



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD
DE PRODUCIR BIOSOLIDOS QUE CUMPLAN CON
LA NORMATIVIDAD DE LA US-EPA A PARTIR DE
Lodos GENERADOS EN MEXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

B I O L O G O

P R E S E N T A:

LEOPOLDO SANABRIA OLMOS



DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
DIRECCION DE TESIS:
M. EN INGENIERIA QUIMICA
JOSE ANTONIO BARRIOS PEREZ

FACULTAD DE CIENCIAS
MEXICO. DICCION ESCOLAR

2001



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

MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: Estudio para determinar la factibilidad de producir biosólidos que cumplan con la normatividad de la US-EPA a partir de lodos generados en México. realizado por Leopoldo Sanabria Olmos

con número de cuenta 9455655-7 , pasante 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 M. en C. Ma. del Pilar Ortega Larrocea

Propietario M. en C. Ma. Guadalupe Barajas Guzmán

Suplente Biol. Abel Ibañez Huerta

Suplente M. en C. Mario Alejandro Gómez Ponce

FACULTAD DE CIENCIAS
U. N. A. M.

Consejo Departamental de Biología

Dra. Luisa A. Alba Lois



DEPARTAMENTO
DE BIOLOGIA

DEDICATORIAS

A mis padres

Graciela Olmos Celestino y Miguel Sanabria Navarrete por su comprensión y confianza que han tenido en mi y por compartir todos los momentos durante mi formación profesional.

A mis tíos

Agradezco a Lidia José Tapia y Quintín Olmos Celestino por su inestimable ayuda durante las diferentes etapas de éste trabajo.

A mis hermanas

Lidia, Madai y Sandra por ser mis mejores amigas, de ustedes tome el valor para concluir éste trabajo de tesis.

Agradezco a muchos otros colaboradores entre ellos a mis familiares y amigos que participaron en éste proyecto y que por ser tantos no puedo nombrarlos específicamente.

AGRADECIMIENTOS

Al M. en I. José Antonio Barrios Pérez por la asesoría brindada en éste trabajo de tesis al proporcionar sus valiosos comentarios de orden científico y técnico.

A la Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros por incluirme en su grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería Ambiental.

A la Facultad de Ciencias por la formación profesional.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por la oportunidad para llevar a cabo éste trabajo de tesis.

A mis sinodales por su disposición en la revisión de diversas secciones y contribuido en la preparación de ésta tesis.

Al Ing. Germán Salgado por su apoyo profesional durante mi instancia en el grupo Tratamiento Reúso.

ÍNDICE.

RESUMEN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS PARTICULARES	3
1. JUSTIFICACIÓN	4
2. LODOS RESIDUALES	6
2.1. TIPOS DE LODOS	6
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS	7
2.2.1. Químicas	7
2.2.2. Físicas	7
2.2.3. Biológicas	9
2.3. GENERACIÓN DE LODOS	10
2.4. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS	10
2.4.1. Método por composteo	10
2.4.2. Digestión aerobia	11
2.4.3. Digestión anaerobia	11
2.4.4. Deshidratación	11
2.4.5. Estabilización alcalina	12
2.5. OPCIONES DE DISPOSICIÓN	12
2.5.1. Incineración de lodos	12
2.5.2. Descargas al océano	13
2.5.3. Rellenos sanitarios	13
2.5.4. Producción de biosólidos	14
2.6. INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE DETECCIÓN EN LODOS RESIDUALES	14
2.7. ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTO	15
2.7.1. Estabilización ácida	16
2.7.2. Estabilización alcalina	18
3. MICROORGANISMOS PATÓGENOS PRESENTES EN LOS LODOS	19
3.1. INTERÉS DE LOS PATÓGENOS	19
3.2. VÍAS DE INFECCIÓN	19
3.3. PATÓGENOS DE INTERÉS COMÚN EN LOS LODOS	20
3.3.1. Bacterias	20
3.3.2. Virus	20
3.3.3. Protozoos	20
3.4. HELMINTOS	22
3.4.1. Platelminfos	22
3.4.2. Nematelmintos	29
3.5. SUPERVIVENCIA DE LOS PATÓGENOS EN EL AMBIENTE	34

4. NORMATIVIDAD	36
4.1. NORMAS EN MÉXICO	36
4.2. NORMAS DE LA US-EPA	37
4.2.1. Requerimiento de patógenos para obtener biosólidos clase A	38
4.2.2. Tecnologías para obtener biosólidos clase A	38
4.2.3. Requerimiento de patógenos para obtener biosólidos clase B	39
4.2.4. Sitios de restricción para biosólidos clase B	39
4.2.5. Tecnologías para obtener biosólidos clase B	40
4.2.6. Reducción de la atracción de organismos vectores	40
4.2.7. Clasificación de biosólidos con respecto al contenido de metales	41
5. METODOLOGÍA	44
5.1. MUESTREO	44
5.2. ESTABILIZACIÓN ALCALINA	45
5.2.1. Acondicionamiento y deshidratación de los lodos	45
5.2.2. Estabilización alcalina de los lodos	45
5.3. ESTABILIZACIÓN ÁCIDA	46
5.4. MÉTODOS ANALÍTICOS	47
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
6.1. ESTABILIZACIÓN ALCALINA	49
6.1.1. Coliformes fecales	49
6.1.2. Huevos de helmintos	50
6.1.3. Metales pesados en lodo estabilizado	50
6.2. ESTABILIZACIÓN ÁCIDA	51
6.2.1. Estabilización con ácido sulfúrico	51
6.2.2. Estabilización con ácido perclórico	55
6.2.3. Estabilización con ácido peracético	58
6.2.4. Estabilización con ácido acético	61
6.2.5. Determinación general de las eficiencias de los ácidos	64
6.2.6. Evaluación del tipo de ácido recomendable para pruebas futuras de estabilización.	65
7. CONCLUSIONES	67
8. RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS	69
ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN	72

RESUMEN.

En la actualidad la mayoría de los procesos que se aplican en el tratamiento de agua residual municipal producen residuos sólidos o semi-sólidos que son denominados lodos. Debido a las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lodos residuales, se han implementado diferentes métodos para tratarlos desde hace varios años en Estados Unidos, Canadá, y algunos países de Europa y Asia. Estos métodos tienen el objeto de disminuir el volumen de material que será tratado mediante la extracción del agua en exceso y por otro lado la reducción de los patógenos en el contenido que ocasionan impactos negativos al ambiente y ponen en riesgo la salud humana.

En el capítulo 2 se realiza una descripción general de los lodos residuales, desde sus características hasta las opciones de disposición. El término biosólido se usa para denominar a los lodos que se pueden aprovechar en suelos agrícolas con niveles casi exentos de patógenos y que además mantienen los nutrimentos tanto orgánicos como inorgánicos.

Sin embargo en años recientes, en nuestro país, los lodos producidos que han sido analizados han presentado un alto contenido de patógenos causantes de diversas enfermedades al hombre. Razón por la cual en el capítulo 3 se presenta un resumen de los patógenos más comunes, con mayor énfasis en los helmintos debido a que en sus formas de huevo son muy resistentes a los procesos de tratamientos de lodos.

Actualmente, en México, los lodos generados por las plantas tratadoras de aguas residuales son considerados como residuos peligrosos, y su disposición esta sujeta a las regulaciones del Instituto Nacional de Ecología (INE). Las investigaciones actuales que se están realizando por diferentes instituciones en México, sobre la estabilización de lodos, permitirán proponer un nuevo sistema de normas acerca del tratamiento y reúso, empleando como base la reglamentación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency), conocida con las siglas US-EPA. Dada la importancia para establecer los límites de concentración de patógenos y por otro lado de metales pesados en los lodos generados en nuestro país, se realizó un resumen de las normas actuales tanto de mexicanas como de la US-EPA en el capítulo 4.

En México, el problema principal para poder clasificar a los lodos como biosólidos lo constituye el elevado contenido de bacterias y huevos de helmintos, por lo que es necesario desarrollar tecnologías que reduzcan y en el mejor de los casos eliminen por completo el contenido de estos microorganismos. En este trabajo se aplicó la estabilización alcalina y la estabilización ácida sobre lodos fisicoquímicos procedentes de una planta de tratamiento de agua residual del Distrito Federal, México. Los métodos analíticos se enfocaron principalmente en la determinación de los coliformes fecales y huevos de helmintos en lodo crudo y su

eliminación al aplicar las estabilizaciones (los tipos de estabilización se realizaron por separado, como se indica en el capítulo 5). Solamente en la estabilización alcalina se determinó la concentración de metales pesados.

En la estabilización alcalina se caracterizó al lodo crudo encontrándose que el contenido promedio de coliformes fecales es de 7.3×10^6 NMP/g de sólidos totales y el de huevos de helmintos de 127 por gramo de sólidos totales, cantidad muy por encima de los encontrados en otros países. Al estabilizar con cal este lodo se logró obtener Biosólidos clase B. Estos lodos se almacenaron por seis meses, tiempo en que se realizó otro análisis alcanzando la clasificación de biosólidos clase A. La concentración de metales pesados totales resultó muy por debajo de los límites requeridos para clasificar a los lodos como biosólidos de acuerdo con la US-EPA.

En la estabilización ácida se utilizaron cuatro tipos de ácidos con seis dosis aplicadas por cada uno (acético, peracético, perclórico y sulfúrico). Este proceso de estabilización aún no está regulado por lo que este estudio sirvió para justificar su empleo. En promedio los lodos crudos utilizados para estas pruebas contenían de 9.1×10^5 a 4.8×10^8 NMP/ g de sólidos totales y de 61.5 a 117.0 huevos de helmintos por gramo de sólidos totales. Los resultados indican que los ácidos orgánicos fueron los más eficientes, logrando inactivar los huevos de helmintos en un promedio de 88 % con peracético y 90 % con acético, siendo el ácido peracético más efectivo en la eliminación de coliformes fecales (menos de 3 NMP/ g de sólidos totales). Aún cuando no se alcanzó la clasificación para biosólidos clase A, sí se logró para la clase B. También estos dos ácidos se consideraron mejores debido a su eficiencia global.

Se llegó a la conclusión que la estabilización alcalina es altamente eficiente para estos lodos y que con la estabilización ácida, en especial con los ácidos orgánicos, se logra obtener biosólidos clase B. Sin embargo en la estabilización ácida haría falta realizar la concentración de metales pesados y, a través del tiempo, el recrecimiento de coliformes fecales e inactivación de huevos de helmintos.

OBJETIVO GENERAL.

Determinar la aplicabilidad de los procesos de estabilización ácida y alcalina a lodos municipales generados en una planta de tratamiento de aguas residuales del Distrito Federal y evaluar si cumplen con los requisitos de normatividad de la US-EPA para clasificarlos como Biosólidos.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Evaluar las eficiencias de las técnicas de estabilización ácida y alcalina en la destrucción de microorganismos patógenos (huevos de helmintos y coliformes fecales).
- Determinar si posterior a la estabilización, el nivel de éstos patógenos en los biosólidos producidos cumplen con las normas de la US-EPA.
- Analizar la aplicabilidad de las normas de la US-EPA en el tratamiento de algunos lodos residuales producidos en México y su conversión a biosólidos.
- Determinar si los biosólidos producidos son factibles para su disposición en suelos.

1. JUSTIFICACIÓN.

Dada la importancia y responsabilidad que debemos tener hacia el cuidado del ambiente, el presente trabajo evalúa la calidad de una de las fuentes de lodos residuales generados en México para determinar si es posible estabilizarlos y cumplir con las normas de calidad internacionales como las de la US-EPA. Actualmente en nuestro país no existe un tratamiento adecuado de los lodos lo que da como resultado la transmisión de organismos patógenos y sustancias tóxicas que causan enfermedades tanto a animales como al hombre cuando son manipulados. Además los factores que limitan el manejo de lodos residuales son la falta de una reglamentación que regule su descarga al ambiente, así como la escasa experiencia y conocimientos prácticos para favorecer su reúso.

El problema más grave que se presenta se debe al alto grado de contacto de los trabajadores agrícolas y en general de toda la población que habita cerca de las zonas potenciales de disposición. Por ejemplo los trabajos hechos por el Instituto Nacional de Salud Pública y el Instituto Nacional de la Nutrición desde el año de 1988, referentes a las zonas de riego con aguas residuales sin tratar, demuestran que la población del Valle del Mezquital (aproximadamente 400 000 personas) presenta infecciones parasitarias con índices de 12 a 14 veces mayores que en otras zonas (Cifuentes *et al.*, 1992). Es de suponer que el alto grado de enfermedades diarreicas en la zona es un factor de diseminación hacia fuera de ella, debido al flujo de personas y de productos agropecuarios.

El conocer y cuantificar la presencia de microorganismos patógenos característicos de los lodos, aspecto muy poco estudiado incluso a nivel mundial, será de gran utilidad para asegurar su manejo y reúso. La disposición del lodo residual sobre terrenos es uno de los métodos para eliminar la acumulación de desechos, enriqueciendo al mismo tiempo la fertilidad del suelo por la gran cantidad de materia orgánica y nutrimentos adicionados al mismo. Sin embargo, cada disposición puede degradar los edafocistemas debido a la presencia potencial de sustancias tóxicas, como por ejemplo metales pesados. Diversas características del suelo como su textura, contenido de materia orgánica y arcilla, capacidad en el intercambio de cationes, pH y el contenido de carbonato de calcio, permiten amortiguar los efectos tóxicos de metales pesados vertidos. Además de influir en los microorganismos del suelo y sus actividades, tales como el reciclaje de nutrimentos a través de su mineralización (Dar, 1997).

El estudio microbiológico para evaluar la eliminación de patógenos en este trabajo se refiere al tratamiento de lodos residuales sometidos a condiciones desfavorables para los mismos (pH básico y ácido), lo cual permitirá producir biosólidos que son lodos que se pueden disponer en suelos agrícolas. La información generada contribuirá al desarrollo de la normatividad nacional correspondiente que es el aspecto práctico del tratamiento de lodos.

En México no existe aún pleno acuerdo sobre los beneficios que podrían aportarse sobre el uso y disposición de biosólidos concernientes a la protección del ambiente. Sin embargo varios países del mundo cuentan con la experiencia en tratar este problema desde hace varios años. Por esta razón se tomó como base la normatividad de la US-EPA, que es un reglamento completo para el uso y disposición de biosólidos, desarrollado durante más de 20 años.

Sin embargo, debido a las características diferentes de los lodos generados en México de a de los de Estados Unidos, principalmente en el aspecto microbiológico, en este estudio se evaluó la factibilidad de poder cumplir con los límites establecidos por esta norma para los lodos generados en nuestro país. Para ello se emplearon dos procesos de estabilización de lodos (ácida y alcalina). La información generada podrá servir de referencia en el establecimiento de políticas acordes con nuestras necesidades y con las tendencias mundiales de protección al ambiente y salud humana.

2. LODOS RESIDUALES.

2.1. TIPOS DE LODOS.

Los lodos separados de las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales suelen tener un contenido en sólidos suspendidos variable entre 0.25 y el 12 % en peso, dependiendo del tratamiento. Los problemas derivados del manejo de los lodos son complejos debido a que están formados, principalmente, por materia orgánica bajo forma de heces fecales.

Las características del lodo varían en función del origen de los sólidos y el tiempo de obtenido el lodo. En la tabla 2.1 se resumen algunas características de los lodos.

Tabla 2.1. Características de los lodos producidos por el tratamiento de agua residual (Metcalf y Eddy, 1991).

TIPO DE LODO	DESCRIPCIÓN
PRIMARIO	El lodo de los tanques de decantación es generalmente gris y grasiento y en la mayoría de los casos produce un olor extremadamente molesto. Puede digerirse fácilmente si se adoptan condiciones adecuadas de funcionamiento.
DE PRECIPITACIÓN QUÍMICA	El lodo procedente de los tanques de precipitación química con sales metálicas es generalmente de color oscuro, aunque su superficie puede ser roja si contiene mucho hierro. El lodo con cal es café grisáceo. El olor del lodo químico puede ser molesto, pero no tanto como el de lodo primario. Aunque es algo grasiento, los hidratos de hierro o aluminio contenidos en él lo hacen gelatinoso. Si se deja suficiente tiempo en el tanque se produce su descomposición que produce gas y aumenta su densidad.
DE FILTROS PERCOLADORES	Material humificado de los filtros percoladores que es pardusco, floculento y relativamente inodoro cuando está fresco. Generalmente, la descomposición se produce más lentamente que otros lodos crudos pero cuando contiene muchos gusanos pueden convertirlo rápidamente en molesto. Se digiere fácilmente.
COMPOSTADO	El lodo compostado suele ser marrón oscuro o negro, pero el color puede variar dependiendo de los materiales de soporte. El olor del lodo bien compostado no es molesto.
ACTIVADO	El lodo activado tiene una apariencia floculenta de color marrón. Si el color es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico. Si el color es más claro de lo normal, puede haber estado aireado insuficientemente y los sólidos tienen tendencia a sedimentar lentamente. El lodo en buenas condiciones tiene un olor característico a tierra que no es molesto. Tiende a convertirse en séptico con bastante rapidez y luego adquiere un olor bastante desagradable de putrefacción.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.

2.2.1. Químicas.

Las características químicas de un lodo definen las necesidades de tratamiento, disposición final y su posible utilización agronómica. Para que la aplicación de lodos sea posible se deben someter a todos los análisis necesarios para identificar sus componentes. 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 y por partición entre la fase sólida y la líquida durante el proceso de separación de los sólidos. Se distinguen cinco grupos: metales y cianuro, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos semivolátiles, plaguicidas y bifenilos policlorados y otros (EPA, 1994).

Los compuestos orgánicos son difíciles de degradar o son insolubles tales como la celulosa, algunos polipéptidos, grasas e hidrocarburos policlorados. Los compuestos inorgánicos de los lodos incluyen potasio, magnesio, manganeso y calcio, además de elementos traza como hierro, cobalto, cobre, zinc, molibdeno y otros metales pesados como cadmio y níquel. También contienen macronutrientes (nitrógeno y fósforo) en forma orgánica o mineral. Todos estos pueden favorecer el enriquecimiento de los suelos y promover el desarrollo de las plantas. Muchos de estos compuestos químicos son característicos para determinar la disposición final de un lodo procesado.

2.2.1.1. Olor.

Generalmente los compuestos que causan el olor desagradable del lodo son: sulfuro de hidrógeno, indoles, mercaptanos, sulfuros orgánicos, ácidos grasos volátiles, aminas y amonio. Sin embargo la detección, por pruebas químicas específicas, de alguno de estos compuestos no necesariamente significa que el lodo es inestable, pero sí oloroso. Contrario a esto, su ausencia no podría garantizar que el lodo cause olor molesto. La estabilización química tiene ventajas en el control del olor sobre los tratamientos biológicos en términos de costo operacional de la planta, simplicidad de la operación y efectos inmediatos (Bruce y Fisher 1984).

Para cuantificar los distintos olores se utiliza un olfatómetro dinámico que permite efectuar mediciones de campo. Antes de aplicar algún biosólido al suelo, este debe ser tratado de alguna manera para minimizar el potencial de olor.

2.2.2. Físicas.

Dentro de las características físicas de los lodos se pueden mencionar el color, la concentración de sólidos, el tamaño de partícula y las propiedades de flujo principalmente.

2.2.2.1. Concentración de sólidos.

Es la relación entre el contenido de sólidos y el volumen del lodo:

$$C_1 = \text{mg de sólidos secos/ L de lodo} = \text{mg/L}$$

Cuando las concentraciones son muy elevadas se puede expresar la relación del peso de sólidos y el peso de la muestra:

$$C_2 = \text{g de sólidos secos/g lodo} = \text{g/g}$$

Este número multiplicado por 100 se denomina porcentaje de sólidos y es la forma más usual de expresar la concentración (Vesilind *et al.*, 1986).

2.2.2.2. Tamaño de partícula.

El tamaño de partícula es un factor que determina directamente la facilidad de eliminar el agua de un lodo. En general, si la mayor parte de las partículas tienen un tamaño entre 1 y 10 micras, el secado es más difícil. A su vez, el tamaño de partícula influye directamente sobre la facilidad con la que se sedimentan los sólidos. Por ejemplo el lodo primario presenta una naturaleza más granular que el lodo secundario y es por lo general más concentrado. Por su parte, el lodo secundario al estar conformado principalmente por biomasa presenta sólidos más ligeros y de una naturaleza menos granular al ser conglomerados de microorganismos.

2.2.2.3. Propiedades de fluido.

Las propiedades de flujo de los lodos son causadas por el contenido de material orgánico coloidal y sólidos suspendidos contenidos en el mismo. Esto dificulta su manejo como un líquido, sobre todo en plantas de tratamiento en las que se requiere el bombeo de los lodos en su recorrido. Por esto, una herramienta fundamental para el estudio de los lodos es su caracterización como fluido. Colín (1983) distingue 4 categorías:

- Lodos líquidos.- Fluyen por influencia de la fuerza de gravedad.
- Lodos plásticos.- El lodo está tan concentrado que no fluye libremente y se deforma constantemente al ejercer una presión. Estos lodos pueden ser bombeados.
- Lodos sólidos susceptibles de ser compactados.- Es lodo demasiado espeso que no se puede bombear. Su volumen aun decrece a medida que se secan.
- Lodos con volumen constante.- Es el lodo que se seca sin mayor reducción de volumen.

Los lodos se consideran fluidos no newtonianos y pseudoplásticos. La primera propiedad se refiere a que la caída de presión bajo condiciones laminares no es proporcional al flujo, por lo que la viscosidad no es constante, es decir, son heterogéneos. La consistencia es función del esfuerzo cortante, de la temperatura y de la presión del líquido. La segunda característica se refiere a que las propiedades del líquido dependen del esfuerzo cortante y del tiempo.

2.2.3. Biológicas.

En los lodos se concentran una gran cantidad de microorganismos: bacterias, virus, hongos, protozoarios, rotíferos y nemátodos entre otros. Sin embargo, dentro de estos organismos existen diversas especies patógenas que provocan enfermedades al hombre. Estas especies y enfermedades se mencionan en la Tabla 2.2. Estos organismos son responsables de un gran número de muertes al año en países con escasos recursos sanitarios, especialmente en zonas tropicales (Ayres, 1996, Feachem *et al.*, 1983). En el capítulo 3 se mencionan con más detalle los organismos patógenos más comunes encontrados en los lodos.

Tabla 2.2. Principales patógenos de importancia médica en lodos de agua residual (EPA, 1994)

ORGANISMO	ENFERMEDADES / SINTOMAS
BACTERIAS	
<i>Salmonella</i> sp.	Salmonellosis, fiebre tifoidea
<i>Shigella</i> sp.	Disentería bacilar
<i>Yersinia</i> sp.	Gastroenteritis aguda, (diarrea y dolor abdominal)
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis
ENTEROVIRUS	
Virus hepatitis A	Hepatitis
Virus tipo norwalk	Gastroenteritis con severa diarrea, fiebre
Rotavirus	Gastroenteritis con diarrea aguda
Poliovirus	Poliomielitis
Coxsackievirus	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre
Echovirus	Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebre, gastroenteritis.
Reovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
Calicivirus	Gastroenteritis epidémica
PROTOZOOS	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enteritis aguda, amebiasis
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (diarrea, pérdida de peso, calambre abdominal)
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis

ORGANISMO	ENFERMEDADES / SINTOMAS
HELMINTOS	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Disturbios nutricionales y digestivos, dolor abdominal, vómito, flojera
<i>Ascaris suum</i>	Vomito, dolor de pecho
<i>Trichuris trichura</i>	Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso
<i>Toxocara canis</i>	Fiebre, dolor muscular, síntomas neurológicos
<i>Taenia saginata</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal
<i>Taenia solium</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, disturbio abdominal
<i>Necator americanus</i>	Dolor abdominal
<i>Hymenolepis nana</i>	Teniasis, enfermedades intestinales

2.3. GENERACIÓN DE LODOS.

El volumen de los lodos residuales varía en función del proceso de tratamiento que se aplique. En general, las cantidades de lodo generadas son mayores en procesos que emplean reactivos químicos como sales de aluminio y hierro, así como cal. En la tabla 2.3 se aportan datos acerca de la producción de lodos en diferentes procesos y operaciones de tratamiento.

Tabla 2.3. Generación de lodos por diversos procesos de tratamiento de aguas residuales (adaptada de Metcalf y Eddy, 1991 y Jiménez *et al.*, 1998).

PROCESO	GENERACIÓN DE LODOS, Kg ST/10 ³ m ³	
	INTERVALO	VALOR TÍPICO
Sedimentación primaria	108-168	150
Tratamiento primario avanzado (TPA)	185-315	*
Lodos activados	72-96	84
Filtro percolador	60-96	72
Aeración extendida	84-121	96
Remoción de fósforo mediante la adición de cal		
Bajas dosis	241-398	301
Altas dosis	602-1325	795

ST: sólidos totales

*depende de la calidad del agua.

2.4. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS.

Actualmente se emplean una variedad de procesos para el tratamiento de lodos residuales municipales. A continuación se presenta una descripción de los procesos más empleados, según Metcalf y Eddy (1991).

2.4.1. Método por composteo.

En el composteo la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta

alcanzar un producto final estable. El lodo compostado adecuadamente es un material tipo humus, higiénico y libre de características desagradables. Aproximadamente el 20 ó 30 % de los sólidos volátiles se convierten a dióxido de carbono y agua. Conforme se produce la descomposición de la materia orgánica contenida en el lodo, la composta se calienta hasta alcanzar temperaturas situadas en el intervalo de pasteurización (50 a 70 °C), lo cual permite la destrucción de organismos patógenos entéricos y se produce un secado más estable, con menos olor que un lodo original.

2.4.2. Digestión aerobia.

En este proceso el lodo es oxidado bioquímicamente por bacterias en un reactor. El suministro de oxígeno se realiza por mezclado o por inyección de aire a presión. Los sólidos volátiles contenidos son transformados a CO₂, agua y nitratos. Estudios realizados en plantas piloto de gran tamaño han permitido constatar que la digestión aerobia termofílica se puede emplear para conseguir rendimientos de eliminación de hasta el 70 % de la materia orgánica biodegradable con tiempos de retención muy cortos 3 a 4 días.

El tiempo medio de residencia celular en el lodo es de 10 días a 55 °C hasta 60 °C, si la temperatura excede los 55 °C los organismos patógenos son reducidos hasta obtener biosólidos clase A (EPA, 1994).

2.4.3. Digestión anaerobia.

El proceso de digestión anaerobia depende de la acción de un número de microorganismos que trabajan en un medio libre de oxígeno, generalmente clasificados dentro de los formadores de ácido ó formadores de metano. Estas reacciones se llevan a cabo en un tanque cerrado que puede o no ser calentado.

Los microorganismos formadores de metano, son un grupo diverso de anaerobios estrictos, extremadamente sensitivos a cambios en el ambiente, por lo que su estabilidad es uno de los principales intereses en tratamiento de aguas y lodos residuales. Para el crecimiento de las bacterias formadoras de metano se necesitan ciertos rangos de temperatura, alcalinidad y pH. El pH de un digestor anaerobio debe permanecer cerca de 6.0 y para que ocurra una digestión adecuada debe ser controlado. La temperatura es el mayor criterio, ya que hay dos grupos de bacterias las cuales se desarrollan en rangos de temperatura estrechos; de 27 hasta 43 °C pertenecientes al rango mesofílico y de 45 hasta 65 °C que pertenecen al rango termofílico.

2.4.4. Deshidratación.

La deshidratación es una operación utilizada para reducir el contenido de humedad del lodo. Los dispositivos de deshidratación utilizan varias técnicas para la eliminación de la humedad. Algunas se basan en la evaporación y percolación naturales, ya que consumen menos energía aunque requieren mayores

extensiones de terreno y más trabajo de operación, principalmente para levantar la masa de lodos. Entre estos procesos se encuentran los lechos de secado y las lagunas de lodos. Los aparatos de deshidratación mecánica utilizan medios físicos, asistidos mecánicamente para acelerar el proceso. Los medios físicos utilizados incluyen la filtración, el prensado, la acción capilar, la extracción por vacío y la separación y compactación por centrifugación.

2.4.5. Estabilización alcalina.

La estabilización alcalina es un proceso simple que representa un bajo costo y simplicidad de operación lo que le confiere ventajas sobre otros sistemas de estabilización. Adicionalmente, disminuye la concentración de microorganismos patógenos considerablemente y el producto es generalmente empleado como fertilizante parcial, mejorador de suelos o cubierta de rellenos sanitarios.

La literatura contiene muchas referencias, citadas desde hace más de 50 años, concernientes a la efectividad de la cal para reducir los microorganismos patógenos en agua natural y agua residual. Información más reciente se refiere al poder bactericida de la cal en los lodos.

La estabilización alcalina de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales de tipo municipal es uno de los métodos más antiguos y simples para la eliminación de organismos patógenos. En Estados Unidos la estabilización con cal había sido usada esporádicamente hasta antes de 1970; sin embargo, desde principios de esta década ha tenido un continuo desarrollo y ha sido ampliamente aceptada como un método para la estabilización de los lodos.

2.5. OPCIONES DE DISPOSICIÓN.

El método de disposición que se aplique a un determinado lodo estará basado en un estudio preliminar que demuestre la viabilidad de dicho método así como su superioridad sobre los métodos para disponer el lodo de una manera económica y segura. El interés en la aplicación del lodo al suelo ha aumentado en los últimos años como consecuencia de la menor disponibilidad y viabilidad de otras opciones de gestión de los lodos, tales como la incineración y la evacuación al mar por el impacto ambiental que esto genera. Por ello, los métodos que se recomiendan para ser aplicados en nuestro país son la producción de biosólidos y la disposición en rellenos sanitarios, siendo la primera la mejor alternativa ya que existe una gran disponibilidad de terreno para aplicarlos obteniendo al mismo tiempo un beneficio adicional a la disposición.

2.5.1. Incineración de lodos.

La incineración incluye la deshidratación del lodo para evaporar el agua, seguida de la combustión para oxidar completamente la materia volátil. La deshidratación ocurre a una temperatura aproximada de 350 °C y la incineración es sostenida en un rango de 650 a 750 °C. Para que se mantenga una combustión auto-sostenida se requiere que el lodo contenga al menos 35 % de sólidos

orgánicos (Viessman y Hammer, 1993). Sin embargo, si el lodo contiene menos del 15 % de sólidos, no se considera apto para la incineración (Kreith, 1994).

Las principales ventajas de la incineración de lodos son, entre otras:

- Máxima reducción de volumen, disminuyendo las necesidades de evacuación
- Destrucción de patógenos y compuestos tóxicos (las cenizas residuales son por lo general estériles e inertes).
- La incineración se puede llevar a cabo en el sitio sin necesidad de transportar los lodos grandes distancias.

Asimismo, la incineración de lodos presenta algunas desventajas tales como:

- El costo de inversión es muy alto.
- Se requiere de personal capacitado.
- La evacuación de los residuos que pueden ser clasificados como peligrosos, puede ser complicada y costosa.
- Se requiere combustible para iniciar el proceso y su mantenimiento cuando las características de los lodos no son óptimas.

2.5.2. Descargas al océano.

La evacuación final de lodo es llevada a cabo, principalmente, en las ciudades costeras. Actualmente, esta práctica está cayendo en desuso debido a la degradación de las aguas recreativas, al incremento en la cantidad de sólidos en el fondo del mar y al potencial tóxico para la vida acuática. Los contaminantes relacionados con la toxicidad son: los metales pesados, los patógenos y los contaminantes orgánicos.

2.5.3. Rellenos sanitarios.

Un relleno sanitario es un lugar en el que los residuos sólidos son depositados en un sitio adecuado y cubiertos por lo general diariamente con suelo o materiales similares. Para reducir el volumen a transportar y para controlar la generación de lixiviados en los rellenos sanitarios, suele ser necesario deshidratar el lodo. En muchos casos, la concentración de sólidos es un factor importante en la determinación de la aptitud de un lodo para su evacuación. En un relleno sanitario controlado ideal, los sólidos se depositan en una zona determinada, se compactan *in situ* mediante un tractor o un rodillo y se cubren con una capa de 30 cm de suelo. Las condiciones insalubres, tales como olores y moscas, se pueden reducir cubriendo diariamente los sólidos depositados (Metcalf y Eddy, 1991).

La selección del sitio de disposición de lodos debe considerar aspectos tales como: zonas ambientales sensibles, protección de las aguas subterráneas, vectores transportadores de enfermedades, la ubicación con respecto a las áreas pobladas y aspectos de seguridad relacionados con la presencia de materiales tóxicos. Las características del suelo deben ser altamente amortiguadoras para

que el biogás, los lixiviados y los escurrimientos no causen problemas de contaminación, olores o riesgos a la salud.

2.5.4. Producción de biosólidos.

Como fertilizantes, los biosólidos mejoran la nutrición de las plantas añadiendo nitrógeno, fósforo y otros nutrimentos al suelo. Esto permite la reducción del uso de fertilizantes sintéticos aplicados ya que los nutrimentos se liberan más lentamente conforme las necesidades de las plantas. Los elementos traza son inmovilizados en el suelo y los nutrimentos son tomados en un mayor tiempo por las plantas y convertidos en biomasa. Los biosólidos actúan como acondicionadores del suelo facilitando el transporte de nutrimentos e incrementando la retención del agua. Como mejoradores de la textura de suelos muy compactos, éstos actúan incrementando la porosidad y en suelos arenosos, la retención de agua. Asimismo, reducen la erosión de los suelos.

La calidad de los biosólidos debe ser garantizada mediante un programa de monitoreo regular que incluya el análisis de nutrimentos, metales pesados, microorganismos indicadores, contenido de sólidos, compuestos orgánicos, pH, entre otros. Algunos sitios de disposición para biosólidos son:

- Terrenos agrícolas (pastizales y cultivo)
- Áreas de remediación (campos minados, sitios de construcción)
- Invernaderos
- Bosques
- Cementerios
- Carreteras
- Aeropuertos
- Zonas recreativas (parques, campos de golf)
- Jardines caseros

En la US-EPA se establecen los criterios que deberán seguirse para el uso final o disposición de biosólidos en el ambiente cuando éstos son depositados para acondicionar suelos o fertilizar cultivos, como método de disposición final o en el caso de que sean incinerados. Esta regulación ha sido considerada como una de las más completas a nivel mundial y en la actualidad, aún cuando no se ha impuesto dicha normatividad en nuestro país, sirve de referencia a la producción y disposición de biosólidos. En el capítulo 4 se realiza un resumen de esta regulación.

2.6. INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE DETECCIÓN EN LODOS RESIDUALES.

Los indicadores microbiológicos son los organismos representantes del análisis microbiológico de los lodos residuales. Se requiere de un monitoreo directo de los 3 tipos más comunes de patógenos: Coliformes fecales, virus y huevos de helmintos. Para huevos de helmintos viables, una prueba es el

monitoreo de huevos del género *Ascaris* que sirve como indicador para varios géneros de helmintos entre estos: *Toxocara*, *Trichuris* e *Hymenolepis*. Para virus una prueba representativa es el monitoreo simultaneo de varias especies de enterovirus. Sin embargo, las técnicas de detección de virus son de alta complejidad por lo cual no se aplican comúnmente.

Los coliformes fecales son bacilos cortos, gram-negativos, no esporulados, aerobios y anaerobios facultativos con la capacidad de fermentar la lactosa con producción de ácido y gas en 24 a 48 horas a 44.5 °C (termotolerantes). La técnica empleada para cuantificar los coliformes fecales (Anexo A.2), permite detectar en forma confiable a *Escherichia coli*, bacteria considerada como indicador de contaminación de tipo fecal (Lavoie, 1983).

Cuando el monitoreo para bacterias patógenas es directo es importante hacer el análisis para *Salmonella* sp. que es una bacteria de gran interés en el lodo residual.

Para que un indicador microbiológico de contaminación sea considerado como óptimo, deberá contar con las siguientes características (De León *et al.*, 1988).

- Su ausencia debe ser una evidencia de la buena calidad microbiológica
- Su densidad debe ser una medida proporcional aproximada de la contaminación por desechos fecales.
- Si existe la presencia de organismos patógenos de origen intestinal, el indicador debe existir en mayor número para facilitar su detección.
- Debe persistir en más de un medio que otros patógenos de origen intestinal.
- Debe poder determinarse cuantitativamente por los procedimientos rutinarios de laboratorio.
- Debe identificar fuentes de contaminación.

2.7. ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTO.

Se ha determinado que los lodos fisicoquímicos (tratamiento primario avanzado) generados en nuestro país contienen aproximadamente 3 y 6 órdenes de magnitud mayores de coliformes fecales y salmonelas que los lodos primarios en otros países (Jiménez *et al.*, 1997; Lue-Hing, 1992). Asimismo, el contenido de huevos de helmintos (promedio en huevos/ g de masa seca) es de 59 en lodos primarios fisicoquímicos provenientes del agua residual de la Ciudad de México. En tanto en lodos de plantas de tratamiento de Estados Unidos es <1 (Jiménez *et al.*, 1997; Lue-Hing, 1992). Estos valores ratifican la necesidad de estudiar la remoción de microorganismos patógenos por medio de procesos de estabilización convencionales y no-convencionales a nivel local.

Entre las opciones de estabilización se encuentran principalmente dos: la estabilización alcalina y la estabilización ácida. La estabilización alcalina ha

demostrado su efectividad en México en la inactivación de microorganismos patógenos en estudios realizados por Jiménez *et al.* (1997). Sin embargo, queda mucho por estudiar de la estabilización ácida para determinar su factibilidad en la destrucción de microorganismos. A continuación se presenta una revisión del estado de dichas tecnologías.

2.7.1. Estabilización ácida.

2.7.1.1. Estabilización con ácido sulfúrico.

En 1971 Roth y Keenan, estudiaron el efecto de ambientes ácidos en la viabilidad de *E. coli* evaluando el tiempo necesario para destruir el 90 % de la población bacteriana. Se emplearon ácidos acético, láctico, málico, cítrico, tartárico, clorhídrico y sulfúrico. Los resultados indicaron que el ácido sulfúrico fue el más eficiente seguido del ácido clorhídrico en un pH de 3.0 y 3.2 unidades respectivamente.

En 1984, Lynch *et al.*, patentaron un proceso de estabilización de lodos mediante la adición de ácido sulfúrico, cloro, ozono, aire y cal. El proceso se lleva a cabo en dos reactores presurizados: el primero recibe el lodo y lo mezcla con el ácido y el cloro y le inyecta aire para oxidar la materia orgánica; el segundo mezcla el lodo con ozono, aire y cal y lo mantiene cierto tiempo de retención. Adicionalmente existe un proceso de deshidratado intermedio en donde el agua removida es recirculada al primer reactor y los sólidos son enviados al segundo reactor. Los autores reportan que el lodo producido puede ser empleado en rellenos sanitarios o puede ser incinerado como fuente de energía.

Recientemente Meunier *et al.*, (1996) estudiaron la reducción de sólidos totales y volátiles en lodos residuales mediante la acidificación de los mismos con ácido sulfúrico a un pH de 2 a 2.5. Se demostró que la aplicación del ácido provoca una rápida hidrólisis y mineralización de la biomasa con una consiguiente reducción de los sólidos del lodo. Las reducciones alcanzadas fueron de hasta 43.3 % y 54.4 % para sólidos totales y volátiles respectivamente. La dosis de ácido sulfúrico y el tiempo de contacto son los parámetros de mayor importancia para la reducción de volumen del lodo (Sandoval, 1999).

2.7.1.2. Estabilización con ácido peracético.

El ácido peracético es bien conocido como un agente antimicrobial en hospitales y agroindustrias. Ha sido usado para desinfectar efluentes urbanos y últimamente se ha utilizado para desinfectar residuos. La actividad desinfectante del ácido peracético está basada sobre la liberación de oxígeno activo que, rompe las uniones de sulfidrilos (-SH) y sulfuros (S-S), que están unidos con enzimas, impidiendo seriamente la actividad celular (Lefevre *et al.*, 1992).

La disolución rápida del ácido peracético en lodo y su biodegradación total de

residuos no interfieren en un cambio radical del lodo, beneficiando la constitución del suelo a través de una mejor cohesión, estructura friable y algunas veces incrementando la retención del agua. Además de que los compuestos de amonio no disminuyen considerablemente y en concentraciones óptimas se reducen olores desagradables del lodo (Fraser *et al.*, 1984).

Mediante una serie de diluciones de ácido peracético que se adicionaron en lodo, se obtuvieron reducciones de *Salmonella* sp. como se observa en la tabla 2.4. También se analizó la viabilidad de los huevos de *Taenia saginata* en donde se inhibió hasta en un 99 % y se destruyó la viabilidad de los embriones en un 100 % con dosis aplicadas de 250 a 1 000 mg/L de ácido (entre 36 y 40 % de ácido peracético)

Tabla 2.4. Reducción de los niveles de *Salmonella* sp. de lodo crudo tratado con ácido peracético (Fraser *et al.*, 1984).

Concentración de ácido peracético	% de reducción de <i>Salmonella</i>			
	Tiempo de contacto			
	0 min.	10 min	20 min	30 min
200 mg/L	0	0	99.0	90.0
400 mg/L	0	90.0	99.0	90.0
500 mg/L	0	99.9	99.0	90.0
600 mg/L	0	99.9	99.0	90.0

Godfree *et al.*, (1984) estudiaron la desinfección de bacterias en lodos mediante la adición de dos compuestos: DF 955 que contiene formaldehído y Proxitane 4002 que contiene ácido peracético. En el caso del Proxitane 4002 se presentaron reducciones de hasta 3 unidades log en *Salmonella* sp. empleando dosis de hasta 600 mg/L con tiempos de contacto de 10 minutos. Adicionalmente, la aplicación del ácido peracético demostró una inhibición de la viabilidad en la incubación de huevos de helmintos del género *Taenia* sp.

De igual modo, Owen (1984) estudió la destrucción de huevos de helmintos de *Taenia saginata* en lodos mediante la adición de ácido peracético en dosis de 100 a 1000 mg/L con tiempos de contacto de 30 minutos a 7 días. La viabilidad de los huevos fue reducida hasta en un 75 % empleando dosis de 500 mg/L en 7 días de contacto.

2.7.1.3 Estabilización con otros ácidos.

La adición de ácidos orgánicos en lodos, ha demostrado tener efectos variables de remoción para los huevos de helmintos de cada especie. En un estudio se probaron varios tipos de ácidos en lodos con el interés principal de eliminar la viabilidad en huevos de nemátodos (*Ascaris suum*) y de plathelminths (*Fasciola hepatica*). Los ácidos fueron: ácido acético (400 mg/L), ácido propiónico (300 mg/L) y ácido iso-butírico (40 mg/L). En *A. suum* los ácidos orgánicos producen una inhibición casi completa del desarrollo del huevo en un tiempo de 19

días de exposición. Los resultados obtenidos casi no variaron al cambiar el tipo de ácido. En *F. hepatica* después de 19 días en lodo ácido la mayoría de los huevos desarrollaron un embrión dividido a temperatura ambiente y a 27 °C, todos los ácidos orgánicos produjeron resultados similares (Kiff y Lewis-Jones, 1984). El pH manejado fue de 3.0 y 3.2 respectivamente.

2.7.2. Estabilización alcalina.

En 1981 la EPA publicó un informe en el cual se examinaban 28 plantas de tratamiento donde aplicaban la estabilización alcalina en sus lodos. En todas las plantas este método fue instituido como una técnica permanente para reemplazar otros procesos más caros, como una técnica provisional, como proceso alternativo o como una práctica estacional.

Durante los 80's, en Estados Unidos se realizaron varias investigaciones enfocadas a evaluar la efectividad de la estabilización alcalina para la reducción de los microorganismos patógenos. Esta metodología cambió de ser un proceso alternativo a ser una opción confiable, por lo que comenzaron a desarrollarse sistemas y equipo específicos. Esto permitió desarrollar regulaciones gubernamentales, lo que aumentó la aceptación del método para el tratamiento de los lodos.

Todos los procesos para estabilización alcalina requieren del control de tres parámetros fundamentales: pH, tiempo de contacto y dosis de material alcalino. El pH es intensivo y el tiempo de contacto es extensivo, ambos se relacionan directamente entre sí. En todos los procesos el pH debe aumentar y mantenerse por arriba o cercano a 12.

La aplicación de cal también reduce la emisión de sulfuros volátiles y ácidos grasos, disminuyendo considerablemente los malos olores. La dosis óptima de cal depende de factores como: el tipo y la concentración de sólidos (primarios, de lodos activados) y la composición química de las fracciones sólida y líquida.

Tal vez la adición de cal sea más conveniente y rápido para desinfectar lodos de agua residual. Técnicas analíticas que han sido ya desarrolladas proveen métodos y enumeraciones reales de *Salmonella* sp. en lodos. Los resultados de algunos experimentos mostraron que con un tiempo de contacto de 15 minutos la reducción de esta bacteria fue muy marcada, especialmente en pH de 9.0 a 11.5 se redujo en un 99 %. Otros experimentos concluyeron que a pH de 12 y un tiempo de exposición de 4 horas se eliminaron huevos de *Taenia saginata in vitro* hasta por un 90 % (Godfree *et al.* citado por Bruce, 1984).

CAPÍTULO 3

3. MICROORGANISMOS PATÓGENOS PRESENTES EN LOS LODOS RESIDUALES.

3.1. INTERÉS DE LOS PATÓGENOS.

El contenido de organismos patógenos de los lodos es una de sus propiedades más importantes para limitar su manejo ya que provocan problemas sanitarios. El lodo residual municipal contiene generalmente cuatro tipos de patógenos causantes de enfermedades al hombre: bacterias, virus, protozoos y helmintos. Los microorganismos pueden ser introducidos dentro del ambiente en varias formas. En general, la aplicación de los lodos residuales sobre el suelo tiene una alta probabilidad de que los microorganismos patógenos contaminen los pozos y aguas subterráneas al ser filtrados. Esto se debe a que los procesos de tratamiento a los cuales son sometidos estos lodos residuales no completan eficientemente la remoción o inactivación de los microorganismos causantes de enfermedades (EPA, 1994).

En este capítulo se hace énfasis principalmente en huevos de helmintos ya que el trabajo experimental se basa en la remoción de estos.

3.2. VÍAS DE INFECCIÓN.

Cuando el lodo es aplicado en terrenos o sitios de disposición, tanto los humanos como los animales pueden estar expuestos a los patógenos directa ó indirectamente, por ejemplo:

Contacto directo:

- Contacto inadvertido con lodo residual.
- Caminando sobre el área poco tiempo después de la aplicación del lodo.
- Inhalando microorganismos que pueden llegar a través de fuertes vientos o cultivando el suelo después de la aplicación.

Contacto indirecto:

- Consumo de productos contaminados por patógenos que han sido cultivados con suelos 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 suelos con disposición de lodos.
- 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.

3.3. PATÓGENOS DE INTERÉS COMUN EN LOS LODOS.

3.3.1. Bacterias.

Las bacterias se pueden clasificar como microorganismos procariotas, (sin orgánulos en su célula) unicelulares. Ingraham (1998) incluye a las bacterias en cuatro divisiones, basándose en la composición de la pared celular.

Los bacilos Gram negativos anaerobios facultativos pertenecen al grupo entérico e incluyen patógenos humanos, de los cuales la mayoría infectan el sistema digestivo por ejemplo *Salmonella typhi*, causante de las fiebres tifoideas, varias especies del género *Shigella* que causan la shigelosis, un tipo de disenteria y *Vibrio cholerae* causante del cólera. También se incluye a *Yersinia* sp. causante de gastroenteritis.

Muchos tipos de bacterias colonizan el tracto intestinal del hombre y son continuamente desechadas junto con las heces. Un grupo de bacterias intestinales, los coliformes fecales, desde mucho tiempo atrás han sido utilizadas como indicadores de aguas contaminadas por residuos del hombre. El papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en la naturaleza como en una planta de tratamiento, es amplio y de gran importancia (Metcalf y Eddy, 1991).

3.3.2. Virus.

Pueden infectar animales, plantas y otros microorganismos. Su tamaño es extremadamente pequeño, los virus más grandes son alrededor de una décima parte del tamaño de una célula bacteriana típica. Los más pequeños son alrededor de una milésima parte de ese tamaño (Ingraham, 1998). El contenido de virus en heces es de 10^3 hasta 10^8 unidades infectivas por gramo (INDRE, 1995).

Los virus que se replican en el tracto intestinal del hombre se refieren a los virus entéricos humanos. Estos virus son desechados en la materia fecal de individuos quienes fueron infectados por consumo de alimentos y agua contaminada, entre otros. Más de cien virus entéricos pueden ser excretados en material fecal humano por esto, los virus están presentes en los residuos domésticos; dependiendo del tipo de tratamiento usado. Entre el 50 y 99.999 % de los virus son inactivados durante el tratamiento de residuos (Grasso *et al.*, 1984).

3.3.3. Protozoos.

Los quistes de protozoarios (estadio en reposo del organismo que se encuentra en los residuos), son grandes y van desde 2 hasta 60 micras. No se reproducen en el ambiente y son capaces de sobrevivir en el suelo por meses o años, dependiendo de las condiciones del ambiente (Ingraham, 1998).

Los protozoos se alimentan en general de bacterias y otros organismos

microscópicos. Tienen una importancia capital, tanto en el funcionamiento de las plantas de tratamiento biológico como en la purificación de los cursos de agua ya que intervienen para mantener el equilibrio natural de los diferentes tipos de microorganismos responsables de los procesos (Metcalf y Eddy, 1991). Sin embargo un grupo importante de protozoos que se encuentran en los lodos en forma de quiste, es de importancia médica, de entre ellos *Giardia lamblia* causante de la giardiasis (diarrea, pérdida de peso y dolor abdominal). Este organismo permanece en forma de quiste en el ambiente, mientras que en el humano se desarrolla en adulto y se reproduce (Figura 3.1).

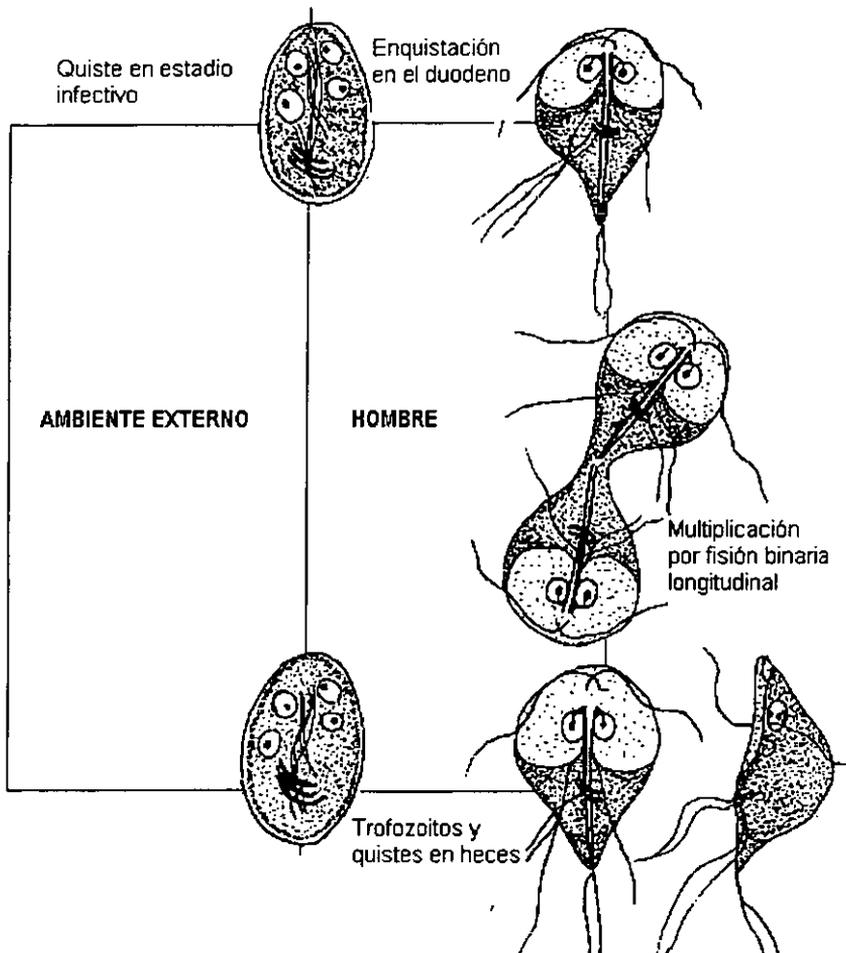


Figura 3.1. Ciclo de vida de *Giardia lamblia*. (Imagen tomada del Internet http://www.cdfound.to.it/_atlas.htm).

3.4. HELMINTOS.

Los animales pluricelulares que comúnmente parasitan al hombre pertenecen al Phylum Platyhelminthes y Phylum Nemátoda. La mayor parte del ciclo vital de muchos gusanos parásitos transcurre en condiciones esencialmente anaerobias. El almacenamiento de lípidos y glucógeno es común en éstos seres de donde obtienen el oxígeno para sus necesidades metabólicas. Por lo general, los huevos, los embriones y las larvas poseen sustancias alimentarias concentradas que se utilizan durante el desarrollo del organismo joven hasta que éste puede obtener su propio alimento (Brusca y Brusca, 1990).

Varios parásitos helmintos pueden ser encontrados en el agua residual y en los lodos en forma de huevo, muchos de los cuales requieren uno o más huéspedes en su ciclo biológico. Todos ellos son causantes de enfermedades serias. Uno de los intereses principales para el reúso de agua residual y producción de biosólidos en nuestro país es la remoción de huevos de helmintos por su alto índice de infección.

A continuación se hará una descripción exclusivamente de los helmintos encontrados en lodos residuales, que de acuerdo con su importancia médica y su frecuencia afectan al hombre.

3.4.1. Platelmintos.

Los Platelmintos o gusanos planos, se llaman así porque cuando son adultos, presentan cuerpos aplanados; poseen una cabeza y un cuerpo con simetría bilateral. Los Platelmintos patógenos al hombre encontrados en lodos son las llamadas tenias de la clase Céstoda y las llamadas duelas de la clase Tremátoda (Lamothe, 1988).

3.4.1.1. Céstodos.

En general, los efectos patológicos producidos por la infección de céstodos adultos son de menor gravedad y de tratamiento más sencillo que los efectos causados por las formas larvarias. Los ocasionados por los individuos adultos pueden producir obstrucción intestinal, intoxicaciones y anemia perniciosa. Sin embargo, las larvas suelen localizarse en sitios más críticos como en los ojos, huesos, corazón, hígado y cerebro, causando serios trastornos funcionales y en muchos casos la muerte (Lamothe, 1988).

Las tenias constan de tres partes: un escólex, provisto de ganchos o ventosas que fijan el gusano a la mucosa intestinal de su hospedador; inmediatamente del escólex viene el cuello, o centro germinal, donde se forman los nuevos segmentos y finalmente; los propios anillos o segmentos llamados proglótidos, en los proglótidos maduros se observan los órganos reproductores completamente desarrollados, mientras que los grávidos contienen los huevos embrionados (Figura 3.2).

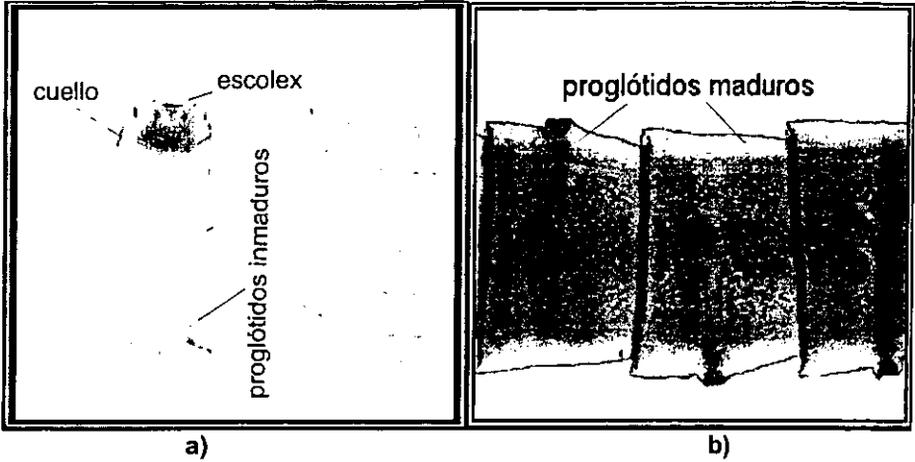


Figura 3.2. a) Región anterior de *Taenia* sp. mostrando la región del cuello y del escolex, también se muestran los proglótidos inmaduros y b) proglótidos maduros en donde los órganos reproductores están diferenciados (Bogitsh y Cheng 1998).

La mayoría de las tenias son hermafroditas. La función de los proglótidos es sólo producir huevos, estos huevos varían en forma y tamaño para cada especie. Los de *Taenia solium* son esféricos de 30 a 40 micras de diámetro con paredes gruesas y radiadas en cuyo interior se encuentra el hexacanto u oncósfera como se observa en la figura 3.3. La cápsula embrional es muy delgada, casi invisible y se pierde en huevos desechados en heces fecales; sin embargo el embrióforo es muy grueso formado por bloques de queratina unidos por una sustancia cementante que da al huevo una apariencia estriada radial (Smyth y McManus, 1989).

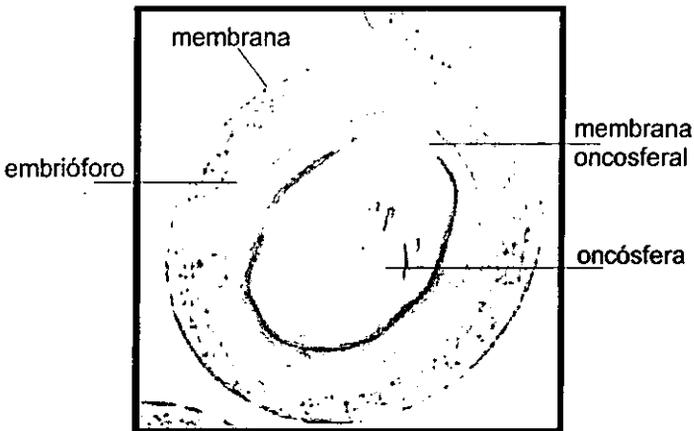


Figura 3.3. Huevo de *Taenia* sp. (Bogitsh y Cheng, 1998).

El género *Hymenolepis* de acuerdo con algunos autores, contiene aproximadamente 400 especies. Dos especies de *Hymenolepis* son de interés particular: *H. nana* e *H. diminuta* que tienen como hospederos definitivos a roedores y humanos, los hospederos intermediarios son generalmente escarabajos (Figura 3.4).

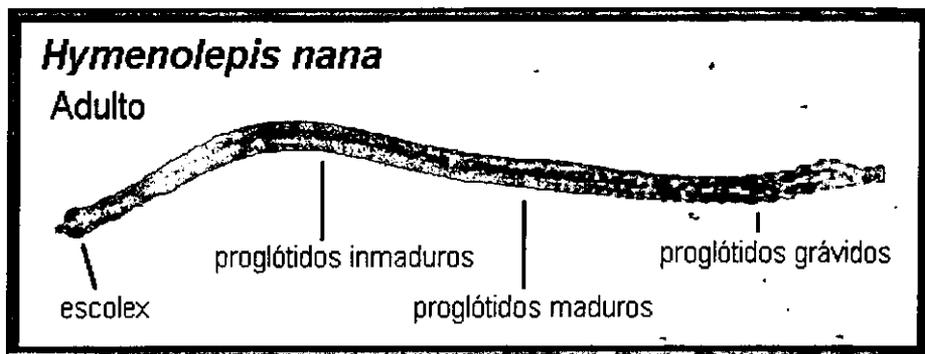


Figura 3.4. *Hymenolepis nana* adulto, longitud aproximada 35 mm (Imagen tomada del Internet <http://www.biosci.ohio-state.edu/>).

Estas especies causan un problema en humanos en particular donde la población es muy alta, el contacto cerrado y donde las condiciones sanitarias son pobres. *H. diminuta* tiene como hospedero definitivo a roedores pero también ha sido reportada en humanos varias ocasiones. Esta especie puede diferenciarse fácilmente de *H. nana* porque carece de un rostelo armado y sus huevos no presentan filamentos polares (Lamothe, 1988). Entre los caracteres morfológicos, ambas especies son prácticamente indistinguibles. En éste género es notable la presencia de los cuatro succionadores bien desarrollados (Figura 3.5).

Los huevos de *H. nana* son poco esféricos, miden de 30 a 47 micras de diámetro y presentan, como carácter específico, una oncosfera que está encerrada en una envoltura interna con dos engrosamientos polares. De cada uno de los engrosamientos parten entre cuatro y ocho filamentos polares. Dentro de la oncosfera hay tres pares de ganchitos en forma de lanceta. En cambio los de *H. diminuta*, son semi-esféricos, tienen una membrana interna transparente, ligeramente amarilla y miden de 60 a 79 micras por 72 a 86 micras (Figura 3.6).

La morfología general de la estructura de las membranas de *H. diminuta* e *H. nana*, se muestra en la figura 3.7. Esta consiste principalmente de 3 capas: 1) cubierta o cápsula compuesta de queratina, 2) una envoltura externa, localizada por debajo de la cubierta. Esta membrana parece ser relativamente impermeable a muchas sustancias; las proteasas, carbohidrasas y lipasas no la afectan y 3) una envoltura interna responsable en la formación del embrióforo y la membrana oncosferal (Smyth y McManus, 1989).

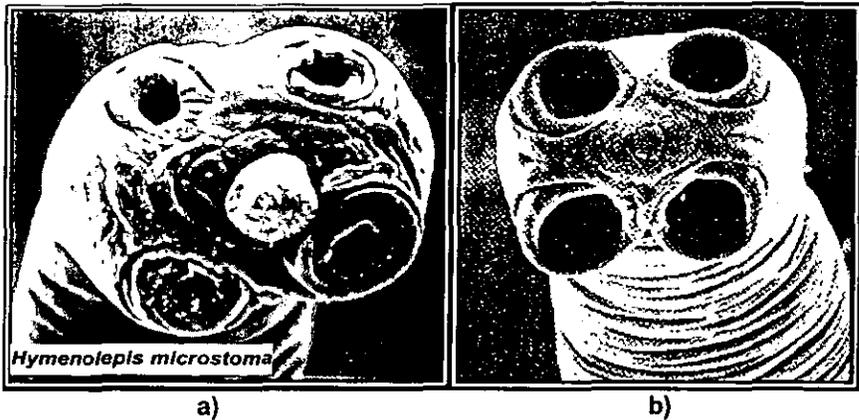


Figura 3.5. Microfotografía electrónica del escolex de: a) *Hymenolepis microstoma*, de apariencia similar con *H. nana* y b) *H. diminuta* (Cheng, 1986).

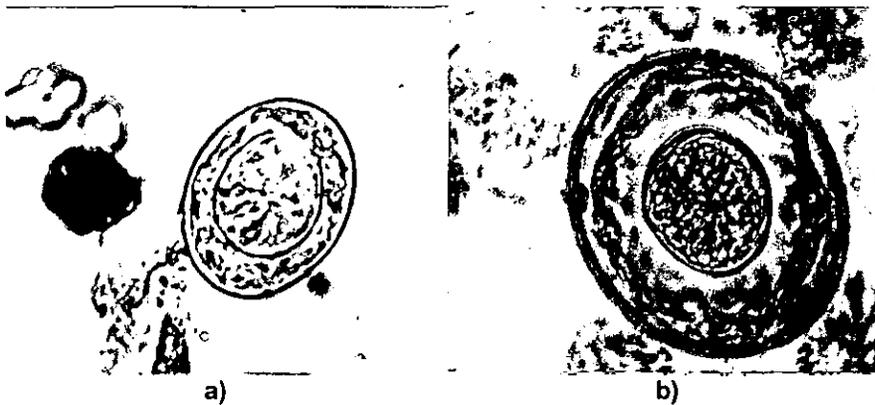


Figura 3.6. a) Huevo típico de *Hymenolepis nana*. b) Huevo típico de *Hymenolepis diminuta*. (Instituto de Ingeniería Ambiental, UNAM).

En la figura 3.7 se denota que en *H. nana* (en contraste con *H. diminuta*): a) el embrióforo es delgado e incompleto, una característica que puede facilitar el rompimiento en el intestino del hospedero definitivo; b) hay una capa filamentosa polar adicional entre la membrana oncosferal y la lámina basal (Smyth y McManus, 1989).

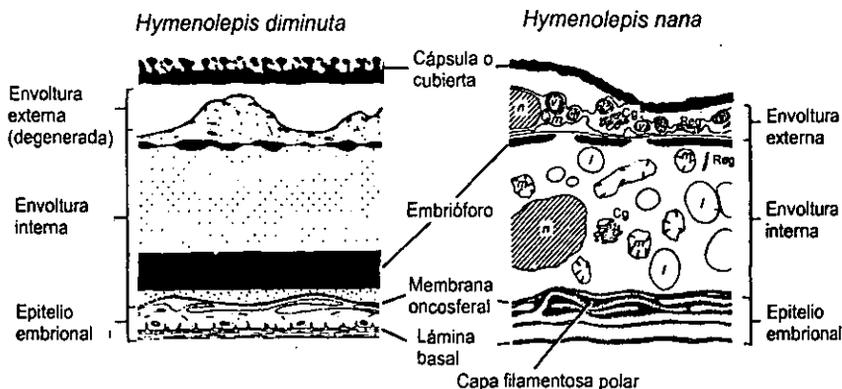


Figura 3.7. Comparación de una estructura fina de membranas de huevos de *H. diminuta* e *H. nana*. Cg, Complejo de Golgi; Reg, Retículo endoplásmico granular; l, cuerpos lipídicos; m, mitocondria; n, núcleo; v, vacuolas (Smyth y McManus, 1989).

3.4.1.1.1. Ciclo de vida.

Como ejemplo del complejo ciclo de vida de un Céstodo consideraremos el caso de *Taenia* sp. mostrado en la figura 3.8. Este se inicia cuando los proglótidos grávidos se desprenden de la cadena y salen expulsados del intestino delgado del hombre en las heces, liberando huevos hacia el ambiente. Éstos son dispersados fundamentalmente por agua y aire, logrando que su distribución pueda ser muy amplia contaminando los alimentos.

Cuando un hospedero intermediario los consume, los huevos eclosionan en su intestino y dejan en libertad una oncosfera, embrión de la mayoría de los céstodos, provisto de pares de ganchos y gran cantidad de glándulas de penetración. Atraviesan la pared intestinal para dirigirse a los vasos mesentéricos y llegar, por vía sanguínea, a todo el cuerpo alojándose principalmente en músculos, cerebro, corazón, lengua y ojos en donde se transforma en cisticerco después de 60 ó 70 días (Lamothe, 1988).

La cisticercosis es una parasitosis producida por la larva de *Taenia solium*. Las larvas son pequeñas vesículas ovales de 8 a 10 mm de largo por 5 mm de ancho, en su interior contienen un escólex introvertido e invaginado rodeado por un líquido cristalino. En la figura 3.9 se observa un corte histológico de músculo que contiene a la larva en forma de quiste. La patología asociada con la cisticercosis depende de cuales órganos son infectados y el número de cisticercos que se alojen.

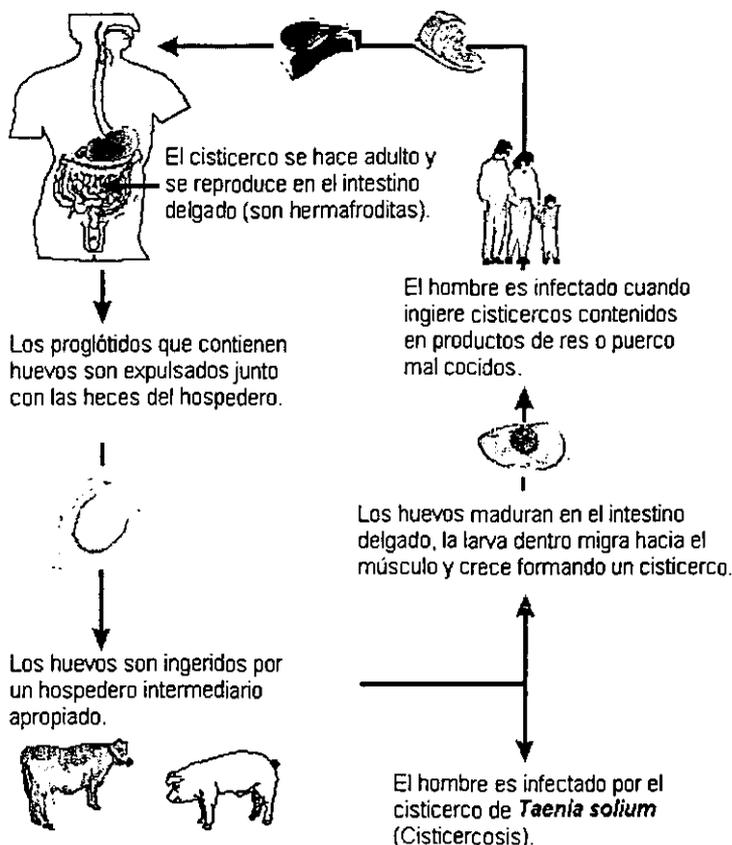


Figura 3.8. Ciclo de vida de *Taenia* sp. (Imagen tomada del Internet <http://www.biosci.ohio-state.edu/>).

Un cisticerco localizado en un sitio crítico del cerebro causa serios trastornos que van desde desequilibrio y parálisis de uno o varios miembros hasta la epilepsia, la ceguera, hidrocefalia e incluso la muerte.

La cisticercosis es, por su frecuencia y gravedad, uno de los principales problemas de salud pública que enfrentan los países en desarrollo como México, donde se estima que el 3 % de la población la padece y el 1 % muere por dicha causa. Asimismo, representa una importante fuente de pérdidas económicas, se estima que la frecuencia de los cerdos parasitados oscila entre 0.05 y el 10 %, según el sistema rústico o tecnificado que se emplee en su cría (Lamothe, 1988).

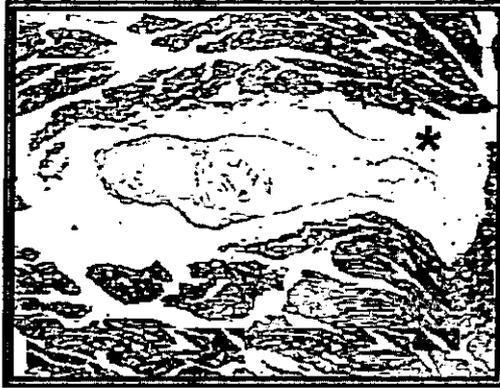


Figura 3.9. Sección de tejido de un cisticerco en músculo. Notar la cápsula fibrosa alrededor del cisticerco (*), (Imagen tomada del Internet <http://www.biosci.ohio-state.edu/>).

3.4.1.2. Tremátodos.

Los tremátodos son endoparásitos de vertebrados incluido el hombre, presentan dos órganos de fijación llamadas ventosas: uno situado en el extremo anterior donde por lo general se abre la boca y otro localizado en el centro de la región ventral, llamado acetábulo.

La forma del tremátodo en general presenta un extremo coniforme en el extremo anterior, miden entre 20 y 30 mm de largo por 13 mm de ancho. Su tegumento es espinoso, especialmente en la parte anterior. Los huevecillos son operculados con la cáscara amarillenta, que miden de 130 a 150 micras de largo por 63 a 90 micras de ancho, como se observan en la figura 3.10.

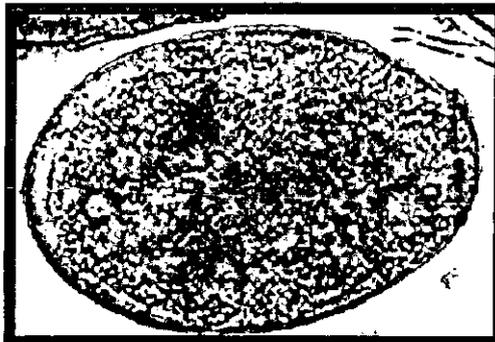


Figura 3.10. Huevo de *Fasciola hepatica*, se observa el opérculo en la parte anterior (Schmidt y Roberts, 1996).

La especie *Fasciola hepatica* perteneciente a esta clase es de gran importancia parasitológica ya que los adultos viven normalmente como parásitos

en los conductos biliares de numerosos animales herbívoros, tanto silvestres como domésticos y del hombre. Es una especie cosmopolita, aunque los mayores incrementos de fasciolosis se han presentado recientemente en algunos países latinoamericanos. Este padecimiento se caracteriza por la destrucción del tejido hepático causado por el parásito, así como daño de los conductos biliares, la atrofia del sistema porta y otros signos patológicos (Lamothe, 1988).

3.4.2. Nematelmintos.

Los nematelmintos (también llamados nemátodos) tienen cuerpos cilíndricos. Este tipo de gusanos posee simetría bilateral y generalmente tienen los extremos aplanados, con un aparato digestivo completo que incluye boca y ano; un aparato reproductor bien desarrollado y un rudimentario sistema nervioso, la mayoría de ellos son dioicos. El tamaño y forma de los huevos varían según la especie.

En la lombriz látigo (Figura 3.11), *Trichuris trichiura*, la hembra tiene un ovario y un útero que contiene numerosos huevos embrionados con forma de "bolillo", los cuales portan en cada extremo un prominente tapón. De las aproximadamente 60 especies que infectan mamíferos, dos parasitan al hombre: *T. trichiura* y *T. vulpis*. Las infecciones de este organismo producen diarrea, disentería y anemia (Lamothe, 1988).

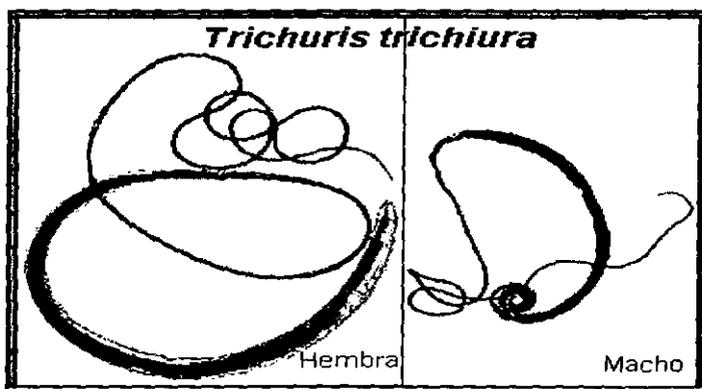


Figura 3.11. *Trichuris trichiura*, por las formas que tienen cuando son adultos se les denomina lombriz látigo (Cheng, 1986).

Se estima que una sola hembra de *Trichuris* sp. es capaz de producir entre 1 000 y 7 000 huevos diarios que miden entre 50 y 54 micras de largo por 23 micras de ancho. Externamente su cáscara es amarillenta y en el interior transparente (Figura 3.12). El embrión se desarrolla en el suelo en aproximadamente 21 días (Bird, 1971).



Figura 3.12. Huevo de *Trichuris trichura*. Los extremos ("tapones bipolares") sirven como características taxonómicas. (Instituto de Ingeniería Ambiental, UNAM).

Lamothe (1988), menciona que la especie *Ascaris lumbricoides* como se observa en la figura 3.13, es uno de los parásitos más comunes encontrados en el hombre, se estima que el 25 % de la población mundial está infectada por este nemátodo. Las formas adultas habitan en el intestino delgado y los huevos son expulsados en las heces.

La acumulación de fluidos en los pulmones tiene como consecuencia una neumonía por *Ascaris*, que puede causar la muerte. *A. suum* se encuentra comúnmente en puercos y su ciclo de vida es parecido al de *A. lumbricoides*. Si el hombre ingiere huevos de *A. suum* la larva migra hacia los pulmones y muere, esta puede ser una causa particular de una seria neumonía por *A. suum*.

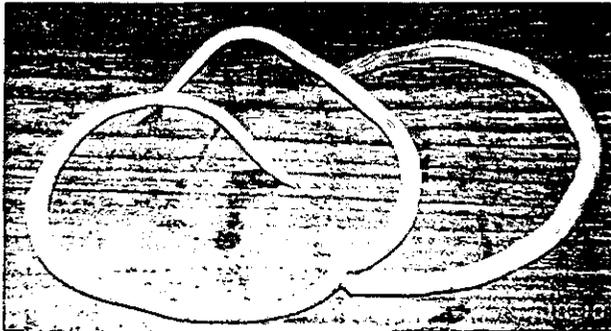


Figura 3.13. *Ascaris lumbricoides*. Adultos inmaduros (Instituto de Ingeniería Ambiental, UNAM.).

Los huevos fertilizados, de forma redonda u oval, miden entre 45 y 75 micras de largo y de 30 a 50 micras de ancho; su cubierta externa, de aspecto rugoso, es teñida por la bilis al tener contacto con las heces, lo que les da una coloración pardo-dorada característica (Figura 3.14). Los huevos no fecundados son mayores (de 85 a 95 micras de largo y entre 30 y 40 micras de ancho) y no presentan la envoltura externa mamelonada (Figura 3.14). Se producen en

promedio más de 250 000 huevos por día y se ha estimado que estos gusanos pueden llegar a liberar hasta 27 millones de huevos durante los 10 a 24 meses que tienen de vida (Bird, 1971).

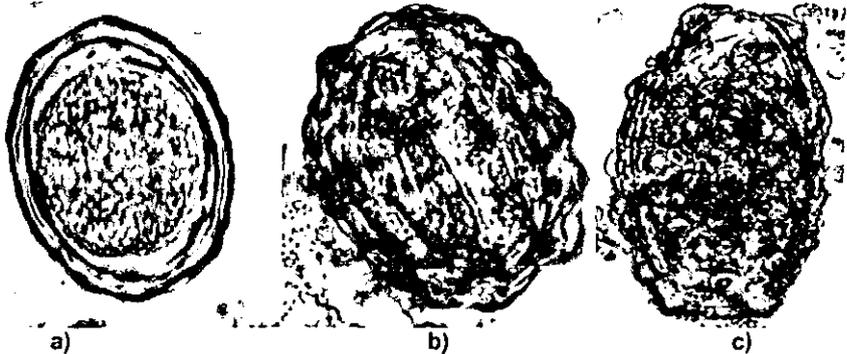


Figura 3.14. Huevos de *Ascaris lumbricoides*: a) huevo descorticado fértil; b) huevo fértil regular; c) huevo infértil (Instituto de Ingeniería Ambiental, UNAM.).

La cubierta celular del huevo de *Ascaris* y otros nemátodos, como se observa en la figura 3.15, consiste de 3 capas 1) la externa ó capa vitelina, 2) una capa quitinosa y 3) la más interna, la capa lipídica. En algunos hay una cuarta capa proteínica como en *Ascaris* sp. La función de la capa quitinosa es estructural y de soporte, mientras que la capa lipídica confiere resistencia a la desecación y a la penetración de sustancias polares (Schmidt y Roberts, 1996).



Figura 3.15. Microfotografía electrónica que muestra la estructura de un huevo típico de nemátodos (x 3 800). (CV) capa vitelina; (CQ) capa de quitina; (CC) citoplasma cortical, partícula densa; (EL) estructuras lipídicas; (NF) núcleo femenino y (GR) gránulos refringentes (Schmidt y Roberts, 1996).

El género *Toxocara* puede infectar al hombre en el segundo estadio somático larval. Los huevos de *Toxocara* son extremadamente resistentes a las condiciones adversas ambientales; un área contaminada con este tipo de huevos es muy difícil de sanitizar. La especie *Toxocara canis* es la más común y parasita principalmente perros. Una estimación aproximada realizada en Estados Unidos indica que del 20 al 95 % de los perros están infectados con esta especie, por lo cual es importante que sean desparasitados regularmente. Las dimensiones de los huevos de *T. canis* van de 85 a 95 micras de diámetro (Figura 3.16).

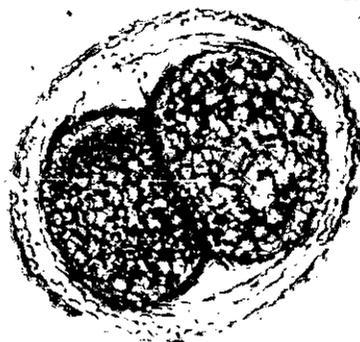


Figura 3.16. Huevo de *Toxocara canis* (Instituto de Ingeniería Ambiental, UNAM.).

Consideraremos el ciclo de vida indirecto de *Ascaris lumbricoides* como ejemplo de nemátodos, esquematizado en la figura 3.17. Se inicia con la copulación de los gusanos adultos que viven libres en la luz del intestino delgado, de cuyo contenido se alimentan. Los huevos fértiles son liberados en el intestino y salen junto con las heces del hospedero para distribuirse en distintos ambientes (Lamothe, 1988).

Las uncinarias, *Necator americanus* y *Ancylostoma duodenale*, mostradas en la figura 3.18, también del grupo de los nematelmintos, se diferencian de las especies anteriormente mencionadas en que sus larvas viven en el suelo, sin que existan animales o humanos como hospederos intermediarios (ciclo de vida directo).

Las personas son parasitadas al andar descalzas en terrenos infectados, lo que permite que las larvas filariformes, de vida libre, penetren a través de la piel y alcancen el torrente circulatorio y a través de éste llegar a los pulmones, pero vuelven a migrar para hospedarse en el intestino delgado en donde alcanzan la madurez sexual.

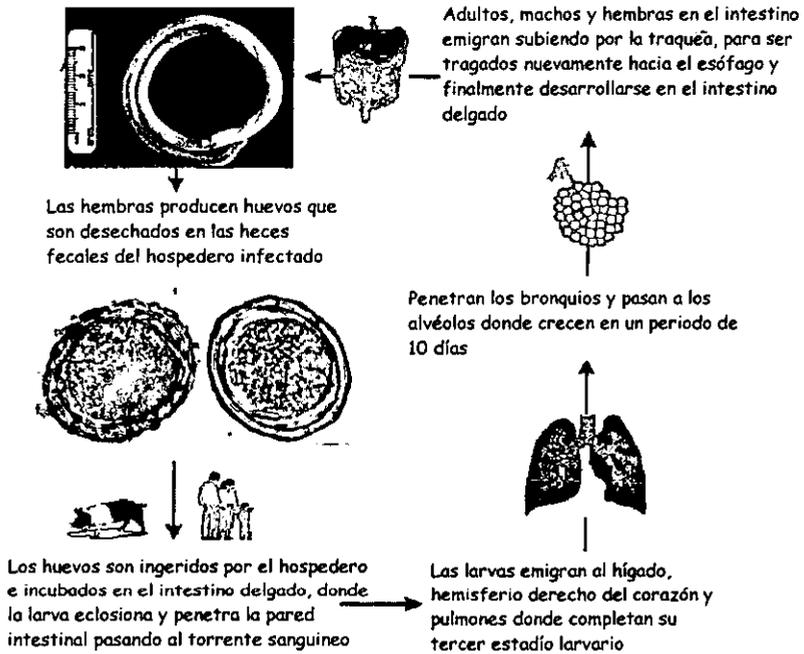


Figura 3.17. Ciclo de vida de *Ascaris lumbricoides* (Imagen tomada del Internet <http://www.biosci.ohio-state.edu/>).

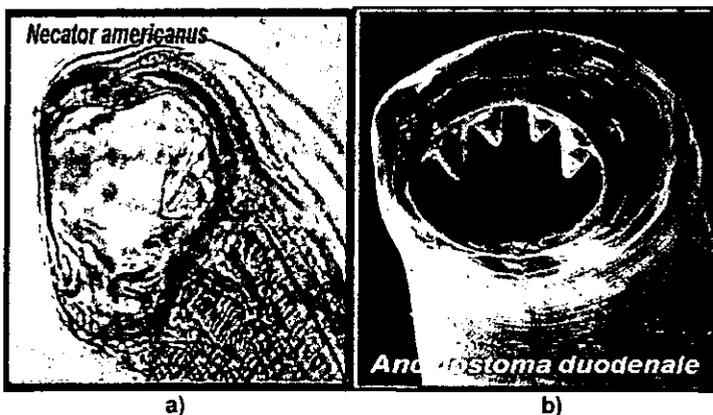


Figura 3.18. a) *Necator americanus* la abertura oral de esta especie contiene placas cortantes, se observa el esófago en esta imagen (*). b) *Ancylostoma duodenale*, notar la presencia de dientes cortantes, dos en cada lado (Schmidt y Roberts, 1996).

Los huevos típicos de uncinarias, figura 3.19, con forma ovalada, miden de 60 a 76 micras de largo por 30 a 40 micras de ancho y son producidos diariamente por las hembras en número de 5 000 a 10 000.

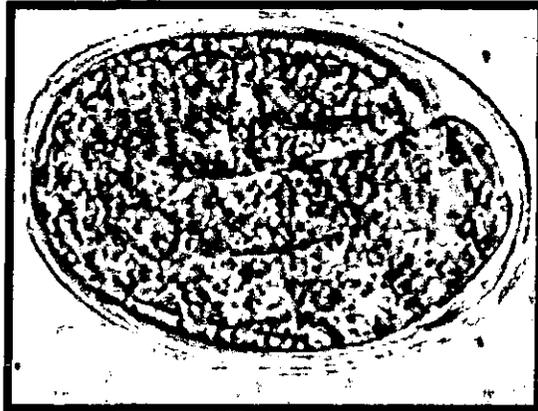


Figura 3.19. Huevo típico de uncinarias, este no difiere significativamente entre las especies. Se observa una larva en su interior (Schmidt y Roberts, 1996).

3.5. SUPERVIVENCIA DE LOS PATÓGENOS EN EL AMBIENTE.

Los organismos patógenos expuestos al medio ambiente perecen en tiempos variables bajo condiciones de calor, luz solar, desecación y por otros microorganismos que destruyen los patógenos que habitan en los lodos. Bacterias, protozoos y virus generalmente son inactivados en pocos días ó pocos meses, pero los huevos de helmintos bajo condiciones de alta humedad y sombra pueden sobrevivir varios años. En la tabla 3.1 se muestra el tiempo de supervivencia de distintos patógenos.

Tabla 3.1. Tiempo de supervivencia de patógenos en suelos y en superficies de plantas (Storey y Phillips, 1985).

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	2 días	2 días
Huevos de helmintos	7 años	2 años	2 años	1 mes

Entre los patógenos las bacterias son únicas por su habilidad de recrecimiento; los virus, helmintos y protozoos no tienen un recrecimiento fuera del organismo hospedero específico.

El control de riesgo microbiológico se efectúa con base en las bacterias, virus y huevos de helmintos por su gran resistencia a los factores ambientales. La densidad de microorganismos se define como el número de ellos por unidad de masa de los sólidos totales en base seca. Los criterios de calidad se expresan comúnmente por 4 gramos de sólidos totales debido a que 100 mL de lodo doméstico contienen aproximadamente esta cantidad (EPA, 1994).

4. NORMATIVIDAD.

4.1. NORMAS EN MÉXICO.

Durante los últimos años, el interés de la población acerca de la contaminación del agua, aire, erosión del suelo, explotación de recursos naturales y la extinción de plantas y animales, ha estimulado nuevas leyes de protección ambiental, regulaciones y seguridad pública.

En el mes de diciembre de 1996 fueron incorporadas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente (LGEEPA), varios preceptos que se refieren tanto a un régimen genérico de responsabilidad por el daño ambiental como a un régimen específico tratándose de responsabilidad derivada del manejo y disposición de residuos peligrosos. En la tabla 4.1 se presenta una descripción de las disposiciones legales relacionadas con los lodos de aguas residuales en México.

Tabla 4.1. Reglamentos ambientales en México que aplican para lodos provenientes de aguas residuales.

REGLAMENTO	DESCRIPCIÓN
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Capítulo III. (Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos). Capítulo IV. (Prevención y control de la contaminación del suelo).	Los lineamientos que pueden ser aplicados para lodos, se encuentran en las secciones sobre prevención y control de la contaminación de aguas epicontinentales o marinas y de suelos. 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 a las aguas y suelos nacionales como contenedores finales de diferentes tipos de residuos. ARTICULO 120- Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local: VII.- El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua. ARTICULO 134. - Para la prevención y control de la contaminación del suelo III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;
Norma Oficial Mexicana: NOM-001-ECOL-1996 Diario Oficial de la Federación del 7 de enero de 1997.	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 llevar a cabo la determinación de huevos de helmintos, la cual es aplicable en lodos.

REGLAMENTO	DESCRIPCIÓN
Norma Oficial Mexicana: NOM-052-ECOL-1993 Diario Oficial de la Federación del 22 de octubre de 1993.	Establece las características de los residuos peligrosos, presenta un listado de los mismos y los límites de toxicidad al ambiente. Los lodos que provienen de las aguas residuales de las industrias: textil, acabados de metales, galvanoplastia, químico-farmacéutica, electroquímica, producción de pinturas, entre otras se consideran residuos peligrosos cuando se exceden los límites de toxicidad propuestos en el punto 5.5 de la norma (corrosividad, inflamabilidad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico infecciosas).
Norma Oficial Mexicana: NOM-055-ECOL-1996 Diario Oficial de la Federación del 22 de octubre de 1993.	Establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinaran para un confinamiento controlado y a la instalación de centros integrales para el manejo de residuos industriales peligrosos.

4.2. NORMAS DE LA US-EPA.

La US-EPA desarrolló el reglamento "Estándares para el uso y disposición de lodos provenientes del tratamiento de agua residual doméstica". Esto fue publicado en el capítulo 40 del Reglamento del Código Federal (CFR), el 19 de febrero de 1993 con la versión actualizada en 1996 y que comúnmente se conoce como apartado 503. Esta normatividad es de las primeras y más completas del mundo, por lo que será modelo para estructurar las normas mexicanas. La regulación 503 incluye 5 apartados: provisiones generales, requerimientos para la aplicación a suelos, disposición superficial, reducción de los patógenos y la atracción de vectores e incineración.

- Apartado A: Establece lineamientos generales sobre los propósitos, la aplicabilidad, la obligatoriedad y las exclusiones a la reglamentación.
- Apartado B: Establece lineamientos específicos sobre la aplicación de biosólidos en suelos con la finalidad de beneficiarlos. Entre los lineamientos que norma se encuentran los siguientes:
 - a) Concentración de metales pesados en los biosólidos y su tasa de carga anual o acumulativa en el suelo.
 - b) Reducción de organismos patógenos y de atracción de organismos vectores. La efectividad de la reducción de organismos patógenos determina dos tipos de biosólidos: clase A o clase B.
- Apartado C: Que establece lineamientos específicos de aplicación superficial. Se consideran sitios de disposición superficial los siguientes: fosas diseñadas ex profeso para contener biosólidos, áreas excavadas que reciben biosólidos con alto contenido de agua a través de tuberías y lodos deshidratados dispuestos en montones.
- Apartado D: Que establece lineamientos específicos y tecnologías requeridas para llevar a cabo la reducción de organismos patógenos y la

atracción de organismos vectores.

- Apartado E: Que establece los lineamientos específicos para llevar a cabo la incineración de los biosólidos.

4.2.1. Requerimiento de patógenos para obtener biosólidos clase A.

El lodo residual que se aplique a suelos o jardines y que el contacto sea directo al público deberá cumplir con los requerimientos necesarios para biosólidos clase A, en donde el objetivo principal es reducir la densidad de patógenos por debajo de los límites detectables. Los parámetros de operación deberán ser estrictos para asegurar la obtención de biosólidos clase A ya que existe el riesgo de que ocurra un recrecimiento. Para evitar esto, todos los procesos para obtener biosólidos Clase A requieren de un monitoreo microbiológico en:

- Coliformes fecales: la densidad en el lodo residual debe ser menor que 1000 como número más probable (NMP), por gramo de sólidos totales (base en peso seco).
- *Salmonella* sp. la densidad de esta bacteria en el lodo debe ser menor que 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales (base en peso seco).
- Virus entéricos: la densidad en el lodo residual debe ser menor a 1 como unidad formadora de placas (UFP) por 4 gramos de sólidos totales (base en peso seco).
- Huevos de helmintos viables: la densidad debe ser menor que 1 por 4 gramos de sólidos totales (base en peso seco).

Una vez determinado el nivel límite de patógenos el lodo residual tratado está dispuesto a ser usado considerándose como clase A (EPA, 1996).

4.2.2. Tecnologías para obtener biosólidos clase A.

Dentro de las tecnologías para obtener biosólidos clase A encontramos las siguientes: acondicionamiento térmico, procesos no considerados o no conocidos, procesos avanzados para la reducción de patógenos (PARP) y procesos equivalentes a PARP acreditados ante y por la autoridad competente.

4.2.2.1. Acondicionamiento térmico.

Procesos que basan su operación en elevar la temperatura y el pH durante un tiempo de contacto preestablecido (estabilización térmico-alcalina). El proceso depende del tipo de lodos, el tamaño de las partículas, la forma de contacto entre ellas y el calor.

4.2.2.2. Procesos Avanzados para la Reducción de Patógenos (PARP).

Incluyen los procesos mencionados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Procesos para obtener biosólidos clase A (EPA, 1994).

PROCESO	TRATAMIENTO
COMPOSTA	La temperatura del lodo residual es mantenida a 55 °C o más, por 3 días, en un recipiente ó pila estática aireada, el lodo debe ser mezclado con material de degradación biológico como aserrín de madera.
SECADO TÉRMICO	El lodo residual es secado por contacto directo ó indirecto con gas caliente a más de 80 °C para reducir el contenido de humedad a un 10% o menos.
TRATAMIENTO CON CALOR	Al lodo residual se le inyecta vapor caliente hasta alcanzar una temperatura de 180 °C por más de 30 minutos. El recrecimiento de bacterias patógenas puede ocurrir si el lodo es reinoculado.
DIGESTIÓN AEROBIA TERMOFÍLICA	El tiempo medio de residencia celular en el lodo es de 10 días a 55 °C hasta 60 °C, el contenido de sólidos volátiles biodegradables del lodo pueden ser reducidos hasta un 70% en corto tiempo.
IRRADIACIÓN POR RAYOS GAMA	El lodo residual es irradiado con rayos Gama de ciertos isótopos por ejemplo de Cobalto 60 y Cesio 137 a dosis de al menos un megaradio a temperatura de 20 °C.
IRRADIACIÓN POR RAYOS BETA	El lodo residual es irradiado con rayos Beta de un acelerador a dosis de al menos 1 megaradio a temperatura de 20 °C.
PASTEURIZACIÓN	La temperatura es elevada en un corto tiempo y mantenida a 70 °C por 30 minutos o más. El principal objetivo es eliminar <i>Salmonella</i> . El lodo residual es pasteurizado en bloques para prevenir un recrecimiento de bacterias que puede ocurrir en un proceso continuo.

4.2.3. Requerimiento de patógenos para obtener biosólidos clase B.

El objetivo es asegurar la reducción en densidad de bacterias patógenas y virus entéricos. Se demuestra por monitoreo de coliformes fecales en el lodo tratado, que debe ser menor de 2×10^6 UFC ó NMP por gramo de sólidos totales del lodo residual (base en peso seco). Los huevos de helmintos viables no necesariamente deben ser reducidos en lodo clase B (EPA, 1996).

A diferencia del lodo clase A, el cual está esencialmente libre de patógenos, el lodo clase B contiene algunos. Por esta razón los sitios para cultivo, pastoreo de animales y acceso público quedan restringidos hasta que factores ambientales reduzcan los niveles de patógenos, cuando el lodo clase B sea aplicado en algún terreno. Estas restricciones son designadas para asegurar la reducción suficiente de huevos de helmintos viables.

4.2.4. Sitios de restricción para biosólidos clase B.

- Cultivos en donde las partes comestibles tocan el lodo residual mezclado con suelo y crecen superficialmente en el terreno no pueden cosecharse hasta 14 meses después de la aplicación del lodo residual.

- Cultivos en donde las partes comestibles están totalmente cubiertas por suelo mezclado con lodo no pueden ser cosechadas hasta 20 meses después de la aplicación, el lodo debe quedar sobre la superficie del suelo por 4 meses o más antes de su incorporación dentro del terreno porque se considera como tiempo mínimo para que las condiciones ambientales reduzcan huevos de helmintos viables.
- Cultivos en donde las partes comestibles no tocan el suelo mezclado con lodo residual no pueden ser cosechados hasta 30 días después de su aplicación.
- Animales no pueden pastar sobre el terreno hasta 30 días después de la aplicación del lodo residual en especial animales que tienen contacto con el hombre.
- Los accesos públicos a lugares con alta exposición deben ser restringidos por 1 año después de la aplicación del lodo.

4.2.5. Tecnologías para obtener biosólidos clase B.

Los procesos para obtener biosólidos clase B, son procesos para reducir significativamente patógenos (PRSP) mencionados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Procesos para reducir significativamente patógenos (EPA, 1994).

PROCESO	TRATAMIENTO
DIGESTIÓN AEROBIA	El lodo residual es agitado con aire u oxígeno para mantener a los organismos en condiciones aerobias, los valores promedio serán de entre 40 días a 20 °C y 60 días a 15 °C
DIGESTIÓN ANAEROBIA	Utiliza bacterias que funcionan en un ambiente libre de oxígeno para convertir sólidos volátiles en dióxido de carbono, metano y amonio, los valores promedio de residencia celular y temperatura estarán entre 15 días a 55 °C y 60 días a 20 °C.
SECADO CON CALOR	El lodo residual es secado sobre arena o pavimento en forma de lechos o celdas por un mínimo de tres meses, el ambiente normal diario debe ser a una temperatura por encima de los 0 °C.
ESTABILIZACIÓN CON CAL	Suficiente cal es adicionada al lodo residual para elevar el pH hasta 12 con 2 horas de contacto.

4.2.6. Reducción de la atracción de organismos vectores.

Este aspecto es importante porque los vectores (moscas, mosquitos, aves y roedores entre otros) son organismos que pueden transmitir patógenos por contacto físico o por contacto biológico jugando un papel específico en el ciclo de vida del patógeno. La regulación considera 12 opciones para lograr la reducción efectiva de vectores en los biosólidos (Tabla 4.4). En algunos casos estos se refieren a la disminución de la capacidad misma y en otros casos controla la posibilidad del contacto directo entre vectores y biosólidos.

Tabla 4.4. Requisitos para disminuir la atracción de vectores (EPA, 1994).

OPCIÓN	APROPIADO PARA:
1.- Al menos 38% de reducción de sólidos volátiles totales.	Biosólidos obtenidos por: Digestión anaerobia Digestión aerobia Composta, Lagunas
2.- Digestión anaerobia complementaria.	Sólo para lodo digerido anaerobiamente que no cumple con la opción 1.
3.- Digestión aerobia complementaria.	Sólo para lodo digerido aerobiamente, que tenga 2% o menos sólidos que no cumpla la opción 1.
4.- Tasa específica de consumo de oxígeno.	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 sólidos del 75%	Lodos que no contengan lodos primarios crudos.
8.- Reducción de humedad hasta un contenido de sólidos del 90%	Lodos que contengan lodos primarios crudos
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 fosa sépticas.	Residuos de fosas sépticas aplicados a suelo agrícola, bosques, sitios de restauración o dispuestos superficialmente.

4.2.7. Clasificación de biosólidos con respecto al contenido de metales.

El apartado 503 de la US-EPA establece dos clases de calidad en lodo basadas en la concentración de metales pesados.

4.2.7.1. Biosólidos de calidad excepcional (*Exceptional Quality Biosolids, EQ*).

Son biosólidos que contienen una baja concentración de elementos químicos contaminantes, una virtual ausencia de patógenos y bajo potencial de atraer organismos vectores. Los biosólidos EQ deben tener una concentración de elementos químicos contaminantes inferior a la mostrada en la tabla 4.5.

Para que un biosólido se considere EQ debe ser un biosólido clase A por cumplir una de las tecnologías que se mencionan en 4.2.2. También es necesario que cumpla con una de las ocho primeras alternativas para la reducción de atracción de vectores de la tabla 4.4. Aunque no es requerido por la EPA, la tasa de aplicación de nitrógeno no debe exceder los requerimientos de los cultivos para

evitar la contaminación de acuíferos.

4.2.7.2. Biosólidos con concentración de contaminantes admisible (*Pollutant Concentration Biosolids, PC*).

Son biosólidos que tienen concentraciones de contaminantes iguales a los EQ, deben cumplir con los límites establecidos en la tabla 4.5. Por su contenido de organismos patógenos son catalogados como biosólidos clase B, deben cumplir con una de las tecnologías que se mencionan en el punto 4.2.5.

Para su aplicación los biosólidos PC deben cumplir con una de las diez primeras opciones para reducción de atracción de organismos vectores de la tabla 4.4. También los biosólidos clase A pueden considerarse como PC si se cumple con una de las opciones de reducción de atracción de vectores numeradas como 9 y 10 en la misma tabla.

4.2.7.3. Biosólidos con una tasa de aplicación de contaminante acumulativa (*Cumulative Pollution Loading Rate Biosolids, CPLR*).

Estos biosólidos exceden en al menos uno de los contaminantes de la concentración permisible para los EQ pero nunca los niveles tope de contaminantes de la tabla 4.5. 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 exceda la tasa de aplicación de contaminante acumulativa de la tabla 4.5.

Para obtener biosólidos tipo CPLR se debe partir de biosólidos clase A o B y se debe cumplir una de las diez opciones para reducir la atracción de vectores de la tabla 4.4.

4.2.7.4. Biosólidos con tasa anual de aplicación de contaminante (*Annual Pollutant Loading Rate Biosolids, APLR*).

Son biosólidos que sólo pueden ser distribuidos en bolsas u otros contenedores para su aplicación en cantidad controlada en suelo. Estos exceden los niveles de contaminantes establecidos para los biosólidos EQ pero no son superiores a los niveles tope de la tabla 4.5. No deben exceder la tasa anual de aplicación de contaminante que se indica en la misma tabla y los biosólidos deben ser clase A, además de cumplir una de las primeras ocho opciones para la reducción de atracción de vectores de la tabla 4.4.

La tasa de carga anual de contaminante es la máxima cantidad de un contaminante contenido en los biosólidos que puede ser aplicado en un solo sitio durante un año.

Tabla 4.5. Límites de contaminantes en biosólidos para su aplicación en suelos. (EPA, 1994).

Contaminante	Límite de concentración máxima para los biosólidos que se apliquen al suelo (mg/kg) ^a	Carga acumulativa para biosólidos. CPLR (kg/ha) ^a	Límites para biosólidos EQ y PC. (mg/kg) ^a	Carga anual de contaminantes para biosólidos APLR (kg/ha/año) ^a
Arsénico	75	41	41	2
Cadmio	85	39	39	1.9
Cobre	4300	1500	1500	75
Cromo	3000	3000	1200	150
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	18	18	0.90
Níquel	420	420	420	21
Plomo	840	300	300	15
Selenio	100	100	100	5
Zinc	7500	2800	2800	140
Aplica a:	Todos los sólidos que apliquen sobre el terreno.	Biosólidos a granel y empacados ^b .	Biosólidos en aplicación masiva.	Biosólidos empacados ^b .

^a: Base seca.

^b: Biosólidos empacados (son aquellos que están en bolsas o cualquier otro recipiente).

5. METODOLOGÍA.

Con el objeto de disminuir o eliminar el nivel de microorganismos patógenos que se concentran en los lodos, se aplicaron dos procesos de estabilización: la estabilización alcalina, que en diversos países es aceptada y conforme a la reglamentación de la US-EPA es útil para obtener biosólidos clase B y la estabilización ácida, que no esta regulada aún, se utilizaron los ácidos: acético, peracético, perclórico y sulfúrico.

5.1. MUESTREO.

La estabilización se llevó a cabo empleando muestras de lodo fisicoquímico de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Pedro Actopan de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal. Básicamente la planta cuenta con un desbaste que recibe el agua residual (35 L/s) de las poblaciones de San Gregorio y San Pablo, Xochimilco, Distrito Federal, México. El agua es bombeada hacia un cárcamo y a la salida de éste se dosifica el sulfato de aluminio a una dosis de 66 mg/ L aproximadamente. 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.

Los lodos generados son llevados de la purga de los sedimentadores hacia un espesador en el que permanecen por un periodo aproximado de 15 días. Las muestras de lodo analizadas provenían de la purga del sedimentador que estaba operando el día del muestreo. Las colectas del lodo crudo corresponden a las fechas de la tabla 5.1, en cada fecha se colectaron 10 litros de lodo crudo en un garrafón de plástico que se llevó al laboratorio del Instituto de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México en donde se realizaron las estabilizaciones y los análisis. En el apartado 5.2 se realiza una descripción del proceso para la estabilización alcalina, en el apartado 5.3 de la estabilización ácida y en el apartado 5.4 y anexo A los métodos analíticos.

Tabla 5.1. Fechas de los muestreos del lodo crudo y de su estabilización.

Estabilización	Primera fecha de muestreo (día/mes/año)	Segunda fecha de muestreo (día/mes/año)	Tercera fecha de muestreo (día/mes/año)
Ácido acético (20 %)	22-06-1999	12-07-1999	03-08-1999
Ácido peracético (20 %)	08-06-1999	12-07-1999	03-08-1999
Ácido perclórico (3.7 %)	12-06-1999	26-10-1999	30-11-1999
Ácido sulfúrico (50 %)	25-05-1999	12-07-1999	30-11-1999
Cal hidratada	18-02-1999		

5.2. ESTABILIZACIÓN ALCALINA.

5.2.1. Acondicionamiento y deshidratación de los lodos.

El acondicionamiento de los lodos es un proceso previo a la deshidratación mediante el cual se aglomeran las partículas sólidas para facilitar la remoción del agua. En este trabajo el acondicionamiento de los lodos se llevó a cabo mediante floculación con un polielectrolito catiónico de alto peso molecular (Percol 728, Allied Colloids), el cual se aplicó a una dosis de 5.4 kg por cada tonelada de sólidos totales (ST). La deshidratación se realizó con un filtro prensa piloto de marcos y placas.

5.2.2. Estabilización alcalina de los lodos.

La estabilización alcalina se llevó a cabo con cal hidratada al 91.2 % de pureza, la cual se calcinó a 550 °C durante tres horas con el propósito de eliminar la humedad. La dosis teórica de cal es del 20 % (peso/peso) para un lodo con el 20 % de ST; sin embargo, dependiendo del contenido de ST del lodo esta dosis debe ser ajustada con la siguiente ecuación (Jiménez *et al.*, 1997):

$$\text{Dosis de cal viva} = - 5.9 \{ \text{Ln}(\text{sequedad en \%}) \} + 39.9$$

Con esta ecuación y con el valor de los sólidos totales del lodo desaguado (15.4 %) se obtuvo la dosis correcta para la aplicación de la cal, que fue del 23.7 %. Como se puede observar, esta ecuación es empleada para cal viva, sin embargo, si tomamos en cuenta que la cal hidratada equivale a un 70 % de cal viva se tuvo que realizar un ajuste para obtener la dosis adecuada utilizando cal hidratada. La dosis final que se aplicó fue de 52.2 g de cal hidratada por kg de lodo húmedo.

Se tomó una muestra de lodo crudo y una muestra de lodo estabilizado, inmediatamente se realizó la lectura del pH y se determinaron los sólidos totales conforme el Anexo A-1. Se dispusieron los gramos de lodo crudo y estabilizado equivalentes a 2 gramos de sólidos totales en recipientes de plástico para el análisis de huevos de helmintos (HH), Anexo A-3. En otro contenedor se tomó otra muestra de lodo crudo y estabilizado equivalente a 4 gramos de sólidos totales y se le determinó la concentración de coliformes fecales (CF), Anexo A-2.

Posteriormente, la dosis de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se mezcló hasta obtener un producto relativamente homogéneo. Una vez obtenido el biosólido, se le determinaron en dos horas después los mismos parámetros que al lodo crudo más el análisis de metales pesados. Éste biosólido se almacenó en contenedores de plástico descubiertos dentro de una bodega a temperatura ambiente por seis meses, tiempo en el que se tomó otra muestra y se realizó un análisis para determinar la viabilidad de huevos de helmintos y la concentración y recrecimiento de coliformes fecales.

5.3. ESTABILIZACIÓN ÁCIDA.

En el laboratorio se vació un litro de lodo en cada contenedor del equipo de prueba de jarras (Figura 5.1), se utilizaron 6 contenedores etiquetados para cada dosis y 1 contenedor para el lodo crudo. Simultáneamente se prepararon las concentraciones de ácido y se adicionaron al mismo tiempo al contenedor correspondiente. Se aplicó de inmediato una velocidad de agitación de 320 rpm con un tiempo de contacto de 30 minutos en todas las muestras. Se realizaron tres repeticiones con cada ácido que corresponden a la fecha de muestreo. El volumen de lodo en cada muestra empleada fue de 1000 mL para los ácidos: sulfúrico, acético y perclórico, pero para el ácido peracético el volumen fue de 800 mL debido a que al mezclar se produjo una gran cantidad de espuma.

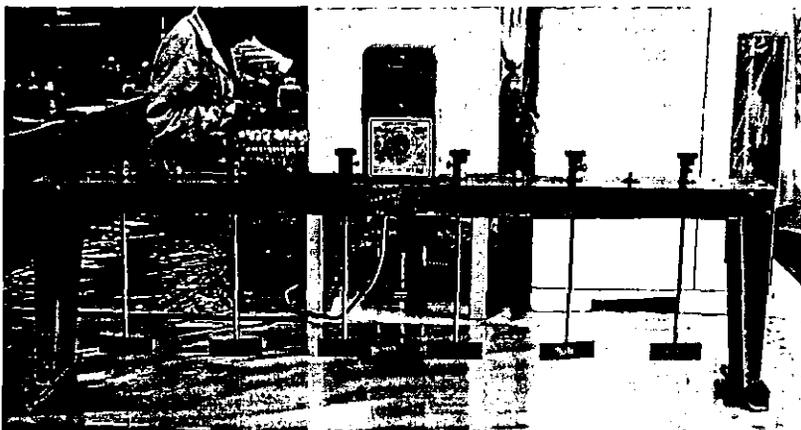


Figura 5.1. Prueba de Jarras, equipo en donde la velocidad de agitación de 0 a 320 rpm se puede controlar.

Al término de la agitación se tomó una muestra de lodo crudo y estabilizado de cada contenedor. Se realizó una curva de equilibrio de pH contra volumen de ácido por litro de lodo con excepción del peracético, de inmediato se inicio la caracterización del lodo crudo y estabilizado siguiendo las técnicas primero se determinaron los sólidos totales (Anexo A-1). De estos mismos contenedores se vaciaron los gramos de lodo crudo y estabilizado equivalentes a 2 gramos de sólidos totales en recipientes de plástico para determinar la concentración de huevos de helmintos (Anexo A-3) y en otros frascos el equivalente a 4 gramos de solidos totales para determinar coliformes fecales (Anexo A-2).

Las concentraciones de la solución ácida para los ácidos sulfúrico y perclórico fueron del 20 % v/v, la concentración del ácido peracético fue más baja del 3.7 % v/v debido a que el producto comercial que se logró obtener contiene esta concentración y no se pudo utilizar una concentración mayor. La concentración del ácido acético fue del 50 % v/v ya que se considera como un ácido débil.

Por su parte, las dosis de ácido sulfúrico y perclórico están basadas en curvas de dosis-pH elaboradas con lodo muestreado para la primera corrida de estos ácidos. En el caso del ácido peracético, las dosis aplicadas fueron mayores a las reportadas en la literatura debido a que algunos autores mencionaron haber aplicado dosis de 500 mg/L para inactivar el 75 % de huevos de *Taenia* después de 7 días de contacto (Owen, 1984). Igualmente para el ácido acético las dosis y tiempos de contacto fueron de 400 mg/L por un mínimo de 7 días (Kiff y Lewis-Jones, 1984).

Por lo anterior, en el caso de los ácidos orgánicos se eligieron dosis considerablemente mayores a las reportadas, las cuales se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Dosis de ácido que fueron adicionadas a las muestras de lodo, las muestras sin adición de ácido son de referencia (lodo crudo).

Ácido sulfúrico (ppm)	Ácido perclórico (ppm)	Ácido peracético (ppm)	Ácido acético (ppm)
0	0	0	0
4 400	2 600	1 000	3 700
6 100	3 500	1 700	7 300
8 900	5 100	2 500	11 000
14 000	8 000	3 300	14 700
25 100	14 400	4 200	18 400
57 600	32 900	5 000	22 000

5.4. MÉTODOS ANALÍTICOS.

- Sólidos Totales (ST): Para determinar la concentración de sólidos totales se utiliza el método gravimétrico de Sólidos Totales (APHA, 1995), se menciona en el Anexo A.1. Se evaluaron en los lodos crudos y estabilizados para calcular la cantidad de materia seca que sirve de referencia para expresar los demás parámetros.
- PH: Se realizaron las mediciones del pH al lodo crudo y después de aplicados los tratamientos (APHA, 1995).
- Coliformes fecales: El contenido de coliformes fecales fue determinado por la técnica de fermentación en tubos múltiples ó Número Más Probable (NMP), descrito en el anexo A.2. La densidad de los coliformes se expresó como NMP por gramo de sólidos totales, que se obtuvo mediante el código formado por tres algoritmos correspondiente al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas.
- Huevos de Helminetos: La determinación y cuantificación de huevos de helmintos fue analizada por la técnica de la NOM-001-ECOL-1996 que se practica en aguas residuales, descrita en el Anexo A.3, pero que es aplicable para muestras de lodos. Se reportaron los datos como huevos de helmintos por gramo de sólidos

totales (HH/ g ST) y el porcentaje de la viabilidad representada por la presencia o ausencia de huevos larvados, además de otros criterios cualitativos mencionados en la Tabla 5.3. Con las especies que formaron larvas, en el tiempo de incubación (de 4 semanas), se realizó el análisis de remoción favorecida por los tratamientos.

Tabla 5.3. Criterios para la determinación de huevos de helmintos viables (Caceres, et al., 1987 citado por Ghiglietti, et al., 1997).

Huevos viables	Huevos no viables
Estructuras intactas con la cubierta celular simétrica y continua.	Estructuras pobremente definidas.
Continuación del desarrollo del huevo en varios estadios de maduración, por ejemplo, división, mórula, gastrula y larva.	Vacuolización del citoplasma y condensación celular, huevo en estadio unicelular con el citoplasma vacuolado y granulado.
Diferenciación entre cada estadio observando una secuencia de maduración.	Contracción, ruptura y pérdida en la continuidad de la membrana.

- Metales pesados totales: Al lodo estabilizado con cal se le determinó la concentración de metales pesados totales por el método espectrofotométrico de absorción atómica: por aspiración directa de aire-acetileno se determinó la concentración de cadmio, cobre, níquel, plomo y zinc; por la técnica generación de hidruros se determinó la concentración de arsénico y selenio; por la técnica de generador de hidruros-vapor frío se determinó la concentración de mercurio (NOM-AA-051-1981). Estos se analizaron en un laboratorio certificado.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.1. ESTABILIZACIÓN ALCALINA.

Los huevos de helmintos determinados en los lodos pertenecen principalmente a la clase Nemátoda que incluye a las especies *Ascaris lumbricoides*, *Toxocara canis*, y *Trichuris trichura*. De la clase Cestoda se determinaron las especies *Hymenolepis nana* e *Hymenolepis diminuta*. De mayor abundancia *A. Lumbricoides* con relación a las otras especies que son de igual importancia médica.

El contenido promedio de sólidos totales en lodo crudo fue de 5.6 % y un pH de 6.3, las condiciones requeridas para la inactivación de organismos patógenos es lograr obtener un pH de 12 (EPA, 1994). Al estabilizar el lodo, este alcanzó en dos horas un pH de 12.5 con un contenido de sólidos de 20.9 % (Tabla 6.1). Es muy importante observar que el pH disminuyó, hasta ser neutro, durante el tiempo de almacenamiento debido a la absorción de carbono atmosférico que gradualmente consume la alcalinidad residual del lodo estabilizado.

Tabla 6.1. Caracterización del lodo crudo, después de 2 horas y 180 días de la estabilización alcalina.

Parámetro	Tipo de lodo		
	crudo	Estabilizado 2 horas	Estabilizado 180 días
ST %	5.6	20.9	ND
PH	6.3	12.5	6.9
Helmintos (HH/g de ST)	127	50	ND
HH viables (HH/g de ST)	ND	5.5	0.25
Coliformes fecales Log(NMP/g de ST)	6.9	2.5	1.5

ND: no determinado

Los resultados de las pruebas de estabilización alcalina indican que el tratamiento de lodo residual con cal inhibe casi completamente la viabilidad de huevos de helminto almacenándolo por 6 meses después de la estabilización. Se provoca un bloqueo irreversible en el desarrollo de estadios infectivos cuando son transferidos a un pH neutro (Eriksen *et al.*, 1995).

6.1.1. Coliformes fecales.

Con respecto al contenido de coliformes fecales en lodo crudo se obtuvo una concentración de 6.9 log (NMP/g de ST), pero en un tiempo de 2 h de contacto de la cal con el lodo se redujo a 2.5 log (NMP/g de ST) logrando obtener biosólidos clase A. Al realizar la lectura después de 6 meses se obtuvo una reducción hasta 1.5 log (NMP/g de ST) lo cual indica que no se presentó

recrecimiento aun cuando el pH se redujo a 6.9 unidades.

Esto confirma lo observado por Farrell (citado por Bruce, 1984), quien encontró que el tratamiento con cal a un pH de 11.5 rápidamente elimina bacterias fecales incluyendo *Salmonella* sp.

6.1.2. Huevos de Helmintos.

Para huevos de helmintos se observó una baja viabilidad a partir de las 2 horas de estabilizado el lodo, sin embargo a los seis meses en la viabilidad se obtuvo 0.25 HH/g de ST considerándose biosólidos clase A.

En trabajos realizados por Owen (citado por Bruce, 1984), se menciona que la inhibición de la maduración de los huevos de helmintos puede ser atribuido solamente al pH elevado, ya que no se encontraron evidencias de la incorporación de calcio en el embrióforo de huevos tratados con cal. Es claro que al alcanzar un pH de 12 en un tiempo corto se produce una inhibición casi completa de la viabilidad de huevos de helminto. En la tabla 6.1, se muestra la reducción de huevos de helmintos en lodos estabilizados a través del tiempo, que fue favorable para la obtención de biosólidos clase B a las dos horas y biosólidos clase A a los seis meses.

6.1.3. Metales pesados en lodo estabilizado con cal.

En la Tabla 6.2 se muestran los resultados de las concentraciones de metales pesados totales en el lodo estabilizado con cal. La US-EPA en su apartado 503 controla algunos metales pesados para la producción de biosólidos (Tabla 4.5), los lodos que se estabilizaron con cal se encontraron muy por debajo de los límites requeridos, por lo que estos biosólidos pueden ser factibles para reúso en suelo una vez que se haya eliminado ó reducido el contenido de microorganismos patógenos.

Tabla 6.2. Concentración de metales pesados totales en lodo estabilizado con cal.

METAL	LODO ESTABILIZADO (mg/kg ST)	LÍMITE DE METALES CONTENIDOS EN LOS BIOSÓLIDOS (mg/kg ST) (EPA, 1996)
As	<1	75
Cd	6.2	85
Cu	83	4 300
Hg	<1	57
Ni	25	420
Pb	76	840
Se	<1	100
Zn	1 663	7 500

La concentración de los metales pesados de los lodos estabilizados con cal

analizados en éste trabajo se encontraron por debajo de los reportados en el análisis de lodos producidos en la salida del Gran Canal de la ciudad de México (Jiménez y Campos, 1996), de igual manera están por debajo de los límites requeridos por la US-EPA. También la concentración de metales pesados analizados en este estudio se encuentran por debajo a los reportados en los Estados Unidos (Lue-Hing *et al.*, 1992).

La principal ventaja de la estabilización alcalina sobre los otros procesos mencionados por la US-EPA es su bajo costo y la simplicidad de la operación, ya que el lodo estabilizado con cal ha sido probado y generalmente es benéfico al utilizarlo posterior en suelos agrícolas. El complejo químico de reacciones entre la cal y los patógenos no ha sido dilucidado y es conveniente tomar en cuenta los procesos de hidrólisis, saponificación y neutralización ácida que ocurren en un ambiente con un pH alto creado en la estabilización alcalina.

La estabilización alcalina resultó ser un método que permitirá aplicar los biosólidos al suelo para uso agrícola con las más estrictas normas de la US-EPA para obtener biosólidos clase A.

6.2. ESTABILIZACIÓN ÁCIDA.

Debido a que la estabilización ácida es un proceso que no ha sido muy estudiado, es necesario adecuar sus condiciones de operación. En estas pruebas la calidad del lodo a lo largo de los diferentes muestreos varió ligeramente en cuanto al contenido de sólidos totales (4.3 a 6.7 %). Sin embargo, en el aspecto microbiológico las muestras presentaron valores significativamente diferentes lo cual permitió evaluar el proceso de estabilización ácida en lodos con distintas calidades microbiológicas (9.1×10^5 a 4.6×10^6 NMP/ g ST para coliformes fecales y 61.5 a 117.0 huevos/ g ST para helmintos). De acuerdo con los parámetros analizados, se discutirán los resultados en 4 incisos correspondiente a los ácidos: sulfúrico, perclórico, peracético y acético comprendiendo pH, coliformes fecales y huevos de helmintos.

6.2.1. Estabilización con ácido sulfúrico.

6.2.1.1. Resultados de pH.

La disminución del pH en los lodos acidificados involucra dos aspectos. La primera relacionado con la destrucción de microorganismos en ambientes ácidos por debajo de 4 unidades (McKinney, 1962), y la segunda con la posibilidad de deshidratar el lodo empleando polímeros sintéticos que operan a pH de 4 a 11 unidades generalmente (Allied Colloids, 1988).

En el caso de la destrucción de microorganismos, generalmente a un pH ácido únicamente los organismos acidófilos pueden sobrevivir así como algunos hongos. De hecho, bacterias acidófilas como las de los géneros de *Thiobacillus* y *Sulfolobus* oxidan minerales sulfurosos para producir ácido sulfúrico, el cual

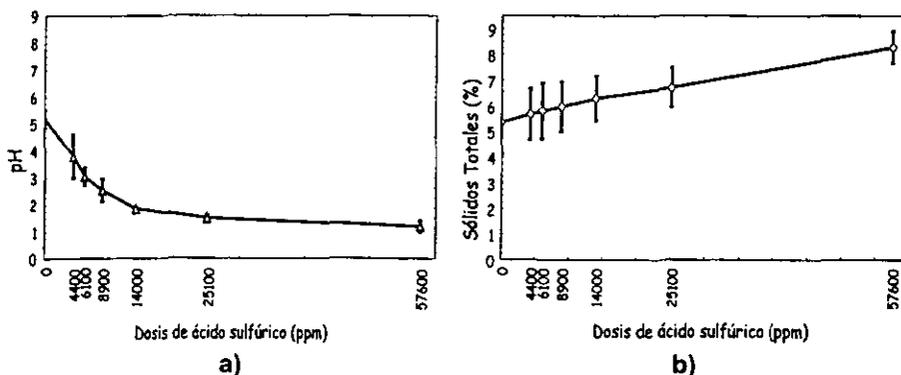
acidifica el medio. Sin embargo, la mayoría de las bacterias, incluyendo aquellas involucradas en la fermentación llamadas ácido-tolerantes, son incapaces de desarrollarse a pH menor de 4.

Por su parte, el acondicionamiento es un proceso que reduce el volumen de lodo mediante la remoción de agua del mismo, empleando diferentes equipos como filtros banda, filtros prensa, centrifugas o prensas rotatorias. En este proceso se emplean polímeros sintéticos que favorecen la coagulación de los lodos facilitando el desaguado en los procesos mencionados.

De acuerdo con lo anterior, podría pensarse que existe una limitante para combinar la estabilización ácida con el acondicionamiento de lodos. Hay que mencionar que es posible encontrar en el mercado polímeros específicos que operen a pH extremadamente ácido, como los alcanzados en la experimentación; sin embargo, su distribución es limitada y su aplicación requiere de mayor estudio.

El ácido sulfúrico fue empleado en las pruebas de estabilización ácida. En las pruebas de estabilización se aplicaron dosis de 4 400, 6 100, 8 900, 14 000, 25100 y 57 600 ppm. Las dosis de ácido sulfúrico fueron aplicadas independientemente del contenido de sólidos totales del lodo o del pH inicial de las muestras.

La gráfica 6.1. muestra los resultados promedio de pH en las muestras acidificadas con ácido sulfúrico y el valor correspondiente a sólidos totales. Es posible que debido a la operación en la planta de tratamiento de San Pedro Actopan, los tiempos de purga de los sedimentadores varíen sin un relativo control ocasionando que el lodo pase más tiempo en ellos y su concentración se incremente o disminuya. Al existir un mayor tiempo de retención de los lodos en el sedimentador, puede presentarse cierta actividad microbiana que ocasione un ligero descenso del pH debido a la producción de ácidos orgánicos ya que el lodo primario es fácilmente digerible (Metcalf y Eddy, 1991).



Gráfica 6.1. Comportamiento de: a) pH y b) sólidos totales en muestras acidificadas con ácido sulfúrico ($n=3 \pm$ desviación estándar).

En todas las muestras, con excepción de una, el pH fue menor a 4 unidades por lo que se esperaría una destrucción total de las bacterias contenidas en el lodo. Además, la desviación estándar de las muestras (indicada en la curva de promedios) fue en general baja, sugiriendo que la concentración de sólidos totales no influye de manera notable en el pH obtenido, el cual depende mayormente en la capacidad amortiguadora de los lodos dada por la alcalinidad.

Otro punto que hay que mencionar, es la cobertura del intervalo de valores de pH propuestos inicialmente a partir de la curva de dosis de ácido-pH (4 a 1). En la gráfica 6.1 se observa que la variación en el pH entre cada dosis corresponde generalmente a 0.5 unidades desde cerca de 4 hasta cerca de 1 lo cual destaca la utilidad de dicha curva.

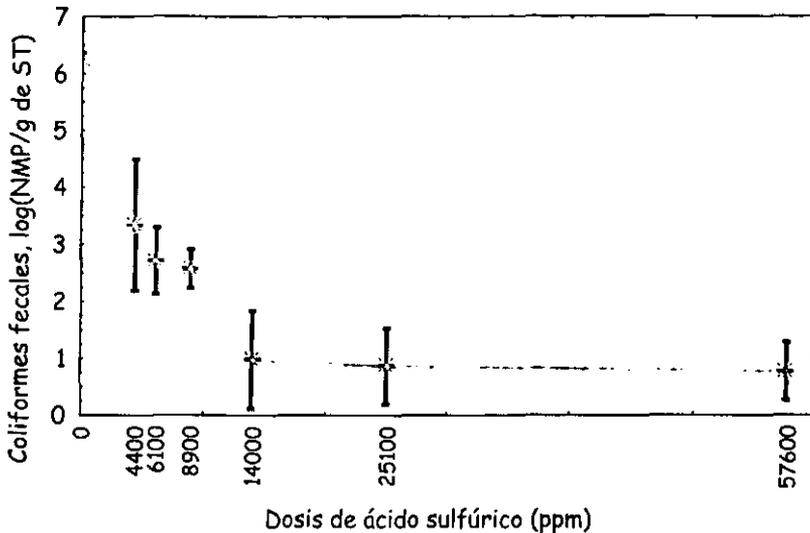
6.2.1.2. Coliformes fecales.

La Clase A en el Apartado 503 es prácticamente libre de patógenos mientras que la clase B permite un contenido determinado de coliformes fecales (único parámetro microbiológico regulado) pero debe aplicarse bajo ciertos criterios para disminuir el riesgo de infección.

En el caso de la estabilización de lodos para su aplicación en suelos lo recomendable es aplicar un proceso que genere lodos clase B que sean aplicados en lugares con acceso público restringido. Por ello, el proceso de estabilización ácida debe cumplir con una concentración de coliformes fecales menor a 2×10^6 NMP/g ST para poder ser empleados como fertilizantes o mejoradores de suelos. A continuación se describen los resultados de las concentraciones de coliformes fecales estabilizados con ácido sulfúrico.

La gráfica 6.2 presenta los resultados obtenidos con la aplicación de ácido sulfúrico. Es importante aclarar que podrían no justificar su aplicación si únicamente se requiere un lodo clase B debido a que la concentración inicial de coliformes fecales en el lodo crudo fue menor que el límite establecido para lodos clase B, todas las muestras acidificadas cumplieron con ese criterio. Por esto las muestras con dosis superiores a 6 100 ppm lograron cumplir con los límites para la clase A, que corresponden a las dosis superiores a 8 900 ppm en las que se redujo la concentración de coliformes fecales por debajo del límite de detección (3 NMP/g ST).

Por otro lado observamos que la reducción total de los coliformes fecales se da por debajo de las 2 unidades de pH (dosis de 14 000, 25 100 y 57 600 ppm), contrastando con lo mencionado anteriormente que establece que la inactivación se da a un pH menor a 4. Esto podría estar relacionado con el tiempo de contacto relativamente corto (30 minutos) manejado en esta investigación, que podría no ser suficiente para destruir por completo los coliformes aplicando dosis menores a 14 000 ppm.

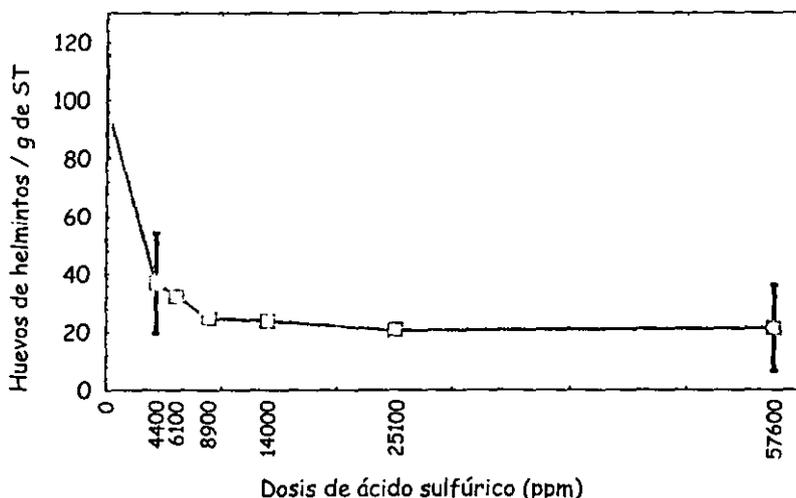


Gráfica 6.2. Reducción de la concentración de los coliformes fecales en muestras acidificadas con ácido sulfúrico ($n=3 \pm$ desviación estándar).

6.2.2.3. Huevos de helmintos.

Como se ha destacado, los huevos de helmintos son el principal problema en los lodos de nuestro país (Lamothe, 1988). De su destrucción o inactivación depende básicamente el que puedan ser aplicados en suelos debido a que son organismos altamente resistentes a cambios ambientales y por lo tanto, a la mayoría de los procesos de estabilización. Hay que recalcar el alto contenido de huevos de helmintos en el lodo crudo, el cual presentó en promedio 98 huevos/g ST y alcanzó un máximo de 111.5 huevos/g ST. Estos valores superan al valor promedio obtenido en lodos fisicoquímicos generados en el tratamiento del agua del emisor central del Drenaje Profundo del Valle de México correspondiente a 59 huevos/g ST (Jiménez, 1997).

Las primeras pruebas realizadas indicaron eficiencias variables en cuanto a la destrucción de helmintos, sin mostrar una tendencia definida en el comportamiento de este parámetro. Durante este periodo se realizaron repeticiones para intentar determinar la tendencia relacionada con cada ácido. Aparentemente, ésta se definió en algunos casos mientras que en otros la variabilidad de los resultados no mostró un patrón claro. Tal es el caso del ácido sulfúrico, el cual mostró una desviación estándar superior al 45 %, llegando hasta más de 140 % en las muestras acidificadas (Gráfica 6.3). Hay que mencionar que los resultados de la primera corrida indicaron una baja eficiencia de inactivación de los huevos de helmintos. Sin embargo, en las pruebas posteriores dicha eficiencia se incrementó aun cuando la diferencia entre corridas persistió.



Gráfica 6.3. Inactivación de los huevos de helmintos en muestras acidificadas con ácido sulfúrico ($n=3 \pm$ desviación estándar).

El mecanismo por el cual se inactivan los huevos de helmintos con el ácido sulfúrico no está definido. Sin embargo, puede deberse a la alta corrosividad del mismo y a la alta reactividad con una gran cantidad de sustancias orgánicas. Asimismo, es posible que el ácido destruya la membrana albuminosa por su acción deshidratante u oxidante dejando al huevo con una superficie descortificada lisa con lo cual se vuelve no infectivo. Este fenómeno se da con algunas enzimas digestivas que pueden actuar de la misma manera sobre los huevos de *Ascaris lumbricoides*.

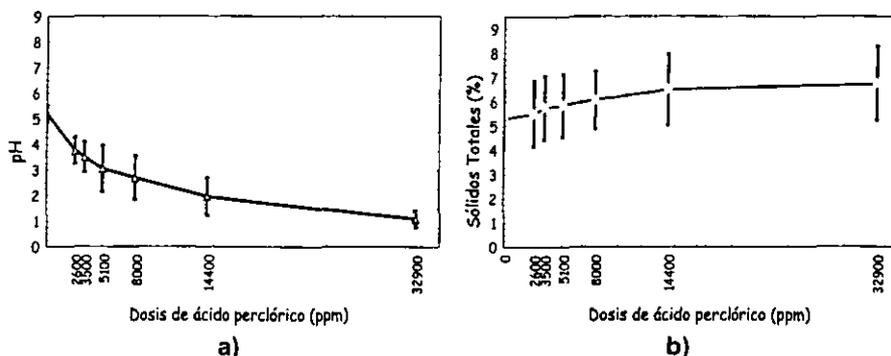
6.2.2. Estabilización con ácido perclórico.

6.2.2.1. Resultados de pH.

En la gráfica 6.4 se presentan los resultados de pH en las muestras estabilizadas con ácido perclórico. En este caso se emplearon dosis de 2 600, 3500, 5 100, 8 000, 14 400 y 32 900 ppm. Al igual que en las muestras que emplearon ácido sulfúrico, la muestra con una mayor contenido de sólidos totales presentó el pH más bajo, causado por la operación de la planta.

En estas muestras, la desviación estándar fue mayor que en el caso del ácido sulfúrico (0.61 vs 0.33 unidades de pH en promedio), lo cual quizás se debió a la variación en la alcalinidad de los lodos de una muestra a la otra. El pH alcanzado fue similar al obtenido con el ácido sulfúrico, limitando la posibilidad de acondicionamiento en las muestras con dosis altas. Se observa que a pesar de haber basado las dosis en la curva de calibración (dosis-pH), los resultados no

siguen un patrón definido como en el caso del sulfúrico.



Gráfica 6.4. Comportamiento de: a) pH y b) sólidos totales en muestras acidificadas con ácido perclórico (n=3± desviación estándar).

6.2.2.2. Coliformes fecales.

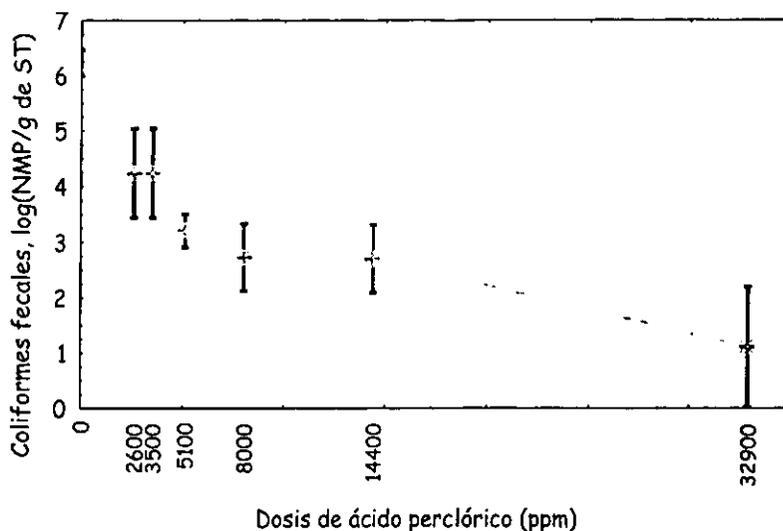
Con el ácido perclórico se obtuvieron resultados similares a los del sulfúrico como se aprecia en la gráfica 6.5. Empleando dosis superiores a 8 000 ppm se logra cumplir con el límite para lodos clase A y aplicando dosis de 32 900 ppm se alcanza reducir la concentración por debajo del límite de detección. En esta ocasión las muestras que cumplieron con el límite de clase A fueron aquellas que presentaron un pH promedio menor a 3 unidades. Sin embargo, hay que destacar que aun por debajo del pH de 4 la destrucción de coliformes fecales únicamente alcanzó reducir en promedio 2 unidades logarítmicas en el caso de las dosis de 2600 y 3 500 ppm, lo cual no puede ser considerado como una estabilización eficiente.

6.2.2.3. Huevos de Helmintos.

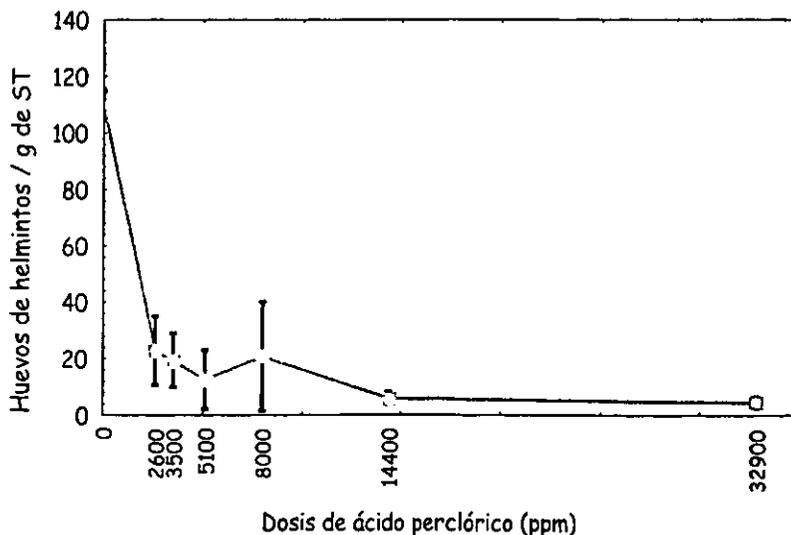
La aplicación del ácido perclórico, presentó una buena eficiencia en la inactivación de los huevos de helmintos (Gráfica 6.6). Partiendo de valores basales superiores a los 100 huevos/g ST se logró una disminución en las concentraciones hasta menos de 6 huevos/g ST en las muestras con 14 400 y 32900 ppm además una desviación estándar muy baja (<3 huevos/g ST). Considerando también las densidades alcanzadas de coliformes fecales en estas dos muestras (Gráfica 6.5), es posible ratificar que una dosis de aplicación mayor a 14 400 tendríamos lodos clase B de la US-EPA.

Empleando dosis menores a 8 000 ppm es posible obtener una reducción de los huevos de helmintos por debajo del límite de lodos clase B. Sin embargo, la elevada desviación estándar (hasta 19 huevos/g ST) impide el poder garantizar el cumplimiento de dicho límite al aplicar esas dosis. El mecanismo de acción podría deberse a la inactivación por su alta corrosividad a todo tipo de tejidos

destruyendo posiblemente la membrana de los huevos de helmintos.



Gráfica 6.5. Reducción de la concentración de los coliformes fecales en muestras acidificadas con ácido perclórico ($n=3 \pm$ desviación estándar).



Gráfica 6.6. Inactivación de los huevos de helmintos en muestras acidificadas con ácido perclórico ($n=3 \pm$ desviación estándar).

6.2.3. Estabilización con ácido peracético.

6.2.3.1. Resultados de pH.

El tercer ácido probado en la estabilización fue el peracético. De acuerdo con la literatura, éste posee un gran poder desinfectante aún en dosis relativamente bajas. Por tal motivo, las dosis empleadas fueron menores que con los ácidos inorgánicos. La gráfica 6.7 presenta los resultados de pH obtenidos en cada una de las corridas realizadas.

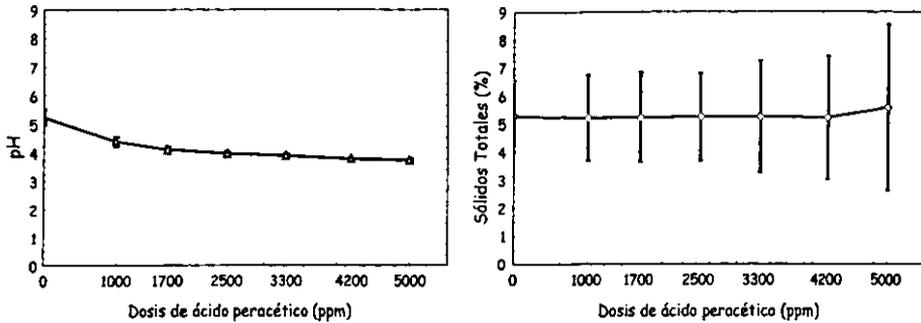
En este caso el pH de las muestras de lodo crudo no sigue el comportamiento mencionado anteriormente ya que la muestra con mayor contenido de sólidos presenta un pH intermedio entre las otras dos muestras con concentraciones menores (Gráfica 6.7). Una posibilidad es que la alcalinidad de los lodos permita neutralizar parte de los ácidos orgánicos generados durante la descomposición de los lodos. Otra posibilidad es que se haya dosificado un exceso de coagulante (sulfato de aluminio) en el tratamiento, lo cual generaría un lodo con un pH ligeramente ácido debido a la reacción del sulfato de aluminio con el agua liberando iones H^+ .

Se aprecia también en la gráfica 6.7 que la desviación estándar de los valores es menor que para los ácidos inorgánicos, lo que indica que éste ácido estabiliza mejor los lodos independientemente de las variaciones originales en su pH. Es posible que debido a la cantidad de compuestos heterogéneos que están presentes en los lodos, en distintas concentraciones en cada corrida, los ácidos inorgánicos al ser altamente reactivos puedan estar reaccionando con ellos, mientras que en el caso de los ácidos orgánicos, principalmente actúan reduciendo el pH del lodo.

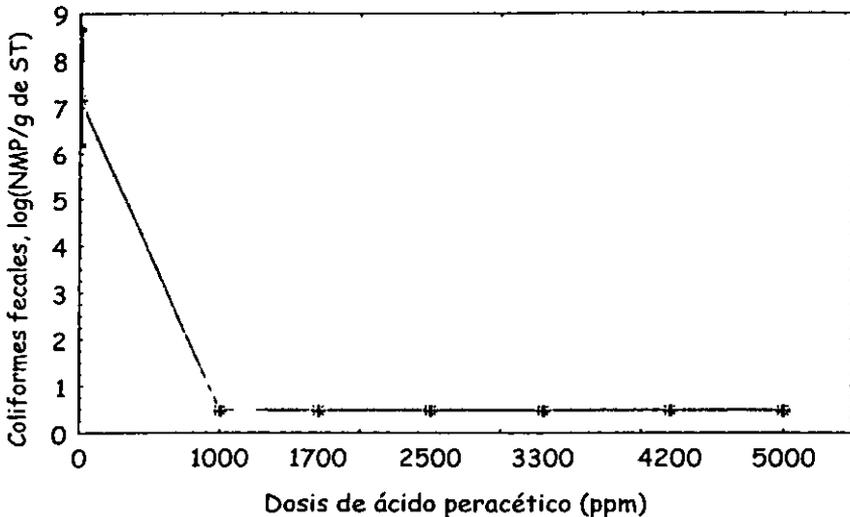
De acuerdo con lo citado anteriormente, al no reducir el pH por debajo de 4 unidades en algunas muestras, se esperaría una baja eficiencia en la destrucción de coliformes fecales empleando dosis menores a 2 000 ppm. Sin embargo, a estos niveles de pH es posible que ciertos polímeros permitan el acondicionamiento del lodo lo cual puede ser una ventaja considerable sobre los ácidos inorgánicos en este aspecto.

6.2.3.2 Coliformes fecales.

El ácido peracético confirmó su gran poder desinfectante como lo muestra la gráfica 6.8. En todas las dosis empleadas se logró reducir la concentración de coliformes fecales por debajo del límite de detección en la totalidad de las muestras. Por ello, no se observan líneas de desviación estándar en las muestras acidificadas, aún cuando las muestras de lodo crudo presentaron concentraciones diferentes de coliformes fecales hasta en más de 2 unidades logarítmicas.



Gráfica 6.7. Comportamiento del pH en muestras acidificadas con ácido peracético ($n=3 \pm$ desviación estándar).



Gráfica 6.8. Reducción de la concentración de los coliformes fecales en muestras acidificadas con ácido peracético ($n=3 \pm$ desviación estándar).

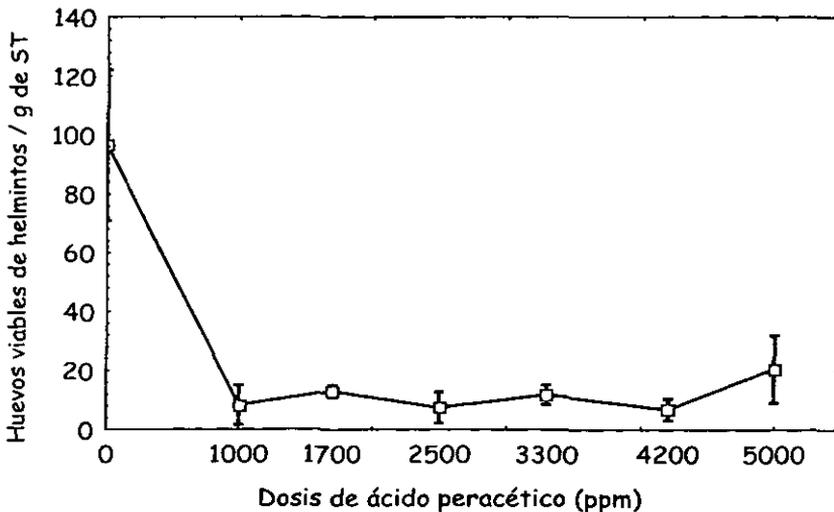
Aparentemente la acción del oxígeno activo liberado, combinado con el peróxido de hidrógeno de la solución atacan los grupos funcionales de algunas enzimas destruyendo la membrana celular. Además, algunos autores indican que el peracético tiene efectos sobre la actividad enzimática de las bacterias (Lazarova *et al.*, 1998).

Es claro que el tiempo de contacto experimental fue suficiente para permitir la acción del ácido peracético, permitiendo quizás reducir este tiempo lo que representaría un ahorro en algunos gastos derivados del proceso de estabilización (tamaño de reactor, costo de mezclado, etc.). Esto confirma que el producto

empleado destruye las bacterias en "5 minutos o menos" (Información personal del proveedor de Quimiproducos S.A. de C.V.), empleando dosis de 200 a 500 ppm. Sin embargo, se requieren pruebas posteriores a menor concentración para verificar esta posibilidad así como para lograr la estabilización.

6.2.3.3. Huevos de helmintos.

La gráfica 6.9 muestra los resultados obtenidos con ácido peracético. Como ya se demostró, éste posee un gran poder bactericida, además de su capacidad de inactivación de huevos de helmintos que se comprueba al observar los resultados. A concentraciones de 1 000 ppm se logra reducir de un promedio de 96.5 hasta 20 huevos/g ST o menos en algunas muestras. Como se aprecia en la gráfica 6.9, el comportamiento de este parámetro fue relativamente constante, presentando una desviación estándar relativamente baja con excepción de la dosis de 5 000 ppm. En este último parece ilógico que se presenten los valores mayores y una desviación estándar de más de 10 huevos/g ST. Sin embargo debe mencionarse también que en el caso del ácido peracético la reacción de éste con el lodo generó una gran cantidad de espuma especialmente en las muestras con dosis mayores. Además de la dificultad para determinar la concentración de patógenos en lodos (Bitton, 1994).



Gráfica 6.9. Inactivación de los huevos de helmintos en muestras acidificadas con ácido peracético ($n=3 \pm$ desviación estándar).

A pesar de que en el lodo crudo se presentaron valores de 67.8 a 117.0 huevos/g ST, en las muestras acidificadas la concentración disminuyó a niveles relativamente constantes. Podrían realizarse pruebas empleando dosis menores para evaluar el efecto sobre los helmintos, ya que en el caso de los coliformes

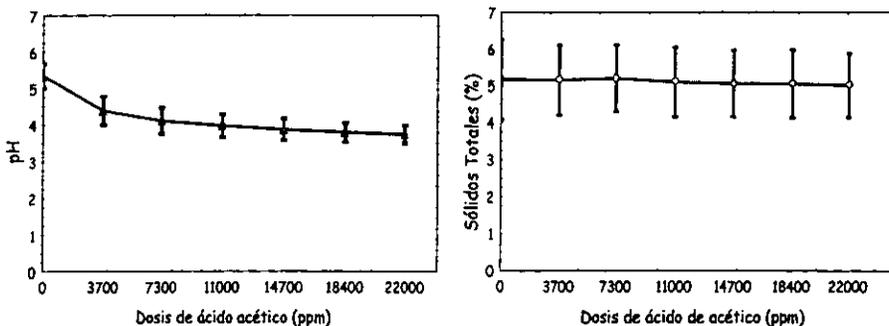
fecales, éstos fueron destruidos por debajo del límite de detección en todos los casos. Adicionalmente, se estudia la posibilidad de obtener un producto con una mayor concentración de ácido peracético y una menor concentración de peróxido de hidrógeno para evitar la formación de espuma en exceso y obtener una muestra más homogénea.

6.2.4. Estabilización con ácido acético.

6.2.4.1. Resultados de pH.

Las pruebas con ácido acético en este caso la muestra con un mayor contenido de sólidos presentó un pH mayor que las muestras con concentraciones de sólidos menores. Aunque aparentemente en todas las muestras de lodo crudo la concentración de sólidos no presentó una gran variabilidad, una variación de mas del 2 % como la observada refleja distintas condiciones de operación del proceso de tratamiento de agua.

Similarmente a lo observado en el caso del ácido peracético, las muestras acidificadas con ácido acético presentaron una desviación estándar pequeña - menos de 0.4 unidades de pH en todos los casos-. Además, el comportamiento del pH es similar manteniéndose ligeramente por debajo de 4 en las dosis mayores a 11 000 ppm en promedio, se observa que no hay un descenso significativo del pH incrementando esta dosis hasta 22 000 ppm (Gráfica 6.10). Con esto se esperaría una vez más una baja eficiencia en la destrucción de coliformes fecales pero el acondicionamiento podría ser llevado a cabo con polímeros que actúen en condiciones ácidas.



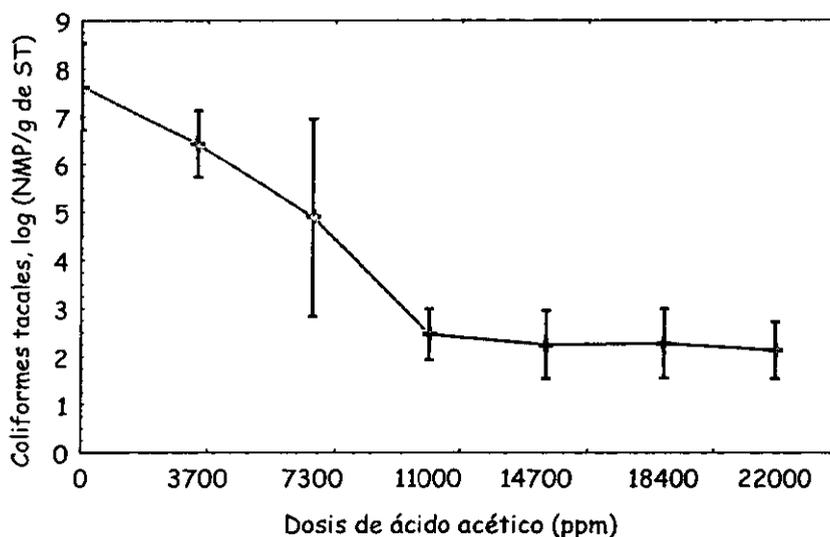
Gráfica 6.10. Comportamiento del pH en muestras acidificadas con ácido acético ($n=3 \pm$ desviación estándar).

Comparando las gráficas de comportamientos de pH en muestras acidificadas con los diferentes ácidos se esperaría una alta eficiencia en la destrucción de coliformes fecales empleando ácidos inorgánicos que disminuyen el pH muy por debajo de las 4 unidades requeridas. Sin embargo, en el apartado de coliformes fecales se observa que ésta relación de pH-destrucción no es

estrictamente válida, interviniendo otros factores como por ejemplo el tipo de ácido empleado. Es necesario destacar la diferencias de concentración en las dosis en el eje de las ordenadas para facilitar la apreciación de las curvas.

6.3.4.2 Coliformes fecales

Se presentan los resultados con el ácido acético en la gráfica 6.11. En ella se nota una baja eficiencia de destrucción de coliformes fecales empleando dosis menores a 11 000 ppm. Sin embargo, al aumentar las dosis por encima de ese valor, la calidad de los lodos cumple con lo establecido para lodos clase A. En este caso, la diferencia en las eficiencias si está aparentemente relacionada con el pH ya que en las muestras en las que el pH promedio fue superior a 4 unidades la eficiencia promedio fue considerablemente menor que en las muestras con un pH menor a 4 en las que se logró reducir la concentración un promedio de más de 5 unidades logarítmicas.



Gráfica 6.11. Reducción de la concentración de los coliformes fecales en muestras acidificadas con ácido acético ($n=3 \pm$ desviación estándar).

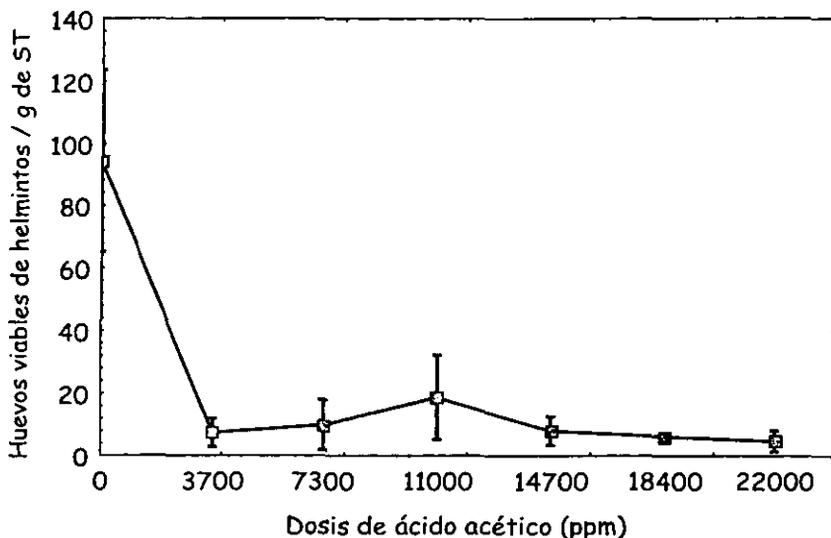
Cabe mencionar que de acuerdo con Parkin y Owen (1986), en el proceso de digestión anaerobia, si el pH desciende por debajo de 6 unidades, los ácidos volátiles como el acético, se encuentran en forma no-ionizada (CH_3COOH) la cual es más tóxica para algunas bacterias debido a que pasan a través de la membrana más fácilmente. Podría darse este fenómeno en el caso de la estabilización con ácido acético puesto que el pH inicial es menor a 6, permitiendo que la mayor parte del ácido se encuentre no-ionizado.

Los resultados obtenidos con el ácido peracético y acético indican que el pH

alcanzado en el proceso no necesariamente se relaciona con el nivel de estabilización logrado. Por el contrario, se establece que el tipo de ácido aplicado influye más en la eficiencia que el pH del proceso.

6.2.4.3. Huevos de helmintos.

El comportamiento del ácido acético fue parecido al del peracético, partiendo de concentraciones similares en el lodo crudo y logrando reducciones ligeramente superiores como se muestra en la gráfica 6.12. Una vez más con este ácido orgánico, la curva de concentraciones promedio tiene una tendencia marcada (con excepción de la dosis de 11 000 ppm que presentó un valor promedio mayor que el de las demás muestras, así como una desviación estándar relativamente grande).



Gráfica 6.12. Inactivación de los huevos de helmintos en muestras acidificadas con ácido acético ($n=3 \pm$ desviación estándar).

Comparando los resultados de helmintos de la gráfica 6.12 con los de coliformes fecales de la gráfica 6.11 se aprecia que no existe ninguna relación aparente entre los coliformes fecales y los huevos de helmintos por lo cual, los primeros no pueden ser empleados como indicadores.

Al igual que en el caso de los coliformes fecales, la inactivación de los huevos de helmintos podría deberse a la afinidad del ácido acético, a ser transportado a través de la membrana ya que en ciertas etapas del desarrollo del huevo existe una mayor permeabilidad a compuestos orgánicos.

De acuerdo con los resultados no es posible establecer ninguna relación entre el pH y la inactivación de los huevos de helmintos. Aparentemente, al igual que con los coliformes fecales, ésta depende en mayor medida del tipo de ácido aplicado por lo que el pH no es criterio adecuado para predecir la eliminación de patógenos. Es necesario mencionar que la membrana quitinosa que protege a los huevos de *Ascaris* está cubierta por una membrana llamada capa *ascarosida* la cual es permeable únicamente a gases. Sin embargo, cuando el huevo es sometido a estímulos específicos involucrando temperatura, pH, CO₂ o condiciones reductoras, esta capa se vuelve permeable y perfora la capa quitinosa (Ward y Fairborn, 1972).

Adicionalmente, se observó que no es posible establecer una relación entre el comportamiento de los coliformes fecales y los huevos de helmintos, por lo que la abundancia de los primeros no puede emplearse como indicador de estos últimos. En contraste lo que se establece es la factibilidad de emplear el proceso para reducir la concentración de coliformes fecales y huevos de helmintos con miras a producir biosólidos que puedan ser aplicados en suelos.

6.2.5. Determinación general de las eficiencias de los ácidos.

Para determinar las bondades de cada uno de los ácidos empleados en el proceso se resumieron las eficiencias de cada uno de los ácidos en la tabla 6.3 en donde se muestran los valores promedio, mínimos y máximos para los dos parámetros microbiológicos analizados.

Tabla 6.3. Resumen de las eficiencias de destrucción de coliformes fecales e inactivación de huevos de helmintos.

Ácido	Coliformes fecales (log)			Huevos de helmintos (%)		
	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima
Sulfúrico	4.29	1.70	5.88	69	2	98
Perclórico	3.19	1.39	5.88	87	62	97
Peracético	6.86	5.70	8.19	88	72	98
Acético	4.22	0.21	6.38	90	69	98

Como se observa, las mayores eficiencias (en negrita) fueron alcanzadas en el caso de los coliformes fecales con el ácido peracético. Por su parte, para los huevos de helmintos, éstas se dieron con el ácido acético y el peracético.

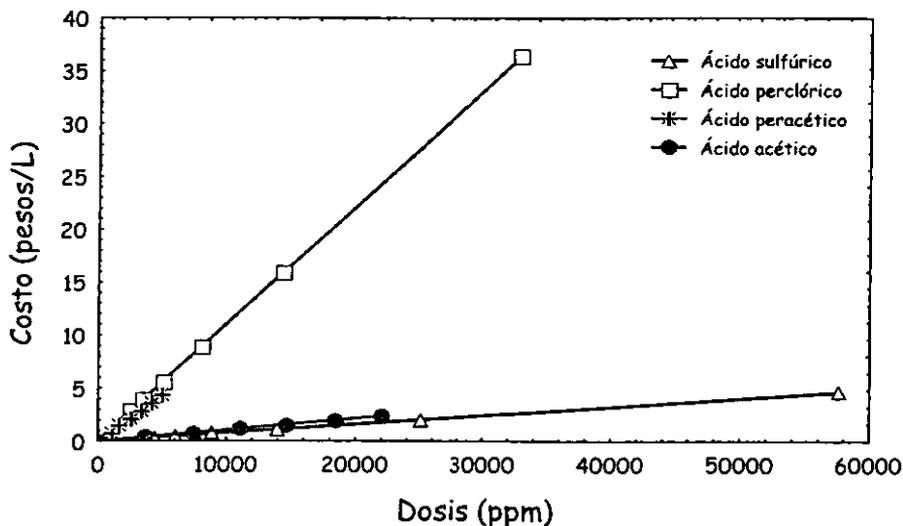
De lo anterior se puede establecer que los ácidos orgánicos tuvieron un comportamiento global más eficiente en el proceso que los ácidos inorgánicos por lo cual en el aspecto microbiológico se recomienda su uso en pruebas posteriores de estabilización ácida. En el caso del ácido acético se recomienda no operar el proceso empleando dosis menores a 11 000 ppm para garantizar una buena destrucción de coliformes fecales.

6.2.6. Evaluación del tipo de ácido recomendable para pruebas futuras de estabilización.

En la evaluación del tipo de ácido recomendable para el proceso influyen diversos factores de los cuales se tomarán en cuenta la eficiencia en la estabilización y el costo del reactivo.

Como ya se mencionó en el apartado 6.2.5, los ácidos más eficientes de manera global fueron el acético y el peracético. Por su parte, los ácidos sulfúrico y perclórico limitan su uso debido a las menores eficiencias en cuanto a helmintos y coliformes fecales respectivamente.

En relación a los costos, la gráfica 6.13 presenta los costos del tratamiento con cada ácido para las diferentes dosis empleadas. En este punto se tomó en cuenta únicamente el costo de reactivo asumiendo que los demás costos son iguales, debido a que las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones de operación (equipo empleado, velocidad de mezclado y tiempo de contacto).



Gráfica 6.13. Costos relacionados con el reactivo para cada tratamiento. Datos correspondientes al periodo de mayo a noviembre de 1999.

Como se observa, el alto costo del ácido perclórico hace que su aplicación en la estabilización sea muy desventajosa si se le compara con el costo de los demás ácidos. Aparentemente el ácido peracético tendría una tendencia similar pero su aplicación en dosis menores (como se hizo ver), disminuiría el costo asociado a su consumo, además de que es posible que la estabilización sea eficiente aplicando dosis menores.

Los ácidos sulfúrico y acético presentan costos muy similares, con una pendiente ligeramente mayor en el caso del acético. Sin embargo, las ventajas mencionadas en el aspecto microbiológico al acético lo proyectan como la mejor opción para ser usada en el proceso.

Por su parte, el ácido peracético ha mostrado recrecimiento en muestras de agua residual a las que ha sido aplicado, por lo que es necesario, en caso de proponerlo como reactivo, que se realicen estudios de recrecimiento con él.

7. CONCLUSIONES.

- El contenido de huevos de helmintos en algunos de los lodos fisicoquímicos generados en el Valle de México (hasta 117 HH/ g de ST), supera significativamente a los niveles encontrados en lodos primarios de los Estados Unidos, lo cual indica la necesidad de aplicar procesos que reduzcan significativamente este tipo de organismos.
- La estabilización alcalina de lodos fisicoquímicos es un proceso altamente eficiente en cuanto a remoción de coliformes fecales y huevos de helmintos. Los niveles alcanzados cumplen con las normas de la US-EPA para biosólidos clase B en ambos parámetros y para clase A en coliformes fecales.
- Los lodos fisicoquímicos estabilizados con cal en este estudio cumplen con los requerimientos para biosólidos de reúso agrícola en cuanto al contenido de metales pesados.
- El pH del lodo estabilizado con cal a través del tiempo tiende a neutralizarse y alcanza el nivel de biosólidos clase A para huevos de helmintos.
- La estabilización ácida de lodos fisicoquímicos es factible con los diferentes ácidos estudiados. Los ácidos orgánicos como el acético y peracético presentan mejores eficiencias de destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos que los ácidos inorgánicos como el sulfúrico y el perclórico. Además el costo favorece a estos ácidos orgánicos.
- En la estabilización ácida el empleo de ácidos orgánicos no presentó una disminución tan marcada del pH del lodo como en el caso de los inorgánicos, lo cual puede presentar importantes ventajas durante la aplicación de polímeros para la deshidratación del lodo.
- La estabilización ácida es capaz de producir biosólidos clase A de acuerdo con las normas de la US-EPA con respecto a coliformes fecales. Con respecto a huevos de helmintos sería necesario reducir aún más su concentración para lograr el cumplimiento de los límites establecidos para este tipo de lodos.
- La estabilización ácida es un proceso aplicable en lodos fisicoquímicos para reducir el alto contenido de microorganismos y permitir la aplicación de los lodos tratados en suelos agrícolas.
- Es posible producir biosólidos que cumplan con las normas de la US-EPA con los tratamientos probados, por lo que éste estudio puede servir de apoyo para la norma de lodos residuales generados en México.

8. RECOMENDACIONES.

- ◆ Se deben realizar pruebas adicionales con los ácidos acético y peracético para determinar si hay recrecimiento en los biosólidos producidos de bacterias y una mayor inactivación de huevos de helmintos a través del tiempo.
- ◆ Considerar análisis de disponibilidad de metales pesados en los lodos estabilizados con ácidos, como el acético y peracético debido a que un descenso en el pH pudiera incrementar su concentración en la fase soluble.
- ◆ Se deben analizar los costos asociados con la estabilización de los lodos, realizando una comparación entre diferentes procesos que logren reducir la concentración de microorganismos de manera similar.
- ◆ Es necesario determinar el grado de destrucción de la materia orgánica (medida como sólidos volátiles) contenida en el lodo para verificar el cumplimiento de los criterios de reducción de la atracción de vectores de la US-EPA o justificar la aplicación de alguna medida alternativa para cumplir con dichos criterios.
- ◆ Es necesario considerar las posibles restricciones de aplicación para cada tipo de suelo, principalmente debido al pH de los diferentes biosólidos estudiados con el propósito de disminuir el riesgo de impactar negativamente al suelo.
- ◆ Se debe iniciar con una reglamentación rigurosa que permita a las industrias y organismos encargados del tratamiento del agua residual adoptar la prevención de la contaminación como la llave para reforzar en un futuro el manejo de los lodos residuales municipales. Sin embargo, dicha reglamentación deberá estar acorde a las condiciones del país, principalmente considerando la calidad de los lodos a tratar.

REFERENCIAS.

- ☞ Allied Colloids. 1988. Polymers: A brief discussion of polymers and their use in sludge treatment. U.S.A.
- ☞ APHA, AWWA, WPCF. 1995. Estándar Methods for the examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. Washington, D.C. U.S.A.
- ☞ Ayres, R.M. y Mara D.D. 1996. Analysis of wastewater for use in agriculture. World Health organization. Finland. 31 p.
- ☞ Bird, F.A. 1971. The structure of nematodes. Academic Press, New York. 318 p.
- ☞ Bitton, G. 1994. Wastewater Microbiology. Wiley-Liss, Inc. 226 p.
- ☞ Bogitsh, J. B. y Cheng, C.T. 1998. Human Parasitology. Academic Press. U.S.A. pp 489.
- ☞ Bruce, M.A. y Fisher, J.W. 1984. Sludge Stabilisation. Methods and Measurement. En: Bruce, A. Sewage sludge stabilization and disinfection. Ellis Horwood Limited, Great Britain. pp 23-44.
- ☞ Brusca, C. R. y Brusca, J.G. 1990. Invertebrates. Sunderland Publication, Massachusetts, U.S.A. 922 p.
- ☞ Caceres, A., Xet, A.M. y Flores, G. 1987. Simplified methodology for helminth egg counts and viability in organic fertilizer. *Second Project Meeting on Use of Human Waste in Agriculture and Aquaculture*, Adelboden, Switzerland, 15-19 June. En: Ghiglietti, R., Genchi, C. Di Matteo, L. Calcaterra, E. y Colombi, A. 1997. Survival of *Ascaris suum* eggs in ammonia treated wastewater sludges. Great Britain. *Bioresource Technology*. **59**, 195-198.
- ☞ Cheng, C.T. 1986. General Parasitology. Segunda edición, Academic Press. Inc. U.S.A. pp 827.
- ☞ Cifuentes, E., Blumental, J. Ruiz, P. G. y Beneth, S. 1992. Health Impact Evaluation of Wastewater in Mexico. *Public Health Review*, **19**, 243-250.
- ☞ Collin, F. 1983. Characterization of the Physical State of Sludge, paper presented at the COST 68 Symposium Brighton, England.
- ☞ Dar, H. G. 1997. Impact of Lead and Sewage Sludge on Soil Microbial Biomass and Carbon and Nitrogen Mineralization. *Environ. Contamin. Toxicol.* **58**, 234-240.
- ☞ De León, R., Gerba, P. Ch. y Rose, B. J. 1988. Manual for monitoring parasites water. University of Arizona. pp 17-387.
- ☞ EPA. 1996. Part 503. Standards for the use or disposal of sewage sludge, Versión actualizada en internet.
- ☞ EPA/832/R-93-003. 1994. A plain english guide to the EPA, part 503 Biosolids rule. U.S.A.
- ☞ Eriksen, L. Andreasen, P. y Ilsoe B. 1995. Inactivation of *Ascaris suum* eggs during storage in lime treated sewage sludge. Great Britain. *Wat. Sci. Tech.* **36** (11), 1026-1029.
- ☞ Farrell, J. 1984. Recent developments in sludge digestion in the United States and a view of the future. En: Bruce, A. Sewage sludge stabilization and disinfection. Ellis Horwood Limited, Great Britain. pp 315-329.

- ☞ Feachem, G., Bradley, J. Garelick, H. y Mara, D. 1983. Sanitation and Disease Health Aspects of excreta and Wastewater Managment. John Wiley and Sons. Chichester, Great Britain. pp 233-297.
- ☞ Fraser, A.J., Godfree, F. A. y Jones, F. 1984. Use of peracetic acid in operational sewage sludge disposal to pasture. *Wat. Sci. Tech.* 17, 451-466.
- ☞ Ghiglietti, R., Genchi, C. Di Matteo, L. Calcaterra, E. y Colombi, A. 1997. Survival of *Ascaris suum* eggs in ammonia treated wastewater sludges. *Bioresource Technology*. 59, 195-198.
- ☞ Godfree, F., Jones, F. Satchwell, M. y Watson, C. 1984. The effectiveness of chemical disinfection on faecal bacteria. En: Bruce, A. Sewage sludge stabilization and disinfection. Ellis Horwood Limited, Great Britain. pp 412-425.
- ☞ Grasso, P. E., Scott, B. y Holm-Hansen, T. 1984. Sludge disinfection. Water Pollution Control Federation, Washington, U.S.A. 50 p.
- ☞ INDRE. 1995. Manual de técnicas de laboratorio. Vol. I: Bacterología y Virología. Secretaría de Salud, México. 338 p.
- ☞ Ingraham, J.L. 1998. Introducción a la microbiología. Vol.I. Reverté, Barcelona. 328 p.
- ☞ Jiménez, C. B., Barrios, P.A. y Garcapiña, T. 1998. Apoyo para la integración del documento "Factibilidad de reúso de biosólidos provenientes de un TPA estabilizados con cal en Ciudad Juárez". Informe final elaborado para la Universidad de las Naciones Unidas.
- ☞ Jiménez, C. B. y Campos, R. G. 1996. Estudio en modelo físico del agua del Grán Canal en el Km 27.5: Tratamiento de lodos. Reporte a CNA, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- ☞ Jiménez, C. B., Chavez, A. y Capella, A. 1997. Wastewater in the Valley of México and its reuse. Instituto de Ingeniería, UNAM. México. 9 p.
- ☞ Kiff, R.J. y Lewis-Jones, R. 1984. Factors that govern the survival of selected parasites in sewage sludge. En: Bruce, A. Sewage sludge stabilization and disinfection. Ellis Horwood Limited, Great Britain. pp 453-461.
- ☞ Kreith, F. 1994. Handbook of solid waste managment. McGrawhill. pp 109-147.
- ☞ Lamothe, A.R. y Garcia, P.L. 1988. Helmintiasis del hombre en México. A.G.T. Editor, México. 139 p.
- ☞ Lavoie, C. 1983. Identification of strains isolated as total and fecal coliforms and comparison of both groups as indicators of fecal pollution in tropical climates. *Journal of Microbiology*. 29, 689-693.
- ☞ Lazarova, V., Janex, M.L. Fiksdal, L. 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.
- ☞ Lefevre, F., Audic, M. J. y Ferrand, F. 1992. Peracetic acid disinfection of secondary effluents discharged off coastal seawater. *Wat. Sci. Tech.* 25 (12), 155-164
- ☞ Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1996. México.
- ☞ Lue-Hing, C., Zenz, R.D. y Kuchenrither. 1992. Municipal sewage sludge managment: processing, utilization and disposal. Ed. Technomic. Lancaster U.S.A. Water Environment Federation.
- ☞ Lynch, J.M., Pffafin, J.R. Pecker, C. Cardenas, R. Cunningham, S. Bozzone, R.T. y Borg, S. 1984. Method for the treatment of wastewater sludge. Patente

- No. 4,500,428, U.S.A.
- ☞ McKinney, R.E. 1962. Microbiology for sanitary engineers. McGraw-Hill.
 - ☞ Metcalf y Eddy. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, McGraw-Hill, Second Edition. New York. 1334 p.
 - ☞ Meunier, N., Tyagi, R.D. y Blais, J.F. 1996. Traitement acide pour la stabilisation des boues d'épuration. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **23**, 76-85.
 - ☞ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-051-1981. Análisis de Agua, Determinación de Metales, Método Espectrofotométrico de Absorción Atómica.
 - ☞ Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Diario Oficial de la Federación. Publicación 6 de enero de 1997. México.
 - ☞ Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. Diario oficial de la Federación. Publicación 22 de octubre de 1993. México.
 - ☞ Norma Oficial Mexicana NOM-055-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: Bruce, A. Sewage sludge stabilization and disinfection. Ellis Horwood Limited, Great Britain. pp 426-439.
 - ☞ Parkin, G.F. y Owen, W.F. 1986. Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. ASCE. *Journal of Environmental Engineering*. **112** (5),
 - ☞ Roth, L.A. y Keenan, D. 1971. Acid injury of *Escherichia coli*. *Canadian Journal of Microbiology*. **17** (8), 1005-1008.
 - ☞ Sandoval, Y. L. 1999. Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua. Ingeniería y Ciencias Ambientales. Enero-Febrero. **40**, 11- 20.
 - ☞ Schmidt, D. G. y Roberts, S. L. 1996. Foundations of Parasitology. Wm. C. Brown Publishers, Fifth Edition. U.S.A. pp 355-381.
 - ☞ Smyth, D.J. y McManus, P.D. 1989 The physiology and biochemistry of cestodes. Cambridge University Press, Cambridge. pp 156-194.
 - ☞ Storey, W. G. y Phillips, A. R. 1985. The survival of parasite eggs throughout the soil profile. *Parasitology*. **91**, 585-590.
 - ☞ Vesilind, A. P., Hartman, G. C. y Skene, E. T. 1986. Sludge Management and disposal for the practicing Engineer. Lewis publisher Inc. pp 58-63.
 - ☞ Viessman, W. y Hammer, M. J. 1993. Water supply and pollution control. Haper Collins College Publishers. pp 532-564.
 - ☞ Ward, K.A. y Fairborn, D. 1972. Chitinase in developing eggs of *Ascaris suum* *The Journal of Parasitology*. **58**(3), 546-549.
 - ☞ www.biosci.ohio-state.edu/ College of Biological Sciences. Ohio State University. U.S.A.
 - ☞ www.cdfound.to.it/_atlas.htm Atlas of Medical Parasitology. Carlo Denegri Foundation. Turin, Italy.

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN.

A.1. Descripción de la técnica para obtener sólidos totales.

Para determinar la concentración de sólidos totales se utiliza el método gravimétrico de Sólidos Totales, basándose en la referencia del Standar Methods (APHA, AWWA, WPCF, 1995).

A.1.1. Procedimiento.

Se preparan cápsulas de evaporación a peso constante en una mufla a 505° C por 2 horas; posteriormente se deja enfriar en el desecador por un periodo de 30 minutos. Se pesa cada una de las cápsula obteniendo el peso 1.

A cada cápsula se le agregan 50 mL de lodo, posteriormente se pesa cada una obteniendo el peso 2. Se introducen las cápsulas en la estufa a 105° C durante 24 horas hasta la evaporación total del agua. Después de retirar las cápsulas, dejándolas enfriar en el desecador por 30 minutos, se pesa de nuevo cada cápsula obteniendo el peso 3.

A.1.2. Cálculos:

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

P_1 = peso constante de la cápsula, en g.

P_2 = peso de la cápsula con la muestra antes de la evaporación, en g.

P_3 = peso de la cápsula con la muestra después de la evaporación, en g.

A.2. descripción de la técnica de fermentación en tubos múltiples ó número más probable (NMP), por medio directo (A-1).

Este método está en base a lo descrito por Ayres y Mara (1996).

La evaluación microbiológica de los lodos es permitida por medio de la fermentación o degradación anaerobia de los hidratos de carbono por los microorganismos, en la que el oxígeno molecular que actúa como aceptor terminal de electrones ha sido sustituido por un sustrato orgánico, y así estimar la magnitud de la contaminación. Dicha evaluación se realiza por medio de una serie de pruebas sistemáticas de cuantificación de indicadores bacteriológicos, principalmente del grupo coliforme fecal, cuya sola presencia demuestra que ha ocurrido algún tipo de contaminación.

La técnica de fermentación en tubos múltiples (NMP) adecuada para agua con alta turbidez y lodos requiere de mayor tiempo en su realización y medios de cultivo, incrementado con ello su costo. Sin embargo, pruebas paralelas nos permiten demostrar la aplicabilidad y equivalencia entre éstas.

A.2.1. Conservación de las muestras.

Las muestras una vez colectadas deben procesarse lo antes posible. De no ser así, se deben refrigerar sin exceder de 6 a 24 horas para muestras altamente contaminadas y con baja turbidez respectivamente. Tiempos superiores afectan la concentración microbiana y el resultado no es representativo.

En el medio A-1 se utiliza una incubación directa a 44° C adecuada para muestras de agua con alta turbidez y lodos, lo cual requiere de mayor tiempo en su realización y medios de cultivo, incrementando con ello su costo.

A.2.2. Reactivos.

- > Lactosa 5 g
- > Triptona 20 g
- > Salicín 0.5 g
- > Cloruro de sodio 5 g
- > Tritón X-100 1 mL
- > Agua destilada 1 000 mL

El medio de cultivo consiste en la disolución de todos los reactivos, ajustando el pH a 6.9. Agregar 10 ml de solución a cada tubo de ensaye, introducir un tubo Durham invertido, tapar los tubos, y esterilizar en el autoclave (120° C por 10 m).

Adicionalmente se prepara agua de dilución constituida por fosfato monopotásico y magnesio a un pH de 7.2 ± 0.1 , esta solución tiene una capacidad amortiguadora.

Se agregan 9 ml en tubos con tapa y se esteriliza.

A.2.3. Procedimiento.

- a) Colectar una cantidad de lodo en gramos de materia fresca que corresponda a 4 gramos de materia seca en un frasco estéril bien tapado.
- b) Agitar la muestra, e inocular 1 ml en un tubo con medio de cultivo o a un tubo que contenga agua de dilución. No pipetear con la boca.
- c) Agitar esta agua de dilución con muestra (1:10), utilizando una nueva pipeta estéril, transferir 1 mL a cada uno de los tres tubos que contienen el tubo Durham invertido y 10 ml de medio A-1. Señalar los tubos de

acuerdo a las diluciones que se hayan inoculado, (1:10, 1:100, 1:1000, etc...).

- d) Transferir los tubos inoculados en un baño de agua mantenido a 44° C ($\pm 0.25^\circ$ C).
- e) Después de la incubación por 24 horas, examinar a cada tubo la producción de gas. Contar el número de tubos positivos (aquellos con producción de gas) y determinar el NMP.
- f) Para lodos, la densidad de los coliformes se expresa como NMP de coliformes por gramos de sólidos totales (base en peso seco), y se obtiene mediante el código formado por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas, aplicando la siguiente fórmula.

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

A.3. Descripción de la técnica para la determinación y cuantificación de huevos de helmintos de la NOM-001-ECOL/96.

Esta técnica es aplicable para la cuantificación de huevos de helminto tanto para muestras de lodos, influentes y efluentes de plantas de tratamiento.

A.3.1. Procedimiento para lodos.

A.3.1.1. Muestreo.

- Preparar recipientes de 1 litro desinfectados con cloro, lavados con agua potable a chorro y enjuagarlos con agua destilada..
- Tomar una cantidad en gramos de materia fresca que corresponda a 2 gramos de materia seca.

A.3.1.2. Manejo y conservación de la muestra.

- Las muestras serán refrigeradas o colocadas en agua con hielo tan pronto como sea posible.
- Se transportarán al laboratorio en hieleras con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo
- Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo y si no es posible refrigerar, las muestras deben procesarse dentro de las 48 horas.

A.3.1.3. Concentrado y centrifugado de la muestra.

- Filtrar el lodo sobre un tamiz de 160 micras, enjuagar también el

- recipiente donde se encontraba originalmente la muestra y lavar enseguida con 5 litros de agua potable o destilada.
- Recibir el filtrado en garrafones de 8 litros.
 - Dejar sedimentar durante 3 horas o toda la noche.
 - Aspirar el sobrenadante al máximo y depositar el sedimento en una botella de centrifuga de 450 mL, enjuagar 2 a 3 veces el recipiente de 8 litros.
 - Centrifugar a 400 g por minuto (1 400 rpm por 3 minutos).
 - Decantar el sobrenadante por vacío (asegurarse de que exista la pastilla) y resuspender la pastilla en 150 mL de $ZnSO_2$ con una densidad de 1.3, homogeneizar.
 - Centrifugar a 400 g por 3 minutos.
 - Recuperar el sobrenadante vertiéndolo en un frasco de 2 litros y diluir cuando menos en 1 litro de agua destilada.
 - Dejar sedimentar 3 horas o toda la noche.
 - Aspirar al máximo el sobrenadante por vacío y resuspender el sedimento agitando, verter el líquido resultante en 2 tubos de centrifuga de 50 mL y lavar de 2 a 3 veces con agua destilada el recipiente de 2 litros. Centrifugar a 480 g por 3 minutos (2,000 rpm por 3 minutos).
 - Resuspender la pastilla en 15 mL de solución alcohol-ácido, adicionar 10 ml de éter etílico.
 - Agitar suavemente y abrir de vez en cuando los tubos para dejar escapar el gas.
 - Centrifugar a 660 g por 3 minutos (2,500 rpm por 3 minutos).
 - Aspirar al máximo el sobrenadante para dejar menos de 1 ml de líquido, proceder a cuantificar.

A.3.1.4. Identificación y cuantificación de la muestra.

- Distribuir todo el sedimento en una celda de Sedwich-Rafter o bien en una cámara de conteo de Doncaster.
- Para evitar la sobreposición de las estructuras y el detritus no eliminado, repartir la muestra en los volúmenes que se consideren adecuados y faciliten su lectura.

A.3.1.5. Determinación de viabilidad.

- Para estudiar la viabilidad, diluir la pastilla con 4 ml de ácido sulfúrico 0.1N e incubar a 26 °C por 4 semanas, realizar la identificación y cuantificación. Se tomaron los criterios de determinación de huevos de helmintos viables de la tabla 5.2.