 83 % de inhibición de la viabilidad.

### 1.5.3 Mecanismos de desinfección del ácido peracético (APA)

Las propiedades desinfectantes del APA son diferentes cualitativamente y cuantitativamente de las del peróxido de hidrógeno o ácido acético. Además diversos estudios han demostrado que el APA tiene un poder microbiano mucho más fuerte que sus productos de descomposición (Tichacek, 1962; Baldry, 1983 citado en Fraser *et al.*, 1984).

Se ha sugerido que el APA rompe las uniones sulfhidrilo (-SH) y sulfuro (S-S) dentro de las enzimas, de ahí que componentes importantes en la membrana sean rotos por ruptura oxidativa (Davis *et al.*, 1980 citado en Fraser *et al.*, 1984). Además el APA probablemente disloca la función quimiosmótica del transporte de membrana a través de la ruptura o dislocación de la pared celular, el cual impide seriamente la actividad celular. El APA intracelular puede también oxidar enzimas esenciales, de manera que rutas bioquímicas vitales así como el transporte activo a través de membranas y los niveles de soluto intracelular son deterioradas (Fraser *et al.*, 1983). Un punto importante es que el APA no es afectado por la catalasa, enzima que actúa sobre los radicales hidroxilos libres (Greenspan y Mackellar, 1951; Greenspan *et al.*, 1955 citado en Fraser *et al.* 1984).

Las propiedades ovicidas del APA pueden estar relacionadas con sus efectos como desnaturizador de proteínas demostrado cuando es usado como esporicida (Fraser *et al.*, 1983). En las investigaciones realizadas por Fraser *et al.*, (1984) aplicando dosis de 500 a 1000 mg/l de lodo, se induce una acción de penetración y de ruptura suficiente dentro de las células del embrión en el huevo de helminto que resulta en un considerable daño morfológico. Los síntomas de huevos de helminto que han sido inactivados por ácido peracético son carencia de movimiento, coloración oscura, granulación y la apariencia ovoide en céstodos. La ruptura, penetración o dislocación por APA de las membranas embrionarias durante la maduración del embrión puede traer una exposición catastrófica del embrión a las condiciones ambientales

prevalcientes una vez que el lodo es esparcido a la pastura (Fraser *et al.*, 1984).

## 1.6 Ácido Acético

El ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) es un ácido orgánico y estos se distinguen por el grupo funcional  $\text{COOH}$ . Los nombres comunes usados para describir a este grupo de compuestos orgánicos incluyen : grasas, grasas volátiles, lipofílicos, ácidos débiles o carboxílicos.

Los ácidos orgánicos se pueden agrupar por el número de carbonos en su cadena, pudiendo ser de cadena corta (1 - 6 átomos), de cadena media (7 - 10) y de cadena larga (11 o más átomos de carbono). El ácido acético es un ácido graso de cadena corta (2 átomos de carbono) y sus propiedades físicas se muestran en la Tabla 1.27

El ácido acético es miscible en agua, y en general todos los ácidos orgánicos son débilmente ácidos ya que ellos no donan realmente sus protones en soluciones acuosas. La fuerza de un ácido cualquiera se ve reflejada en su constante de disociación  $K_a$  o  $\text{p}K_a$  ( $-\log K_a$ ). El ácido (HA) se disocia en agua a protón (H) y anión ( $\text{A}^-$ ) tal que en equilibrio  $[\text{H}^+][\text{A}^-]/[\text{HA}] = K_a$  constante de disociación. La disociación de ácidos débiles es dependiente del pH ya que ésta incrementa cuando el valor del pH se aproxima al neutro (Cherrington *et al.*, 1991).

Tabla 1.27 Propiedades físicas del ácido acético

Color	Líquido incoloro
Presión de vapor	20 °C: 11.4 mm
Densidad de vapor	(aire = 1): 2.07
Punto de ebullición	116-118 °C
Gravedad específica	( $\text{H}_2\text{O} = 1$ ): 1.049
Solubilidad en agua	120g en 100g agua
Punto de fusión	16.2 °C

Para los microorganismos, los ácidos orgánicos y entre ellos el ácido acético, pueden actuar como fuente de carbono y energía o como un agente inhibidor, esto dependiendo de la concentración del ácido, su capacidad para entrar en la célula y la capacidad del organismo para metabolizarlo. La eficiencia de estos agentes como desinfectantes puede aumentar si se incrementa su concentración (Vanderwal, 1979; Van Staden *et al.*, 1980 citado en Cherrington *et al.*, 1991).

### 1.6.2 Uso del ácido acético como desinfectante

El ácido acético junto con otros ácidos orgánicos ha sido empleado como conservador de productos alimenticios sólidos y líquidos para consumo



humano y animal por razones de solubilidad, sabor y baja toxicidad (Baird - Parker, 1980 citado en Cherrington *et al.*, 1991).

El mejor conservador ácido conocido para alimento humano es el ácido acético, el cual en forma de vinagre es usado para conservar alimentos para almacenamiento de largo tiempo (Cherrington *et al.*, 1991).

El ácido acético ha sido probado satisfactoriamente para inhibir el crecimiento de cepas de *Escherichia coli* 0157:h7 enterohemorrágica aislada de alimentos humanos (Mckellar *et al.*, 1999).

El ácido acético y láctico, han sido ampliamente estudiados como agentes desinfectantes para carne roja, principalmente de res y oveja, y carne de aves, en el control de agentes infecciosos entéricos (Cherrington *et al.*, 1991). Los miembros de la familia *Enterobacteriaceae* son sensibles al ácido acético e inhibidos a concentraciones de 1 % (Mendonca *et al.*, 1989 citado en Cherrington *et al.*, 1991)

En lodos son pocos los trabajos realizados con ácido acético. Kiff *et al.*, (1984) probaron distintos ácidos orgánicos sobre la viabilidad de huevos de helmintos de importancia veterinaria que se encuentran en los lodos como lo son *Ascaris suum*, *Fasciola hepatica* y *Moniezia spp.* Los ácidos utilizados fueron: ácido acético (400mg / L), ácido propiónico (300 mg / L), ácido iso-butírico (40 mg / L), ácido n-butírico (150 mg / L) y ácido iso-valérico (40 mg / L). Los tiempos de exposición que utilizaron fue de 7, 14 y 19 días e incubados a 37 °C por 23 días, realizando las pruebas en lodo primario y digerido. Para el caso de *Ascaris suum* los ácidos orgánicos tuvieron una inhibición casi completa en el desarrollo del huevo. En *Moniezia spp.* la exposición a ácidos orgánicos provocó daño al huevo, siendo el tiempo de exposición un factor importante ya que hubo reducción de huevos normales de 60% después de siete días de exposición a 20% después de 14 días de exposición. En cuanto a *Fasciola hepatica* después de 19 días de exposición la mayoría de los huevos tuvieron un desarrollo a una etapa de embrión dividido a 37 °C y a un estado de miracidio en 27 °C. El tipo de ácido orgánico no tuvo relevancia ya que todos tuvieron resultados similares. Tampoco hubo variación con respecto al tipo de lodo.

Las pruebas realizadas por Barrios *et al.*, (2000) en lodo incluyeron al ácido acético en dosis que van desde los 3,700 a 22,000 mg / L. El pH que se alcanzó en las pruebas a las dosis mencionadas fue de 4.8 a 4. Dentro de los parámetros microbiológicos los coliformes fecales fueron reducidos en 5.56 unidades logarítmicas hasta cumplir con los requerimientos para un biosólido Clase A de la US EPA. Otro parámetro evaluado fueron los huevos de helminto en donde se logró inactivar con la dosis más alta el 98 % de los huevos viables, cumpliendo con los límites para un biosólido Clase B de la US EPA.

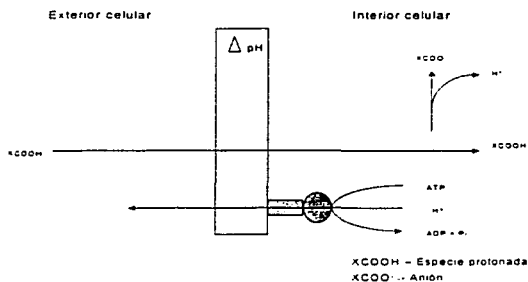
### 1.6.3 Mecanismo de desinfección del acético y ácidos orgánicos débiles

La toxicidad del ácido acético y otros ácidos orgánicos débiles es dependiente del pH. Los ácidos orgánicos son compuestos liposolubles y la forma no disociada del ácido es la que difunde a través de la membrana (Gottschalk, 1987 citado en Taherzadeh *et al.*, 1997). Bajo condiciones de pH ácido los ácidos orgánicos se encuentran en forma no disociada difundiendo a través de la membrana plasmática y alcanzando un ambiente más alcalino dentro del citoplasma celular que en bacterias alcanza valores de 7.4 a 7.6 (Padan *et al.*, 1981; Slonczewski *et al.*, 1981 citado en Cherrington *et al.*, 1991) y 8.2 a 8.7 (Lagarde, 1977; Booth *et al.*, 1979 citado en Cherrington *et al.*, 1991). Una vez dentro de la célula se lleva a cabo la disociación del ácido en un protón y un anión, debido al pH interior más alcalino. Como resultado el protón y el anión menos solubles a los lípidos se acumulan en el citoplasma alterando el metabolismo de la célula (Pampulha *et al.*, 2000).

El mecanismo de la inhibición del crecimiento microbiano por ácidos orgánicos parece deberse a la acidificación del citoplasma celular como resultado de la liberación del exceso de protones seguido a la disociación del ácido (Baird - Parker, 1980 citado en Cherrington *et al.*, 1991).

Esto se puede ver ya que en concentraciones subletales de ácidos orgánicos se inhibe el crecimiento de los microorganismos y esto se atribuye a la desviación del uso del ATP en los procesos anabólicos para bombear protones (H<sup>+</sup>) a través de la ATPasa de la membrana plasmática (Warth *et al.*, 1988 citado en Pampulha *et al.*, 2000).

En la Figura 1.5 se observa la representación esquemática del movimiento de los ácidos orgánicos los cuales son lipofílicos y entran a la célula. Debido al pH intracelular se disocian en un anión y un protón provocando de esta manera una acidificación del citoplasma. El anión es lipofóbico y se acumula en el citoplasma mientras que el protón es bombeado hacia el exterior de la célula por las ATPasas unidas a la membrana celular



**Figura 1.5 Representación esquemática del movimiento de los ácidos orgánicos en bacterias (Russell, 1991)**

La caída del pH intracelular no es la única causa de inhibición en el crecimiento de bacterias como tampoco de la toxicidad de los ácidos orgánicos, ya que también la acumulación del anión ácido está relacionada con estos fenómenos. Cherrington *et al.*, (1990) sugirieron que el anión ácido puede interferir en la conformación de la molécula del ADN (ácido desoxirribonucleico), además de que las diferencias de estructura del anión podrían explicar las diferencias de la actividad de los ácidos orgánicos con el mismo o similar valor de pKa.

Además de la inhibición del crecimiento los ácidos orgánicos pueden actuar sobre la membrana celular y otros sitios de la célula que incluyen enzimas, síntesis de macromoléculas y ADN (Cherrington *et al.*, 1991).

En un estudio realizado por Cherrington *et al.*, (1990) sobre el efecto de los ácidos orgánicos en la síntesis de macromoléculas obtuvieron que los ácidos orgánicos causaron inhibición de la síntesis de ADN y división celular por un periodo de 30 minutos después de su adición a cultivos de *Escherichia coli*. La tasa de síntesis de macromoléculas como ARN (ácido ribonucleico), lípidos, proteínas y pared celular se redujo en un 50% o más después de la adición de ácido fórmico, también la actividad enzimática baja debido a los valores ácidos del pH y esto es considerado un efecto secundario de la acidificación del citoplasma. La sensibilidad en las funciones de biosíntesis parece variar dependiendo del tipo de bacteria y de ácido.

## 1.7 Disposición de lodos

Hay dos soluciones generales básicas para el destino de los lodos que son: 1) la recuperación y aprovechamiento o 2) su estricta eliminación sin recuperación.

Dentro de la primera opción la producción de biosólidos parece ser la más viable ya que los lodos pueden ser reciclados para obtener un beneficio de sus propiedades y nutrientes así como de su propiedad para acondicionar suelos.

Existen dos grupos de suelos a los que se puede aplicar los biosólidos:

- a) Suelo agrícola, forestal y sitios de acondicionamiento, llamados colectivamente como sitios de contacto no públicos.
- b) Parques públicos, viveros, campos de golf, prados y jardines familiares, llamados colectivamente como sitios de contacto público.

La aplicación de biosólidos a suelo se puede llevar a cabo de varias maneras algunas de ellas son:

*Inyección de biosólidos.* Esta forma de aplicación se efectúa en forma sub-superficial con la ventaja de que se reduce la atracción de vectores. Sin embargo con este método no se puede añadir una cantidad significativa de biosólidos en la superficie durante la hora siguiente a la aplicación, y si los biosólidos son clase A deben ser inyectados dentro de las siguientes 8 horas al proceso de reducción de patógenos. El objetivo es crear una barrera entre los biosólidos y los vectores. El suelo elimina agua de los biosólidos, lo que limita su movilidad y desprendimiento de olor. Generalmente se presentan olores al momento de la aplicación del lodo, pero estos desaparecen pronto después de la aplicación.

*Incorporación de biosólidos en el suelo.* La incorporación debe ser dentro de las siguientes 6 horas después de la aplicación o disposición en el suelo. La incorporación puede ser por arado o alguna otra forma de mezclado con el suelo. Si los biosólidos son clase A el tiempo de proceso de eliminación de patógenos y la aplicación o disposición no debe ser mayor a 8 horas.

En cuanto a la otra opción que significa una eliminación sin recuperación los lodos pueden ser dispuestos de la siguiente manera:

- **Vertido al océano.** El vertido de lodo al océano aunque en algunos países como E.U. se encuentra prohibido es llevado a cabo principalmente en ciudades costeras. Actualmente esta práctica

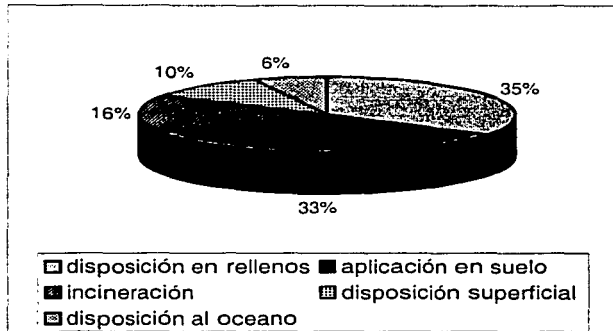
esta cayendo en desuso debido a la degradación de las aguas recreativas, al incremento de sólidos en el fondo del mar y al potencial tóxico para la vida acuática. También los lodos pueden ser vertidos a un cauce superficial como los ríos.

- **Relleno sanitario.** Un relleno sanitario es un lugar en el que los residuos sólidos son depositados y cubiertos por lo general diariamente con suelo o materiales similares, pero también se utilizan para disponer el lodo. Un lodo que va ser depositado en un relleno sanitario puede ser previamente estabilizado y desaguado para reducir su volumen y evitar lixiviados esto depende de las regulaciones locales. Los monodepositos son rellenos donde exclusivamente se colocan biosólidos incluyen zanjas y áreas abiertas. Las zanjas pueden ser anchas o angostas, así como superficiales o profundas (Metcalf y Eddy, 1991).
- **Lagunas.** Las lagunas de lodo son otro método común de disposición porque es simple y económico si la planta se encuentra en una remota localidad. Una laguna es una base de tierra en la cual en la cual lodo no tratado o digerido es depositado. En lagunas de lodo no tratado, los sólidos orgánicos se estabilizan por descomposición anaerobia y aerobia. Los sólidos estabilizados sedimentan y se acumulan, el exceso de líquido se regresa a la planta para ser tratado (Metcalf y Eddy, 1991).
- **Incineración.** Consiste en convertir el lodo en cenizas inertes, para esto es necesario deshidratar el lodo aproximadamente a 30 % de sólidos totales para que la incineración sea auto-sostenida. Las temperaturas necesarias para la incineración van de 650 a 750 °C (Metcalf y Eddy 1991). Generalmente es considerado como un método de disposición no benéfico a menos que el calor sea recuperado en forma de vapor y la generación eléctrica sea incluida en el proceso (Girovich, 1996).

## 1.8 Manejo de lodos en el mundo

### 1.8.2 Estados Unidos de América

La producción de sólidos municipales en E.U. de América es aproximadamente de 8 millones de toneladas métricas en 1995 y se espera que esta cantidad aumente debido al incremento en la población (Girovich, 1996). En cuanto al manejo de los biosólidos en E.U. en la Figura 1.6 se muestran los porcentajes que ocupan las distintas opciones de manejo de lodos (Girovich, 1996).



**Figura 1.6 Opciones de manejo de lodos en E.U. (Girovich, 1996)**

La Agencia de Protección al Ambiente (US EPA por sus siglas en inglés) promueve activamente el uso benéfico de biosólidos porque esto ayuda a decrecer la dependencia de los fertilizantes químicos y provee significativas ventajas económicas.

### 1.8.3 Europa

La Unión Europea (12 países) generó cerca de 6.5 millones de toneladas métricas de sólidos municipales en 1992. Los directivos de la Unión Europea durante el periodo de 1986 y 1991 promovieron el uso benéfico de lodos residuales (Golstein *et al.*, 1977) y el futuro del uso benéfico de los biosólidos dependerá de la legislación concerniente a los estándares para su uso. En el presente el uso benéfico en la Unión Europea varía de 10 a 60 % (Girovich, 1996). Los porcentajes de las diferentes opciones de disposición en la Unión Europea se muestran en la Tabla 1.28.

Tabla 1.28 Disposición de biosólidos en la Unión Europea

País	Uso en Agricultura %	Relleno %	Incineración %	Otros %	Océano %	Producción anual dmt/año x 1,000
Alemania	27	54	14	5	--	2,700
Reino Unido	42	8	14	13	30	1,107
Francia	60	20	20	---	---	852
Italia	33	55	4	8	---	816
España	50	35	5	---	10	350
Países Bajos	26	50	3	19	2	323
Dinamarca	54	20	24	2	---	170
Bélgica	29	55	15	1	---	200
Grecia	10	90	---	---	---	48
Irlanda	12	45	---	8	35	37
Portugal	11	29	---	---	60	25
Luxemburgo	12	88	---	---	---	8

(Girovich, 1996).

### 1.8.1 Asia

Japón genera alrededor de 1.4 millones de toneladas al año con aproximadamente 60 % de incineración (Girovich, 1996).

En China se estima se producen alrededor de 0.4 millones de toneladas de lodos al año (Wang, 1997) y existen al menos tres métodos más comunes de disposición de lodos que son: *Vertidos al ambiente, Relleno sanitario e Incineración* (Wang, 1997).

En América Latina no se tienen datos disponibles.

### 1.8.2 Manejo de lodos en México

En México los lodos residuales producto del tratamiento de las aguas residuales se consideran residuos peligrosos según la Norma NOM-052-ECOL-1993 y en consecuencia deben sujetarse a las regulaciones que al respecto emita el Instituto Nacional de Ecología (INE). Su manejo se ha limitado a la disposición en lagunas y rellenos sanitarios o es vertido al drenaje después de haberlo estabilizado por algún proceso convencional. Además de que en México no se tiene la experiencia de un manejo para reúso benéfico de los lodos y solo se están desarrollando algunos proyectos en Ciudad Juárez y Monterrey así como otras ciudades del país.

## 1.9 Normatividad

### 1.9.1 Estados Unidos de América

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) desarrolló el reglamento que fue publicado en el capítulo 40 del reglamento del Código Federal en 1993 con el nombre de: "Estandares para el uso o disposición de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales" que se conoce comúnmente como el apartado 503. Esta regulación comprende 5 subapartados que incluyen: provisiones generales, aplicación a suelo, disposición superficial, reducción de patógenos, y atracción de vectores (Tabla 1.29)

**Tabla 1.29 Descripción de los sub-apartados incluidos en el apartado 503 de la US EPA**

<b>Subapartado A. Provisiones generales.</b> Establece los lineamientos generales sobre los propósitos, la aplicabilidad, la obligatoriedad y las exclusiones de la reglamentación.
<b>Subapartado B. Aplicación a suelo.</b> Establece los lineamientos específicos sobre la aplicación de biosólidos en suelos con la finalidad de beneficiarlos. Entre los lineamientos que norma están: a) Concentración de metales pesados en biosólidos y su tasa de carga anual o cumulativa en suelo y b) Reducción de organismos patógenos y de atracción de vectores.
<b>Subapartado C. Disposición superficial.</b> Establece los lineamientos de la disposición superficial.
<b>Subapartado D. Reducción de patógenos y atracción de vectores.</b> Establece lineamientos y tecnologías requeridas para llevar a cabo la reducción de organismos patógenos y la atracción de vectores.
<b>Subapartado E. Incineración.</b> Establece los lineamientos para llevar a cabo la incineración.

(EPA, 1994)

#### 1.9.1.1 Regulación de los biosólidos de acuerdo a su contenido de metales

La US EPA eligió diez metales que van a ser regulados de acuerdo a su toxicidad, persistencia, concentración, movilidad o potencial de exposición los cuales se muestran en la Tabla 1.30 (Girovich, 1996).

Según la concentración de metales que puede contener los biosólidos estos se clasifican de la siguiente forma:

**Biosólidos de calidad excepcional (EQ. Exceptional Quality Biosolids).** Los biosólidos denominados de *Calidad Excepcional* se caracterizan por tener un bajo contenido de contaminantes, una virtual ausencia de patógenos (biosólido Clase A) y una reducción en los niveles de los compuestos que atraen los vectores.



**Biosólidos con concentración de contaminantes admisible (PC. Pollutant Concentration Biosolids).** Este término se refiere a biosólidos que tienen la misma concentración de contaminantes a los EQ (Tabla 2.30) pero tienen una reducción de patógenos Clase B y son sujetos a prácticas de manejo más que opciones de tratamiento para reducir la atracción de vectores.

**Biosólidos con una tasa de aplicación de contaminantes acumulativa (CPLR. Cumulative Pollutant Loading Rate Biosolids).** Los biosólidos de este tipo exceden en por lo menos uno los límites de concentración de contaminantes para EQ y PC (Tabla 2.30) pero nunca los niveles tope de contaminantes. Este tipo de biosólidos pueden ser aplicados al suelo en forma masiva pero controlando la cantidad y frecuencia de la aplicación de manera que nunca se excede la tasa de aplicación de contaminante acumulativa.

**Biosólidos con tasa anual de aplicación de contaminantes (APLR. Annual Pollutant Loading Rate Biosolids).** Son biosólidos que son vendidos o distribuidos en contenedores o bolsas para su aplicación a suelo que excede los límites de contaminantes EQ pero cumple con los límites de tope de concentración (Tabla 1.30). No deben exceder la tasa anual de aplicación de contaminantes y los biosólidos debe ser Clase A y cumplir con las opciones de atracción de vectores.

**Tabla 1.30 Metales que son regulados por el apartado 503 de la EPA y sus concentraciones límites**

Contaminante	Concentraciones tope para biosólidos aplicados a suelo (mg/kg)	Límites para biosólidos EQ y PC (mg/kg)	Carga acumulativa para biosólidos CPLR (kg/Ha)	Carga anual de contaminantes para biosólidos APLR (kg/Ha/año)
Arsénico	75	41	41	2
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	3000	1200	3000	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	—	—	—
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	36	100	5.0
Zinc	7500	2800	2800	140
Aplica a:	Todos los biosólidos que se coloquen sobre terreno	Biosólidos a granel y empacados	Biosólidos en aplicación masiva	Biosólidos empacados

(EPA, 1994)

La Tabla 1.31 nos muestra algunos de los contaminantes orgánicos que se encuentran presentes en los lodos y la concentración que pueden presentar. Estos pueden acumularse y tener un efecto nocivo en el medio ambiente y en la salud humana.

**Tabla 1.31 Contaminantes orgánicos que pueden estar presentes en lodos residuales**

Contaminante	Concentración estimada en lodos mg/kg (base seca)
Benzideno	0,281
Benzo(a)pireno	0,001
Bis(2-etilhexil)ftalato	105
Dimetilnitrosamina	0,281
Hexaclorobenzeno	0,040
Hexaclorobutadieno	0,112
Benzeno	0,336
Tetracloruro de carbono	0,000006
Cloroformo	0,026
Tetracloroetileno	0,150
Tricloroetileno	0,529
Cloruro de vinilo	0,000076
BPCs	0,034

Fuente: Adaptado de Jiménez., 1999

### 1.9.1.2 Regulación de los biosólidos en relación a su contenido de organismos patógenos

La EPA distingue dos tipos de biosólidos según el contenido de microorganismos indicadores y patógenos los cuales pueden ser de dos tipos clase A o clase B.

**Clase A.** Son biosólidos libres de patógenos. El objetivo de los requerimientos para la Clase A es reducir las densidades por debajo de los límites de detección los cuales son:

- *Salmonella sp.*: menos que 3 Número Más Probable (NMP) por 4 gramos de sólidos totales (ST) base de peso seco.
- Virus entéricos: menos que 1 Unidades Formadoras de Placas (UFP) por 4 gramos de sólidos totales (ST), en peso seco
- Huevos de helmintos: menos de 1 por 4 gramos de sólidos totales, en peso seco.
- Coliformes fecales : menos de 1000 NMP por gramo de sólidos totales.

**Clase B.** El objetivo es asegurar que las bacterias patógenas y los virus entéricos son adecuadamente reducidos en densidad, lo cual se demuestra por:

- Una densidad de coliformes fecales menor que 2,000,000 NMP o UFC por gramo de sólidos totales en base seca.

Los huevos de helmintos no son necesariamente reducidos. Los biosólidos Clase B son aplicados en sitios de restricción los cuales son :

- a) Cosechas en que las partes aprovechables tocan los biosólidos o mezcla del suelo y están totalmente por arriba de la superficie de la tierra, no deberán ser cosechados por 14 meses después de la aplicación
- b) Cosechas con la parte aprovechable por debajo de la superficie de la tierra, no deberán de ser cosechados por 20 meses después de la aplicación
- c) Zonas de pastoreo, no permitir el pastoreo hasta después de 30 días de la aplicación de los biosólidos
- d) En lugares de acceso público con un alto potencial de exposición, deberá ser restringido el acceso por un año después a la aplicación de los biosólidos
- e) En lugares con acceso con bajo potencial a exposición pública, deberá ser restringido el acceso por 30 días después de la aplicación de los biosólidos

La US, EPA en el apartado 503 en el apéndice B hace un listado de los procesos de estabilización por los cuales se puede alcanzar un biosólido Clase A que caen dentro de Procesos que Reducen Sustancialmente los Patógenos (PFRP por sus siglas en Ingles) o Clase B que a su vez caen dentro de los Procesos que Reducen los Patógenos (PSRP por sus siglas en ingles) dependiendo de que proceso se utilice. Los procesos que reducen sustancialmente los patógenos y producen un biosólido Clase A se muestran en la Tabla 1.32.

**Tabla 1.32 Procesos que reducen sustancialmente los patógenos (PFRP)**

Proceso	Descripción.
Composteo	Se realiza en un contenedor o pila estática aireada y que se mantenga a 55 °C por más de 3 días. Se puede realizar en surco.
Estabilización alcalina	Consiste en dar un tratamiento a pH (a más de 12 durante 72 horas o más) y temperatura elevada, por arriba de 52 °C por al menos 12 horas. Se debe secar el biosólido con aire hasta obtener un porcentaje de sólidos de 50 % después de 72 horas de haber elevado el pH
Secado con calor	Se lleva a cabo con gases calientes en contacto directo o indirecto para llegar a 90% de ST o más. Si el todo se encuentra líquido se debe calentar a 180 °C o más por 30 minutos.
Digestión aerobia termofílica	Se realiza con 10 días de retención a temperatura de 55-60 °C

Continuación

Irradiación de lodos	Para la irradiación beta se emplea al menos 1.0 megarad a temperatura ambiente (20 °C) y la gamma se lleva a cabo con isótopos como Cobalto 60 o Cesio 137 a dosis de por lo menos 1.0 megarad a temperatura ambiente
----------------------	---

Fuente: (Girovich, 1996)

Los procesos que reducen los patógenos se muestran en la Tabla 1.33.

**Tabla 1.33 Procesos que reducen los patógenos (PSRP)**

Proceso	Descripción
Digestión aerobia	Entre 40 días a 20 °C y 60 días a 15 °C
Secado con aire	En lechos de secado de arena o celdas durante 3 meses por lo menos. Durante 2 de los 3 meses la temperatura promedio diaria ser superior a 0 °C
Digestión anaerobia	Entre 15 días de 35 – 55 °C y 60 días a 20 C
Elaboración de composta	En contenedor, pila estática aireada o en surcos a 40 °C o más durante 5 días y en el transcurso de ese período a más de 55 °C durante 4 horas
Estabilización con cal	Con pH de 12 durante 2 horas

Fuente: (Girovich, 1996)

Algunos de estos procesos utilizan las misma tecnologías para producir un biosólido Clase A o un biosólido Clase B pero con diferentes condiciones de operación.

Es importante hacer notar que las regulaciones actuales no incluyen a los protozoarios, rotíferos y hongos como organismos sujetos a los requerimientos de patógenos, esto debido a la carencia de métodos analíticos para su determinación y porque la US EPA concluyó que estos organismos son poco probable para sobrevivir a los procesos de tratamiento de aguas residuales y biosólidos de esta manera estos no deberían causar un efecto adverso en el uso de los biosólidos (National Sewage Sludge Survey, 1990 citado en Girovich, 1996).

### 1.9.1.3 Regulación de la atracción de vectores

Una ruta importante para el transporte de patógenos es la transmisión a través de vectores. Los vectores son organismos vivientes capaces de transmitir un patógeno de un organismo a otro mecánicamente (simplemente transportando el patógeno), o biológicamente (teniendo un papel en el ciclo de vida del patógeno). Los vectores más comunes son: insectos, aves, moscas, y roedores. La US EPA establece 12 opciones para la atracción de vectores. El cumplimiento en los requerimientos de la reducción en la atracción de vectores deben

ser demostrados separadamente de la reducción de patógenos y ambos deben ser alcanzados.

Cuando los biosólidos son aplicados a tierra de agricultura, bosques, y sitios de contacto público o sitios de remediación se debe cumplir con uno de los primeros diez requisitos impuestos por la US EPA que se muestran en la Tabla 1.34. Cuando los lodos son aplicados a césped o jardines de casas uno de los primeros ocho requisitos debe ser alcanzado.

**Tabla 1.34 Requisitos para reducir la atracción de vectores de la US EPA**

Opción	Más apropiado para:
1. Al menos 38 % de reducción de SVT (sólidos volátiles totales)	Biosólidos obtenidos por: digestión anaerobia, digestión aerobia, oxidación química
2. Menos que 17% de pérdida adicional de sólidos volátiles durante adicional	Digestión anaerobia complementaria sólo para lodo digerido anaerobiamente que no cumple con la opción 1
3. Menos de 15% de reducción adicional de sólidos volátiles	Digestión anaerobia complementaria Sólo para lodo digerido aerobiamente, que tenga 2% o menos sólidos que no cumplan con la opción 1
4. Tasa específica de consumo de oxígeno (Specific Oxygen Uptake Rate) a 20 °C es 1.5 mg oxígeno/hr/g total	Lodos provenientes de digestión aerobia (no debe usarse para lodos composteados)
5. Proceso aerobio a temperatura elevada	Composteo de lodo
6. Adición de álcalis	Lodo estabilizado químicamente
7. Reducción de humedad hasta un contenido de 75 % de sólidos.	Lodos tratados por procesos aerobios o anaerobios (lodos que no contienen sólidos desestabilizados generados en el tratamiento primario del agua residual).
8. Reducción de humedad hasta un contenido del 90 % de sólidos	Lodos que contienen sólidos desestabilizados producidos durante el tratamiento primario
9. Inyección de biosólidos al suelo -	Lodo aplicado al suelo o dispuesto superficialmente
10. Incorporación de biosólidos al suelo	Lodo aplicado al suelo o dispuesto superficialmente
11. Recubrimiento	Lodos dispuestos superficialmente
12. Tratamiento alcalino para drenados de fosas sépticas	Residuos de fosas sépticas aplicados a suelo agrícola, bosques, sitios de restauración o dispuestos superficialmente

(Jiménez, 1999)

### 1.9.2 Otros países

En otros países, la legislación en cuanto a los lodos residuales señala que, debido a la concentración de elementos potencialmente tóxicos, se debe definir un límite de adición al suelo. Las Tablas 1.35 y 1.36 muestran las condiciones que se han fijado para tal fin, lo que demuestra que ya se encuentran perfectamente establecidos los parámetros necesarios para obtener los beneficios de los lodos en suelos agrícolas, además de evitar desequilibrios en el ambiente.

También se tiene establecido el límite máximo permitido de cada uno de los metales en el suelo y de acuerdo a este criterio, no deben rebasarse estas concentraciones; prueba de ello son los límites máximos permitidos que se muestran en la Tabla 1.37.

**Tabla 1.35 Condiciones fijadas en diferentes países para la adición de lodo al suelo**

País	Criterio de adición	Máxima aplicación
Alemania	Concentración máxima en suelos	---
Escandinavia	Concentración máxima en lodos	---
Holanda	Concentración máxima en lodos	1 a 2 ton/año
Dinamarca	Demanda de N de cultivos	---
Suecia	Concentración máxima de lodos	1 ton/ha/año
Finlandia	Concentración máxima en lodos	4 ton/ha/año
Noruega	Concentración máxima en lodos	2 ton/ha/año
Reino Unido	Zn equivalente	---

(Lester, 1987; Moller, 1983)

**Tabla 1.36 Guía para la adición de metales en lodos aplicados a suelos agrícolas**

Metal	Límite de adición de metal al suelo (promedio anual, kg/ha)	
	Reino Unido	Comunidad Económica Europea (CEE)
Cadmio	0.17	0.15
Cromo	33.3	10.00
Cobre	9.33	12.00
Níquel	2.33	3.00
Plomo	33.30	15
Selenio	0.17	---
Zinc	18.70	30.00
Periodo de adición	30	10

Nota\* Las adiciones de cobre, níquel y zinc están sujetos al límite del zinc equivalente. --- no se encontraron datos (Lester, 1987)

**Tabla 1.37 Concentraciones máximas permitidas de metales en lodos residuales para uso en agricultura, propuesto por la Comunidad Económica Europea (CEE)**

Metal	Límite recomendado (mg/kg, base seca)	Límite obligatorio (mg/kg, base seca)
Cadmio	20	40
Cromo	750	---
Cobre	1,000	1,500
mercurio	16	---
níquel	300	400
plomo	750	1,000
zinc	2,500	3,000

Nota. --- no se encontraron datos (Lester, 1987)

### 1.9.3 México

En México los reglamentos vigentes que aplican para los lodos de aguas residuales se muestran en la Tabla 1.38

Además se esta elaborando el Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-004-ECOL-2001.- Protección Ambiental.- Lodos y Biosólidos. Este proyecto de Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo establecer las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de los biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger el medio ambiente y la salud humana.

**Tabla 1.38 Reglamentos vigentes para lodos residuales en México**

Reglamento	Descripción
Ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente (1996)	La ley señala a las autoridades responsables de otorgar permisos y autorizaciones, de restringir, o bien, de establecer los parámetros y los criterios limitantes para utilizar las aguas y suelos nacionales como contenedores finales de diferentes tipos de residuos.
Proyecto de Norma Oficial Mexicana: NOM-055-ECOL-1996	Establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para el confinamiento controlado y la instalación de Centros Integrales para el Manejo de Residuos Industriales Peligrosos (CIMARIP). En el punto 5.8 de la Norma se considera que los lodos de las plantas para tratamiento pueden confinarse <i>in situ</i> siempre y cuando se coloquen en una distancia mínima de 1000 m del centro de población más cercano y asegurar que no habrá afectación a los mantos acuíferos.

Continuación

Norma Oficial Mexicana: NOM-052-ECOL-1993.	Establece las características de los residuos peligrosos, presenta un listado de los mismos y los límites de toxicidad al ambiente. De acuerdo con esta norma, los lodos que provienen del tratamiento de aguas residuales, de la industria así como los lodos provenientes del tratamiento biológico de aguas residuales cuando se exceden los límites de toxicidad propuestos en el punto 5.5 de la norma.
Norma Oficial Mexicana: NOM-001-ECOL-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Los lodos se mencionan únicamente en el anexo 1 de esta norma, donde se define la técnica para determinar huevos de helminto.

(Jiménez, 2001)

En este proyecto de Norma Oficial Mexicana se establecen los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos clasificándose en Clase A y B (Tabla 1.39)

**Tabla 1.39 Requerimientos para biosólidos clase A y B**

Clase	Coliformes fecales NMP/gr en base seca	<i>Salmonella sp</i> NMP/gr en base seca	Huevos de helminto/gr en base seca
A	Menos de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
B	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

También se regula los límites permisibles para metales en biosólidos y se clasifican en Tipo *Excelente* y *Bueno* con base en su contenido de metales. Los límites para lodos tipo Excelente y Bueno se muestran en la Tabla 1.40.

**Tabla 1.40 Límites de metales para lodos Excelente y Bueno**

Contaminante (determinados en forma total)	Excelente mg/kg en base seca	Bueno mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	

Los sitios de aprovechamiento de los biosólidos se muestra en la Tabla 1.41.



**Tabla 1.41 Opciones de aprovechamiento de biosólidos clase A según el proyecto de Norma Mexicana**

<b>Aprovechamiento en</b>
Jardines
Macetas de casa habitación y edificios públicos y privados
Áreas verdes para recreación públicas y privadas con contacto humano directo
Camellones urbanos y en vías de comunicación
Panteones y bosques
Viveros campos deportivos

La aplicación de biosólidos en terrenos agrícolas, mejoramiento de suelos y restauración de paisajes, se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de sanidad vegetal. El aprovechamiento de biosólidos en terrenos comprendidos en zonas declaradas como áreas naturales protegidas, sólo podrá realizarse con previa autorización de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Cabe aclarar que este sólo es un proyecto de Norma Oficial Mexicana de protección ambiental y que no es el trabajo final, por lo que puede sufrir modificaciones en cuanto a los datos aquí presentados.

## **CAPITULO 2**

## 2 MÉTODO

### 2.1 Muestreo y caracterización del lodo crudo de estudio

El lodo empleado en las pruebas de estabilización proviene de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Pedro Atocpan, delegación Milpa Alta de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal, que recibe el agua residual de los poblados de San Pedro Atocpan y San Gregorio cuya población es de aproximadamente 15,000 habitantes. Esta planta cuenta con un Tratamiento Primario Avanzado (TPA) de aguas residuales que consiste en la coagulación y floculación de los sólidos suspendidos mediante la adición de sulfato de aluminio y polímero aniónico, incrementando la velocidad de sedimentación para poder remover los sólidos suspendidos del agua residual. El agua que entra a la planta con un caudal de 35 L/s pasa primero por una criba y un desarenador donde se elimina basura y arenas de gran tamaño, para después ser bombeada hacia un cárcamo, a la salida del cual se dosifica el sulfato de aluminio en dosis de 66 mg/L como sal anhidra y el polímero aniónico. El agua es enviada a dos tanques de sedimentación con un tiempo de retención de dos horas. Posteriormente el agua pasa por un sistema de filtros de arena y finalmente es conducida a un tanque clorador donde se lleva a cabo la desinfección antes de descargarla (Figura 2.1).

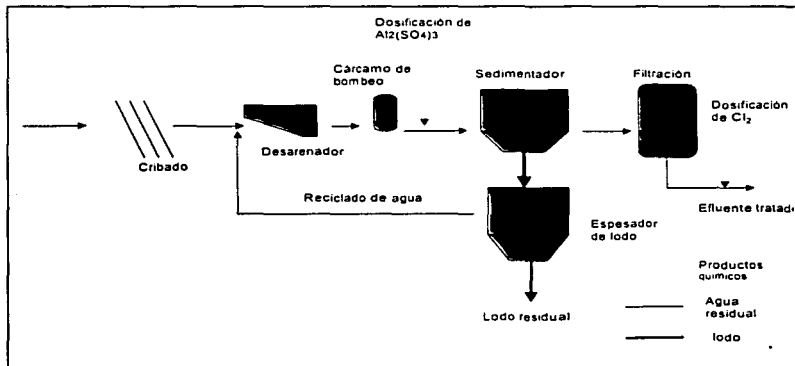


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la planta de San Pedro Atocpan

Las muestras de lodo se recolectaron de la purga del sedimentador primario (Figura 2.2) para lo cual la llave de purga se dejó abierta durante dos o tres minutos hasta obtener un lodo con una consistencia homogénea, depositando el lodo crudo en recipientes de plástico de 7 L, llenados hasta su máxima capacidad y llevados al laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM donde se realizaron los ensayos.



**Figura 2.2 Purga del sedimentador primario de la planta de tratamiento de San Pedro Atocpan**

Durante la realización de las pruebas de estabilización se midieron algunos parámetros que ayudaron a caracterizar el lodo, lo cual en la práctica permite definir el tratamiento y manejo que se llevará a cabo. Estos parámetros se mencionan en la Tabla 2.1 y los métodos analíticos se describen en los anexos 1 a 6.

**Tabla 2.1 Parámetros medidos al lodo crudo durante la realización del estudio**

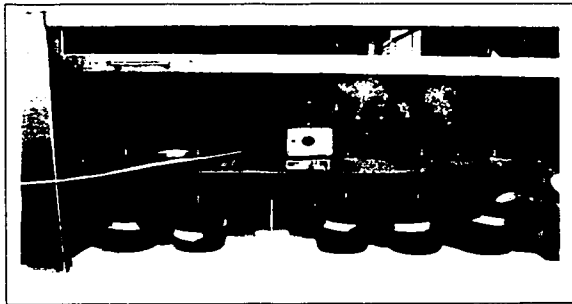
Parámetro	Unidad	Técnica analítica
pH	Unidades de pH	Método 4500-H <sup>+</sup> B.
Sólidos totales (ST)	% en peso	Método 2540 B
Sólidos volátiles (SV)	% de ST	Método 2540 E.
Coliformes fecales	*NMP/g de ***ST	NMX-AA-042-1987
<i>Salmonella</i> spp	NMP/g de ST	Standard Methods-1995
Huevos de Helmintos	**HH/g de ST	NMX-AA-113-SCFI-1999
Resistencia Específica a la Filtración	cm/g	-----
<b>Metales:</b> Arsénico, Cadmio, Cromo, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Mercurio	mg/Kg	EPA6010 EPA7471A

\*NMP-Número más probable    \*\*HH- Huevos de helmintos    \*\*\*ST-sólidos totales

### 2.1.1 Pruebas de estabilización con ácidos acético y peracético

Se realizaron tres pruebas de estabilización con cada ácido a temperatura ambiente en diferentes días. Las pruebas se realizaron en un equipo de prueba de jarras agitando constantemente a 320 rpm (Figura 2.3). En 6 vasos de precipitado de plástico se vació 1 litro de lodo a cada uno, en el caso del acético, y 0.8 litros en el caso del peracético para contener la gran cantidad de espuma que se genera durante la reacción de este último. En todos los casos se empleó una muestra control a la que no se le agregó ácido. Las dosis manejadas fueron de 22,000 y 550 ppm, para el acético y peracético, respectivamente fueron seleccionadas de pruebas realizadas anteriormente por Barrios *et al.*, (2000).

En estas pruebas se evaluaron diferentes tiempos de contacto los cuales fueron: 2, 5, 10, 15 y 30 minutos, con el objeto de encontrar el tiempo óptimo donde se cumpla con los límites que establece el apartado 503 de la US EPA para biosólidos Clase B (mencionados en el capítulo 2) y que al mismo tiempo ayude a reducir el costo de operación ya que a menor tiempo de retención el costo de inversión, derivado de la construcción de los reactores, será menor.



**Figura 2.3 Equipo de prueba de jarras para la estabilización del lodo**

De acuerdo con los estudios realizados por Baldry (1983), al término de cada tiempo de contacto se agregó tiosulfato de sodio pentahidratado (2 g/L) a cada vaso con el fin de neutralizar la acción del ácido acético sobre los microorganismos y así poder establecer con exactitud el grado de inactivación logrado con respecto al tiempo. De igual forma, en el caso del peracético, también se agregó a su vez catalasa para neutralizar el efecto del peróxido de hidrógeno, aplicando dosis de 0.11 mg/L. Para la

caracterización del lodo crudo y estabilizado se midieron los siguientes parámetros: sólidos totales, sólidos volátiles, pH, coliformes fecales, *Salmonella* spp. y huevos de helmintos. Para el análisis de bacterias, se pesó la cantidad equivalente a 4 gramos de materia seca (ST), mientras que para el caso de huevos de helmintos la muestra fue equivalente a 2 gramos de materia seca.

## **2.2 Evaluación de la concentración de metales en el lodo crudo y tratado**

Para evaluar el posible cumplimiento con los límites establecidos por la US EPA y el proyecto de norma oficial mexicana NOM-004-ECOL se realizaron pruebas para determinar los metales totales en el lodo crudo proveniente de la planta de San Pedro Atocpan. Para esta prueba se recolectó lodo crudo en un recipiente de un litro y se mandó a un laboratorio certificado para su análisis.

### **2.2.1 Solubilidad de metales en lodo tratado por vía ácida**

Los metales que se encuentran en el lodo pueden presentar solubilidad cuando son tratados con ácido por lo que se realizaron dos pruebas con ácido acético y una con peracético, llevadas a cabo a temperatura ambiente.

El primer paso consistió en estabilizar un litro de lodo con ácido acético y en su caso con peracético a una dosis de 22,000 mg/L y 550 mg/L respectivamente durante 30 minutos, después se deshidrato centrifugándolo a 3600 rpm durante 10 min. Una vez centrifugado se separó el sobrenadante del sedimento por medio de decantación en un vaso de precipitado. En seguida se procedió a filtrar el sobrenadante con ayuda de un matraz Kitasato, un embudo Büchner, un filtro millipore tipo AP40 y una bomba de vacío. Una vez que se filtró, se repitió la operación filtrando el sobrenadante pero ahora con un filtro Whatman del No. 4 (de 20 - 25  $\mu$ ), para después volver a filtrar utilizando un filtro Whatman del No.1 (de 11  $\mu$ ). La muestra obtenida se filtró por último con un filtro millipore de 0.45  $\mu$  (según el método 3010 A. de los métodos standard metales disueltos). El producto que se obtuvo de este proceso se envasó y se envió a un laboratorio certificado para el análisis de metales solubles; este mismo procedimiento se siguió para determinar los metales solubles en lodo crudo que sirvió como testigo.

### 2.3 Simulación del tren completo de tratamiento de lodo tratado con ácido acético y peracético y evaluación de la estabilidad

Con el fin de evaluar la efectividad del proceso de estabilización, se simuló un tren completo de tratamiento que consistió en la estabilización del lodo ya sea con ácido acético o peracético seguido de un acondicionamiento con un polímero (seleccionado por medio de la prueba de resistencia específica a la filtración (REF) que se menciona en el anexo 6) y la deshidratación para facilitar su manejo y disposición.

Para acondicionar el lodo estabilizado fué necesario seleccionar algunos polímeros los cuales pudieran funcionar a un pH ácido ya que por lo general el intervalo óptimo para un polímero va de 4 a 11 unidades. El polímero seleccionado fué el Ecofloc 6120 (elegido por medio de una prueba de resistencia específica a la filtración (REF)) ya que fué el que mejor logró flocular el lodo tratado con ácido acético a un pH de 3.4. Esta eficiencia fué clara al permitir la formación de una "torta" de lodo que pueda separarse fácilmente del agua.

La prueba se llevó a cabo con 8 L de lodo tratado en el caso de ácido acético y una dosis de 18,000 mg/L colocados en seis vasos de precipitado de 2 L en un equipo de prueba de jarras, mientras que con ácido peracético se utilizaron 6 L de lodo. Para ambos casos se utilizó una agitación constante de 320 rpm y un tiempo de contacto de 30 minutos a temperatura ambiente. Los parámetros que se midieron durante la prueba fueron: pH, sólidos totales, sólidos volátiles, coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helmintos tanto a lodo crudo como estabilizado.

El lodo estabilizado se colocó en una cubeta de plástico y se le agregó una dosis de 6.5 kg / tonelada de sólidos totales del polímero catiónico Ecofloc 6120 mezclando la muestra hasta que se comenzaron a formar los floculos y se procedió a deshidratarlos empleando un filtro-prensa piloto. Después del desaguado se extrajo la torta de lodo del filtro-prensa y se homogenizó de aquí se tomaron las muestras para los parámetros correspondientes.

A su vez se realizó un estudio de evaluación de la concentración de microorganismos en lodo tratado con los dos ácidos a distintos tiempos que fueron 0.5, 1.5 horas, 8, 21 y 42 días. Para esta prueba se utilizó 2 L del lodo deshidratado y homogenizado anteriormente, se colocó en un vaso de precipitado de plástico y el recipiente fué sellado con una película de parafilm para evitar contaminación guardándolo en un lugar lejos de los rayos del sol (para evitar interferencias) y temperatura ambiente.

## **CAPITULO 3**



### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización de los lodos

Realizar la caracterización de los lodos nos permite conocer la concentración de parámetros que nos ayudarán a determinar los procesos de tratamiento a los cuales tienen que ser sometidos y cumplir con las normas de aplicación o disposición. Los parámetros analizados en el lodo de la planta de San Pedro Atocpan se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Caracterización del lodo crudo de la planta de San Pedro Atocpan, Milpa Alta**

Parámetro	Unidades	Crudo	Límite para aplicación en suelos (Según la US EPA)		Desviación estándar ±
			Clase A	Clase B	
pH	unidades de pH	5.4	NA		0.38
Sólidos totales	% en peso	3.9%	NA		0.15
Sólidos volátiles	% de los ***ST	74.4%	NA		0.13
Coliformes fecales	*NMP/g ST	6.3x10 <sup>6</sup>	< 1000 NMP/g ST	< 2x10 <sup>5</sup> NMP / g ST	1.3 ( u log)
<i>Salmonella</i>	NMP/g ST	7.9x10 <sup>4</sup>	< 3 NMP/4 g ST	NA	1.7 ( u log)
H.H. viables	**HH/ g de ST	95	1 HH/4 g ST	NA	27
H.H. No viables	HH/ g de ST	11	NA		6.5
<b>Metales:</b>					
Arsénico	mg/Kg	0.10	41		0.007
Cadmio		0.03	39		0.023
Cromo		0.29	NA		0.39
Cobre		3.03	1,500		1.165
Mercurio		0.004	17		0.0004
Molibdeno		NA	NA		NA
Níquel		0.29	420		0.108
Plomo		1.61	300		0.55
Selenio		ND	100		ND
Zinc		10.97	2,800		3.01

NA. no aplica \*NMP- Número más probable \*\*HH- Huevos de helmintos

De acuerdo con la Tabla 3.1, el principal problema de los lodos de esta planta radica en el alto contenido microbiológico que impide su adecuada aplicación o disposición sin un tratamiento previo. Por ello, el proceso de estabilización propuesto deberá reducir de manera significativa el contenido de bacterias y huevos de helmintos antes de enviar el lodo para su reutilización en la agricultura o disposición en rellenos sanitarios. Así, el

tratamiento ácido se estudió para evaluar la destrucción de los microorganismos analizados de manera que se permita el reuso benéfico de los biosólidos producidos.

El contenido de metales en el lodo crudo no sobrepasa los límites establecidos por la EPA para biosólidos que van a ser aplicados en suelo. Esto se debe al origen de las aguas residuales ya que en esta planta se tratan principalmente aguas domésticas que contienen básicamente desechos humanos, animales y caseros, además de que incluyen la infiltración de las aguas subterráneas.

### 3.1.1. Coliformes fecales, *Salmonella* spp. y huevos de helmintos

La concentración de microorganismos de la planta de San Pedro Atocpan (Tabla 3.1) es similar a la reportada en la literatura tomando en cuenta que la concentración de microorganismos puede variar según la localidad o el país, la época del año, las condiciones de operación del proceso de tratamiento, y el origen de las aguas residuales. Para un lodo primario Bruce *et al.*, (1990 citado en Lue Hing *et al.*, 1998) encontraron que la concentración de coliformes fecales es de 7.3 unidades logarítmicas, la cual es ligeramente mayor a la reportada en la Tabla 3.1 para este estudio; para *Salmonella* spp la concentración que se reporta en la literatura es de 2.6 unidades logarítmicas (1990 citado en Lue Hing *et al.*, 1998), mientras que en el presente trabajo es de 5 unidades logarítmicas.

En lo referente a huevos de helmintos parásitos se obtuvo 98 HH viables por gramo de sólidos totales mientras que en países como Estados Unidos los lodos contienen < 1 huevo de helmintos viable / g ST (Jiménez, 2001). En cuanto a la caracterización por género *Ascaris* es el más abundante con casi 90 % del total de huevos encontrados (Tabla 3.2), seguido por *Trichuris* e *Hymenolepis*. También en los lodos se pueden encontrar géneros que son menos abundantes como *Taenia*, *Necator*, *Enterobius*, y *Trichosomoides*. La infección provocada por *Ascaris* llamada ascariasis es una de las helmintiasis más frecuentes y expandidas en México y el mundo, lo que explica la mayor presencia de huevos de este helminto en el lodo, ya que se calcula que de 700 a 1000 millones de personas en el mundo están infectadas por este parásito (Feachem *et al.*, 1983). Adicionalmente, los huevos de *Ascaris* han sido reportados como uno de los más resistentes a los procesos de tratamiento (Carrington y Harman, 1984).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Jiménez *et al.* (2000) en relación con la distribución de géneros en lodos provenientes de un Tratamiento Primario Avanzado (TPA), obteniendo un porcentaje de 90% de *Ascaris*, *Trichuris* 3.8%, *Hymenolepis* 3.5 %, *Toxocara* 1.7% y *Taenia* 0.4 %.

**Tabla 3.2 Porcentaje de géneros de helmintos encontrados en el lodo de San Pedro Atocpan**

Género	Porcentaje de géneros de helmintos
<i>Ascaris</i>	89.5
<i>Trichuris</i>	4.0
<i>Hymenolepis</i>	3.8
<i>Toxocara</i>	1.8

Los resultados de la caracterización nos demuestran que los lodos generados en esta planta contienen un nivel más alto de microorganismos patógenos que los lodos que se generan por procesos similares en otros países lo que refleja el estado epidemiológico de la población. Además esto nos indica la necesidad de tratar estos lodos ya que pueden representar un peligro de salud pública si son dispuestos o reusados sin tratamiento previo.

### **3.2. Estabilización de lodo de San Pedro Atocpan tratado con ácido acético y peracético**

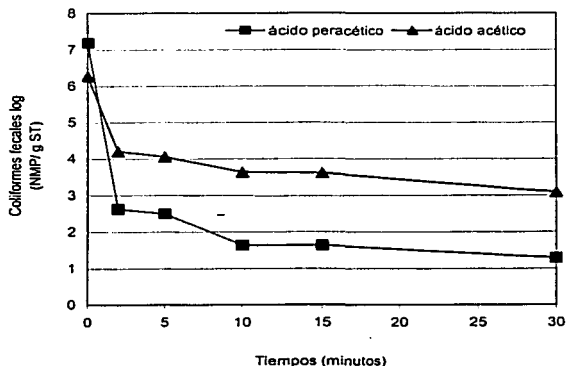
Ya que uno de los problemas del lodo generado en la planta de San Pedro Atocpan son los altos niveles de microorganismos patógenos la estabilización llevada a cabo en este trabajo planea cumplir con los límites impuestos por la US EPA en lo que se refiere a microorganismos patógenos para producir biosólidos que van a ser aplicados en suelo.

#### **3.2.1. Coliformes fecales**

La destrucción de coliformes fecales estabilizando lodo crudo con ácido acético a una dosis de 22,000 mg / L muestra que hubo una reducción en la concentración, partiendo de  $1.86 \times 10^6$  a  $1.17 \times 10^3$  (Número Mas Probable (NMP) / g sólidos totales (ST)) lo cual permite que se cumpla con los requerimientos para biosólidos Clase B que establece la US EPA (1994) que estipula  $< 2 \times 10^6$  NMP/g ST, lo cual permite su aplicación en sitios con acceso restringido (Capítulo 2). Por otra parte los requerimientos de coliformes fecales para biosólidos Clase A son mas estrictos ya que exigen menos de 1000 NMP / g ST según la US EPA (1994). Por su parte el ácido peracético a una dosis de 550 mg / L mostró ser un efectivo desinfectante en tiempos de contacto muy cortos, ya que a los 2 minutos de tiempo de contacto cumple con los límites establecidos para un biosólido Clase A reduciendo de  $1.54 \times 10^7$  iniciales a  $1.94 \times 10^1$  NMP / g ST final (Figura 3.1). En cuanto al mecanismo de acción de los ácidos sobre las bacterias, en el caso del ácido acético en pH's ácidos la molécula de ácido se encuentra en forma no disociada la cual es permeable a la membrana celular lo que permite que se difunda al interior de la célula. Una vez dentro

de la célula la molécula de ácido se disocia en un anión y un protón debido al pH intracelular más alcalino que alcanza valores de 7.4 a 7.6 según Padan *et al.*, (1981 citado por Cherrington *et al.*, 1991). Esto acidifica el citoplasma provocando alteraciones en el metabolismo de la célula y en el crecimiento de las mismas ya que se desvía el uso de la ATPasa de la membrana plasmática para bombear protones hacia el exterior celular (Russell, 1991). Por su parte el ácido peracético rompe las uniones sulfhidrilo (-SH) y sulfuro (S-S) dentro de las enzimas, de ahí que componentes importantes en la membrana sean alterados (Fraser *et al.*, 1983). Además el ácido peracético probablemente disloca la función quimiosmótica del transporte de membrana a través de la ruptura o dislocación de la pared celular, la cual impide seriamente la actividad celular. Adicionalmente, el ácido peracético dentro de la célula puede también oxidar enzimas esenciales de manera que rutas bioquímicas vitales así como el transporte activo a través de la membrana y los niveles de soluto intracelular sean deteriorados (Fraser *et al.*, 1983).

Como se observa en la Figura 3.1 el ácido peracético tiene un mejor rendimiento en lo que se refiere a reducción de coliformes fecales que el ácido acético. Además, se observa que el pH no es un factor determinante en la reducción de estos microorganismos ya que en estas pruebas la mayor reducción alcanzada con ácido peracético se llevó a cabo a un valor de pH más alto, por lo que la reducción de coliformes fecales se debe más a la forma de acción de cada ácido sobre la célula que al pH.



**Figura 3.1 Destrucción de coliformes fecales en lodo tratado con ácidos acético y peracético**

### 3.2.2. *Salmonella* spp.

En cuanto a *Salmonella* spp. (Figura 3.2) con ácido acético hubo una reducción de  $1.58 \times 10^4$  a  $1.58 \times 10^1$  (NMP / g ST). Pese a esto, no se cumple con los requerimientos establecidos en el apartado 503 de la US EPA para un biosólido Clase A que son  $< 3$  NMP por 4 gramos de sólidos totales, cumpliéndose solo con los de Clase B. El valor de pH mínimo al que sobrevive *Salmonella* spp. es de 3 según Lin-Jyhshiu *et al.*, (1995) por lo tanto la reducción se debe más bien al mecanismo de acción del ácido sobre la bacteria que al pH ya que al estabilizar el lodo a la dosis utilizada en esta prueba se obtiene un valor de pH de 3.8 que no es suficiente para llegar al límite de sobrevivencia de este microorganismo.

En cuanto al ácido peracético se logra una reducción de  $1.65 \times 10^5$  a  $1.00 \times 10^0$  (NMP/g ST) cumpliendo con los límites para un biosólido Clase A (Figura 3.2). El pH en este caso tampoco es un factor determinante ya que alcanza valores más altos (4.6) a los de ácido acético y pese a esto logra una mayor reducción de este patógeno. Por lo que la destrucción se debe a las propiedades desinfectantes del ácido peracético explicadas anteriormente.

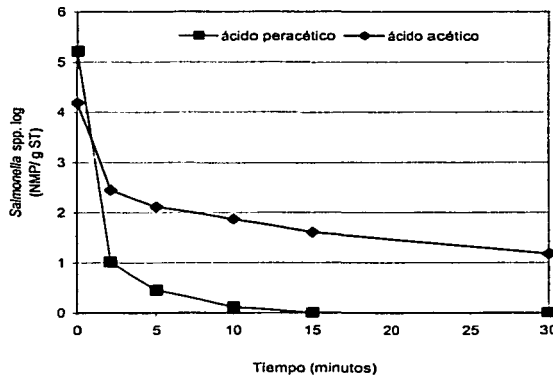
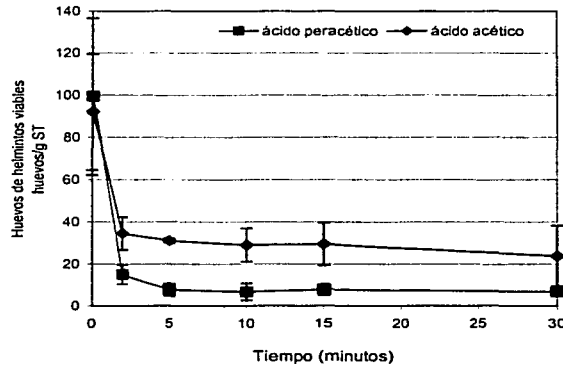


Figura 3.2 Destrucción de *Salmonella* spp en lodo tratado con ácidos acético y peracético

### 3.2.3. Huevos de Helmintos

Con respecto a huevos de helmintos (Figura 3.4) el ácido acético logra una disminución en la viabilidad de 92 iniciales a 23 huevos viables finales (Huevos de helmintos (HH) / g ST) en 30 minutos de tiempo de contacto logrando así una reducción de 74 % de huevos viables. La viabilidad de los huevos de helmintos se determina si este presenta en la cápsula tres membranas que se distinguen entre sí, además los huevos pueden presentar una larva en su interior lo que determina también su viabilidad. Sin embargo no se cumple con los requerimientos para un biosólido Clase A que estipula  $< 1 \text{ HH} / 4 \text{ g ST}$  especificados en el apartado 503 de la US EPA. El ácido peracético mostró ser muy eficiente en inactivar huevos de helminto ya que logró reducir la concentración de 99 huevos viables / g ST a 7 huevos viables logrando así una reducción del 93 %. Como se puede observar en la Figura 4.3 la acción del ácido peracético sobre los huevos de helminto se lleva a cabo en periodos de tiempo cortos.

Fraser *et al.*, (1983) obtuvieron en pruebas con APA en lodo crudo una inactivación del 99 % en huevos de *Taenia saginata* con dosis de 1000 mg APA/litro de lodo, en tanto que en lodo digerido son necesarias dosis menores de 250 mg de APA/ litro de lodo, en este estudio se necesitaron 550 mg/L para inactivar el 93 % de los huevos de helminto viables en lodo crudo no digerido lo que representa una ventaja puesto que la dosis es menor a la utilizada por Fraser *et al.*, (1984).



**Figura 3.4 Inactivación de Huevos de Helmintos en lodo tratado con ácidos acético y peracético**

Las propiedades ovicidas del ácido peracético pueden estar relacionadas con su efecto como un desnaturalizador de proteínas demostrado cuando es usado como esporicida. Los síntomas de huevos de helmintos que han sido inactivados por ácido peracético son carencia de movimiento, coloración oscura, granulación y la apariencia ovoide en céstodos (Fraser *et al.*, 1983).

En un estudio realizado por Fairbairn (1954) se determinó que huevos de helmintos no embrionados contienen cierta concentración de ácidos grasos (acético, butírico y pentanoico) la cual disminuye durante la embrionación, siendo esta reducción hasta del 66%. Es importante mencionar que de acuerdo con el autor, los huevos de *Ascaris* contienen una gran cantidad de grasas que sirven como reserva de energía al huevo durante la etapa de desarrollo mientras que espera la ingestión por parte del huésped. Adicionalmente, parte de dichas grasas la constituyen ácidos grasos volátiles que coinciden con los ácidos que excretan las hembras adultas como productos de la fermentación. Por ello, parece probable que algunos de los ácidos desechados durante la fermentación, sean incorporados y utilizados durante el metabolismo del huevo.

A pesar de que no ha sido establecido el mecanismo por el cual los huevos de helmintos son afectados por los ácidos, lo anterior podría explicar el efecto de la aplicación de ácidos orgánicos (volátiles) en la reducción de la concentración de huevos de helmintos en lodos. Adicionalmente, el hecho de que la capa lipídica sea semipermeable, y esta permeabilidad varíe de acuerdo con las condiciones ambientales y el grado de desarrollo del huevo, permitiría al igual que en el caso de las bacterias, el paso de los ácidos orgánicos que una vez en el interior se disociarían acumulándose tanto protones como aniones que contribuirían a la inactivación del organismo.

#### **3.2.4. Determinación general de las eficiencias de los dos ácidos**

En la Tabla 3.3 se hace un resumen de la eficiencia de reducción de microorganismos de los dos ácidos. El ácido peracético tiene un mejor desempeño en la reducción e inactivación de microorganismos presentes en el lodo que el ácido acético, lo cual se debe al mecanismo de acción que ejerce el ácido sobre las células bacterianas y los huevos de helmintos, lo que corrobora su amplio uso como agente desinfectante de distintos usos.

**Tabla 3.3 Resumen de remoción de microorganismos en lodo tratado con ácido acético y peracético**

Tratamiento	Coliformes fecales *Log NMP /g ST	<i>Salmonella</i> spp *Log NMP /g ST	Huevos de helminto %
Ácido acético	3.2	3	74
Ácido peracético	6	5.2	93

\*logaritmo del número más probable

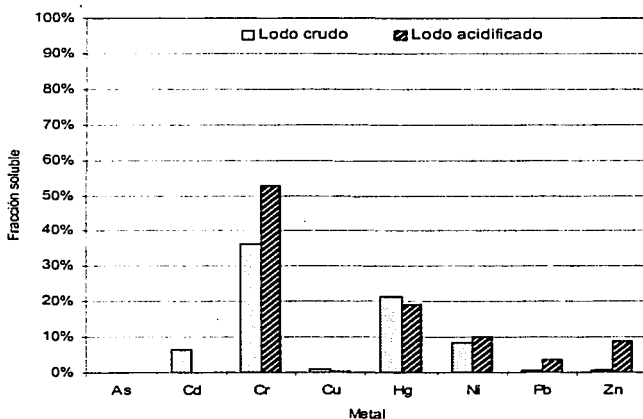
Las ventajas de estabilizar lodos con ácido acético y peracético es que reduce el tiempo de contacto que se lleva a cabo mediante la estabilización por procesos convencionales ( descritos en el Capítulo 1) que puede alcanzar de 15 a 20 días o más dependiendo del proceso, con la misma o mayor eficiencia de reducción de microorganismos, lo que resultaría en una disminución en el costo de tratamiento del lodo (tamaño del reactor, mezclado etc.) ya que con ácido peracético es suficiente 10 minutos de tiempo de contacto para lograr cumplir con lo establecido por el apartado 503 de la US EPA para biosólidos Clase B, mientras que con acético son necesarios 30 minutos para producir este mismo tipo de biosólido.

### **3.3. Solubilidad de metales en lodo de San Pedro Atocpan tratado con ácido acético y peracético**

Los metales pueden estar presentes en el lodo ya sea como iones o formando complejos ya sea con ligandos orgánicos e inorgánicos e pueden presentar solubilidad al ser tratados con ácido. Esto puede ser aprovechado para extraer los metales del lodo ya que parte de estos son transferidos de la fase sólida a la fase acuosa y después son separados del lodo cuando es deshidratado, disminuyendo así la concentración de metales en el lodo y reduciendo así el peligro de toxicidad cuando es aplicado al suelo.

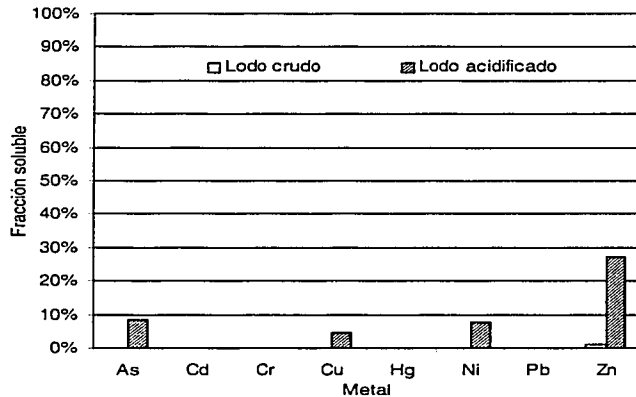
Con respecto a la solubilidad de metales, se observa que al aplicar el ácido acético se incrementa ligeramente la fracción soluble de cromo, plomo, níquel y zinc, mientras que el resto de los metales analizados se mantiene sin cambio significativo o presenta reducciones aparentes (Figura 3.5). A este último respecto es necesario mencionar que debido a la baja concentración de metales en el lodo de la planta de San Pedro Atocpan, así como a la variabilidad en la calidad del lodo, aún siendo del mismo lote, se puede considerar que la fracción soluble de los metales en los que no se incrementó, se mantendrá igual a la del lodo crudo puesto que la aplicación del ácido acético disminuye el pH del lodo y potencialmente solubiliza los metales, más no reduce su solubilidad.





**Figura 3.5 Solubilidad de metales en lodo crudo y tratado con ácido acético**

Por su parte, en la muestra tratada con ácido peracético la concentración inicial de metales solubles fue prácticamente 0 en todos los casos, incrementándose al aplicar el ácido y disminuir el pH en el caso del arsénico, cobre, níquel y zinc (Figura 3.6). Se puede observar que al ser tratado el lodo con ácido peracético el porcentaje de solubilidad es mayor que con ácido acético para dos metales que presentaron solubilidad en común, lo que se atribuye a las propiedades corrosivas de este ácido las cuales actúan sobre los complejos que forman los metales ya sea con ligandos orgánicos e inorgánicos provocando una mayor solubilidad de los metales.



**Figura 3.5 Solubilidad de metales en lodo crudo y tratado con ácido peracético**

Es importante mencionar que a pesar de lo que pudiera suponerse, el incremento en la solubilidad de algunos metales al tratar el lodo con ácido peracético no fue aprovechado para separar metales durante el desaguado en lodos con alto contenido de estos, permitiendo cumplir con los límites de la US EPA.

### **3.4. Simulación de un tren completo de tratamiento de un lodo estabilizado con ácido acético y peracético y evaluación de la estabilidad del lodo**

El porcentaje de sólidos totales que resultaron del acondicionamiento y deshidratado del lodo tratado con ácido acético fue de 9.83 % lo que representa un porcentaje muy bajo ya que el lodo sigue conservando mucha humedad dificultando así su transporte, manejo y disposición que repercutiría en los costos económicos derivados del tratamiento del lodo. Esto se debió al volumen de lodo alimentado al filtro prensa, el cual fue mucho menor a la capacidad volumétrica del equipo, impidiendo una adecuada filtración a presión.

Algunos autores como Metcalf y Eddy (1991) reportaron porcentajes de sólidos totales obtenidos mediante varios procesos de deshidratado. Por ejemplo, en un filtro banda produce una torta de sólidos de 20 a 35 % en lodos primarios y para un filtro de vacío se obtiene en un lodo primario 27 a 35 % de sólidos totales, mientras que para un filtro prensa de banda reportan de 28 a 44 % de sólidos, todos ellos superiores a los obtenidos en el presente trabajo.

Para el caso del ácido peracético se realizaron dos pruebas de deshidratado, una probando papel como medio filtrante y otra con lonas de polipropileno. Con papel filtro el porcentaje de sólidos totales fue de 7.56 % siendo también un porcentaje muy bajo y con lonas de polipropileno el rendimiento fue mejor y se obtuvo un 19 % de sólidos totales más cercano a lo que se reporta en la literatura.

Pese a que el pH del lodo estabilizado con ácido acético es menor y los polímeros utilizados para acondicionar el lodo actúan sobre ciertos valores de pH (4 – 11) no se observa una diferencia significativa entre los sólidos totales obtenidos con lodo estabilizado con ácido acético o peracético. La diferencia se observa cuando se cambia el medio filtrante de papel filtro a lonas de polipropileno.

Es necesario realizar más pruebas de acondicionamiento y deshidratado para hacer más eficiente esta etapa del proceso de tratamiento del lodo.

### 3.4.1. Evaluación de la estabilidad del lodo

Para evaluar la evolución de la concentración de los microorganismos se realizaron análisis a diferentes tiempos después de la estabilización, tomando muestras a 0.5 y 1.5 horas, y posteriormente a 8, 21 y 42 días.

#### 3.4.1.1. Parámetros microbiológicos

Como parte del trabajo experimental se realizó la caracterización microbiológica del lodo crudo donde se obtuvo una concentración inicial de  $2.5 \times 10^8$  NMP/g ST,  $4.0 \times 10^5$  NMP/g ST y 58 huevos viables /g ST para coliformes fecales, *Salmonella* spp. y huevos de helmintos respectivamente. De los huevos encontrados, el 83 % del total perteneció al género *Ascaris*, el 9 % al género *Hymenolepis*, el 7 % a *Trichiuris* y el 0.9 % a *Toxocara*.

En cuanto a los resultados del lodo tratado, la reducción de coliformes fecales llevada a cabo por cada ácido es muy similar aunque el ácido peracético tiene una mejor remoción en tiempos cortos que la alcanzada con ácido acético ya que reduce de  $2.5 \times 10^8$  a 81 NMP/g ST en solo 30 minutos y en el tiempo total de la prueba logra reducir la concentración

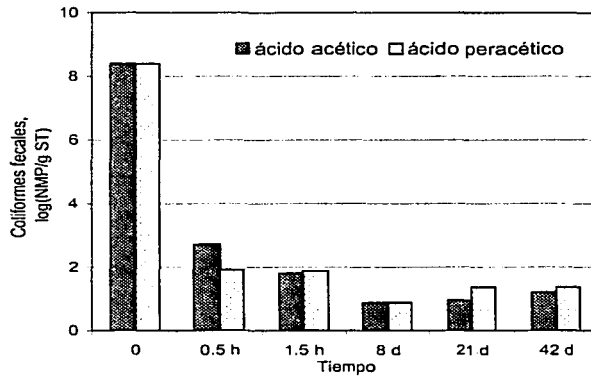
hasta 23 NMP/g ST, mientras que el ácido acético logra reducir a 520 NMP/g ST en los primeros 30 minutos (Tabla 3.4). A medida que avanza la prueba hasta los cuarenta y dos días el ácido acético logra una reducción similar alcanzando 16 NMP/g ST. Con los dos ácidos se cumple con los límites de coliformes fecales establecidos para un biosólido clase B según la US EPA (1994) que marca  $<2 \times 10^6$  MPN/g ST, y aún con los límites para clase A de  $<1000$  NMP/g ST.

**Tabla 3.4 Resultados de los parámetros microbiológicos medidos al lodo estabilizado con ácido acético y peracético**

Tiempo	C.F. NMP/gST		<i>Salmonella</i> spp. NMP/g ST		HH /gST	
	APA	Acet	APA	Acet	APA	Acet
0	$2.49 \times 10^5$		$4 \times 10^6$		58	
0.5 h	81	520	<0.75	<0.75	7	14
1.5 h	75	64.2	<0.75	<0.75	5	7
8 d	7.5	7.5	<0.75	<0.75	7	7
21 d	23	9	<0.75	<0.75	7	6
42 d	23	16	<0.75	<0.75	3	4

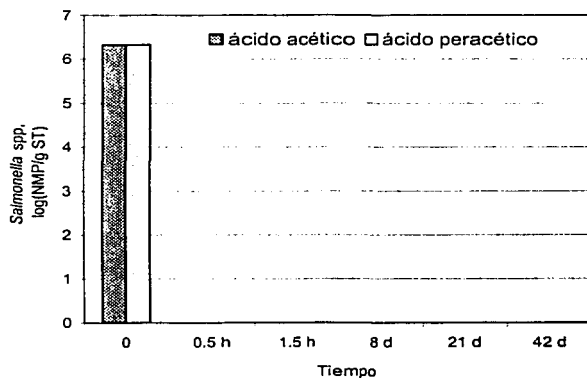
En lo que respecta a la evaluación de la concentración de coliformes fecales durante toda la prueba no hay un aumento significativo de estos microorganismos indicadores (Figura 3.6) que pueda sugerir algún riesgo de transmisión de enfermedades si este biosólido se destina a ser reutilizado ya sea como mejorador de suelo o fertilizante. En ambos casos se nota un ligero aumento de los 8 a los 42 días, lo cual pudiera deberse a que los coliformes fecales pueden emplear al ácido acético como fuente de carbono o energía después de desarrollar cierta tolerancia o adaptación al ácido.

En cuanto a *Salmonella* spp. la reducción de este microorganismo patógeno es la misma para los dos ácidos y va de  $4 \times 10^6$  a 0.75 NMP/g ST lo que comprueba su eficiencia en remover organismos patógenos (Figura 3.7). Con relación a la normatividad de la US EPA en el caso de *Salmonella* spp. se logra cumplir también con los límites para un biosólido clase A que estipula  $< 0.75$  NMP/g ST. Adicionalmente, no se presentó recrecimiento de estos organismos en el transcurso de la prueba por lo que se infiere que, tomando en cuenta este parámetro, el biosólido producido puede ser reusado sin temor de provocar problemas de salud a la población que esté en contacto con él ni a la gente que labora en los campos donde pueda ser esparcido el biosólido.



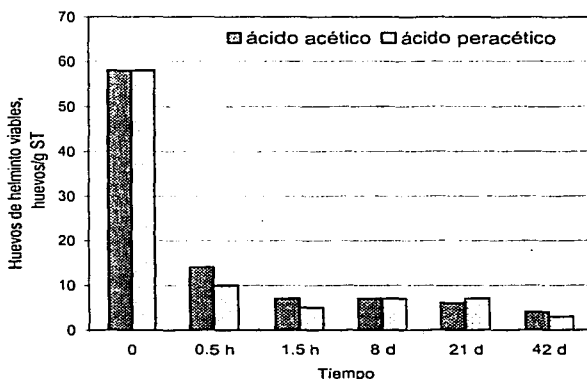
**Figura 3.7 Evolución de la concentración de coliformes fecales en lodo tratado con ácidos acético y peracético**

Algunos estudios han reportado que ciertas variedades de *Escherichia coli*, incluidas en el grupo de los coliformes fecales, no siempre crecen en condiciones ácidas con ácido acético a pH por debajo de 4.4 mientras que algunas especies de *Salmonella* pueden crecer a pH de 4 (Lin *et al.*, 1995; Ryu *et al.*, 1999). Sin embargo, bajo ciertas circunstancias ambos tipos de bacterias pueden desarrollar una tolerancia al ácido permitiendo su recrecimiento después de un periodo de adaptación. De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente experimento, dicha adaptación pudo haberse dado para ambos casos con coliformes fecales, lo que se demuestra como un ligero recrecimiento. Por lo que es necesario realizar más pruebas con ácido acético y peracético y confirmar el recrecimiento.



**Figura 3.8 Evolución de la concentración de *Salmonella* spp. en lodo tratado con ácidos acético y peracético**

En lo que se refiere a la reducción de huevos de helmintos la inactivación lograda por los dos ácidos es muy similar pero el ácido peracético resulta ser más efectivo (Figura 3.10) Como en las pruebas anteriores el ácido peracético es más efectivo que el ácido acético en tiempos de contacto cortos, ya que logra inactivar en media hora de 58 a 7 huevos viables mientras que el ácido acético inactiva de 58 a 14 en el mismo tiempo de contacto. Al término de la prueba el ácido peracético inactiva de 58 a 3 que equivale a un 95 % de inactivación mientras que el ácido acético inactiva de 58 a 4 equivaliendo a un 93 % de inactivación lo cual puede considerarse como una eficiencia equivalente. A pesar de la buena inactivación de huevos de helmintos no se cumple con los límites para biosólidos clase A de la US EPA que marca como límite < 0.25 huevos viable por gramo de sólidos totales, con lo cual estos lodos deben ser considerados como clase B y aplicarse con ciertas restricciones.



**Figura 3.10 Inactivación de huevos de helmintos durante la prueba de estabilización de lodo con ácido acético y peracético**

## **CAPITULO 4**



## 4. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados de la caracterización microbiológica del lodo de la planta de tratamiento de San Pedro Atocpan, el género *Ascaris* es el más abundante de los huevos de helmintos parásitos encontrados con un 90 % del total de huevos esto concuerda con lo encontrado por otros autores y se debe a que es una infección muy extendida entre la población de México y el mundo, además de que los huevos de *Ascaris* se encuentran entre los más resistentes a las diferentes condiciones ambientales.
- Los lodos generados en la planta de San Pedro Atocpan poseen una concentración mayor de organismos patógenos y parásitos comparado al lodo generado por procesos similares en otros países, siendo este su principal problema.
- En lo que se refiere a estabilización con ácido acético se logra cumplir con los requerimientos para un biosólido clase B según la US EPA para uso en zonas restringidas y el tiempo de contacto necesario para lograr esto es de 30 minutos, asegurando una buena remoción tanto de bacterias indicadoras y patógenas, como de huevos de helmintos.
- Con ácido peracético también se logró cumplir con los límites microbiológicos para un biosólido clase B según la US EPA. Un tiempo mínimo de 10 minutos es el adecuado para alcanzar un biosólido clase B con lo cual se asegura una buena remoción de bacterias y huevos de helmintos.
- La estabilización de los lodos ya sea con ácido acético o peracético requieren tiempos de contacto menores a los que se emplean en los procesos convencionales que en ocasiones necesitan hasta 20 días para producir un biosólido clase B. Esto ayuda a reducir el costo de inversión y de energía, ya que se necesitan tanques más pequeños para almacenar el lodo y menor gasto de energía en el mezclado.
- El ácido peracético es un mejor biocida que el ácido acético además de que reduce el tiempo de contacto en que se lleva a cabo la estabilización, sus productos de descomposición no son tóxicos al ambiente como ya ha sido demostrado por otros autores, por lo tanto se recomienda su uso.
- El lodo producido en la planta de San Pedro Atocpan no presenta problemas de metales pesados, ya que el contenido de éstos no sobrepasan los límites incluidos en el apartado 503 de la EPA. Esto se debe al origen de las aguas residuales que en este caso son aguas

domésticas cumpliendo así con los requerimientos para biosólidos que son utilizados en agricultura.

- En lo que respecta a solubilidad de metales en lodo tratado con ácido acético, cuatro metales presentaron condiciones de solubilidad a pH de 3.62 estos son cromo, plomo zinc y níquel, lo que puede ser aprovechado para separar los metales del lodo cuando es desaguado. Mientras que con ácido peracético también cuatro metales presentan solubilidad a pH de 4.47 y son arsénico, cobre, níquel y zinc.
- La dosis de 18,000 mg/L de ácido acético probada en la prueba de evaluación de la concentración de microorganismos resultó ser tan efectiva como la de 22,000 mg/L ya que produjo un biosólido clase B, ayudando así a reducir costos en el tratamiento de los lodos por concepto de reactivos.
- A pesar de que se registro un pequeño aumento en la concentración de coliformes fecales en lodo tratado con los dos ácidos es necesario que se realicen más pruebas para determinar si efectivamente hay recrecimiento o se debe a lo heterogéneo de la muestra.
- *Salmonella* spp. no registra aumento en su concentración a través del tiempo evaluado.
- En las pruebas de deshidratación de lodo tratado ya sea con ácido acético o ácido peracético el porcentaje de sólidos totales es mas bajo que el reportado en la literatura para lodo primario, por lo que se recomienda realizar más pruebas. A su vez las lonas de polipropileno utilizadas como medio filtrante en las pruebas de deshidratación en vez de papel-filtro resultaron ser más efectivas por lo que se recomienda su uso en futuras pruebas de desaguado de lodos.

## LITERATURA CITADA

---

**Literatura citada**

- APHA. (1989). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater (17 th ed.) American Public Health Association, Washington, D.C.
- Baldry, M.G.C. (1983). The bactericidal, fungicidal, and Sporocidal properties of hydrogen peroxide and peracetic acid. *Journal of Applied Bacteriology*, 54, 417- 428 pp.
- Baldry, M.G.C., y Fraser, J.A.L. (1988). Disinfection with peroxigens. En: *Critical reports on applied chemistry*. K.R. Payne (ed.). 23, John Wiley and Sons, Chichester, 91-116 pp.
- Baldry, M.G.C., y French, M.S. (1989). Activity of peracetic acid against sewage indicator organisms. *Water, Science and Technology*, 21, 1747-1749 pp.
- Baldry, M.G.C., Cavadore, A., Freach, M.S., Massa, G., Rodrigues, L.M., Schirch, P.F.T. y Theradgold, T.L. (1995). Effluente disinfection in warm climates with peracetic acid. *Water Science and technology*, 31, (5-6), 161-164 pp.
- Barrios, J.A., Jiménez, B., González, O., Salgado, G., Sanabria, L. y Iturbè, R. (2000). Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos fisicoquímicos por vía ácida. Instituto de Ingeniería de la UNAM. XII Congreso Nacional, Femisca, Morelia, México, 683-692 pp.
- Biagi, F. (1990). Enfermedades parasitarias. *La prensa Mexicana*. (Ed), México, 44-51 pp.
- Bitton, G. (1994). Wastewater microbiology. Wiley-Liss, USA.
- Capizzi, S., Chevallier, A., y Schwartzbrod, J. (1999). Destruction of *Ascaris ova* by accelerated electron. *Radiation physics and chemistry*, 56, 591-595 pp.
- Carrington, E.G., y Harman, S.A. (1984) The effect of anaerobic digestion temperature and retention period on the survival of *Salmonella* and *Ascaris ova*. En: *Sewage sludge stabilization and disinfection*, A. Bruce (Ed.), Ellis Horwood Limited, UK, 369-380 pp.
- Chemetrics Inc. (2000). Hoja Técnica – Acido Peracético.

- Cherrington, C.A., Hinton, M., mead, G.C. y Chopra, I. (1991). Organic acids: Chemistry, Antibacterial Activity and practical Applications. *Advances in Microbial Physiology*, 32.
- EPA. (1991). Preliminary Risk Assesment for parasites in municipal Sewage Sludge Applied to land. Office of Research and Development, Washington D.C. 20460.
- EPA/832/R-93-003.(1994). A plain english guide to the EPA, part 503 Biosolids rule.USA.
- Fairbairn, D. (1954). Embryonic and Postembryonic changes in the Lipids of *Ascaris lumbricoides* eggs. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*. 33, 122-129 pp.
- Feachem, R.G., Bradley, D.J., Garelick, H. y Mara, D.D. (1983). *Ascaris* y ascariasis. En: *Sanitation and Disease, Health Aspects of Excreta and Wastewater Management*. John Wiley and Sons and The World Bank, Washington D.C.
- Fraser, J.A.L., Godfree, A.F., Gibson, D., Jones, F. y Slater, D. (1983). Sewage sluge disinfection using peracetic acid. Presented to the North Western Branch of the Institute of Water Pollution Control. 9 th. November (in press).
- Fraser, J.A.L., Godfree, A.F. y Jones, F. (1984). Use of peracetic acid in operational sewage sludge disposal to pasture. *Water, Science and Technology*, 17, 451-466 pp.
- Girovich, M.J. (1996). Biosolids treatment and management. Ed. Marcel Dekker, Inc. USA.
- Godfree, A.F., Jones, F., Satchwell, M., y Watson, D.C. (1984). The Effectiveness of chemical disinfection on faecal bacteria in sludge. En: *Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection*. Editor Bruce, A.M., publicado por Water Research Centre, Ellis Horwood Limited.
- Haraken, M.S. (1984). Inactivation of enteroviruses, rotaviruses and bacteriophages by peracetic acid in a municipal sewage effluent. *Microbiology letters*, 23, 27-30 pp.
- Interox-Solvay. (1999). Ácido peracético. Información general. Hoja técnica
- Jiménez, B., Maya, R.C. y Pulido, V.M. (1996). Evaluación de las diversa técnicas para detección de los huevos de helminto y selección de una para conformar la NMX correspondiente. Informe

---

final. Instituto de Ingeniería de la UNAM. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua.

- Jiménez, B. (1999). Producción de Biosólidos y su Reúso como Mejoradores de Suelos. *Revista Federalismo y Desarrollo, Banobras*, SIN: 0188-3232, 65, 75-86 pp, México, D.F.
- Jiménez, B., Barrios, J.A. y Maya, C. (2000). Class B Biosolids production from wastewater sludge with high pathogenic content generated in a advanced primary treatment. *Water Science and Technology*, 42, (9), 103-110 pp.
- Jiménez, B. (2001). La Contaminación Ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa-Noriega, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F, 1era. Edición, 925 pp.
- Kiff, R.J. y Lewis-Jones, R. (1984). Factors that govern the survival of selected parasites in sewage sludges. En : *Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection*. Editor Bruce, A.M. publicado por Water Research Centre, Ellis Horwood Limited.
- Lazarova, V., Janex, M.L., Fiksdal, F., Oberg, C., Barcina, I., y Pommepuy, M. (1998). Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency. *Water Science and Technology*, 38, (12), 109-117 pp.
- Lefevre, F., Audic, J.M., y Ferrand, F. (1992). Peracetic acid disinfection of secondary effluents discharged off coastal seawater. *Water Science and Technology*, 25, (12), 155-164 pp.
- Lester, N. (1987). Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes. Vol II. Treatment and disposal. CRC. Press, Inc. Florida, EUA.
- Levine, M.M. (1987). Escherichia coli that cause diarrhea: Enterotoxigenic, enteropathogenic, enteroinvasive, enterohemorrhagic and enteroadherent. *Journal Infect. Dis.*, 155, 377-389 pp.
- Liberti, L.; y Notarnicola, M. (1999). Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water, Science and Technology*, 40, (4-5), 235-245 pp.
- Lin, J., Lee, I., Frey, J., Slonczewski, J., y Foster, J. (1995). Comparative Analysis of Extreme Acid Survival in *Salmonella typhimurium*, *Shigella flexneri* and *Escherichia coli*. *Journal of Bacteriology*, 177, (14), 4097-4104 pp.

- Lue-Hing, C., Zenz, R.D., Tata, P., Kuchenriter, R., Malina, F.J., y Sawyer, B. (1998). Municipal sewage sludge management: A reference text on processing, utilisation and disposal, Technomic Publishing Company ed., Pennsylvania, USA, volumen 4.
- McKellar, R.C., y Knight, P.K. (1999). Growth and Survival of various strains of enterohemorrhagic *Escherichia coli* in hydrochloric and acetic acid. *Journal of Food protection*, 62, (12), 1466-1469 pp.
- Metcalf y Eddy, Inc. (1991). Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse. Ed., McGraw-Hill, Inc. USA. 1-1333 pp.
- Moller, O. (1983). German practice in land disposal of sludge including legislation and health aspects. *Water Science and Technology*, 15, 115-133 pp.
- Morris, R. (1993). Reduction of microbial levels in sewage effluents using chlorine and peracetic acid disinfectants. *Water Science and Technology*, 27, (3-4), 387-393 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicación 22 de Octubre de 1993. México.
- Owen, R.R. (1984). The Effectiveness of chemical disinfection on parasites in sludge. En: *Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection*. Editor Bruce, A.M., publicado por Water Research Centre, Ellis Horwood Limited.
- Pamphula, M.E., Loureiro-Dias, C.M. (2000). Energetics of the effect of acetic acid on growth of *Saccharomyces cerevisiae*. *Fems Microbiology letters*, 184, 69-72 pp.
- Pedersen, D.C. (1983). Effectiveness of sludge treatment processes in reducing levels of bacteria, viruses and parasites. En: *Biological Health Risks of Sludge Disposal to land in Cold Climates*. P.M. Wallis and D.L. Lehman, eds. University of Calgary Press, Calgary, Canada, 9-31 pp.
- Plachy, P., Placha, I., y Juris, P. (1997). Effect of anaerobic stabilization of sewage sludges on the survival of *Ascaris suum* under laboratory conditions. *Helminthologia*, 34, (4), 229-234 pp.
- Rajala-Mustonen, R.L., Toivola, P.S., y Heinonen-Tanski, H. (1997). Effects of peracetic acid y uv irradiation on the inactivation of coliphages in wastewater. *Water Science and Technology*, 35, (11-12), 237-241 pp.

- Rawat, K. P., Sharma, A., y Rao, S.M. (1997). Microbiological and physicochemical analysis of radiation disinfected municipal sewagew. *Water Res.*, 32, (3), 737-740 pp.
- Reimers, R.S., Little, M.D., Englande, A.J., McDonell, D.B., Bowman, D.D., y Hughes, J.M. (1986). Investigation of parasites in sludges and disinfection. Techniques prepared by the school of public health and tropical medicine, Tulane university, New Orleans, LA in cooperation with the municipal Environmental research Laboratory, US, EPA, Cincinnati, OH., US EPA, Cincinnati, OH., EPA 600/1-85/022.
- Roth, L.A. y Keenan, D. (1971). Acid Injury of *Escherichia coli*. *Canadian Journal of Microbiology*, 17, (8), 1005-1008 pp.
- Russell, J.B. (1991). Resistance of *Streptococcus bovis* to acetic acid at low pH: relationship between intracellular pH and anion accumulation. *Applied Environmental Microbiology*, 57, 255-259 pp.
- Ryu, J.H., Deng, Y., y Beuchat, L.R. (1999). Behavior of acid-adapted and unadapted *Escherichia coli* 0157:H7 when exposed to reduced pH achieved with various organic acids. *J. Food Prot.*, 62, (5), 451-455 pp.
- Sarti, E. (1997). La teniosis y cisticercosis por *Taenia solium*. *Salud Pública de México*, 39, (3), 225-231 pp.
- Shaban, A.M. (1999). Bacteriological evaluation of composting systems in sludge treatment. *Water Science and Technology*. 40 (7), 165-170 pp.
- Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. (2001). *Epidemiología*. 2, (18), semana 2 del 7 al 13 de Enero del 2001.
- Taherzadeh, J.M., Niklasson, C., y Liden, G. (1997). Acetic acid – friend or foe in anaerobic batch conversion of glucose to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*?. *Chemical Engineering Science*, 52, (15), 2653-2659 pp.
- Vesilind, P.A., Hartman, G.C., y Skene, E.T. (1986). *Sludge Management and Disposal for the practicing engineer*. Publicado por Lewis Publishers, INC. USA.
- Wang, M.J. (1997). Land application of sewage sludge in China. *The Science of the total Environment*, 197, 149-160 pp.



- WEF, (1995). Wastewater Residuals Stabilization (Manual of practice FD-9). Water Environmental Federation, Alexandria Virginia, USA.
- WEF.(1995b). Wastewater Biology: The Microlife. OMNIPRESS, Alexandria, Virginia, USA.

**ANEXOS**

---

**Anexo 1 Por ciento de Sólidos Totales**

Para determinar la concentración de sólidos totales se utiliza el siguiente método gravimétrico.

**1.1 Procedimiento**

Preparar una cápsula de evaporación a peso constante en una estufa a 105 °C por 24 horas; posteriormente dejarla enfriar en el desecador por un periodo de 30 minutos. Pesar la cápsula obteniendo el peso 1 ( $P_1$ ).

Agregar una alícuota no menor de 5 gramos de muestra, pesar la cápsula con la muestra para obtener el peso 2 ( $P_2$ ). Introducir la cápsula en la estufa a 105 °C durante horas hasta la evaporación total del agua. Después retirar la cápsula y dejarla enfriar en el desecador por espacio de 30 minutos y pesarla para obtener el peso 3 ( $P_3$ ).

**1.2 Cálculos:**

Con los pesos obtenidos aplicar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100$$

---

**Anexo 2. Por ciento Sólidos Volátiles Totales****2.1 Procedimiento:**

Residuos producidos durante la ignición del método 2540 B (de sólidos totales)

a peso constante se colocan en una mufla a temperatura de 550 °C. Se deja en la mufla por espacio de 2 horas. Una vez cumplido el tiempo se saca la cápsula y se coloca en un desecador en atmósfera seca. Esperar media hora hasta que la cápsula se enfríe y pesarla este será el peso 4 (P<sub>4</sub>).

**2.2 Cálculos:**

$$\% \text{ Sólidos Volátiles Totales} = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} \times 100$$

Nota. El peso 3 y peso 1 son los obtenidos durante la determinación de los sólidos totales.

---

**Anexo 3. Determinación de coliformes fecales.****Indicadores Bacteriológicos.****3.1 Prueba para coliformes fecales (Medio A-1)**

La prueba para coliformes fecales permite diferenciar entre los coliformes de origen fecal (intestino de los animales de sangre caliente) y los procedentes de otras fuentes).

a). Medio líquido A-1

**3.2 Preparación:**

Lactosa	5.0 g
Triptona	20.0 g
Cloruro de sodio, NaCl	5.0 g
Salicina	0.5 g
Éter p-isooctifenil de polietilenglicol (Tritón x-100)	1.0 ml
Agua destilada	1 L

**3.3 Procedimiento:**

Calientese hasta la disolución de los ingredientes sólidos, añadase el Éter p-isooctifenil de polietilenglicol y ajústese el pH a  $6.9 \pm 0.1$ . Antes de esterilizar, se vierte la mezcla en tubos de fermentación con un vial invertido en cantidad de suficiente como para cubrir al menos parcialmente el vial después de la esterilización. Ciérrense los tubos con tapones de metal o de plástico resistente al calor. Esterilice pasándola por el autoclave a 121 grados centígrados durante 15 minutos. Consérvese a oscuras a temperatura ambiente durante no más de 7 días. No importa que se forme precipitado.

Se prepara el medio con la potencia necesaria para que, al añadir 10 ml de la muestra, la concentración de los ingredientes no sea inferior a la marcada en el medio estándar. Para muestras de 10 ml, se prepara medio doblemente concentrado.

Utilizar el factor de dilución 10, inoculando múltiples y submúltiplos de 1 ml de la muestra. En tubos las diluciones se preparan añadiendo 1 ml de la muestra al primer tubo 1:10, de éste se extrae 1 ml y se añade a otro tubo, dilución 1:100 y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada. Homogenizar cada dilución.

Para la prueba presuntiva se utilizan por lo menos tres series de tres tubos cada uno con Lauril Sulfato o caldo Lactosado con púrpura de bromocresol. Transferir 1 ml de las diluciones seleccionadas a las series de tubos correspondientes, iniciando de la mayor a la menor dilución e incubar los tubos a un baño de agua a  $44.5 \pm 0.2$  grados centígrados e incúbense durante otras  $21 \pm 2$  horas.

### **3.4 Interpretación**

La aparición de gas en cualquier cultivo en medio A-1 a las 24 horas o menos de incubación es una reacción positiva que indica la existencia de coliformes de origen fecal. Calcúlense el NMP a partir de los tubos positivos con medio A-1: La densidad de los coliformes fecales se expresa como NMP de coliformes por 100 ml y se obtiene mediante el código formado por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas, aplicado a la siguiente fórmula:

$$\text{NMP} = (\text{NMP de Tablas}) \times (10 / \text{mayor volumen indicado}).$$

---

**Anexo 4 Técnica para la determinación y cuantificación de huevos de helminto.****Objetivo.**

Determinar y cuantificar huevos de helmintos en lodos.

**4.1 Fundamentos.**

Utiliza la combinación de los principios del método difásico y del método de flotación, obteniendo un rendimiento de un 90 %, a partir de muestras artificiales contaminadas con huevos de helminto de *Acaris*

**4.2 Equipo:**

Centrífuga:	Con intervalos de operación de 1000 a 2500 revoluciones por minuto. Periodos de operación de 1 a 3 minutos Temperatura de operación 20 a 28 °C
Bomba de vacío:	Adaptada para control de velocidad de Succión 1/3 hp
Microscopio óptico	Con iluminación Koheler Aumentos de 10 a 100X; platina móvil; Sistema de microfotografía
Agitador de tubos	Automático Adaptable con control de velocidad
Parrilla eléctrica	Con agitación

---

Hidrómetro Con intervalo de medición de 1.1 a 1.4  
g/cm<sup>3</sup>

Temperatura de operación 0 a 4 °C

#### 4.3 Reactivos:

- Sulfato de zinc heptahidratado
- Acido sulfúrico
- Eter etílico
- Etanol
- Agua destilada
- Formaldehído

#### 4.4 Solución de sulfato zinc, gravedad específica de 1.3

- Fórmula
- Sulfato de zinc 800 g
- Agua destilada 1,000 ml

#### 4.5 Preparación:

Disolver 800g de sulfato de zinc en 1,000 ml de agua destilada y agitar en la parrilla eléctrica hasta homogenizar, medir la densidad con hidrómetro. Para lograr la densidad deseada agregar reactivo o agua según sea el caso.

#### 4.6 Solución alcohol-ácido:

- Fórmula
- Acido sulfúrico 0.1 N 650 ml
- Etanol 350 ml



---

**4.7 Preparación:**

Homogenizar 650 ml del ácido sulfúrico al 0.1 N, con 350 ml del etanol para obtener un litro de la solución alcohol-ácida. Almacenarla en recipiente hermético.

**4.7 Material:**

- Garrafrones de 8 litros
- Tamiz de 160  $\mu\text{m}$  (micras) de poro
- Probetas graduadas (1 litro y 50 ml)
- Gradillas para tubos de centrifuga de 50 ml
- Pipetas de 10 ml de plástico
- Aplicadores de madera
- Recipientes de plástico de 2 litros
- Guantes de plástico
- Vasos de precipitado de 1 litro
- Bulbo de goma
- Magneto
- Cámara de conteo Doncaster

**4.8 Procedimiento:**

- a) Tomar 4 gramos de sólidos totales de la muestra que va ser tratada.
- b) Pasar esta cantidad de muestra a una licuadora y agregar 1 litro de detergente Triton x y licuar durante 2 minutos.
- c) Una vez licuado la muestra se deposita en un recipiente de plástico de boca ancha y se deja sedimentar durante 3 horas o toda la noche.

- d) Se retira el sobrenadante con ayuda de una bomba al vacío y una pipeta de plástico, filtrar el sedimento en Tamiz de 160  $\mu\text{m}$
- e) Enjuagar el filtrado con 5 litros de agua y recuperar en el mismo recipiente.
- f) Sedimentar 3 horas o toda la noche
- g) Decantar sobrenadante y transferir el sedimento en tubos para centrifuga y centrifugar a 2000 rpm/ 3 min.
- h) Decantar el sobrenadante, resuspender la pastilla con 150 ml de sulfato zinc y centrifugar a 2000 rpm / 3 min.
- i) Recuperar el sobrenadante en un recipiente de 2L y añadir 1 litro de agua destilada, sedimentar 3 h o toda la noche.
- j) Decantar sobrenadante y transferir sedimento a 2 tubos de 50 ml, centrifugar a 2,500 rpm / 3 min.
- k) Decantar el sobrenadante y reagrupar sedimento en un solo tubo con 15 ml de solución ácido – alcohol y 10 ml de eter etílico (permitiendo que el gas escape al homogenizar)
- l) Centrifugar a 3,000 rpm / 3 min. Decantar el sobrenadante y dejar menos de 1 ml del líquido.
- m) Resuspender el sedimento en 4 ml de ácido sulfúrico 0.1 N e incubar a 26 °C durante cuatro semanas.
- n) Leer al microscopio con ayuda de disco Doncaster y reportar número de huevos.

---

**Anexo 5 Determinación de *Salmonella* spp.****Objetivo**

Llevar a cabo la cuantificación de *Salmonella* sp mediante la técnica de tubos múltiples o número mas probable (NMP) en todos residuales.

**5.1 Principio:**

A partir de un enriquecimiento con medios selectivos, que contienen sustancias inhibitoras , se favorece la multiplicación de *Salmonella* reconstituyendo a su vez la vitalidad de las células dañadas y, de igual forma, impidiendo el desarrollo de bacterias coliformes asociadas.

**5.2 Reactivos y Materiales:**

Reactivos:

- Caldo de Tetracionato
- Caldo de Selenito Cistina
- Yoduro de potasio
- Cristales de yodo
- Verde brillante
- Agar Sulfito de Bismuto
- Agar Xilosa Lisina Desoxicolato (XLD)
- Agar triple azúcar hierro (TSI)
- Agar Hierro Lisina (LIA)
- Cloruro de Magnesio
- Fosfato monopotásico
- Solución tampón de fosfatos (agua dilución)
- Solución de hidróxido de sodio 0.1 N

- Solución de hidróxido de sodio 1 N
- Alcohol etílico

### 5.3 Materiales:

- Matraces Erlenmeyer de vidrio, de 1 y 2 litros de capacidad
- Matraz aforado de 1 L
- Pipetas graduadas de vidrio de 1, 5 y 10 mL
- Cajas Petri estériles (100 x 15 mm)
- Tubos de ensayo (18 mm, 16 mm x 150 mm o de 12 mm x 120 mm)
- Tapones de acero inoxidable para tubos de ensayo (18 mm x 180 mm, 16 mm x 150 mm o 12 mm x 120 mm)
- Tubos de rosca (13 x 100 mm)
- Gradillas y canastillas de acero inoxidable
- Frascos de 1 L de capacidad con tapa de cierre hermética
- Frascos de 100 mL de capacidad con tapa de cierre hermético y autoclavables.
- Mechero de Bunsen, lámpara de alcohol o similar.
- Portapipeteros de acero inoxidable
- Barrás magnéticas
- Guantes de latex
- Tapabocas
- Bulbo de goma
- Espátula

### 5.4 Aparatos e instrumentos

- Parrilla con agitación
- Autoclave a una presión de 1.05 kg/cm<sup>2</sup>, y una temperatura de 121 °C

- Balanza granataria con intervalo de medición de 0.1 a 100 g
- Balanza analítica con intervalo de medición de 0.0001 a 10.00 g
- Estufa u horno con capacidad para operar a una temperatura de  $180 \pm 10$  °C
- Incubadora con capacidad para operar a una temperatura de  $37$  °C  $\pm$  0.2°C
- Incubadora con capacidad para operar a una temperatura de  $41$  °C  $\pm$  0.2 °C
- Baño de agua (con agitación) con capacidad para operar a una temperatura de  $44.5$  °C  $\pm$  0.2 °C.
- Potenciómetro con intervalo de medición de 6.5 a  $7.5 \pm 0.2$  pH
- Refrigerador con capacidad para operar entre  $2$  y  $4$  °C  $\pm$  0.5 °C.

## **5.5 Procedimiento:**

### **5.5.1 Enriquecimiento:**

Suspender 4 gramos de sólidos totales en 36 ml de caldo de tetrionato, obteniendo una dilución de  $10^{-1}$ . Mezclar durante 2 o 3 minutos, con la ayuda de una parrilla de agitación, a baja velocidad (800 rpm) hasta la completa disolución. Incubar durante  $22 \pm 2$  horas a  $37 \pm 0.2$  °C

### **5.5.2 Preparación de diluciones:**

Una vez transcurrido el tiempo de incubación, preparar las diluciones decimales seriadas transfiriendo 1 mL de caldo de tetrionato en 9 ml de agua de dilución ( $10^{-2}$ ) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.

En cada dilución se debe homogenizar perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba a

abajo con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables y utilizar una pipeta estéril diferente, para cada una de las diluciones decimales subsecuentes.

Adicionar por triplicado 1 mL de cada una de las diluciones preparadas en tubo conteniendo caldo selenito cistina correctamente etiquetados. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir, en la muestra, más de la tercera parte de la pipeta. Incubar durante  $24 \pm 2$  horas a  $41 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Realizar la observación del vire de coloración, considerando n color anaranjado intenso como positivo de la prueba correspondiente.

## 5.6 Interpretación de resultados

La densidad de *Salmonella* se expresa como NMP de coliformes por g de materia seca o ST, el cual se obtiene a partir de tablas ya establecidas, las cuales incluyen los límites de confianza al 95 % para cada una de las combinaciones de tres (o cinco) series de tubos positivos posibles.

Para su utilización se proporcionan códigos formados por tres algoritmos correspondientes al número al número de tubos con resultados positivos entres series consecutivas.

El NMP de *Salmonella* se obtienen a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el caldo de selenito cistina. Si se inoculan tres series de tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en tablas, se obtienen el código formado por el número de tubos

con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

$$\text{NMP} = (\text{NMP de tablas}) \times (10/\text{mayor volumen inoculado})$$

---

**Anexo 6 Resistencia específica a la filtración.****Objetivo**

Elegir entre 5 polímeros catiónicos que actúan a pHs ácidos, uno que favorezca mejor la deshidratación del lodo.

**6.1 Material:**

- Bomba de vacío
- Embudo Buchner
- Probeta graduada de 100 ml de plástico
- 2 vasos de precipitado de 250 ml
- 5 jeringas de 5 ml de plástico
- 5 filtros Whatman del No. 42

**6.2 Reactivos:**

- Polímero Ecofloc 6120
- Polímero Ecofloc 6520
- Polímero Ecofloc 5260
- Polímero Ecofloc 257



---

- Polímero Ecofloc 6260

### **6.3 Preparación del polímero:**

Preparar una solución de polímero a una concentración de 1 % que es la recomendada por el proveedor. Dejar agitando durante 24 h antes de la prueba.

### **6.4 Procedimiento:**

a) En un vaso de precipitado colocar 100 ml de la muestra (lodo acidificado). Posteriormente dosificar paulatinamente el polímero iniciando con 2 ml y agitar manualmente vertiendo el lodo del vaso, repitiendo esto para determinar si hay una coagulación del lodo. En caso negativo aumentar la dosis para repetir la evaluación o probar otro polímero disponible.

b) Posteriormente emplear el dispositivo conformado por un embudo Buchner de 9 cm , una probeta graduada de 100 ml, una conexión para aplicar vacío al embudo y una bomba de vacío. La presión de vacío que se aplica es de 0.5 bar, manteniéndola constante a lo largo del ensayo.

c) Se deposita los 100 ml de lodo con polímero en el embudo , con un filtro y se le aplica vacío. Se mide el volumen de filtrado que cae en la probeta con respecto al tiempo, la cual se marca con un lápiz cada diez segundos hasta llegar a 50 ml de filtrado.

### **6.5 Cálculos:**

Con la siguiente ecuación se obtiene la resistencia específica a la filtración:

$$r = \frac{2aPs^2}{nC}$$

**donde:**

r= Resistencia específica a la filtración (m/kg)

a= Pendiente de la curva t/v respecto de v, (s/m<sup>6</sup>)

t= Tiempo de filtrado

v= Volumen de filtrado obtenido en un periodo de tiempo t (m<sup>3</sup>)

P= Gradiente de presión o presión aplicada (Pa)

s= Área de la superficie filtrante (m<sup>2</sup>)

n= Viscosidad dinámica del filtrado (a temperatura ambiente, n se encuentra próxima a 1.1E<sup>-3</sup> Pa.S)

C= Masa de sólidos por unidad de volumen de filtrado (kg/m<sup>3</sup>)

Aplicando diversas dosis de polímeros y midiendo su resistencia específica a la filtración, es posible determinar la dosis recomendada de reactivo para llevar a cabo el acondicionamiento y posterior deshidratación de los lodos.