

LODOS RESIDUALES COMO ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACION DE SUELOS

JOSE MISAEL MEDINA TIZNADO

MONOGRAFIA

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Grado de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA



**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

Programa de Graduados
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Noviembre de 2003

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMIA
DEPARTAMENTO DE BOTANICA**

**LODOS RESIDUALES COMO ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACION DE
SUELOS**

MONOGRAFIA

**ELABORADA POR:
JOSE MISAEL MEDINA TIZNADO**

**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR PARA SER
APROBADA Y COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:**

INGENIERO EN AGROBIOLOGIA

COMITE ASESOR:

**BIOL. SOFIA COMPARAN SANCHEZ
PRESIDENTE**

**DR. EDMUNDO PEÑA CERVANTES
1er. SINODAL**

**MC. EMILIO RASCON ALVARADO
2do. SINODAL**

**BIOL. MARIA TERESA RUIZ DE LEON
3er. SINODAL**

**MC. ARNOLDO OYERVIDES GARCIA
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE AGRONOMIA**

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO NOVIEMBRE 2003

DEDICATORIA

ESTE TRABAJO ESTA DEDICADO CON TODO CARIÑO, AMOR Y RESPETO A TODA MI FAMILIA, POR EL SACRIFICIO Y APOYO QUE RECIBÍ DE CADA UNO DE ELLOS DURANTE MI FORMACION PROFESIONAL.

A MIS PADRES

Por tener la dicha de ser hijo de ellos, porque por ellos soy lo hasta ahora soy, por brindarme la mayor herencia que pude haber recibido, Educación. Por confiar en mi, por su amor y por todos sus sacrificios. GRACIAS. . .

A MIS HERMANOS

Por haber compartido tantas cosas juntos, por que el día en que nos separamos siempre recibí algún apoyo que me motivaron para salir adelante y vencer los obstáculos.

A cada uno de ellos les agradezco de corazón, pero quiero agradecer mi más grande agradecimiento a ALVARO MEDINA por su grande sacrificio y a ROSARIO MEDINA por que por su cercanía siempre tuve un apoyo y aliento para salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A MI "ALMA MATER"

Con todo respeto y cariño por haberme acogido en su seno y darme la oportunidad de formarme como profesionista.

A MIS PADRES Y HERMANOS

Quiero brindar mi mas grande agradecimiento a mi familia. Por su importante y desinteresado apoyo incondicional que siempre me brindaron, porque sin ellos hubiera sido dificil lograr mis objetivos.

A MIS ASESORES

Por el apoyo recibido durante la realización del más importante de todos trabajos realizados durante mi especialización, MI TITULACION.

Expreso mi mas profundo y sincero agradecimiento a la BIÓLOGA MARÍA TERESA RUIZ DE LEÓN, por la confianza y el apoyo que siempre me brindo

INDICE GENERAL

INDICE DE CUADROS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO.....	3
I. ANTECEDENTES.....	4
JUSTIFICACIÓN.....	6
II. CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	9
2.1. IMPORTANCIA DEL AGUA.....	9
2.2. ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN.....	9
2.2.1. EUTROFICACIÓN.....	10
2.2.2. LIXIVIACIÓN.....	10
2.3. FUENTES DE CONTAMINANTES PRODUCIDOS.....	11
2.3.1. AGRICULTURA.....	11
2.3.2. DOMESTICO.....	11
2.3.3. INDUSTRIA.....	12
III. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS REASIDUALES.....	13
3.1. DEFINICIÓN DE AGUA RESIDUALE.....	14
3.2. FINALIDAD DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO.....	14
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	15
3.4. COMPOSICIÓN GENERAL DE LAS AGUAS.....	16
3.4.1. ARRASTRE POR LAS LLUVIAS.....	16
3.4.2. EXCRETAS.....	16
3.4.3. RESIDUOS DOMESTICOS.....	16
3.4.4. RESIDUOS INDUSTRIALES.....	16
3.5. NATURALEZA CAMBIANTE DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	17
3.6. ANÁLISIS Y CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL.....	17
3.6.1. INDICADORES FÍSICOS.....	17
3.6.2. INDICADORES QUÍMICOS.....	18
3.6.3. INDICADORES BIOLÓGICOS.....	19
3.7. FASE DE TRATAMIENTO.....	20
3.7.1. PRETRATAMIENTO.....	20
3.7.2. TRATAMIENTO PRIMARIO.....	21
3.7.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	22
3.7.4. TRATAMIENTO TERCIARIO (AVANZADO).....	23
3.8. VERTIDO DEL LÍQUIDO.....	23

IV. LODOS RESIDUALES.-----	24
4.1. DEFINICIÓN DE LODOS.-----	25
4.2. PRODUCTOS DE DESECHO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS----	25
4.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.-----	26
4.4. ANALISIS DE LOS LODOS.-----	27
4.4.1. CLASIFICACIÓN DE LODOS.-----	27
4.5. CONTAMINANTES PRESENTES EN LOS LODOS.-----	28
4.5.1. METALES PESADOS.-----	28
4.5.1.1. EFECTOS EN LA SALUD PUBLICA.-----	29
4.5.2. CONTAMINANTES ORGANICOS.-----	30
4.5.2.1. EFECTOS EN LA SALUD PUBLICA.-----	30
4.5.3. AGENTES PATÓGENOS.-----	31
4.5.3.1. EFECTOS EN LA SALUD PUBLICA.-----	33
V. TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES.-----	35
5.1. FINALIDAD DEL TRATAMIETO.-----	36
5.1.1. ALMACENAMIENTO.-----	36
5.2. ETAPAS DEL TRATAMIENTO.-----	36
5.2.1. MEZCLADO DE LOS LODOS.-----	37
5.2.2. 1ra ETAPA (ESPESADO).-----	37
5.2.3. 2da ETAPA DIGESTIÓN Y/O ESTABILIZACIÓN.-----	38
5.2.4. 3ra ETAPA ACONDICIONAMIENTO Y DESINFECCION.-----	41
5.2.5. 4ta ETAPA DESHIDRATACIÓN.-----	42
5.2.6. 5ta ETAPA SECADO.-----	43
5.3. ANALISIS DE LODOS ANTES DE LA DISPOSICIÓN.-----	44
5.4. ALTERNATIVAS DE DISPOSICION.-----	46
5.5. PRINCIPALES ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN EN EL MUNDO.-----	48
5.6. EFECTOS NEGATIVOS POR LOS TIPOS DE DISPOSICIÓN.-----	49
5.7. RECICLAMIENTO Y/O PENSAMIENTO AMBIENTAL.-----	51
VI. DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS.-----	52
6.1. SITUACIÓN MUNDIAL.-----	53
6.2. EROSIÓN DE SUELOS EN MÉXICO.-----	53
VII. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS TRATADOS.-----	58
7.1. CONSTITUCIÓN QUÍMICA DEL LODO.-----	59
7.2. CARACTERÍSTICAS DESFAVORABLES PARA LA APLICACIÓN AL SUELO.-----	60
7.2.1. PATÓGENOS.-----	60
7.2.2. METALES.-----	60
7.2.3. NUTRIMENTOS.-----	61
7.2.4. COMPUESTOS ORGANICOS.-----	62
7.3. CARACTERÍSTICAS FAVORABLES PARA LA APLICACIÓN AL SUELO.-----	63
7.3.1. NITRÓGENO.-----	63
7.3.2. FÓSFORO.-----	64

7.3.3. OTROS NUTRIENTES ESENCIALES PARA LAS PLANTAS.--	65
7.3.4. MATERIA ORGÁNICA.-----	66
VIII. APLICACIÓN DEL LODO AL SUELO.-----	67
8.1. LEGISLACIÓN PARA EL USO AGRÍCOLA DE LOS LODOS.-----	68
8.2. SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL LUGAR DE APLICACIÓN.-----	69
8.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS DE APLICACIÓN.-----	70
8.3.1. SUELOS Y TOPOGRAFÍA.-----	70
8.3.2. PERMEABILIDAD.-----	71
8.3.3. PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO.-----	71
8.3.4. DISTANCIA DE LOS SITIOS DE APLICACIÓN A LOS CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES.-----	72
8.4. LIMITACIONES ESTACIONALES.-----	72
8.5. CARACTERÍSTICAS DEL LODO RESIDUAL PARA SER APLICADO.-----	73
8.5.1. POTENCIAL HIDRÓGENO.-----	73
8.5.2. MATERIA ORGÁNICA.-----	73
8.5.3. NUTRIMENTOS.-----	73
8.5.4. CONCENTRACIÓN DE METALES.-----	74
8.5.5. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS.-----	75
8.5.6. CONCENTRACIÓN DE TÓXICOS ORGANICOS.-----	76
8.5.7. CONDICIONES SANITARIAS.-----	76
8.5.7.1. SOBREVIVENCIA DE PATÓGENOS EN EL SUELO.-----	78
8.6. TASAS DE APLICACIÓN.-----	79
8.7. FORMAS DE APLICACIÓN.-----	80
8.8. CULTIVOS APTOS PARA EL DESARROLLO EN SUELOS TRATADOS CON LODOS.-----	81
8.9. EVALUACIÓN DE RIESGOS POR LA APLICACIÓN.-----	82
8.10. UTILIZACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES EN ALGUNOS PAISES.-----	83
CONCLUSIÓN.-----	91
BIBLIOGRAFÍA.-----	92

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Características de los lodos producido en el tratamiento de aguas.-----	26
Cuadro 2: Efectos sobre la salud humana de los metales presentes en los lodos.-----	29
Cuadro 3: Enfermedades más comunes transmitidas por los organismos patógenos a los seres humanos a través de los lodos residuales.-----	33
Cuadro 4: Disposición de lodos residuales en la Comunidad Europea en el año de 1990.----- -----	47
Cuadro 5: Impactos ambientales relacionados con las diferentes alternativas de disposición de lodos.-----	49
Cuadro 6: Tipos de degradación y superficies afectadas en la Nación.-----	55
Cuadro 7: Comparación de los componentes de abonos naturales y lodos residuales.-----	58
Cuadro 8: Composición Química típica de los lodos.-----	59
Cuadro 9: Contenido típico de metales en los lodos.-----	61
Cuadro 10: Comparación entre los fertilizantes comerciales y el lodo.-----	62
Cuadro 11: Contenido de oligoelementos en los lodos.----- -----	65
Cuadro 12: Clasificación de los sitios de aplicación de lodos de acuerdo a sus	

características del suelo, topografía y geología.-----	70
Cuadro 13: Límites de aplicación de lodos al suelo por la permeabilidad.-----	71
Cuadro 14: Criterios de profundidad del acuífero en diferentes sitios.-----	71
Cuadro 15: Recomendaciones relacionadas con la pendiente.-----	72
Cuadro 16: Límites de metales establecidos por la USEPA en los lodos que se apliquen al suelo.-----	74
Cuadro 17: Concentraciones límite de metales pesados en suelos agrícolas (mg/Kg en base seca).-----	75
Cuadro 18: Límites de algunos tóxicos orgánicos e inorgánicos.-----	76
Cuadro 19: Límites de concentración de organismos patógenos.-----	77
Cuadro 20: Tiempo de sobrevivencia de los microorganismos en el suelo.-----	79
Cuadro 21: Tasas de aplicación de lodos típicos de diferentes opciones de aplicación al suelo.-----	80
Cuadro 22: Sensibilidad de los cultivos a metales pesados.-----	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de la pérdida de fertilidad de suelos en la república mexicana.-----	56
Figura 2: Gráfica de la degradación de suelos en la república mexicana.-----	57

INTRODUCCIÓN

En los centros urbanos e industriales se incrementa la generación de aguas residuales día con día, para ello se han construido plantas de tratamiento a fin de generar un efluente líquido de calidad adecuada que pueda ser retornada a las aguas superficiales naturales con un impacto mínimo al medio ambiente o a la salud pública, pero en consecuencia son generados grandes volúmenes de lodos residuales con alta carga orgánica y toxicidad. En muchas plantas de tratamiento de agua, los lodos que se generan no se ha considerado su manejo y disposición, en la mayoría de los casos son descargados al drenaje municipal y a las corrientes superficiales provocando contaminación y disminuyendo las posibilidades de uso del agua o cualquier otro recurso al que se le provoque contaminación.

Los lodos residuales son el subproducto del tratamiento de las aguas residuales y mientras mayor sea la efectividad del tratamiento, mayores cantidades de lodo serán generados. La mayoría de los contaminantes que se presentan en las aguas no son destruidos durante el tratamiento, estos tienden a concentrarse en los lodos. Por eso es necesario manejar adecuadamente este producto para buscar alterar lo menos posible el ambiente. Para garantizar el manejo de estos desechos, es necesaria la estabilización microbiológica y la dilución de contaminantes presentes.

En la actualidad los lodos residuales no son considerados como un desecho, en muchos países de la Unión Europea y en Norteamérica han sido utilizados como acondicionadores de los suelos erosionados y en los cultivos agrícolas por su alto contenido de materia orgánica, nitratos y muchos de los nutrimentos esenciales para el desarrollo de las plantas, ya que la problemática del campo acerca del empobrecimiento del suelo por el uso agrícola intensivo es muy marcada en muchas regiones del mundo y sobre todo de nuestro país. Por esto, es de gran atractivo la utilización de los lodos en suelos agrícolas como fertilizantes o mejoradores de suelo, ya que al mismo tiempo de eliminar el producto, se reciclan nutrimentos y se mejora la capacidad productiva de los suelos, además de ser una opción de bajo costo para restaurar suelos degradados.

La respuesta de los lodos en la aplicación a suelos agrícolas depende de las propiedades del suelo, condiciones del medio ambiente, composición y dosis del lodo, lo que se traduce en una actividad con resultados distintos según las condiciones en que se presente. En México faltan investigaciones que respalden la utilización de los lodos en suelos de manera eficiente y con el menor impacto ambiental posible, enfatizando el seguimiento de la acumulación de metales pesados en el suelo y cultivos.

Para la utilización de los lodos en la agricultura es necesario proporcionar un tratamiento adecuado para el control de los contaminantes, ya que de acuerdo con la legislación mexicana los lodos son un residuo peligroso, si no cumplen con el análisis CRETIB y definen a los residuos peligrosos como: "Todos aquellos residuos en cualquier estado físico, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológica-infecciosas representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente". La composición de los lodos es muy variada dependiendo del tipo de agua tratada, es por eso que en muchas de las ocasiones puede presentar características de un residuo peligroso. En su composición pueden contener grandes cantidades de contaminantes como son, los metales pesados, compuestos tóxicos orgánicos, patógenos, etc., compuestos que pueden causar daños severos al medio ambiente y a la salud pública. Por tal motivo, a los lodos residuales antes de ser utilizados en los suelos agrícolas, se les debe aplicar este análisis.

Por lo que es importante dar a conocer la obtención y los distintos tratamientos aplicados a los lodos residuales hasta lograr su estabilización y desinfección, para poder ser utilizados en los campos agrícolas. Así como también, las investigaciones y experiencias de diferentes investigadores en varios países que se han dedicado al estudio de la aplicación de los lodos residuales en la agricultura y los efectos que causan sobre estos.

OBJETIVO

Destacar la importancia de la aplicación de los lodos residuales hechas en diferentes países sobre los campos agrícolas y los resultados que han obtenido.

Dar a conocer que al tratar lodos residuales se pueden utilizar como una forma de biorremediación de suelos.

I. ANTECEDENTES DEL USO DE LODOS RESIDUALES

Por milenios la materia orgánica ha sido considerada como fuente importante de fertilidad en los suelos, es por esta razón que residuos orgánicos provenientes de las actividades humanas han sido utilizados como fertilizantes en los suelos agrícolas durante miles de años por los chinos, japoneses y habitantes de la India. En muchos países europeos esta práctica tomó mucha importancia a partir de 1840, pero tuvo que tomar en cuenta la prevención de epidemias, que en aquel entonces representaban problemas graves. Para esto era común la utilización de cal.

A finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, los sistemas de tratamiento consistían en la disposición directa de los lodos en el suelo. Con el descubrimiento de las tecnologías para el tratamiento de los residuos, la disposición en el suelo fue perdiendo importancia, ya que la producción de residuos fue reducida de manera significativa. Entre los años de 1940 y 1950, el incremento en la producción del lodo comenzó a presionar a las autoridades y el uso agrícola de los residuos volvió a crecer de manera significativa. Desde principios del siglo XX se ha escrito y trabajado mucho acerca de los lodos en la agricultura. Su valor como fertilizante, una vez deshidratado (hasta el 10 por ciento de humedad aproximadamente) es innegable, y es por ello que se ha comprobado frecuentemente su capacidad de fertilización entre los abonos naturales.

La aplicación del lodo al suelo se ha venido realizando con éxito durante décadas. El interés en ello ha aumentado en los últimos años como consecuencia de la menor disponibilidad y viabilidad de las otras opciones de disposición de los lodos como la evacuación a vertederos controlados, la incineración y la evacuación al mar.

Uno de los sistemas de utilización de lodos más exitoso que se ha venido haciendo desde 1960 en países como Nueva Zelanda y Australia es el uso de los lodos en las plantaciones forestales. Se tienen datos que en los Estados Unidos también se han utilizado con éxito en suelos forestales desde el año de 1930, en donde hasta los jardines reciben aplicación de estos lodos como fertilizante.

Los países europeos desde principios de 1990 han reciclado gran parte de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas en plantaciones forestales, pero además, han encontrado otros usos adicionales como es el uso en silvicultura, aplicaciones en parques, campos de golf y tierras públicas, uso de coberturas en tierras de cultivo o material de relleno. La aplicación en los suelos que no son de uso agrícola es más utilizada en muchos países debido a que las legislaciones son más flexibles para este uso.

A diferencia de los países antes mencionados, en los asiáticos como el Japón, China y la India han desarrollado desde el siglo pasado técnicas para utilizar los lodos residuales en los cultivos tanto forestales como agrícolas, como es el caso de su uso para fertilizar hortalizas.

Por la diversidad de compuestos sintéticos que han ido apareciendo en los últimos años la utilización de los lodos en los cultivos es más riesgoso, por lo que se les tiene que someter a sistemas de tratamientos que establece la legislación para asegurar que no vayan a causar daños al medio ambiente, pero sobre todo; a la salud pública.

A partir del año de 1990 se empezó a tener mayor interés el uso de los lodos en la agricultura, antes de este año el uso agrícola de los lodos no presentaba mucha importancia, posiblemente porque las alternativas de disposición existentes en ese entonces resultaban ser menos costosas ya que en pocas ocasiones eran sometidos a un tratamiento previo a la disposición.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo urbano en México ha traído como consecuencia un gran incremento en la generación de lodos residuales, producto del tratamiento de aguas residuales. Actualmente

en nuestro país se generan 7.88 km³/año (250 m³/s) de aguas residuales municipales y solo el 23 por ciento del total de esta agua procedente de localidades urbanas a nivel nacional reciben tratamiento (Ríos 2002), y el resto es desechada en forma bruta al medio ambiente causando perturbaciones.

Del agua que recibe tratamiento se producen grandes cantidades de lodos con una alta concentración de contaminantes. La cantidad de lodo producido dependerá de varios factores que intervengan en el proceso (época del año, calidad del proceso, etc.). No sé a estimado la cantidad de lodo producido en el país, lo que si se sabe es que los lodos causaran graves problemas al medio ambiente si no son sometidos a un tratamiento. En los Estados Unidos la estimación actual es de 6.5 millones de toneladas al año, y se espera que esta cifra alcance los 15 a 20 millones de toneladas para el año 2005.

En México el tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo en baja escala. Sin embargo, es importante considerar la generación inevitable de los lodos, que deben ser dispuestos en forma adecuada para evitar contaminación. Actualmente, son pocas las plantas de tratamiento que realizan algún proceso de tratamiento a los lodos, y de estas prácticamente ninguna opera regularmente.

En 1993 la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL), organismo responsable de identificar aquellos materiales que por sus características representen un peligro para el equilibrio ecológico o al medio ambiente, determinó en la norma oficial mexicana NOM-CRP-001-ECOL/93, que los lodos generados durante el tratamiento de las aguas residuales se consideran residuos peligrosos. Sin proponer algún tratamiento, enfatiza la importancia de tratar los residuos peligrosos de manera que se minimice el peligro que representan para el medio ambiente (Maya *et al.*, 1997).

Algunos factores que han limitado el desarrollo de sistemas para el tratamiento de lodos son: la falta de reglamentación adecuada, la poca experiencia e información que sé a generado en el país, los presupuestos reducidos, la falta de personal capacitado, etc. Por tal motivo, se debe considerar la búsqueda de tratamiento de lodos acorde a las condiciones

políticas y económicas de nuestro país. En México los tratamientos mas utilizados son la digestión aerobia y el tratamiento con cal, tal vez por su facilidad de operación. Otro proceso recientemente usado para tratar los lodos, es el composteo, siendo la primera planta de este tipo inaugurada en agosto de 1994 en Cuernavaca, Morelos. Esta planta tiene capacidad para tratar 50 toneladas de lodo que produzca la planta tratadora de aguas (Cardozo, *et al.* 1998).

A los lodos siempre que se tomen las medidas sanitarias y ambientales necesarias en su manejo, pueden ser aplicados a suelos agrícolas, ya que presentan altos contenidos de materia orgánica y nutrimentos que pueden ser utilizados por las plantas. Su aplicación puede contribuir a la fertilización de los cultivos y mejorar la retención de humedad y estructura del suelo. Por lo tanto, es un producto útil para la recuperación de suelos degradados o erosionados. Actualmente en la República Mexicana, estimaciones hechas por la Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos (Semarnap 1999) acerca de la erosión de suelos, indican que la erosión hídrica afecta al 37 por ciento de los suelos del país, del cual el 25 por ciento afecta solo la capa superficial del suelo y el 12 por ciento produce deformaciones de terrenos. Respecto a la erosión eólica, la Semarnap indica que afecta el 15 por ciento de los suelos del país, porcentaje que casi en su totalidad corresponde a erosión con pérdida de la capa superficial.

En el país también existen problemas de contaminación no cuantificadas por el uso de agroquímicos (fertilizantes y herbicidas). Otro problema, es la degradación física (compactación y encostrado) por el uso excesivo de maquinaria pesada en las labores de cultivo, y esta representa el 30 por ciento.

Los problemas de erosión y empobrecimiento de los suelos han generado baja productividad y rendimiento de los cultivos por la falta de nutrimentos. A su vez, resulta poco rentable producir, porque estos problemas maximizan los costos de producción, y en el peor de los casos podría suceder lo que en otros países subdesarrollados, que muchos productores abandonen las tierras de cultivo para dedicarse a cualquier otra labor.

Los suelos pobres con bajo contenido de materia orgánica (natural o inducida) se presentan problemas graves para asegurar el mantenimiento de buenas propiedades de retención de agua. Los sólidos presentes en los lodos se pueden utilizar para mantener, restaurar o crear fertilidad en el suelo, así como una estructura adecuada en tierras degradadas.

Considerando los problemas existentes acerca de la disposición de lodos en las diferentes plantas de tratamiento en el país y los problemas de contaminación, erosión, pérdida de nutrientes o empobrecimiento de los suelos de la República Mexicana, el uso de los lodos residuales en los suelos agrícolas es una opción para la disposición y reciclado de nutrientes que en ellos se encuentran y de esta manera recuperar o nutrir los suelos que presentan estos problemas.

II. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

2.1. Importancia del agua.

El agua es indispensable para todo ser vivo. Es necesaria por sus funciones vitales, para formar parte de su composición orgánica o como medio ambiente para múltiples especies.

En México posterior a la Revolución verde, la población creció rápidamente hasta alcanzar cerca de 100 millones de mexicanos que en la actualidad pueblan el país. Esta gran población requiere, principalmente, agua y alimentos para subsistir y poder desarrollar otras actividades propias del ser humano. La sociedad genera gran cantidad de desechos, y se necesita decidir qué hacer con los residuos acumulados.

2.2. Origen de la contaminación.

A medida que se ha desarrollado la civilización y han crecido las poblaciones las necesidades de agua y energía han ido en orden creciente. Al mismo tiempo, desde el inicio de las actividades humanas, el desarrollo ha obstaculizado cada vez más el uso del agua a causa del vertido desordenado de residuos líquidos a cursos de agua. Hasta hace poco tiempo, las aguas residuales se enviaban directamente a ríos y mares, esperando que sus efectos contaminantes se diluyeran en el agua.

Al igual que la población, la industria y la agricultura demandan grandes cantidades de agua. Desde 1950, el consumo del agua en el mundo se ha incrementado tres veces y medio. Actualmente, el 5 por ciento del agua consumida se destina a usos domésticos, 20 por ciento se utiliza en aplicaciones industriales y el 75 por ciento restante se destina a la agricultura. Del total de agua utilizada en agricultura y uso doméstico, el 20 por ciento se pierde por infiltración y transporte. Todos los consumidores del agua sin importar cual sea el uso, contaminan en mayor o menor medida el vital líquido. Y es así que en las aguas se encuentran una gran cantidad de compuestos, desde las más simples sales inorgánicas hasta complejos compuestos sintéticos producidos por la industria. Estos contaminantes producen problemas de salud pública y además las altas concentraciones de metales y minerales tóxicos hacen que el ambiente se perturbe, en especial las aguas naturales. Las

manifestaciones de contaminación de las aguas se presentan por eutroficación de las aguas superficiales y por lixiviación que contaminan las aguas subterráneas.

2.2.1. Eutroficación.

La eutroficación derivada de los cultivos agrícolas por la adición de fosfatos y nitratos y otros nutrimentos. Cuando las aguas superficiales reciben cantidades excesivas de nutrimentos provocan un crecimiento exagerado de algas y otras plantas acuáticas que al morir se depositan en los fondos y superficie. La descomposición de los restos de algas y plantas consume el oxígeno disuelto en el agua y la capa superficial impide la entrada de luz. En el agua empobrecida en oxígeno ya no pueden vivir otros seres.

2.2.2. Lixiviación.

La lixiviación se lleva a cabo cuando los contaminantes son depositados en los suelos, algunos compuestos son retenidos por las partículas arcillosas y cuando estas entran en contacto con el agua pueden ser removidos hacia los estratos inferiores hasta llegar a los mantos freáticos y depositarse en ellos, provocando la contaminación. La lixiviación de metales pesados (As, Co, Cu, Cd, Pb, Ag y Zn) es acelerada en suelos con pH bajo.

La contaminación del agua siempre ha existido solo que no se manifestaba porque esta se distribuía por todo el mundo y tales concentraciones podían ser amortiguadas por los ecosistemas. Hoy en día la contaminación de las aguas se sigue presentando de la misma forma, pero las actividades humanas son las que causan mayor impacto sobre el medio ambiente, que por lo general su origen se encuentra en los centros urbanos y zonas industriales, las cuales descargan sus desechos en pequeñas áreas, que por su alta concentración, la naturaleza no puede degradar esos contaminantes, dándose así el deterioro ambiental y contaminación de las aguas naturales.

Desde el siglo XIX, el problema de las aguas residuales empezó a plantearse de una forma mas generalizada al aumentar el tamaño del núcleo de la población, a ello se le añadió el inicio de los conocimientos sanitarios suficientes para suponer el peligro potencial que suponía el uso defectuoso de esos residuos, hasta el punto que según la Organización

Mundial de la Salud actualmente un 80 por ciento de las enfermedades que afectan a la población están directamente asociadas al agua.

2.3. Fuentes de contaminantes.

Estos aportes son de naturaleza muy diversa. Cada una de las actividades humanas genera diversidad de contaminantes en mayor o menor grado. A continuación se presentan las fuentes de contaminación de las aguas naturales más comunes:

2.3.1. Agricultura.

La actividad agraria es una fuente importante, principalmente se presenta en forma de sedimentos, fertilizantes inorgánicos comerciales, abonos, sales disueltas en las aguas de riego y plaguicidas o pesticidas, especialmente por los abonos aportados a los cultivos y los residuos originados por la ganadería.

2.3.2. Doméstico.

Los contaminantes domésticos son muy variados y la mayoría son sólidos, materia orgánica, grasas animales y vegetales, cloruros y detergentes. Estas aguas también contienen nitrógeno y fósforo procedentes, principalmente, de las deyecciones humanas y productos de limpieza.

2.3.3. Industria.

De aquí proviene la contaminación más alarmante. Gran parte de esta contaminación consiste en sustancias tóxicas y metales pesados (son tóxicos incluso en cantidades pequeñas) grasas, fenoles y agentes tensioactivos.

Las aguas residuales producidas por la industria representan muchos riesgos ya que sus contaminantes se pueden filtrar a los mantos freáticos y presentar peligros para la salud. La importancia de los recursos hídricos subterráneos para el abastecimiento de agua es incuestionable. Al final de la década de 1980, más de 140 millones de personas de América

Latina y el Caribe utilizaban las aguas subterráneas como fuente prioritaria. Las grandes metrópolis como Ciudad de México, Buenos Aires, Santiago y Lima confirman que los recursos subterráneos son una alternativa viable de abastecimiento de agua, no restringida a comunidades pequeñas o áreas rurales.

En América Latina el tratamiento de las aguas residuales no es nuevo. Durante la primera mitad de este siglo XX se trató de adoptar la tecnología de los países desarrollados, pero ésta no funcionó bien. Se constituyeron plantas con tratamiento primario (sedimentación) y secundario (tratamiento biológico con biofiltros o lodos activados). La mayoría operaron por períodos limitados y casi nunca se llevó a cabo la cloración de los efluentes. El manejo de los lodos fue poco cuidadoso y con mucha frecuencia fueron descargados en los mismos cuerpos de agua que se quería proteger. Muchas plantas terminaron por abandonarse, y esta mala experiencia dificultó la construcción de nuevas plantas de tratamiento. En la actualidad el tratamiento de las aguas residuales se ha hecho una necesidad para poder satisfacer las necesidades de la industria y la población ante la escasez del agua superficial y subterránea, de esta última lo demuestran los grandes abatimientos de niveles que en los últimos años han tenido los acuíferos del Valle de México y la contaminación de los mismos, lo que hace el problema más grave.

III. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

La recolección de las aguas a través de alcantarillado aparece a principios del siglo XIX, y el tratamiento de aguas residuales data de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El desarrollo de la teoría del germen a cargo de Koch y Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX marco el inicio de una nueva era en el campo del saneamiento. En los Estados Unidos, el tratamiento de las aguas residuales recibió la atención hasta finales del siglo XIX, porque en un principio las aguas residuales sin tratar eran descargadas en

grandes masas de agua y los daños no eran graves pues se disponía de grandes extensiones de terreno para su evacuación. Sin embargo a principios del siglo XX, los daños causados y las condiciones sanitarias impulsaron la creciente demanda de mayor eficiencia en el tratamiento y gestión de las aguas residuales.

En los últimos 20 años se ha invertido mucho dinero en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales. Desgraciadamente, el funcionamiento de muchas instalaciones no a satisfecho plenamente las condiciones exigidas por la normatividad sobre los vertidos. En muchos casos y, con sobrecostos importantes, han tenido que ser replanteadas y modificado las instalaciones recién construidas para asegurar un mejor rendimiento en productos finales ya que las aguas residuales recogidas en comunidades y municipios deben ser conducidas en ultima instancia a cuerpos de aguas receptores o al mismo terreno.

La depuración cobró importancia progresivamente desde principios de la década de 1970 como resultado de la preocupación general expresada en todo el mundo sobre el problema, cada vez mayor, de la contaminación humana al medio ambiente, desde el aire, los ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas, por los desperdicios domésticos, industriales, municipales y agrícolas. A partir de entonces las legislaciones ecológicas crearon leyes sobre los residuos líquidos industriales o municipales que pudieran ocasionar un peligro para el medio ambiente y a la salud publica. En estas leyes se menciona que todo residuo antes de ser evacuado se le debe aplicar un tratamiento que reduzca el contenido de contaminantes presentes para minimizar los impactos al medio ambiente. Por lo tanto, es necesario tratar las aguas residuales antes de enterrarlas o devolverlas a los sistemas hídricos locales.

3.1. Definición de agua residual

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) defina a las aguas residuales como materiales derivados de residuos domésticos o de procesos

industriales, los cuales por razón de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales.

Las aguas residuales domésticas son el resultado de las actividades cotidianas de las personas. La cantidad y naturaleza de los vertidos industriales es muy variada, dependiendo del tipo de industria, de la gestión de su consumo de agua y del grado de tratamiento que los vertidos reciben antes de su descarga. El agua de desecho es mil partes de agua por una de desperdicio, o sea, 99.9 por ciento de agua y 0.1 por ciento de desperdicios. Dado este voluminoso uso, la cantidad de aguas de desecho generadas por personas al día es de 600 a 800 litros (Sett, 1996).

3.2. Finalidad de las plantas de tratamiento

Por definición, las aguas llevan elementos extraños denominados contaminantes, por lo tanto, la depuración de las aguas residuales consistirá en remover o reducir la cantidad de contaminantes presentes en los suministros del agua original, hasta el grado que lo marquen las especificaciones o tolerancias de uso final. Dicho de otra manera, la misión de una planta de tratamiento de aguas residuales es reducir al mínimo los contaminantes que presente el agua, para después poder ser vertida al medio natural, o ser reutilizada, ya sea en la industria, agricultura e incluso para el uso público dependiendo del grado de calidad del proceso de tratamiento.

De forma general, los objetivos que se pretenden en la depuración de las aguas son los siguientes:

- Reducir al máximo los contaminantes y sus efectos

- Asegurar la protección del medio ambiente y de los seres vivos que en el se desarrollan
- Prever el desarrollo urbano e industrial

3.3. Características de las aguas residuales.

La mayoría de estas aguas residuales poseen características diferentes dependiendo del lugar de donde son producidas, varían mucho por la presencia o ausencia de industrias y ante las costumbres higiénicas que siga la población. La mayoría de los centros urbanos, captan todos los desechos en una sola fuente colectora. Una red de alcantarillado capta aguas de lluvia, aguas grises procedentes del lavado y la higiene corporal que contiene detergentes, aguas negras con un alto contenido de materia orgánica, etc. y todas estas aguas se deberán someter a un tratamiento y vertido indiferenciado. Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativo, para la determinación precisa de la composición química del agua, como análisis cualitativo para el conocimiento de las características físicas y biológicas.

3.4. Composición general de las aguas.

Las aguas residuales se componen en su mayoría por arrastres de lluvias, excretas, residuos domésticos y residuos industriales.

3.4.1. Arrastre por las lluvias.

Cuando la lluvia cae sobre la ciudad arrastra los fluidos presentes en la superficies expuestas, como restos de animales y vegetales, partículas sólidas de los parques y zonas verdes, hollín, polvos, cementos, etc.

3.4.2. Excretas.

Las excretas humanas fundamentalmente se componen de agua, celulosa, lípidos, prótidos, y materia orgánica en general. Cuando son expulsadas, primeramente hay putrefacción de las proteínas. Se presenta descarboxilaciones de aminoácidos que producen lisina, tirosinas, aminas, etc., y desaminaciones con desprendimiento de NH_3 . Al formarse escatol, fenol, indol, paracresol y otros compuestos, aparecen olores desagradables.

3.4.3. Residuos domésticos.

Se proceden de la evacuación de los residuos procedentes de cocinas (desperdicios, arena de lavado, residuos animales y vegetales, detergentes y partículas), de los lavados domésticos (jabones, detergentes sintéticos con espumantes, sales, etc.) y de la actividad general de las viviendas (celulosa, almidón, glicógeno, insecticidas, partículas orgánicas, etc.).

3.4.4. Residuos industriales.

Son todas las aguas que proceden de instalaciones industriales y que vierten sus residuos a la red de alcantarillado y que por lo general el contenido de contaminantes es muy alto. Dependiendo del tipo de industria los residuos pueden ser; metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos tóxicos, entre otros.

3.5. Naturaleza cambiante de las aguas residuales.

El número de compuestos orgánicos que se ha conseguido sintetizar desde principios del siglo XIX pasa hoy en día del medio millón y aparecen unos 10 000 compuestos nuevos cada año. Estos compuestos aparecen en las aguas residuales de la mayoría de los municipios y comunidades. Hoy en día es de gran importancia para los sistemas colectores y tratamientos de aguas residuales la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) y compuestos orgánicos volátiles tóxicos (COVT).

3.6. Análisis y calidad del agua residual.

La calidad del agua se define en relación al uso o actividad a la que será destinada, es por eso que no se puede hablar de buena o mala calidad, si no que cada actividad exige una calidad adecuada. Para evaluar la composición de las aguas residuales y determinar la calidad que está presente, se emplean diversos parámetros físicos, químicos y biológicos. A estos parámetros se les denominan indicadores de calidad del agua; algunos de estos incluyen: físicos; color, turbidez, temperatura, sólidos disueltos totales (STD mg/L), sólidos en suspensión (SS mg/L), químicos; pH, dureza, carbono orgánico total (COT), demanda bioquímica de oxígeno (DBO mg/L), demanda química de oxígeno (DQO mg/L), nitrógeno total, biológicos; patógenos, entre otros.

3.6.1. Indicadores físicos.

Color. Se utiliza para determinar la edad del agua residual de forma cualitativa. El agua residual recientemente suele tener un color grisáceo, conforme pasa el tiempo el color del agua cambia gradualmente a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro, llegando a este punto el agua se clasifica como aséptica. Esta coloración es debido a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con metales presentes en ella.

Turbidez. Como medida de propiedad de transmisión de la luz a través del agua, se emplea para indicar calidad en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La medición se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersa en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

Temperatura. Es un parámetro importante por sus efectos en la vida acuática, en las reacciones químicas y en las velocidades de reacción. Las temperaturas elevadas en los meses cálidos ocasionan agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto.

Sólidos. Los sólidos sedimentables expresados en unidades de mL/L, constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la sedimentación primaria del agua residual. La fracción coloidal esta compuesta por partículas de materia de tamaño entre 0.001 y dos micrómetros. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. El análisis de sólidos volátiles se emplea habitualmente para determinar la estabilidad biológica de fangos de aguas residuales.

3.6.2. Indicadores Químicos.

pH – La concentración del ión hidrógeno es un importante parámetro, el intervalo es muy estrecho para la existencia de la mayoría de los microorganismos. Por otro lado, el agua residual con un pH bajo es difícil tratar por medios biológicos.

Dureza. La dureza del agua se debe principalmente a la presencia de iones de calcio y de magnesio. Este tipo de aguas presenta dificultad para hacer espuma y presenta serios riesgos en la industria. Las cantidades apreciables de las sales de calcio se precipitan al calentarse formando incrustaciones perjudiciales, también causan daños a los suelos provocando salinidad en el lugar donde serán evacuados.

Carbono orgánico total (COT). Indicador de los compuestos orgánicos, fijos o volátiles, naturales o sintéticos. Su medida facilita la estimación de la demanda de oxígeno ligada a los vertidos y establecer una correlación con la DBO y la DQO.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Expresa la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de la oxidación bioquímica de la materia orgánica, de esta manera se mide la eficiencia de algún proceso de tratamiento y controlar el cumplimiento de las limitaciones al que esta sujetos los vertidos.

Demanda química de oxígeno (DQO). La medida de la DQO es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen orgánica o mineral (hierro ferroso, nitritos, amoniaco, sulfuros y cloruros) esta función de las características de los compuestos, de sus proporciones respectivas y de las posibilidades de oxidación

Nitrógeno total. Es un elemento esencial en los diferentes procesos vitales y su presencia es siempre detectable en la transformación de la materia orgánica. Si se vierten a aguas superficiales cantidades altas de nitrógeno puede favorecer el crecimiento la vida acuática no deseada.

3.6.3. Indicadores biológicos.

Patógenos. El análisis microbiológico del agua es de gran importancia para determinar su calidad sanitaria, ya que los microorganismos presentes en el agua (bacterias, hongos y virus) pueden causar infecciones en el hombre y en el ganado provocando desde malestares estomacales hasta la muerte, dependiendo del organismo patógeno y del grado de infección.

Los análisis del agua se realizan conforme lo establecen las Normas Oficiales Mexicanas elaborados por la Comisión Nacional del Agua, conforme al sistema de aseguramiento de calidad (ISO 9000/NMX-CC).

3.7. Fases del tratamiento

El tratamiento de las aguas se realiza o se divide en tres fases, para asegurar la eliminación de la mayoría de los contaminantes que estén presentes en ella, de acuerdo a la legislación vigente en cada país o al uso para la cual será destinada. Las tres fases de tratamiento son; la primaria, la secundaria y la terciaria. Antes de entrar a la primera fase del tratamiento a las aguas, primeramente, es necesario someterlas a un pretratamiento. En la primera fase se elimina un gran porcentaje de sólidos en suspensión y materia orgánica, en la segunda se trata de reducir el contenido en materia orgánica acelerando los procesos biológicos naturales y la tercera es necesaria solo cuando el agua va a ser reutilizada; en

ellas se elimina un 99 por ciento de los sólidos y además se emplean varios procesos químicos para garantizar que el agua esté tan libre de impurezas como sea posible.

3.7.1. Pretratamiento.

Las aguas residuales que entran en una depuradora contienen materiales que podrían atascar o dañar las bombas y la maquinaria. Estos materiales se eliminan por medio de enrejados o barras verticales, y se entierran o se queman tras ser recogidos manual o mecánicamente. El agua residual pasa a continuación a través de una trituradora, donde las hojas y otros materiales orgánicos son triturados para facilitar su posterior procesamiento y eliminación. Después pasan por una zona de aguas tranquilas, con poca velocidad, en donde se depositan los materiales pesados como arena, y otros; a esta se le llama zona de deposición. Y finalmente el agua entra en una tercera zona, llamada zona de decantación. Estos tratamientos constituyen el pretratamiento.

Después de pasar el agua residual por el pretratamiento el agua resultante esta libre de materiales voluminosos, la composición básica pasa a formarse de altos contenidos de materia orgánica, metales pasados y otros componentes de bajo volumen.

3.7.2. Tratamiento primario.

En el pasado se usaban tanques de deposición, grandes y estrechos, en forma de canales, para eliminar materia orgánica y minerales como arena, sedimentos y grava. Estas cámaras estaban diseñadas de modo que permitieran que las partículas inorgánicas de 0.2 mm o más se depositaran en el fondo, mientras que las partículas más pequeñas y la mayoría de los sólidos orgánicos que permanecen en suspensión continuaban su recorrido. Hoy en día las más usadas son las cámaras airadas de flujo en espiral con fondo de tolva o clarificadores, provistos de brazos mecánicos encargados de raspar. Se elimina el residuo mineral y se vierte en vertederos sanitarios. La acumulación de estos residuos puede ir de los 0.08 a los 0.23 m³ por cada 3.8 millones de litros de agua residual. Algunos tipos de tratamientos primarios son: sedimentación y flotación.

La “sedimentación” se realiza en tanques cerrados en donde la eliminación de contaminantes se lleva a cabo mediante las fuerzas de gravedad, en el se puede reducir de un 20–40 por ciento la DBO y de un 40–60 por ciento los sólidos en suspensión. En algunas plantas de tratamiento industrial incorporan procesos llamados coagulación y floculación químicas al tanque de sedimentación. La coagulación consiste en añadir productos químicos como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico o poli-electrólitos a las aguas para alterar las características superficiales de los sólidos en suspensión de modo que se adhieren los unos a los otros y precipiten. La floculación provoca la aglutinación de los sólidos en suspensión. Ambos procesos eliminan más del 80 por ciento de los sólidos en suspensión.

La “flotación” es una alternativa a la sedimentación, utilizada en el tratamiento de algunas aguas residuales, en ella se fuerza la entrada de aire en las mismas, a presiones de entre 1.75 y 3.5 kg/cm². El agua residual, sobresaturada de aire, se descarga a continuación en un depósito abierto. En él, la ascensión de las burbujas de aire hace que los sólidos en suspensión suban a la superficie, de donde son retirados. La flotación puede eliminar mas de un 75 por ciento de los sólidos en suspensión.

3.7.3. Tratamiento secundario.

El tratamiento secundario de las aguas residuales comprende una serie de reacciones complejas de digestión y fermentación efectuadas por microorganismos de diferentes especies bacterianas y consiste fundamentalmente en la degradación de la materia orgánica del agua residual por medios biológicos, para reducir la cantidad de materia orgánica en el agua simulando los procesos naturales de eliminación de residuos. En presencia de oxígeno, las bacterias aeróbicas convierten la materia orgánica en formas estables, como CO₂, agua, nitratos y fosfatos, así como otros materiales orgánicos.

Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basados en la tasa de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua

residual. Gran parte de las normas recientes incluyen el control de la eliminación de nutrientes y los contaminantes prioritarios. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias incluyen la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos. Dos variantes del tratamiento secundario son los fangos activados y filtros de goteo.

Los “fangos activados” es el proceso más utilizado. Es un proceso aeróbico en el que partículas gelatinosas de lodo quedan suspendidas en un tanque de aeración y reciben oxígeno. Las partículas de lodo activado están compuestas por millones de bacterias en crecimiento activo aglutinadas por una sustancia gelatinosa, absorben la materia orgánica y la convierte en productos aeróbicos. Este sistema es eficaz, eliminan del 85 al 95 por ciento de la DBO de las aguas residuales. Después de la aireación, la mezcla pasa a un tanque de decantación, donde los coágulos microbianos (agregados) caen al fondo y el agua residual fluye por el desagüe en la superficie. La bacteria más importante en los fangos es la especie *Zooglea*. Los coágulos acumulados en el fondo se extraen en forma de lodo. La mayor parte de los lodos sedimentados se eliminan por tratamiento en un digestor de lodos anaerobio, una parte de los lodos se recicla volviendo a los tanques de lodos activados como inóculo iniciador para la próxima carga de aguas residuales y el efluente se envía al tratamiento final.

En el proceso de “filtros de goteo” una corriente de agua residual se distribuye intermitentemente sobre un lecho o columna de algún medio poroso (lo suficiente para la entrada de oxígeno) revestido de una película gelatinosa de microorganismos que actúan como agentes destructores. La materia orgánica de la corriente de agua residual es absorbida por la película microbiana y transformada en CO_2 y agua. El proceso de goteo, cuando va precedido de sedimentación, puede reducir cerca de un 85 por ciento de la DBO, pero normalmente eliminan del 70 al 85 por ciento y por lo tanto son menos eficaces que los lodos activados.

3.7.4. Tratamiento terciario (avanzado).

Se emplea cuando el agua que ha de recibir el vertido requiere un grado de tratamiento mayor, o si el efluente va a reutilizarse. El tratamiento terciario se emplea para eliminar el

fósforo, e incluyen pasos adicionales para mejorar la calidad del efluente eliminando los contaminantes recalcitrantes. Los sólidos disueltos se reducen por medio de procesos como la osmosis inversa y la electrodiálisis. La eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos pueden reducir el contenido en nutrientes. Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con ozono es considerada el método más fiable, excepción hecha de la cloración extrema.

3.8. Vertido del líquido

El vertido final del agua se realiza de varias formas. La más habitual es el vertido directo a un río o lago receptor. En aquellas partes del mundo que enfrentan una creciente escasez de agua, tanto de uso doméstico como industrial, las autoridades empiezan a recurrir a la reutilización de las aguas tratadas para rellenar los acuíferos, regar cultivos no comestibles, procesos industriales, recreo y otros usos.

IV. LODOS RESIDUALES

En el tratamiento de las aguas residuales además de generarse agua purificada, también se generan productos llamados biosólidos o lodos constituidos principalmente por los elementos que componen el efluente, los aditivos químicos usados en el proceso y la masa bacteriana que participa en el tratamiento. Las plantas de tratamiento reciben aguas que se producen en un núcleo urbano o industrial y en ocasiones llega una combinación de ellas, es por eso que la calidad de los lodos y el impacto que tendrá éste en el medio ambiente dependerá del agua recibida y de los procesos de tratamiento a los que se les someta

En México en décadas pasadas la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales tenían como objetivo primordial la limpieza del recurso hídrico, sin considerar el manejo y tratamiento que debían tener los lodos generados en las diferentes etapas del tratamiento del agua. En el país la práctica común de descarga de los lodos sin previo tratamiento es directamente al alcantarillado municipal y finalmente a otros cuerpos mayores de agua (Cardozo, 1998). Esta situación ha generado condiciones ambientales peligrosas, además de violar la legislación vigente en materia de prevención y control de la contaminación.

Los lodos generados a partir de la recolección del agua residual, son el producto de deshecho generado durante el tratamiento y están constituidos por sólidos sedimentables y no sedimentables.

Las partículas de materia orgánica que se retiran de la superficie y del fondo de las aguas residuales durante el primer tratamiento forma la mayor parte de lodos en bruto, la gran mayoría puede contener grandes cantidades de microorganismos patógenos y metales pesados, entre otros contaminantes. En el tratamiento biológico los lodos aparecen en dos momentos: las partículas más densas se separan en el decantador primario y dan origen a los lodos primarios. Después las aguas pasan por una zona de aireación y la fuerte actividad aerobia acelera el metabolismo de las bacterias que se multiplican a expensas de la materia orgánica. La biomasa formada se decanta después en el decantador secundario, apareciendo los lodos secundarios.

4.1. Definición de lodos

Los lodos son compuestos orgánicos, sólidos y semisólidos o líquidos, producidos durante el proceso de tratamiento mecánico, biológico y/o químico de purificación de las aguas residuales, que por el proceso al que fueron sometidas contienen una alta cantidad de contaminantes agregados en ellos. El lodo producido suele ser un líquido o líquido semisólido con un contenido en sólidos variable, entre 0.25 y el 12 por ciento en peso. De

acuerdo a la legislación mexicana los lodos de desecho son un residuo peligroso si no cumplen con el análisis CRETIB.

4.2. Productos de desecho en el tratamiento de aguas

En una estimación media elaborada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en un tratamiento de aguas residuales se obtienen 3 litros de lodos por persona por día, con 20 gramos de materia seca por litro. De la misma manera Bellapark en 1988 menciona que en un tratamiento se obtienen 2.5 litros de lodo por persona por día, con 20 gramos de materia seca por litro.

De manera general los productos generados en los sistemas tratamiento son los siguientes:

- *Material gradeado.
- *Lodo primario.
- *Arena.
- *Lodo secundario.
- *Espuma.
- *Lodo químico (formado en la etapa físico – química).

El material gradeado y la arena por lo general son llevados a rellenos sanitarios o son quemados según seas el caso, y los productos restantes son los que entran al proceso de tratamiento para eliminar los contaminantes que estos contengan.

4.3. Características de los lodos

Las características varían en función del origen de los sólidos, de la edad del lodo, y del tipo de procesos al que han sido sometidos. Por lo que es necesario conocer estas características para tratar y evacuarlos de la manera más eficiente posible. Las principales características de los lodos residuales de acuerdo a estudios realizados por Cleverson, *et al.* en Brasil en el año del 2001, son los siguientes:

Cuadro 1: Características de los lodos producido en el tratamiento de aguas.

Lodo	Descripción
------	-------------

Espumas	Esta formada por los materiales flotantes recogidos en la superficie de los tanques de sedimentación primarios y secundarios. Incluyen grasas, aceites minerales y vegetales, ceras, jabones, residuos alimenticios y materiales similares. Su peso específico es menor de 1.0, alrededor de 0.95.
Lodo primario	Procede de los tanques de sedimentación primaria, generalmente es gris y grasiento, en la mayoría de los casos produce un olor muy molesto. Pueden digerirse fácilmente cuando el funcionamiento de la planta es adecuada.
Lodo de precipitación química	Procede de los tanques de precipitación química y es generalmente de color oscuro. El olor de estos lodos puede ser molesto, pero no igual que los lodos primarios. Es algo grasiento, pero los hidratos de hierro o aluminio contenidos en él lo hacen gelatinoso. Si se deja suficiente tiempo en el tanque se produce su descomposición, generando gas en cantidades sustanciales y su densidad aumenta con el tiempo.
Lodos activados	Por lo general tienen apariencia floculante de color marrón. Si el color es muy oscuro puede estar próximo a volverse aséptico. Si el color es más claro de lo normal, pudo haber poca y los sólidos tienen tendencia a sedimentar lentamente. Estos tienden a convertirse en aséptico con bastante rapidez y luego adquiere un olor bastante desagradable de putrefacción.

4.4. Análisis de los lodos

Cuando los lodos son descargados al entorno sin ningún tratamiento su alto contenido en metales pesados pueden provocar la contaminación de las aguas, y podrían entrar en la cadena alimenticia hasta llegar al ser humano causando malestares, trastornos e incluso la muerte. También llevan en su contenido cantidades no cuantificables de microorganismos patógenos que resultan un peligro potencial para la salud humana. En la actualidad la necesidad creciente de proteger el ambiente cada vez más deteriorado por las actividades del hombre con el fin de satisfacer sus necesidades, ha llevado a las autoridades a implementar programas de protección ambiental y emitir leyes y normas que regulen el equilibrio ecológico.

Para saber el tipo de lodo con el que se tiene que trabajar es necesario aplicar los análisis correspondientes en la materia y de esta manera poder clasificarlos. Dentro de los

procedimientos correspondientes para su análisis deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos: equipo utilizado para el análisis, y las normas y métodos existentes para la determinación de los componentes y características, y sobre todo el análisis CRETIB.

4.4.1. Clasificación de lodos.

La clasificación es utilizada por la legislación para determinar cuales lodos residuales son factibles para su tratamiento y rehuso, y en los cuales no es convenientes la aplicación, y por lo tanto, cual será el lugar de disposición. De acuerdo a los diferentes procesos productivos, se pueden presentar las siguientes alternativas:

- a) Lodos peligrosos. Las condiciones de manejo, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición deberán apegarse al Reglamento de Desechos Peligrosos del país. Para la disposición de estos lodos, se debe contar con instalaciones adecuadas y de personal capacitado para la recepción de desechos. En México solo existe uno en el estado de Nuevo León.
- b) Lodos no considerados peligrosos. Son aquellos que por sus características pueden ser utilizados o valorizados como mejoradores de suelos como en los bosques, cementerios, jardines públicos, parques, entre otros.
- c) Existen otros lodos a los que no se les revaloriza pero su concentración en contaminantes es relativamente baja, en este caso la legislación autorizará su disposición en un relleno sanitario de tipo municipal, con las restricciones que las normas establecen para ese tipo de desechos.

4.5. Contaminantes presentes en los lodos

A causa de las características físico-químicas del proceso de lodos activados, el lodo tiende a acumular metales pesados y compuestos orgánicos. Esta propiedad considerada en la calidad del agua residual tratada es una ventaja, pero en el caso del lodo la calidad depende fundamentalmente de tres grupos contaminantes principales. Algunos

componentes de las aguas residuales se concentran en proporciones variables en los lodos. Varios componentes orgánicos y minerales confieren características de fertilizantes a los lodos, pero otros componentes resultan indeseables por que manifiestan riesgos ambientales y sanitarios. Estos componentes pueden ser agrupados genéricamente en:

- Metales pesados
- Microorganismos patógenos
- Contaminantes orgánicos variados

4.5.1. Metales pesados.

Desde el punto de vista ambiental, el metal pesado puede ser entendido como aquel metal que en determinadas concentraciones y tiempo de exposición, cause riesgos a la salud humana y al ambiente, perjudicando las actividades de los microorganismos. Los principales elementos encontrados en este concepto son: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se y Zn. Algunos son esenciales para los microorganismos en ciertas cantidades, pero otros pueden llegar a ser tóxicos debido a su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su manifestación en la cadena alimenticia. Los metales siempre están presentes en concentraciones bajas en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones preocupantes son las que se encuentran en los lodos residuales industriales.

4.5.1.1. Efectos en la salud pública.

La mayoría de los organismos vivos necesitan de algunos metales y en dosis muy pequeñas, caracterizando el concepto de micronutrientes como es el caso del zinc, magnesio, cobalto y fierro. Estos metales se tornan tóxicos y peligrosos para la salud humana cuando sobrepasan el límite de concentraciones.

Cuadro 2: Efectos sobre la salud humana de los metales presentes en los lodos.

Metales	Efectos sobre la salud humana
Cadmio	Este metal es cancerígeno, provoca elevación de la presión sanguínea y del corazón. Daña a la próstata, al sistema óseo. Dolores en las articulaciones, anemia, enfisema pulmonar, osteoporosis, perdida del olfato disminución del desempeño sexual.

Plomo	Irritabilidad y agresividad, indisposición, dolores de cabeza, convulsiones, fatigas, dolores abdominales, náuseas, aberturas musculares; pérdida de memoria, insomnio, accidente vascular cerebral inespecífico, alteraciones de inteligencia, osteoporosis, anemias, enfermedades renales, problemas de coagulación. Afecta al sistema digestivo y reproductivo y es agente teratogénico (que puede producir mutaciones genéticas).
Mercurio	Depresión, fatiga, temblores, síndrome del miedo, dificultades de lenguaje, descontrol, pérdida de memoria, pérdida del apetito sexual, dolor y parálisis de las extremidades, dentadura floja, dolor de cabeza, alucinaciones, vómitos, dificultad de masticación, sudores y pérdida de sensación de dolor.
Níquel	Cancerígeno, puede causar dermatitis de contacto, gengivitis, erupciones en la piel, estomatitis, dolores articulares, osteoporosis y fatiga crónica.
Zinc	Sensaciones como paladar dulce y resequedad en la garganta, tos, fragilidad, dolor generalizado, fiebre, náuseas y vómitos.
Cromo	Dermatitis, úlceras cutáneas, inflamación nasal, cáncer en los pulmones y perforaciones de las fosas nasales.
Arsénico	Trastornos gastrointestinales, espasmos de los músculos de las vísceras, náuseas, diarreas, inflamaciones de boca y garganta, dolor abdominal.
Aluminio	Constipación intestinal, pérdida de energía, cólicos abdominales, pérdida de memoria, dificultad de aprendizaje, raquitismo y convulsiones. Enfermedades relacionadas con Alzheimer y Parkinson.
Bario	Hipertensión arterial, enfermedades cardiovasculares, fatiga y desánimo.

El plomo, el mercurio y el cadmio son metales que no existen naturalmente en ningún organismo, tampoco desempeñan funciones nutricionales o bioquímicas en microorganismos, planta o animales; lo cual implica, que la presencia de estos metales en microorganismos vivos es perjudicial en cualquier concentración.

Los metales pesados pueden producir varios efectos en el hombre, resultado de la acción sobre moléculas, células, tejidos, órganos y demás sistemas interiores. Además, la presencia de un metal pesado puede limitar la absorción de otros nutrientes esenciales en la actividad del organismo. Los metales pesados no pueden ser metabolizados, permanecen en el organismo y ejercen efectos tóxicos cuando se combinan con uno o otros grupos reactivos ligantes, en los cuales son indispensables para las funciones fisiológicas normales. Dependiendo del material envuelto y de la intensidad de intoxicación, el efecto puede ser desde una manifestación local en el pelo, membrana pulmonar o tracto intestinal, hasta efectos mutagénicos, teratogénicos y cancerígenos o hasta la muerte.

4.5.2. Contaminantes orgánicos.

Algunos contaminantes que se encuentran en este grupo corresponden a los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificaciones, agentes tensioactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, que generalmente poseen poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, razón por la cual se acumulan en los lodos. Varios contaminantes orgánicos son volátiles, debido a la baja solubilidad, bajo peso molecular y elevada presión de vapor. Su volatilización representa un riesgo potencial para la salud pública; además, de que la mayoría posee un variado potencial de biodegradación lenta.

4.5.2.1. Efectos en la salud pública.

La evaluación de los efectos fisiológicos causados por los diferentes contaminantes orgánicos en el hombre es muy compleja, pues depende, entre otros factores, de las características peculiares de cada individuo, de las vías de exposición, de las concentraciones y características del contaminante al que fue sometido. Hasta ahora la presencia de contaminantes orgánicos persistentes en los lodos, ha mostrado que el riesgo para la salud humana a través de los cultivos en suelos tratados con lodos es muy pequeño, ya que la absorción de contaminantes orgánicos por las plantas parece ser escasa o nula y hasta hoy no se ha encontrado bioacumulación en el ganado (Damron, Davidson y Bitton, 1980).

El grupo de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2000) sobre riesgos para la salud de los productos químicos presentes en los lodos aplicados a la Tierra llegó a la conclusión de que “la absorción total para el hombre de contaminantes orgánicos identificados procedentes de la aplicación de los lodos a las tierras de cultivo es poco importante y probablemente no causara efectos adversos para la salud”. Sin embargo las investigaciones sobre el papel ecotoxicológico de los contaminantes orgánicos en el sistema suelo-planta-agua y la cadena alimenticia genera mucha duda.

4.5.3. Agentes patógenos.

Los organismos encontrados en los lodos pueden ser capaces de causar enfermedades en el hombre y los animales. Dentro de estos se pueden encontrar cinco grupos: helmintos, protozoarios, hongos, virus y bacterias. Es por ello, que para que cualquier vertido de lodos sea seguro se debe precisar la eliminación, o al menos una inactivación suficiente de estos. El origen de los patógenos puede ser humana lo que refleja directamente el nivel de salud de la población y las condiciones de sanitarias básicas de cada región. También pueden ser de procedencia animal (heces fecales de perros y gatos) y por la presencia de los animales en la red de desechos, principalmente de roedores. En relación a los patógenos presentes en el lodo, estudios epidemiológicos han mostrado que bacterias, virus, huevos de helmintos y cistos de protozoarios representan riesgos para la salud humana y animal.

La cantidad de patógenos presentes en los desechos de una determinada localidad es bastante variable y depende de:

- Condiciones socio-económicas de la población
- Condiciones sanitarias
- Región geográfica
- Presencia de industrias
- Tipo de tratamiento al que el lodo fue sometido

Las concentraciones de patógenos sufren influencia por los métodos de tratamiento al que el lodo es sometido. Los más comunes son: helmintos, bacterias y virus.

El grupo de los helmintos comprende especies como *Taenia solium* que es el parásito de mayor incidencia en América latina, infecta tanto al hombre (hospedero definitivo) como animales (hospedero intermedio). Cuando los huevos son ingeridos, los parásitos se desarrollan hasta que llega a instalarse en el cerebro, o en los músculos de los ojos. Y *Ascaris lumbricoides*, es de mayor incidencia en la población por ser un parásito cosmopolito, parásita el intestino delgado del hombre. El hospedero se contamina

principalmente por la tierra con huevos. Los daños nerviosos más comunes es la agitación nocturna, irritabilidad y en algunos casos epilepsia.

La infección por las bacterias entéricas representa mayor riesgo para los individuos que trabajan en las estaciones de tratamiento. Los agricultores que trabajan cerca del área también tienen riesgos. Algunas bacterias persisten en animales infectados que funcionan como reservorios. La *Salmonella* spp. y *Shigella* spp. representan el mayor riesgo de infección ya que son las bacterias más comunes en los lodos.

Los virus están presentes en diferentes tipos de lodos provenientes de diversos tipos de tratamiento. Su concentración es variable y depende de las condiciones de salud de la población, el tipo de proceso de tratamiento a que fue sometido el lodo, así como el proceso de estabilización utilizado para el lodo. Los virus afectan a los seres humanos y animales y pueden ser transmitidos a través del suelo, alimentos, agua.

La cantidad de organismos presentes en los lodos puede variar en función del tiempo (mes, año, estación del año, etc.), las especies presentes y de otros aspectos. En estudios realizados en Inglaterra, Estados Unidos y Francia por la Organización Mundial de Salud concluyeron que en los lodos primarios el número de huevos de helmintos presentes pueden ser del orden de 10 mil a 100 mil o más, en cuanto a virus el número puede variar de 10 a 10 millones por kilogramo de materia seca.

4.5.3.1. Efectos en la salud pública

El manejo y la utilización de los lodos residuales domésticos para los más variados fines, sin previo tratamiento de estabilización y tratamientos higienizantes, pueden causar infección en el hombre y animales por los agentes patógenos presentes en ellos.

Cuadro 3: Enfermedades más comunes transmitidas por los organismos patógenos a los seres humanos a través de los lodos residuales.

Organismo	Enfermedad	Efectos
Bacterias	Fiebre tifoidea	Diarrea, vómito severo, bazo crecido, intestino inflamado; a menudo es mortal si no se trata.
	Cólera	Diarrea, vómito severo, deshidratación; a menudo mortal si no se trata.
	Disentería bacteriana	Diarrea; raramente es mortal, excepto en niños sin tratamiento adecuado.
	Enteritis	Dolor estomacal severo, náuseas, vómito; rara vez es mortal.
Virus	Hepatitis infecciosa	Fiebre, dolor de cabeza severo, pérdida de apetito, dolor abdominal, ictericia, hígado crecido; rara vez es mortal, pero puede causar daño permanente al hígado.
	Poliomielitis	Fiebre, dolor de cabeza severo, úlceras en la garganta, cuello rígido, dolor muscular intenso, debilidad severa, temblores, parálisis en piernas, brazos y cuerpo; puede ser mortal.
Protozoarios Parásitos	Disentería amebiana	Diarrea severa, dolor de cabeza, escalofrío, fiebre; si no se trata puede ocasionar absceso hepático, perforación intestinal y muerte.
	Giardia	Diarrea, calambres abdominales, flatulencia, eructos, fatiga.
Gusanos Parásitos	Esquistosomiasis	Dolor abdominal, erupción en la piel, anemia, fatiga crónica y mala salud crónica general.

La infección del hombre y de los animales puede ser a través de contacto directo o por medios indirectos. Cuando se da por contacto directo, los individuos pueden inhalar o ingerir directamente partículas que contienen patógenos, por el manejo o consumo de vegetales crudos cultivados en suelos fertilizados con lodos no tratados. Los animales también pueden ser infectados por vía directa y tener problemas graves o servir como reservorio de agentes patógenos. La vía indirecta se da cuando se consume de agua contaminada con lodos que contienen agentes contaminantes, consumo de carne de animales que estén contaminados con huevos de helmintos (huevos de tenias), permitiendo la continuidad del ciclo biológico del parásito.

Las helmintiasis es de las enfermedades más comunes de la humanidad. Se ha calculado que más de 1000 millones de individuos en el mundo están infectados por *Ascaris lumbricoides*. Las helmintiasis intestinales son causa de muerte de alrededor de 100,000

individuos por año en los países subdesarrollados (Tay *et al.*, 1991) citados por Maya *et al.* En México la infección por *Ascaris lumbricoides* tiene una frecuencia que varía entre 43 por ciento a 94 por ciento en la población rural (Maya *et al.*, 1996).

V. TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LOS LODOS RESIDUALES

A partir de la creación de los programas de protección al ambiente que emitieron leyes y normas para regular el equilibrio ecológico, se ha visto la necesidad de someter a un tratamiento a todos los desechos producidos en las actividades cotidianas. Siguiendo este mismo marco, surge la necesidad de dar un tratamiento al agua residual, así como el manejo adecuado de los lodos para poderlos disponer de tal manera que el impacto al ambiente sea lo menos posible. Lo anterior hace que se cree una corriente en pro del ambiente

implementando técnicas y métodos que se adecuen a las necesidades y recursos propios de nuestro país.

Los lodos están compuestos principalmente de 93–99.5 por ciento de agua y un porcentaje de sólidos de 0.5–5 por ciento, así como sustancias disueltas que están presentes en el agua residual y que fueron adicionados o generados por un proceso de tratamiento, todo depende del origen de los sólidos y del método de remoción.

Los lodos se deben tratar para facilitar su manejo y evitar los problemas desde olores hasta agentes patógenos. Los tratamientos aplicados modifican las propiedades de los lodos, haciéndolos más adecuados para su reutilización o eliminación.

Los problemas derivados del manejo de los lodos son complejos, debido a que el lodo esta formado, principalmente de las sustancias presentes en las aguas residuales no tratadas. La fracción del lodo a evacuar generado en el tratamiento biológico del agua residual, esta compuesta principalmente por la materia orgánica presente en ella sujeta a procesos de descomposición y solo una pequeña parte esta compuesta de materia sólida.

5.1. Finalidad del tratamiento

Los objetivos principales del tratamiento son:

- Reducir el contenido del agua para hacer más económico su manejo
- Minimizar la cantidad de organismos patógenos
- Minimizar el contenido de materia orgánica y malos olores
- Eliminar constituyentes peligrosos

5.1.1. Almacenamiento.

El almacenamiento debe realizarse para laminar las fluctuaciones de la producción del lodo y permitir la acumulación de los mismos durante los períodos en los que las instalaciones del siguiente tratamiento estén fuera de servicio, o para asegurar que la alimentación se lleve a cabo a caudal constante. El almacenamiento del lodo durante períodos superiores a dos o tres días provoca su deterioro y aumenta la dificultad del proceso de deshidratación. Para evitar el desarrollo de condiciones asépticas y para controlar los olores generados en los tanques de mezcla y almacenamiento del lodo, se ha utilizado cloro y peróxido de hidrógeno, aunque los resultados no han sido plenamente satisfactorios. El control de olores también se lleva a cabo elevando el pH por adición de hidróxido de sodio o cal.

5.2. Etapas del tratamiento.

El tratamiento de los lodos se realizan con métodos ya sean físicos, químicos, biológicos y térmicos, se divide en cinco etapas, esto es para asegurar la eliminación de la mayoría de los contaminantes que estén presentes en ella, de acuerdo a la legislación vigente en cada país o al uso para el cual será destinada.

Los procesos físicos se utilizan para la reducción del volumen y peso de los lodos por medio de remoción del agua libre o ligada. En los procesos químicos se adicionan reactivos químicos al lodo y por medio de reacciones se realizan modificaciones en las propiedades del lodo. Los procesos biológicos se realizan para oxidar bioquímicamente la materia orgánica contenida en el lodo, mientras que en los procesos térmicos se aplica energía para desaguar, destruir o reducir la toxicidad de los lodos.

Las principales etapas empleadas para el tratamiento son el espesamiento o concentración, digestión y estabilización, acondicionamiento, deshidratación y tratamiento térmico o secado.

5.2.1. Mezclado de los lodos.

Antes de entrar a las etapas de tratamiento los lodos se mezclan para conseguir que la alimentación a los siguientes procesos y operaciones de tratamiento sea un material uniforme. La uniformidad de la mezcla adquiere mayor importancia en el caso de sistemas de corto tiempo de retención, como puede ser el caso de la deshidratación del lodo, el tratamiento térmico o la incineración. La alimentación de un lodo bien mezclado y con características uniformes favorece, en gran medida, el funcionamiento y rendimiento de las plantas. El mezclado de los lodos procedentes de las distintas fases de tratamiento se puede llevar a cabo en tanques de decantación, en las mismas tuberías de extracción de lodos o en tanques para mezcla construidas previamente para tal fin.

5.2.2. 1ra. Etapa (Espesado)

Se lleva a cabo como primera etapa del tratamiento hasta que el lodo alcanza una concentración de sólidos que puede ser hasta el 10 por ciento. El espesado es un procedimiento que se emplea para aumentar el contenido de sólidos en el lodo por eliminación de una parte de la fracción líquida. Las ventajas del espesamiento son mejorar la función del digestor y reducir las inversiones; reducir el volumen del lodo antes de ser evacuados al terreno y mejorar la economía de los sistemas de deshidratación. Se puede llevar a cabo mediante procedimientos físicos, que incluyen el espesado por gravedad, flotación centrifugación, y filtros de banda por gravedad. Los principales métodos para lograr el espesamiento son mecánicos y corresponden a los siguientes:

El espesamiento por gravedad suele realizarse en decantadores estáticos circulares provistos de rasquetas para la eliminación del lodo precipitado y el agua decantada clarificada se extrae por la parte superior. El lodo alimentado sedimenta y compacta y el lodo espesado se extrae por la parte inferior del

tanque. El recogido se realiza con dispositivos verticales que remueven el lodo lentamente, promoviendo la apertura de canales para proporcionar salida al agua y favoreciendo la densificación. El sobrenadante que se origina se retorna al inicio del tratamiento. Para mejorar el rendimiento del proceso a menudo se le puede añadir agua de dilución y ocasionalmente cloro. La concentración de lodo en materia seca tras esta fase de espesamiento suele estar en el entorno del tres al cuatro por ciento (30–40 g/L).

Otro método utilizado es la flotación por aire disuelto. Proceso más empleado en el cual se introduce aire en una solución que se mantiene a una presión determinada. El aire disuelto se libera en forma de burbujas finamente divididas que arrastran el lodo hasta la superficie, desde donde es eliminado.

La concentración de sólidos flotantes que se puede obtener mediante el proceso depende principalmente de la relación aire–sólido, de las características del lodo (especialmente del índice del volumen del lodo), de la carga de sólidos, y de la aplicación de polímeros. Se ha conseguido concentraciones variables entre tres y seis por ciento en peso.

5.2.3. 2da Etapa. Digestión y/o Estabilización.

Esta etapa es muy importante ya que aquí se lleva cabo la reducción de las características que hacen al lodo un residuo peligroso y por consiguiente donde se reduce el riesgo ambiental. En este proceso se reduce la presencia de patógenos, elimina olores desagradables, inhibe, reduce o elimina su potencial de putrefacción, aplicando diferentes tratamientos.

Los medios de estabilización que se utilizan para eliminar el desarrollo de las condiciones desagradables son: reducción biológica del contenido de materia volátil;

oxidación química de la materia volátil; adición de agentes químicos para hacer al fango inadecuado para la supervivencia de los microorganismos y aplicación de calor con el objeto de desinfectar o esterilizar el lodo.

En la estabilización química no se reduce la cantidad de materia orgánica biodegradable, solo crea condiciones para inhibir microorganismos a fin de retardar la degradación del material orgánico y prevenir olores. El lodo puede ser estabilizado químicamente en forma líquida o deshidratada.

La estabilización química comúnmente usada es la estabilización con cal ya que este proceso es conocido desde hace 2000 años para el control de excremento y estiércol. Mediante este método se añade suficiente cal al lodo para elevar el pH por encima de 12. Este valor elevado de pH crea un entorno que no favorece la supervivencia de los microorganismos. Mientras se mantenga este pH el lodo no se pudrirá, no creará olores y no provocará riesgos para la salud pública. Para lograr la estabilización se puede emplear tanto cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como cal viva, CaO . En algunos casos, la cal se ha sustituido por polvo de hornos de cemento y carburo cálcico. Cuando se hace en lodos deshidratados las reacciones exotérmicas de la cal con el agua provocan calentamiento, el cual ayuda a destruir patógenos y evaporar el agua.

Mediante el proceso de estabilización biológica el contenido orgánico de los lodos es reducido por degradación biológica. La digestión se realiza en digestores en presencia de microorganismos tanto aerobios como anaerobios.

La “digestión aerobia” es un proceso en el cual se produce una aireación, por un período significativo de tiempo, con el resultado de una destrucción de células y una disminución de sólidos en suspensión volátiles (SSV). Esta reducción es el resultado de la conversión, por oxidación, de una parte sustancial de lodos en productos volátiles (CO_2 , NH_4 , H_2).

El proceso de digestión aerobia se refleja mediante la ecuación:



En donde el amoniacó es oxidado a nitratos de acuerdo con la siguiente ecuación:



Durante el proceso, la nitrificación es muy intensa y los organismos al ser igual que los de la depuración biológica, son muy resistentes a los contaminantes tóxicos. El tejido celular solo puede ser oxidado en un 75–80 por ciento, siendo el resto, componente no biodegradable e inerte. El periodo de retención que se a definido experimentalmente es entre 10 a 15 días, tiempo necesario para reducir el 40 por ciento de los sólidos volátiles que hay en el lodo a una temperatura media de 20 °C.

En el proceso de “digestión anaerobia” desprende metano y CO₂. Los procesos se realizan en depósitos cerrados, con agitación para homogeneizar. El volumen del lodo es más bajo que el obtenido en la digestión aerobia, los requerimientos de nutrimentos son menores y no se requiere oxígeno. En la digestión anaerobia, la materia es primeramente hidrolizada por enzimas extracelulares a productos solubles de menor tamaño, los cuales pueden pasar a través de la membrana celular, donde son oxidadas anaerobicamente a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno y amoníaco. Los ácidos grasos de cadena corta son convertidos a acetato, gas hidrógeno y dióxido de carbono, y finalmente la metanogénesis ocurre de la reacción del dióxido de carbono, del hidrógeno y del acetato.

Desde mediados de los años sesenta, el “compostaje” de lodos ha venido recibiendo creciente atención como alternativa económicamente viable y ambientalmente segura para la estabilización del lodo. Es un proceso en el que la materia orgánica sufre una degradación biológica de hasta alcanzar un producto final estable. Aproximadamente del 20–30 por ciento de los sólidos volátiles se convierten a CO₂ y agua. Conforme se produce la degradación de la materia orgánica contenida en el lodo, la composta se calienta hasta

alcanzar temperaturas situadas en el intervalo de pasteurización (50–70 °C), lo cual permite la destrucción de organismos patógenos entéricos. Un lodo bien compostado se puede emplear como acondicionador de suelos en usos agrícolas y hortícolas, o ser enviado a vertedero, cumpliendo siempre las limitaciones aplicadas a los constituyentes del lodo.

5.2.4. 3ra. Etapa. Acondicionamiento y desinfección

El proceso de acondicionamiento tiene la finalidad de mejorar las propiedades físicas de los sólidos en los lodos para facilitar la eliminación del agua en el proceso de deshidratación. El método comúnmente empleado implica la adición de reactivos químicos.

En algunos casos el uso de productos químicos o “acondicionamiento químico” permite reducir la humedad del lodo, desde el 90–99 hasta 65–85 por ciento, dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. El acondicionamiento químico da lugar a la coagulación de los sólidos y a la liberación del agua absorbida. Los productos químicos que se emplean incluyen el cloruro férrico, la cal, la alúmina y polímeros orgánicos.

La desinfección esta adquiriendo gran importancia como proceso adicional debido a las restricciones de las normas aplicadas a la reutilización de los lodos y su aplicación al suelo. En la aplicación al suelo, la protección a la salud pública obliga a controlar el posible contacto con organismos patógenos. Existen muchos medios para conseguir la eliminación de los patógenos presentes en los lodos líquidos y deshidratados, como son:

Pasteurización

- Procesos térmicos como el acondicionamiento térmico, secado térmico, incineración, combustión con deficiencia de aire
- Tratamiento a pH elevado superior a 12 durante tres horas, normalmente con cal
- Almacenamiento a largo plazo del lodo líquido digerido
- Compostaje completo a temperaturas superiores a 55 °C y maduración por almacenaje en pilas durante un mínimo de 30 días
- Adición de cloro para la desinfección y estabilización
- Desinfección por radiación de alta energía

Los métodos más adecuados para la desinfección de lodos líquidos procedentes de digestión aerobia y anaerobia son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo. El almacenamiento a largo plazo y el compostaje son, probablemente los métodos más efectivos en la desinfección de lodos digeridos aerobios y anaeróbicamente, y lodos deshidratados.

5.2.5. 4ta. Etapa. Deshidratación.

La deshidratación de los lodos es un proceso de separación del agua en el lodo dándole propiedades de un sólido. El contenido de sólidos resultante se encuentra entre los rangos de 20–45 por ciento de sólidos en peso. La deshidratación se utiliza para reducir el contenido de humedad del lodo por razones como:

- Los costos de transporte del lodo por camión hasta el lugar de su evacuación final son notablemente menores cuando se reduce el volumen por deshidratación
- El lodo deshidratado es generalmente más fácil de manipular que el lodo líquido o espesado
- La deshidratación del lodo suele ser necesario antes de la incineración para aumentar su poder calorífico por eliminación del exceso de humedad
- La deshidratación es necesaria antes del compostaje para reducir la cantidad de material de enmienda o soporte
- En algunos casos puede ser necesario eliminar el exceso de humedad para evitar la generación de olores y que el lodo sea putrescible
- La deshidratación del lodo suele ser necesario antes de su evacuación a vertederos controlados para reducir la producción de lixiviados en la zona del vertedero

Se utilizan varias técnicas para la eliminación de la humedad. Algunos se basan en la evaporación y percolaciones naturales, mientras que los aparatos de deshidratación mecánica utilizan medios físicos operados 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.

En un “filtro prensa”, la deshidratación se lleva a cabo forzando la evacuación del agua presente en el lodo por la aplicación de una presión elevada. Las ventajas de los filtros prensa incluyen; altas concentraciones de sólidos en la torta, obtención de un filtrado muy clarificado y elevadas capturas de sólidos. Los inconvenientes incluyen la complejidad mecánica, los elevados costos de reactivos, los altos costos de mano de obra y la limitada vida útil de las telas del filtro. En la deshidratación de lodos se han utilizado varios tipos de filtros.

Los “lechos” se emplean para la deshidratación de lodos y reducir el contenido de humedad suficiente para que el resto pueda manejarse como material sólido con un contenido de humedad inferior al 70 por ciento. El secado resulta de la combinación de dos factores: evaporación solar y la infiltración del agua. El escurrimiento más importante ocurre durante las primeras 12 a 18 horas, el subsecuente secado se debe principalmente a la evaporación del agua. A medida que esta tiene lugar, las capas de lodos se adjuntan y se agrietan en la superficie dejando que también haya evaporación en las capas inferiores al profundizarse las grietas.

5.2.6. 5ta. Etapa. Secado.

El proceso de secado se utiliza para la eliminación completa del agua retenida en los lodos pero si los tratamientos para la eliminación del agua en el lodo fueron bien empleados, el secado ya no es necesario.

El secado térmico es de tipo mecánico, en el se aporta calor auxiliar para aumentar la capacidad de retención del vapor del aire ambiental y para proporcionar el calor latente necesario para la evaporación. El tratamiento térmico se emplea para la coagulación de sólidos, romper la estructura del gel y destruir la afinidad al agua de los sólidos contenidos en los lodos. Como consecuencia de ello, el lodo se esteriliza y deshidrata rápidamente. A elevadas temperaturas y presiones, se puede conseguir la estabilización casi completa de los sólidos volátiles (reducción aproximada del 90 por ciento).

El objeto del secado térmico es la eliminación de la humedad del lodo líquido, de forma que se pueda incinerar con eficacia y procesar para su transformación como fertilizante. Las ventajas del tratamiento térmico son: el contenido de sólidos del lodo deshidratado oscila entre el 30–50 por ciento; el proceso permite estabilizar el lodo y destruir la mayor parte de los organismos patógenos y el proceso es relativamente insensible a las variaciones de la composición del lodo.

El secado es necesario en la fabricación de fertilizantes para que sea posible triturar el lodo, para reducir el peso y para prevenir la continuación de la acción biológica. El contenido de humedad del lodo seco es inferior al 10 por ciento.

En los casos en que los lodos se deben transportar a grandes distancias, la reducción del volumen del lodo puede compensar los costos de transporte, también la reducción del volumen es deseable en los casos en que se transporta lodo líquido para la aplicación directa al terreno como acondicionador de suelos.

5.3. Análisis de lodos antes de la disposición

Después de tratar los lodos se obtienen los lodos líquidos (estabilizados o no), lodos sólidos (estabilizados o no), lodos desecados. El costo del tratamiento y eliminación se calcula hasta la mitad del costo total del tratamiento de las aguas residuales, pero probablemente aumentará, si la legislación es estricta.

Antes de cualquier vía de disposición, es necesario que aprueben el análisis CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico–infeccioso), ya que de acuerdo con la legislación mexicana los lodos de desecho son un residuo peligroso. Si no cumplen con el CRETIB por lo que será necesario mandarlos a un

confinamiento especial, ya que debido al proceso de tratamiento al que a sido sometida el agua residual en los lodos resultantes de este proceso se tienden a concentrar todos los contaminantes indeseables que el agua acarrea, además de los productos químicos que son aplicados a las aguas para lograr la purificación.

Dentro de los procedimientos correspondientes para el análisis al igual que el que se hace antes del tratamiento, se toman en cuenta los siguientes aspectos: equipo necesario, normas que regulen los tratamientos y los vertidos, y el tipo de métodos confiables para la determinación de los componentes y características.

Para la caracterización de lodos se pueden aplicar dos procedimientos:

Análisis de componentes y concentración.- Esto se hace con la finalidad de poder determinar el lugar de disposición al que tiene que ser enviado, o en el caso de tener la mentalidad de utilizarlos como mejorador de suelos, conocer si el lodo cumple con las características de poder ser utilizado para tal fin.

Análisis de lixiviados.- Consiste en someter a una muestra de residuo a un proceso acelerado de descomposición simulando la situación más crítica que sufrirá al ser depositado en un relleno. En el lixiviado resultante se analizan los parámetros requeridos para su caracterización. También esta prueba es importante para determinar si el lodo puede contribuir a la contaminación de las aguas tanto subterráneas como superficiales, en caso de utilizarlos en la agricultura.

5.4. Alternativas de disposición.

El destino final de los lodos dependerá del tratamiento que hayan recibido y de la posibilidad de aplicarlos en usos definidos, y además, que se encuentren en la cercanía de la

zona donde se producen. Si esto último no es viable, su destino final será el relleno sanitario, ya que en muchas ocasiones los costos de transporte hasta el lugar de aplicación llegan a ser muy altos, por lo tanto, aumentarían el costo del proceso de tratamiento.

Durante mucho tiempo en los países del mundo que implementaron el tratamiento de aguas residuales los productos de desecho eran evacuados directamente al suelo sin considerar un tratamiento previo a estos. A través del transcurso del tiempo cuando se incremento el número de plantas tratadoras y con ello la cantidad de desechos, se fueron buscando alternativas de disposición. Una de ellas fue el verter los desechos al mar ya que la masa de agua es muy extensa y podría dispersar el efecto de los contaminantes. Hasta hace poco tiempo países como España, Inglaterra y Japón seguían desechando los lodos residuales al mar.

En la mayoría de los países del mundo se han implementado normas que regulen el tratamiento y disposición de los residuos, pero en los lugares donde se ha tenido mayor auge en lo que se refiere a lodos es en la Comunidad Europea y en Norteamérica.

A cada vía de eliminación le corresponde un conjunto de normas de calidad de lodos, que están establecidas en la mayoría de los países con la finalidad de proteger el medio ambiente, el suelo y la salud pública. Por ello en 1999 en Europa se prohibió el vertido al mar. Las restricciones sobre la eliminación en vertederos pretenden excluir los residuos orgánicos.

Cuadro 4: Disposición de lodos residuales en la Comunidad Europea en el año de 1990.

País	Cantidad (miles ton/lodo seco/año)	Agricultura (%)	Directo al suelo (%)	Incineración (%)	Océano (%)
Bélgica	35	57	43	0	0

Dinamarca	150	43	29	28	0
Francia	900	27	53	20	0
Alemania	2 750	25	65	10	0
Grecia	200	10	90	0	0
Irlanda	23	23	34	43	0
Italia	800	34	55	11	0
Luxemburgo	15	80	20	0	0
Holanda	280	53	29	10	8
Portugal	200	80	12	0	8
España	300	61	10	0	29
Inglaterra	1 500	51	16	5	28

La Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (USEPA, siglas en inglés) ha propuesto nuevas normas que establecen limitaciones cuantitativas sobre la presencia de contaminantes y prácticas de gestión para la aplicación de lodos a terrenos agrícolas y no agrícolas, distribución, vertido a vertederos específicos, evacuación en superficies, e incineración. Las nuevas normas que se están revisando, pueden tener un impacto sobre los métodos de tratamiento, reutilización y evacuación de lodos empleados o propuestos en la actualidad.

Hoy en día están apareciendo restricciones en todas las vías de eliminación. Las legislaciones estrictas junto con la preocupación de los posibles riesgos ambientales y sanitarios conllevan a esparcir los lodos en los suelos. Potencialmente la opción más atractiva sería utilizar los lodos en la agricultura, porque podrían reciclar nutrientes y ser útiles desde el punto de vista agronómico.

5.5. Principales alternativas de disposición en el mundo

Las principales vías de eliminación de los lodos con tratamiento o sin tratamiento durante mucho tiempo ha sido llevarlos a vertederos, esparcirlos en las tierras, verterlos en el

mar (sobre todo en el Inglaterra) e incinerarlos, sin tomar en cuenta las consecuencias que acarrearán sobre la salud pública y el medio ambiente. Actualmente las principales alternativas de disposición de los lodos comúnmente empleadas en el mundo son:

1. Descargas oceánicas.- Se destinan los lodos al mar después de un precondicionamiento a través de emisiones al océano o por descargas en barcos. Este método ha sido de los más populares en Inglaterra y España, pero se prohibió en 1999 por el riesgo de que existieran problemas como en Japón (Minamata) donde cientos de personas se vieron afectados por concentraciones excesivas de metil-mercurio en los alimentos marinos
2. Incineración.- Proceso de descomposición térmica vía oxidación, donde los sólidos volátiles de los lodos son quemados en presencia de oxígeno, convirtiéndolos en dióxido de carbono y agua, quedando una parte de los sólidos fijos y transformados en cenizas. Es el sistema más caro, pero se usa porque reduce el lodo en más del 90 por ciento y la ceniza producida puede ser transportada sin dificultad
3. Relleno sanitario.- Disposición de residuos en lugares especiales, compactados y cubiertos. El lodo puede ser dispuesto en rellenos sanitarios exclusivos o co-dispuesto como un residuo sólido urbano
4. Recuperación de áreas degradadas.- Disposición de altas dosis de lodos en suelos drásticamente alterados, como área de mineralización donde el suelo no ofrece condiciones para el desarrollo de las plantas, en función de la falta de materia orgánica y de nutrientes en el suelo.
5. Reciclaje agrícola.- Utilización del lodo en suelos agrícolas, pretende crear fertilidad y asociarlos con las plantas de cultivo, y así obtener beneficios de estos, además de reducir los costos de disposición

5.6. Efectos negativos por los tipos de disposición

La escala de alternativas de disposición del lodo residual pasa por evaluaciones de orden técnico, económico y ambiental. En lo que se refiere a la parte ambiental cada alternativa presenta impactos potenciales en el ambiente que pueden ser controlados

dependiendo del sistema de tratamiento utilizado, la eficiencia de operación y manejo, la obediencia de las normas y reglamentos de regulación. Para el control sobre los posibles impactos de una operación de disposición del lodo, se parte de la evaluación de impactos potenciales intrínsecos a cada una de las alternativas. A partir de estos impactos se establecen los principales indicadores ambientales relacionados.

Cuadro 5: Impactos ambientales relacionados con las diferentes alternativas de disposición de lodos.

Alternativa de disposición de lodos	Impactos potenciales ambientalmente negativos
Descargas al océano	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua por sedimentos • Alteración de las comunidades de la fauna marina • Transmisión de enfermedades • Contaminación de elementos en la cadena alimenticia
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del aire • Impactos locales por la disposición de las cenizas
Relleno sanitario	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua superficial y subterránea • Contaminación del aire y del suelo • Transmisión de enfermedades • Impactos estéticos y sociales
Recuperación de áreas degradadas	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua superficial y subterránea • Contaminación del suelo • Olores molestos • Contaminación por elementos en la cadena alimenticia • Transmisión de enfermedades
Reciclaje agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua superficial y subterránea • Contaminación del suelo • Contaminación por elementos en la cadena alimenticia • Transmisión de enfermedades • Impactos estéticos y sociales

Dentro de las actuales alternativas de disposición existentes la que tiene mayor impacto al medio ambiente y a la salud pública es la evacuación del lodo al mar, por eso en muchos de los países es una práctica prohibida. Los componentes del lodo pueden ser fuente de aporte de patógenos, compuestos orgánicos tóxicos y metales pesados. Los elementos

tóxicos pueden ser precipitados al fondo del mar y contribuir a la alteración de comunidades marinas, provocando la muerte de las especies más sensibles por la bioacumulación de metales y compuestos tóxicos en la cadena trófica, pudiendo llegar al hombre a través del consumo de peces y mariscos contaminados.

A los métodos de eliminación a través de incineración y rellenos sanitarios se les atribuyen impactos negativos ya que si no se tiene el cuidado necesario al momento de aplicar el tratamiento algunos de los componentes indeseables pueden escaparse y contaminar al medio ambiente, ya sea a la atmósfera si se trata de la incineración o a los mantos freáticos en caso de los rellenos sanitarios.

En caso de que los lodos se utilicen como acondicionadores de suelos degradados o como sustitutos de los fertilizantes, los impactos resultan del manejo inadecuado al momento de utilizarlos. Cuando se selecciona el lugar, requiere cuidados para evitar los procesos de erosión, los cuales pueden potenciar impactos cuando se presentes grandes torrenciales. El uso agrícola del lodo esta directamente relacionado con la calidad del lodo, las características del área de aplicación, las tasa de aplicación y los cultivos seleccionados. Las dosis deben ser calculadas en base a los requerimientos de los cultivos, para evitar la lixiviación de estos elementos. En una evaluación global del proceso de vías de disposición se deben comprender aspectos como la salud humana, el rendimiento de las cosechas, la salud animal, la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, la calidad del aire, la fertilidad del suelo y los ecosistemas naturales.

5.7. Reciclamiento y/o pensamiento ambiental

De las diversas alternativas de disposición de lodos, el uso agrícola resulta ser más atractivo por económico y por adecuación al ambiente, además, se le puede comparar con lo que se hace tradicionalmente con los residuos orgánicos que se esparcen en las tierras de

cultivo, como el estiércol y los residuos de ganadería. Se han desarrollado numerosos estudios en diferentes partes del mundo e indican que los lodos mejoran las propiedades físicas del suelo aumentando la productividad de las cosechas ya que en sus características presenta aproximadamente, el 50 por ciento de su peso corresponde a materia orgánica, aportan también cantidades variables de nitrógeno (1–7 por ciento), fósforo (1–5 por ciento), potasio (0.3–3 por ciento) y otros nutrimentos con distintos grados de disponibilidad.

Los lodos que se deben utilizar son aquellos que no impliquen riesgos sanitarios y ambientales para el suelo, productos agrícolas, salud humana y el medio ambiente general. Por lo tanto, se debe comprobar la ausencia de microorganismos patógenos, niveles tóxicos de ciertos compuestos y metales pesados, para esto se deben controlar las cantidades incorporadas, los efectos acumulativos de las sustancias y elementos a largo plazo, porque cuando hay un exceso, presentan problemas de toxicidad y contaminación. Cuando los lodos se aplican a los suelos pueden generar mejoras en la productividad y en la recuperación de los ecosistemas degradados, debido a que actúan como acondicionadores de suelos que además de favorecer la asimilación de nutrimentos, aumenta la retención del agua, permite una mejor penetración de las raíces y mejora la estructura del suelo, reduciendo la escorrentía.

En la actualidad los suelos se degradan año con año, lo cual provoca que los costos de producción aumenten considerablemente ya que cada vez cuesta más la inversión para mantener la fertilidad de los suelos, por eso, es necesario buscar alternativas que ayuden a corregir estos problemas. Los lodos por su composición no deben verse como un residuo, si no como una fuente importante de nutrimentos que podrían ayudar a corregir los problemas en la agricultura que actualmente se presentan en el país.

VI. DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS

El suelo se puede definir como el conjunto de cuerpos naturales originados a partir de materiales minerales y orgánicos que contienen materia viva, y que pueden soportar vegetación en forma natural. Cuando un suelo es fértil tiene la capacidad de suministrar a las plantas agua y nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo. La fertilidad del suelo que da la capacidad de sostener el crecimiento a las plantas, a menudo se refiere en particular, a la presencia de las cantidades adecuadas de los nutrientes, pero también comprende su capacidad de satisfacer todas las otras necesidades de las plantas.

Para que crezcan mejor las plantas, las raíces necesitan un ambiente que les suministre las cantidades óptimas de nutrientes minerales, agua y aire (oxígeno). El pH (acidez relativa) y la salinidad (concentración de sales) del suelo son también cruciales. Los factores que determinan la fertilidad de cualquier suelo se clasifican en físicos, químicos y biológicos.

1. Los factores físicos condicionan el desarrollo del sistema radicular y su aporte hídrico. Estos son identificados por la textura, estructura, porosidad, aireación, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc.
2. Dentro de los factores químicos se hace referencia a la reserva de nutrientes y su aporte a las plantas, que se caracteriza por la capacidad de cambios de cationes, pH, materia orgánica, macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (B, Fe, Mo, Mn, Zn, Cu, Na y Cl), y sus formas químicas en el suelo que condicionan su biodisponibilidad.
3. Los factores biológicos están determinados por la actividad de los microorganismos del suelo, donde la microflora utiliza la materia orgánica como sustrato y fuente de energía. Intervienen en la formación de enzimas, ciclo del C y N, transformaciones biológicas de nutrientes y procesos de humificación y mineralización.

6.1. Situación mundial

El suelo fértil es la base del crecimiento vegetal y la producción de alimentos. Sin embargo, en todo el mundo la erosión degrada los suelos, los pastizales se convierten en desiertos y las tierras de regadío se vuelven demasiado salinas para los cultivos. Actualmente, el suelo tiene una elevada tasa de degradación. Entre los factores

responsables se encuentran el crecimiento poblacional, la deforestación, el uso de tierras de poca aptitud agrícola y el mal manejo de los recursos naturales. Según investigaciones, aproximadamente las dos terceras partes de la tierra de cultivo han sido parcial o totalmente destruidas por la erosión o por el agotamiento del suelo causado por hombre (Turk Amos, 1973).

En todo el mundo la erosión, la formación de sales en la tierra y otros problemas vienen degradando los suelos agrícolas de una manera que socavará mucho la productividad en el futuro. Durante los últimos cuarenta años, un tercio de las tierras de labrantío del mundo (1500 millones de hectáreas) han sido abandonadas por semejante degradación. Los alimentos del mundo provienen del 90 por ciento de los sistemas agrícolas basados en las tierras de cultivo, y este porcentaje crece conforme se agota la pesca y los ecosistemas oceánicos naturales. Proteger y nutrir las tierras de cultivo, es la piedra angular de la producción de alimentos.

6.2. Erosión de suelos en México

Respecto a al erosión del suelo en la República Mexicana, se han realizado diversas estimaciones a través de los años las cuales difieren según el método y el período en que se hicieron. De acuerdo a los datos históricos recopilados por la Semarnat mencionan que Baldwin (1945), encontró que la afectación de la erosión era del orden de 45 por ciento de la superficie total. La SARH en 1965, estimó que el 69 por ciento de la superficie del país presentaba erosión en algún grado, y que para 1986 ésta se incrementaría hasta el 81 por ciento. Andrade (1976), manifestaba que el proceso de erosión afectaba el 80 por ciento del país. Estrada y Ortiz (1980), que el 98 por ciento del país presentaba evidencias de erosión. A su vez, García-Lagos (1983), estimó que la erosión alcanzaba el 71 por ciento. Geissert y Rossignol (1987), calcularon que el área afectada por la erosión era del 86 por ciento del territorio nacional.

Estimaciones más recientes hechas por la Dirección General de Restauración y conservación de Suelos (Semarnap), indican que la erosión hídrica afecta a 37 por ciento de los suelos del país, de ese porcentaje el 25 por ciento afecta a la capa superficial del suelo y 12 por ciento produce deformación de terreno. Indican que la erosión eólica afecta al 15 por ciento de los suelos, casi la totalidad corresponde a pérdida la capa superficial.

Otro problema en México es la salinización de los suelos, que es muy frecuente en zonas áridas y semiáridas, las cuales ocupan cerca del 40 por ciento de la superficie nacional. En zonas de cuencas cerradas se presentan fuertes acumulaciones de sales y lo mismo ocurre en varias zonas costeras. No existe una evaluación precisa de la superficie con problemas de salinidad en México. Los datos existentes al respecto son aproximaciones y corresponden a 3.5 millones de hectáreas afectadas en zonas áridas y semiáridas, 800 000 hectáreas en las áreas costeras, 1 millón en áreas agrícolas de temporal y 500 000 en zonas agrícolas de riego, lo cual totaliza unos 6.8 millones de hectáreas de suelos afectados por sales en todo el país (Ortiz, 1992). Estimaciones de la Semarnap en 1999 reportan que la salinización afecta a 3.2 por ciento de suelos del país, porcentaje que equivale a 6.2 millones de hectáreas.

Es común que los suelos se degraden físicamente por la utilización de maquinarias agrícolas durante el proceso de laboreo. La Semarnap en 1999 estimó en 1.8 por ciento la superficie del país afectada por degradación física, cantidad que se debe principalmente a aridificación (0.6 por ciento) e inundación (0.6 por ciento). También se estima que el 15 por ciento de los suelos esta afectada por acidificación, éstos al volverse más ácidos pueden presentar problemas de toxicidad (principalmente por la presencia de aluminio).

La desertificación se produce por la degradación de tierras productivas que son desprovistas de su cubierta vegetal y manejadas inadecuadamente, este proceso puede ser irreversible y tener consecuencias graves. En México, el uso inadecuado de la tierra alcanza grandes dimensiones; ya que ha ocasionado una disminución de la fertilidad de los suelos en un 80 por ciento del territorio nacional.

En México es común el empleo de plaguicidas en las actividades agropecuarias y frecuentemente mediante prácticas inadecuadas y así, constituye una de las formas de contaminación más importantes (sobre todo cuando se aplican por vía aérea) que impactan no sólo los suelos de las áreas en donde se usan, sino que llegan a través de los ríos hasta las zonas costeras afectando las especies marinas.

Cuadro 6: Tipos de degradación y superficies afectadas en la Nación.

Tipos de degradación	Superficie afectada en Km2
<i>Erosión hídrica con</i>	724 651.44
pérdida de la capa superficial	495 668.85
deformación del terreno	227 760.40
sedimentaciones	1 222.19
<i>Erosión eólica con</i>	291 711.40
pérdida de la capa superficial	285 856.25
deforestación del terreno	5 855.15
<i>Degradación química por</i>	132 549.50
Pérdida de nutrientes	31 171.91
Gleyzación	12 989.26
Salinidad	62 421.15
Contaminación	25 967.18
<i>Degradación física por</i>	34 877.66
Urbanización	7 469.16
Aridificación	10 789.66
Compactación	5 473.20
Inundaciones	11 145.64
<i>Degradación biológica</i>	70 817.45
Total	1 254 607.45

El total de la superficie afectada representa el 64 % de la superficie continental del país, estimada en 1 254 608 km. Los datos fueron elaborados por el INEGI en 1999.

Figura 1: Fertilidad de suelos agrícolas en 1996.

La fertilidad de los suelos se basa en la medición de diferentes características químicas resumidas en un índice de fertilidad (IF). Se clasificó según los siguiente valores.



Muy alta = IF mayor de 20.

Alta = IF de 15 – 20.

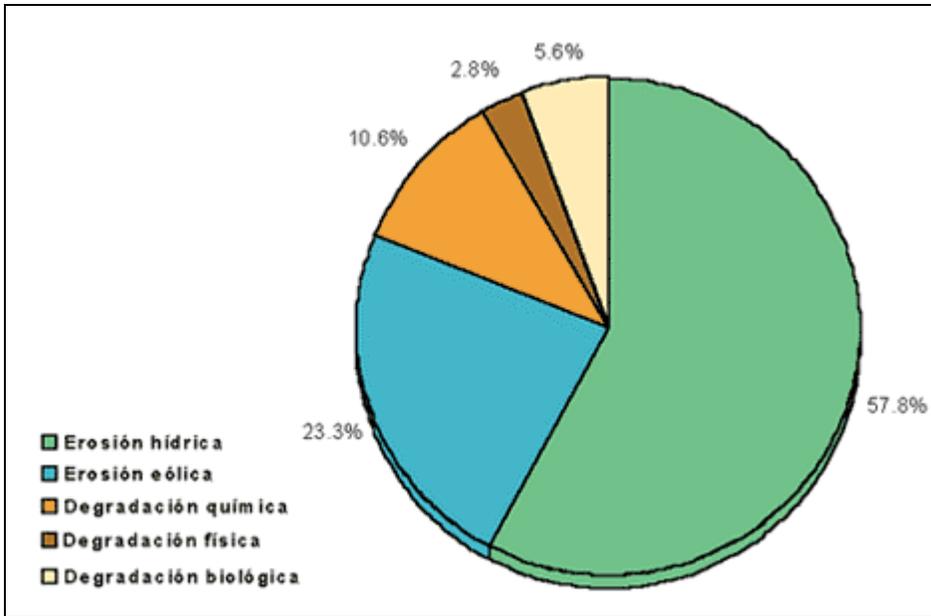
Media = IF de 10 – 15.

Baja = IF de 5-10.

Muy baja = IF de 0 – 5.

Figura 2: Degradación de suelos en 1999.

Los porcentajes se refieren al total de la superficie afectada, 1 254 607.45 km², la cual representa el 64 % de la superficie continental del país, estimada en 1 959 248 km².



Actualmente la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, establece que para el uso, la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, debe ser compatible con su vocación natural y que a demás deben incluirse acciones para su regeneración, recuperación y restablecimiento. Pero estas regulaciones en materia de remediación prevención y control de contaminación en el suelo, se aborda de manera muy general y sin proporcionar sustento para las acciones de control y limpieza.

VII. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS TRATADOS

El destino definitivo del lodo generado en el proceso de tratamiento de aguas es importante puesto que puede convertirse en un posible reciclaje de contaminantes, desde el punto de vista agrícola, proporcionando un doble beneficio: el ambiental al eliminarse los residuos orgánicos urbanos sin alteración relevante del equilibrio ecológico, y el agrícola, al incorporar a los suelos de cultivo la materia orgánica y los nutrientes contenidos. Estos desechos son ricos en materia orgánica y contiene suficiente nitrógeno y fósforo lo que los hace potencialmente útiles como fertilizantes y como fuente de materia orgánica. Además, pueden mejorar las propiedades físicas del suelo lo cual puede reflejarse en un incremento en el rendimiento de los cultivos. Las investigaciones muestran que los lodos activados son más útiles que los lodos digeridos, por ser más ricos en fertilizantes. La adición de un lodo digerido a un suelo, de forma continua produce una baja en el pH, pero este se puede corregir con un encalado.

Cuadro 7: Comparación de los componentes de abonos naturales y lodos residuales.

Componente	Abono natural (estiércol)	lodos	
		Fresco (%)	Digerido (%)
H ₂ O	75	75	46
MO	17-20	15	24
Material mineral	6	--	30
N	0.50-0.55	0.7	1
PO ₄ H ₃	0.25	0.4	0.7
K ₂ O	0.6-0.7	0.1	--

Según Honing y Stutzer.

La aplicación de los lodos a las tierras de cultivo pretende obtener las máximas ventajas de la capacidad del suelo para asimilar, atenuar y destoxificar a los contaminantes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) opina, que cuando la aplicación se realiza adecuadamente, se puede conseguir que la acumulación de contaminantes en el suelo no alcance niveles peligrosos para la salud humana.

7.1. Constitución química del lodo

Desde el punto de vista agronómico, los lodos presentan en su constitución cantidades significativas de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. Los elementos encontrados en mayores cantidades son el nitrógeno y el fósforo. El calcio y el magnesio

son encontrados en pequeñas cantidades, salvo en aquellos lodos que son higienizados a través de encalamientos.

Cuadro 8: Composición química típica de los lodos (medida en mg/Kg).

Características	Lodo crudo primario		Lodo primario digerido		Lodo activado (intervalo)
	Intervalo	Valor típico	Intervalo	Valor típico	
Sólidos secos totales	2-8	5	6-12	10	0.83-1.16
Sólidos volátiles	60-80	65	30-60	40	59-88
Grasas y aceites	6-30	---	5-20	18	---
Proteínas	20-30	25	15-20	183	32-41
Nitrógeno	1.5-4	2.5	1.6-6	2.5	2.4-5
Fósforo	0.8-2.8	1.6	1.5-4	1	2.8-11
Potasio	0-1	0.4	0-3	10	0.5-0.7
Celulosa	8-15	10	8-15	4	---
Hierro	2-4	2.5	3-8	---	---
Sílice	15-20	---	10-20	7	---
pH	5-8	6	6.5-7.5	3000	6.5-8
Alcalinidad	500-1500	600	2500-3500	200	580-1100
Acidos orgánicos	200-2000	500	100-600	1150	1100-1700

Las cantidades de microelementos son variables en los lodos, que contienen generalmente cantidades apreciables de cobre, zinc, manganeso y cantidades menores de boro, molibdeno y cloro. Cuando el lodo es aplicado como única fuente de nitrógeno para las plantas, las cantidades de microelementos adicionales, en la mayoría de las veces, son suficientes para atender las demandas nutricionales de las plantas. Es importante mencionar que los microelementos son necesarios en cantidades pequeñas, por lo tanto, el uso de lodos con niveles altos pueden tener efectos tóxicos.

7.2. Características desfavorables para la aplicación al suelo

Entre los factores limitantes que pueden afectar la utilización con fines agronómicos esta la presencia de microorganismos patógenos, metales pesados, nutrientes y

contaminantes orgánicos, que una vez aplicados al suelo pueden tener efectos nocivos sobre los elementos de la cadena trófica.

7.2.1. Patógenos.

La materia orgánica degradable presente en el lodo no estabilizado puede originar problemas de malos olores y atraer vectores (moscas, mosquitos y roedores) a los lugares de aplicación. Los patógenos (bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos) se concentran en el lodo y pueden propagar enfermedades si existe contacto con el hombre. Para cumplir con los límites permisibles, el contenido en materia orgánica y patógenos se debe reducir considerablemente.

La eliminación de coliformes fecales de los lodos no implica la eliminación de otros parásitos potencialmente patógenos al hombre que tienen origen en las excretas de individuos infectados o en las excretas de hospederos asociados intermediarios. Los organismos patógenos más difíciles de eliminar son los huevos de helmintos.

7.2.2. Metales.

Los elementos traza contenidos en los lodos son aquellos compuestos químicos inorgánicos que, en pequeñas cantidades, pueden ser esenciales o perjudicar tanto a plantas como animales. El término “metales pesados” se utiliza para hacer referencia a varios de los elementos trazas presentes en el lodo. Las concentraciones de metales pesados pueden variar ampliamente, esto puede limitar la tasa de aplicación al terreno y la vida útil del terreno de aplicación. Los principales metales pesados que pueden ser peligrosos son el Cd, Pb y Hg. De ellos el Pb y el Hg no son absorbidos por los cultivos, por lo tanto los riesgos son mínimos. Por otro lado, puede acumularse en los cultivos en concentraciones que podrían ser potencialmente peligrosas.

Los lodos contienen metales traza que quedan atrapados en el suelo y crean posibles riesgos tóxicos para plantas, animales y el hombre. El metal que mayor riesgo presenta es el cadmio, puesto que se puede acumular en las plantas hasta alcanzar niveles que resulten dañinos para el hombre y para los animales sin llegar a ser tóxicos en las plantas. Las aplicaciones repetidas de los lodos aumentarían gradualmente el contenido en elementos traza en los suelos y pueden acumularse durante mucho tiempo.

Cuadro 9: Contenido típico de metales en los lodos

Metales	Lodo seco mg / Kg	
	Intervalo	Media
Arsénico	1.2–230	10
Cadmio	1–3 410	10
Cromo	10–99 000	500
Cobalto	1.3–2 490	30
Cobre	84–17 000	800
Hierro	1 000–154 000	17 000
Plomo	13–26 000	500
Manganeso	32–9 870	260
Mercurio	0.6–56	6
Molibdeno	0–214	4
Níquel	2–5 300	80
Selenio	1.7–17.2	5
Estaño	2.6–329	14
Zinc	101–49 000	1 700

7.2.3. Nutrientos.

Los principales nutrientes que necesitan las plantas (nitrógeno, fósforo y potasio) no se eliminan sustancialmente durante el tratamiento de los lodos, pero son consumidos por las plantas una vez aplicados al suelo. El nitrógeno suele ser el nutriente de mayor interés, debido al riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Por lo tanto el consumo de nitrógeno por parte de la vegetación es un parámetro clave de diseño a la hora de determinar la tasa de aplicación. Cuando se compara el contenido de nutrientes del lodo y de los fertilizantes comerciales, se puede observar que, en la mayoría de los casos, el lodo solo puede satisfacer parte de las necesidades de nutrientes de las plantas, pero si se aplican continuamente cantidades excesivas estos se convierten en elementos tóxicos.

Cuadro 10: Comparación entre los fertilizantes comerciales y el lodo.

	Nutrimentos en %		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizantes típicos	5.0	10.0	10.0
Valores típicos de los lodos	3.3	2.3	0.3

7.2.4. Compuestos orgánicos.

Muchos de estos compuestos resisten la biodegradación por lo que llegan a persistir en el lodo. El principal problema generado por ese tipo de sustancias no está relacionado con el consumo por parte de las plantas, sino por la ingestión directa de los animales que pastan en terrenos de disposición. Existen evidencias de que los compuestos orgánicos pueden ser absorbidos en las superficies de cultivos como las zanahorias.

Los compuestos orgánicos tóxicos se consideran potencialmente peligrosos para la cadena alimenticia por las siguientes razones:

- Por tener baja solubilidad y poca movilidad en el suelo
- Son resistentes a la degradación microbiológica
- Son bioacumulables en tejidos y grasas
- Penetran en la cadena alimenticia
- Son altamente tóxicos en los microorganismos

7.3. Características favorables para la aplicación al suelo

Los lodos contienen todos los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas superiores. El nitrógeno y el fósforo son los elementos que más abundan en los nutrientes de los lodos (Metcalf and Heddy, 1991), aunque el uso de estos en la agricultura es casi exclusivamente como fuente suplementaria de fertilizantes. Además de suministrar agua y nutrimentos esenciales para las plantas, aporta materia orgánica, los cuales si se suministran en cantidades suficientes mejoran las condiciones físicas del suelo y crea condiciones más favorables para el medio ambiente por el manejo de los nutrimentos y del agua.

De manera general, las características que los hacen atractivos para el uso agrícola es la presencia de nitrógeno, fósforo, oligoelementos y materia orgánica.

7.3.1. Nitrógeno.

Es el elemento de mayor valor económico en el lodo, siendo también el nutrimento al que los cultivos presentan mayor respuesta. Su origen proviene de los desechos presentes y de la biomasa microbiana, se encuentra en formas inorgánicas (mineralizadas) y orgánicas. La fracción orgánica constituye la mayor porción de nitrógeno en el lodo, variando del 70 al 90 por ciento dependiendo del tipo de lodo y su cuidado. Las formas minerales (nitrato y amonio) representan pequeñas fracciones de nitrógeno total y se presentan por su rápida disponibilidad para las plantas. En cuanto al nitrógeno orgánico deberá sufrir los procesos de mineralización, transformándose lentamente en formas minerales para poder ser absorbidos por las plantas.

La fracción de mineralización del nitrógeno en el lodo varían de lugar a lugar y año con año, ya que depende de la temperatura, la humedad, la actividad microbiana en el suelo, entre otros factores; se sabe varía entre 20 y el 70 por ciento del nitrógeno aplicado. De la misma forma la fracción de volatización del nitrógeno amoniacal también varía, principalmente en función de la exposición al aire. Estas pérdidas pueden ser minimizadas cuando se incorporan los lodos en el suelo ya que estas pueden ser retenidas por las

partículas del suelo dejándolas disponibles para las plantas. De esta forma el lodo puede satisfacer las necesidades de nitrógeno de los cultivos, aplicándose en una sola ocasión debido a que se libera lentamente, a medida en que la planta lo necesita. Las investigaciones muestran una disponibilidad del 30 al 50 por ciento del nitrógeno en el primer año, cerca del 10 al 20 por ciento en el segundo y del cinco al diez por ciento en el tercero; el restante a partir del tercer año es considerado como constituyente de la materia orgánica humificada en el suelo. En investigaciones hechas en los Estados Unidos, los análisis asumidos de lodos con un contenido del uno por ciento de nitrógenos inorgánico y dos por ciento de nitrógeno orgánico reportaron que el por ciento de mineralización en el primer año se reduce por año y medio en cada uno de los siguientes años (40, 20, 10 y 5 %).

7.3.2. Fósforo.

El fósforo proviene de los desechos de los microorganismos que actúan en el tratamiento de lodos, detergentes y sustancias en las cuales utilizan fosfatos como aditivos. La disponibilidad del fósforo en el lodo se calcula del 40 al 80 por ciento del total contenido en el material. Las plantas necesitan cantidades pequeñas de fósforo para su crecimiento y producción, apenas del cinco al treinta por ciento del total aplicado a través de fertilizantes químicos son aprovechados por las plantas. En los suelos se pueden aplicar de 100 a 2500 kilogramos por hectárea, pero la cantidad asimilable por las plantas es normalmente de 0.1 y un kilogramo por hectárea, por la elevada capacidad de fijación de los elementos por los suelos, ya sea por precipitación o por adsorción.

Los lodos pueden contribuir de dos formas para la optimización del uso del lodo en la agricultura:

1. Puede ser considerado como fuente de fósforo presentando una liberación lenta y continua del elemento en las plantas

2. Puede actuar en el ciclo del nitrógeno en el suelo, auxiliando la disponibilidad del fósforo mineral fijado. Cuando la materia orgánica se descompone libera ácidos que solubilizan parte de fósforo mineral fijado en el suelo haciéndolo disponible

7.3.3. Otros nutrimentos esenciales para las plantas.

El potasio en el lodo se retiene muy poco, por el contrario del nitrógeno y el fósforo, de modo que casi la totalidad del potasio que contiene puede ser asimilado por las plantas. También se encuentran cantidades apreciables de calcio y magnesio, desde 0.2 al 1.5 por ciento de calcio en lodos líquidos y del dos por ciento a más de 2.9 por ciento en lodos sólidos.

Cuadro 11: Contenido de oligoelementos en los lodos

Elemento	Máximo encontrado en el suelo en mg/kg.	Máximos encontrados en los lodos en mg/kg.
Plata	10	0
Arsénico	40	0
Boro	40	0
Cadmio	0.7	15
Cromo	150	200
Cobalto	30	20
Cobre	100	1 500
Estaño	10	0
Manganeso	2 000	500
Mercurio	0.3	8
Molibdeno	4	0
Níquel	80	100
Plomo	100	300
Selenio	10	0
Zinc	300	3 000

La disponibilidad de los químicos inorgánicos para la toma ascendente en la planta o transporte del agua en la tierra, es limitado por el exceso de esos elementos que permanecen libres en la solución del suelo. El aglutinamiento de los químicos en el sustrato del suelo es controlado por los procesos químicos de complejos de materia orgánica, absorción y precipitación. La reacción de precipitación incluye la formación de compuestos solubles óxidos, hidróxidos, carbonatos, fosfatos, sulfuros, etc. El mercurio puede salir del suelo a través de volatilización de los procesos. Como resultado solo pequeñas cantidades de

elementos traza que permanecen libres en solución donde pueden ser asimilados por absorción en las raíces de las plantas. Los procesos son fuertemente afectados por el pH del suelo, con niveles decrecientes de cationes e incrementos en los niveles de aniones en la solución del suelo cuando aumenta el pH.

7.3.4. Materia orgánica.

El contenido de materia orgánica en los lodos residuales, se presenta en cantidades superiores al 50 por ciento. Este factor es de interés en la agricultura ya que la materia orgánica ejerce importantes efectos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, actuando como un acondicionador y contribuyendo sustancialmente para el crecimiento y funcionamiento de las plantas. La materia orgánica mejora las características físicas del suelo, actúa como agente cimentante, promueve mayor agregación de las partículas reduce la cohesión y plasticidad y mejora la capacidad de retención del agua. Los fertilizantes orgánicos aumentan la infiltración y la retención del agua en el suelo y la estabilidad de los agregados, haciendo estos suelos más resistentes a los procesos de erosión.

VIII. APLICACIÓN DEL LODO AL SUELO

La aplicación al suelo del lodo residual se define como “la distribución del lodo sobre un terreno o inmediatamente por debajo de la superficie del mismo”. El lodo se puede aplicar en: terrenos agrícolas, terrenos forestales, terrenos marginales y terrenos especialmente preparados para la evacuación del lodo. En los cuatro casos, la aplicación al suelo se diseña con el objetivo de conseguir un tratamiento adicional del lodo. La luz solar, los microorganismos que habitan el terreno y la desecación, se combinan para destruir microorganismos patógenos y muchas de las sustancias tóxicas presentes. Los metales traza quedan atrapados en la matriz del suelo, y los nutrientes los consumen las plantas convirtiéndolos en biomasa útil. En los tres primeros casos, el lodo se utiliza como un recurso valioso para mejorar las condiciones del terreno. El lodo actúa como acondicionador del suelo al facilitar el transporte de nutrientes, aumentar la retención del agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo, de este modo el lodo sirve como sustituto parcial de fertilizantes químicos caros.

Un suelo sin aportaciones orgánicas se empobrece. El suelo agrícola pierde, en términos medios de 900 a 1 200 kg/ha/año de humus. Estas pérdidas se pueden cubrir con aportes de fuentes variadas de materia orgánica con que se cuente. Utilizando lodos residuales, un aporte de 6 000 a 9 000 kg/ha de materia seca de lodo, cada tres años, puede aportar hasta 20 o 40 por ciento del humus perdido en un suelo de labor, sin riesgos de contaminación de las aguas por nitrógeno, (Bellapark, 1988).

Cuando el lodo es aplicado a suelos agrícolas, la extensión del agua removida durante el tratamiento es el mejor factor que influye en los costos y procesos de selección al

momento de la aplicación. No es necesario remover toda el agua de los lodos antes de la aplicación, pues el agua que contiene puede ser beneficiosa para los cultivos. Aunque los costos de la deshidratación completa de los lodos son más elevados se justifica cuando estos son compensados con el ahorro en los costos de transporte y también le da al lodo la posibilidad de poder ser almacenado y empacado.

8.1. Legislación para el uso agrícola de los lodos residuales

En la actualidad existe una tendencia mundial en las exigencias para la normalización, de mayores niveles de calidad del lodo para el reciclaje agrícola, que se refleje en una mejoría de la calidad de los biosólidos o lodos producidos. La reglamentación para disponer adecuadamente los lodos deben ser específicas de acuerdo con las condiciones ambientales, sociales y económicas de cada región o país. Los parámetros internacionales deben servir de referencia, sin embargo, deben ser validados a través de los resultados experimentales que consideren las peculiaridades regionales, tales como el nivel y el tipo de industrialización, o perfiles sanitarios de la población y las características edafológicas regionales.

En México en el Artículo 139 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, se menciona que toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga la ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto se expida.

La normatividad establece las cargas máximas anuales, así como cargas máximas acumuladas, en función del uso de terrenos para fines agrícolas y no agrícolas. Las medidas encaminadas a la reducción de la presencia de patógenos y de la atracción de vectores también deben ser establecidas por la legislación. Por lo tanto, antes de realizar la aplicación del lodo al terreno agrícola se deberá revisar la normatividad vigente. Además se encuentra estipulado cuales metales y compuestos orgánicos no debe contener el lodo. Las

normas pueden exigir el análisis detallado del lodo para la identificación y caracterización de sus constituyentes y para determinar su aptitud para la aplicación al suelo. Para este caso, se deberán considerar varios niveles de control de patógenos mediante diferentes métodos de estabilización. El lodo aplicado a la superficie del suelo o incorporado al mismo se debe tratar mediante procesos que reduzcan notablemente la presencia de patógenos.

Los pasos a adaptar en el sistema de aplicación se incluyen:

1. Caracterización de la calidad y cantidad del lodo
2. Revisión de las normas locales y federales aplicadas
3. Evaluación y elección de la opción de evacuación
4. Determinación de los parámetros de diseño del proceso (cargas, superficies del terreno necesarias, métodos y calendarios de aplicación)

8.2. Selección y evaluación del lugar de aplicación

Cuando las operaciones de incorporación y dispersión del lodo no son ejecutadas de manera adecuada, los biosólidos se concentran en la superficie del suelo y con las lluvias pueden ser transportadas hasta los escurrimientos, además si estos no están bien higienizados el problema se hace más grave. Para evitar estos problemas la legislación de muchos países establecen restricciones en cuanto al área de aplicación.

Los aspectos críticos en la aplicación del lodo al suelo es la localización de un lugar adecuado para el vertido. Las características del lugar determinaran el diseño final y se incluirán en la efectividad global del sistema de aplicación al suelo. Los lugares que hay que considerar como adecuados dependerán de la opción u opciones de aplicación consideradas (aplicación de terrenos de cultivo, bosques, etc.). Se deberán estudiar a fondo los factores, teniendo en cuenta las técnicas de explotación y los efectos ambientales, también es necesario disponer de una estimación inicial de la superficie del terreno necesario para cada una de las opciones de aplicación consideradas. La determinación final

de la superficie del terreno necesario se debe basar en las tasas de aplicación de proyectos y se debe tener en cuenta la superficie ocupada por la zona de amortiguación necesaria, así como la correspondiente a otras necesidades del sistema.

8.3. Características de los sitios de aplicación

Las características físicas del lugar que merecen especial atención son la topografía, la permeabilidad del suelo, el drenaje, la profundidad hasta el nivel freático, la geología subsuperficial, la cercanía a zonas críticas y la accesibilidad. Antes de iniciar cualquier aplicación de lodos residuales se deberán hacer los estudios antes mencionados en los sitios seleccionados.

8.3.1. Suelos y Topografía.

La topografía es importante por cuanto afecta al potencial de erosión y escorrentía superficial del lodo aplicado, lo cual afecta el funcionamiento de los equipos. Los suelos mas indicados para aplicación al terreno son: suelos con permeabilidad relativamente bajas, 0.5 a 1.5 cm/h; suelos entre moderadamente bien y bien drenados; suelos alcalinos o neutros (pH >6.5), que permitan el control de la solubilidad de los metales y estratos profundos de textura relativamente fina, que permitan gran capacidad de almacenamiento de humedad y de nutrientes.

Cuadro 12: Clasificación de los sitios de aplicación de lodos de acuerdo a sus características del suelo, topografía y geología.

Parámetro	Disponible para aplicación de lodos			No disponible para la aplicación de lodos
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
pH	Mayor o igual de 6.5	Mayor o igual de 6.5	Mayor o igual de 6.5	Mayor o igual de 6.5
Textura	Lar, MarL, ML, L, ArL, L	Ar, ArP.	AM, MA	Arena y grava
Pendiente	0 – 2	2 – 5	5 – 9	Mayor de 9
Profundidad del acuífero	Mayor de 5	3 – 5	2 – 3	Menor de 2

(m)				
-----	--	--	--	--

8.3.2. Permeabilidad.

La permeabilidad se refiere a la capacidad que tiene el suelo para drenar al agua a través de los poros en dirección de las fuerzas de gravedad. Este factor depende de la textura del suelo, es muy importante ya que si el grado de permeabilidad es muy alto podrían ocurrir pérdidas de nutrimentos hacia los mantos freáticos.

Cuadro 13: Límites de aplicación de lodos al suelo en base a la permeabilidad. Ante-proy. NOM-004-ECOL-1998.

Permeabilidad (cm/hr)	Grado de limitación
Menor de 0.08	Severa
0.08–0.24	Moderada
0.24–0.8	Ligera
0.8–2.4	Moderada
mayor de 2.4	Severa

8.3.3. Profundidad del acuífero.

Las consideraciones sobre la profundidad del acuífero evitan que la aplicación del lodo se pueda controlar mejor sin provocar contaminación. En los Estados Unidos en 1987, 24 estados establecían restricciones de profundidad del acuífero para la aplicación del lodo en el suelo. La distancia variaba de 1–12 metros. En la actualidad la EPA considera los siguientes criterios de aplicación para diferentes sitios: agrícolas, forestales y tierras erosionadas.

Cuadro 14: Criterios de profundidad del acuífero en diferentes sitios.

Sitio	Acuífero para agua de consumo humano	Acuíferos que no son para consumo humano
Agrícola	1–2 metros	0.5 metros
Forestal	2 metros	0.7 metros
Tierras erosionadas	1–2 metros	0.5 metros

Para lograr una protección adicional, si el acuífero está inmediatamente bajo el sitio de aplicación se deberá considerar un programa de monitoreo por lo menos anual. De acuerdo con las normas oficiales se requiere que los lodos no contaminen con:

- Nitratos en concentraciones iguales o mayores de 10 mg/L
- Sólidos disueltos mayores de 10 000 mg/L

8.3.4. Distancia de los sitios de aplicación a los cuerpos de aguas superficiales.

Para proteger la aguas superficiales de la contaminación que pudiera ocasionar la aplicación del lodo al suelo la legislación formulo los siguientes reglamentos.

Cuadro 15: Recomendaciones relacionadas con la pendiente.

Pendiente %	Observaciones
0-3	Es ideal, porque no es propicia para escurrimientos o erosión del lodo liquido o con un porcentaje de sólidos mayor.
3-6	Aceptable, los riesgos de erosión son ligeros.
6-12	Se requiere que el lodo sea inyectado al suelo, si es liquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Lo más recomendable es aplicar lodo deshidratado.
12-15	No se recomienda la aplicación de lodo liquido sin un control del escurrimiento, es recomendable la aplicación de lodo deshidratado.
Mayor de 15	Pendientes mayores del 15 % son recomendables solo cuando el suelo tiene una buena permeabilidad (como los bosques), donde la longitud de la pendiente es corta y constituye la menor parte del área total de aplicación.

Para evitar el escurrimiento del lodo hacia el agua superficial se requiere de un área amortiguadora entre el área de aplicación del lodo y los cuerpos de agua, con el propósito de: Proveer un factor de seguridad contra errores durante la aplicación del lodo, y además, proveer de un tratamiento y filtrado de lodo y/o escurrimiento del lodo que ha sido aplicado en la superficie. El tipo de suelo del área amortiguadora es un factor de determinación del tamaño del área. Un suelo erosionado no es un buen filtro amortiguador, mientras que un bosque no perturbado ofrece un excelente tratamiento. La zona de amortiguamiento se puede construir sembrando alrededor de los sitios árboles, arbustos y pastos.

8.4. Limitaciones estacionales

La legislación recomienda que la aplicación del lodo no deberá llevarse a cabo durante los eventos de tormenta cuando la precipitación sea igual o excede un cuarto de pulgada por

hora (0.63 cm). También deberá suspenderse las aplicaciones cuando los suelos estén congelados o cubiertos por nieve.

8.5. Características del lodo residual para ser aplicado.

Las características que deben considerarse para una buena utilización de los lodos antes de ser aplicados en el suelo agrícola son: potencial de hidrógeno, materia orgánica, nutrimentos, concentración de metales, concentración de sólidos, concentración tóxicos orgánicos y las condiciones sanitarias; de estas características dependerán las tasas de aplicación y el tipo de suelo que se deberá seleccionar.

8.5.1. Potencial hidrógeno.

El pH del lodo puede afectar la productividad en los cultivos alterando el pH del suelo y haciendo disponibles los metales tóxicos en las plantas. El pH bajo (menor de 6.5) promueve la lixiviación de los metales, mientras que un pH alto (mayor de 11), ayuda a reducir el nivel de patógenos e inhibe la movilidad de los metales. El nivel de pH del lodo se puede regular con encalamientos antes de la aplicación.

8.5.2. Materia orgánica.

El contenido de materia orgánica permite acondicionar el suelo y mejorar las propiedades tanto físicas, químicas y biológicas. Ayuda a incrementar la infiltración del agua y la capacidad de retención de la misma; aumenta la cantidad de macro y micronutrimentos poniéndolos en disponibilidad para las plantas, solo en cantidades necesarias; aumentan la biota del suelo ayudando a la mineralización de los compuestos que se encuentran en formas orgánicas en el lodo.

8.5.3. Nutrimentos.

El contenido de nitrógeno en el lodo se pueden encontrar como amoníaco (NH_4), en forma de nitrato (NO_3) o en formas orgánicas. Las formas de nitrógeno más contaminantes

en el lodo son las formas solubles como NO_3 , las cuales se pueden lixiviar hacia los mantos freáticos. Para prevenir la contaminación de los acuíferos por el exceso de nutrientes, el lodo debe aplicarse en porcentajes agronómicos.

Los porcentajes agronómicos para una región en particular se debe definir con los siguientes datos:

- Datos de la fertilidad del suelo y de nutrientes en el lodo residual, especialmente nitrógeno y fósforo, en sus formas inorgánicas, formas orgánicas y en las formas disponibles (N-orgánico; N-NH_4 y N-NO_3) y el fósforo disponible, P_2O_5
- La cantidad de nitrógeno y fósforo requerido en cada cultivo
- Factor de volatilización y factor de mineralización
- Calcular la cantidad de nitrógeno disponible en el lodo

8.5.4. Concentración de metales.

La concentración de metales pesados es una limitante para el uso de los lodos residuales en el suelo agrícola.

Cuadro 16: Límites de metales establecidos por la USEPA en los lodos que se apliquen al suelo. (EPA, 1996).

Parámetro	mg/kg
Arsénico	75
Cadmio	85
Cobre	4,300
Mercurio	57
Molibdeno	75
Níquel	420
Plomo	840
Selenio	100
Zinc	7,500

Para minimizar los riesgos de contaminación por metales pasados en los suelos agrícolas se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Determinar la concentración de los elementos contaminantes en el lodo que va a ser aplicado en el suelo en mg/kg
- Considerar una aplicación básica anual del lodo residual de 10 ton/ha/años
- Calcular la carga anual de contaminantes
- Calcular los años en que se puede aplicar en el terreno agrícola, tomando en cuenta la concentración de un contaminante específico
- Determinar el número de años en que pueda ser aplicado el lodo sin exceder los límites permisibles

Cuadro 17: Concentraciones límite de metales pesados en suelos agrícolas (mg/Kg base seca).

Metal	Concentración en suelos		Concentración en lodos		Carga máxima (a 10 años)
	Suelo a pH<7	Suelo a pH>7	Suelo a pH<7	Suelo a pH>7	
Cadmio	1.0	3.0	20	40	0.15
Cobre	50.0	210.0	1 000	1 750	12.00
Níquel	30.0	112.0	300	400	3.00
Plomo	50.0	300.0	750	1 200	15.00
Zinc	150.0	450.0	2 500	4 000	30.00

8.5.5. Concentración de sólidos.

El contenido de sólidos volátiles da una idea de la estabilidad, proporciona una estimación del contenido orgánico del lodo, para poder determinar el potencial de olor que se puede generar durante el transporte y la aplicación al suelo. La cantidad de sólidos afecta la aplicación del lodo residual en diferentes formas:

1. La capacidad de transporte y almacenamiento. El costo es menor a medida que el contenido de sólidos es mayor
2. El contenido de sólidos define el tipo de transporte

3. Define el tipo de aplicación y el equipo requerido. El lodo líquido se puede asperjar sobre la superficie del suelo, se puede inyectar o se puede irrigar
4. Se define el método de almacenamiento

8.5.6. Concentración de tóxicos orgánicos.

Los lodos residuales generalmente no son residuos peligrosos, sin embargo deben ser sometidos a un análisis para definir sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y definir su carácter biológico infeccioso. Debido al aporte industrial de los efluentes tratados, existe la posibilidad de que en los lodos se concentren tóxicos orgánicos, incluso los provenientes de productos caseros de limpieza y pesticidas.

Cuadro 18: Límites de algunos tóxicos orgánicos e inorgánicos (EPA, 1996).

Compuesto	Límite mg/l
Pesticidas	
Clordano	0.03
Heptacloro	0.008
Metoxicloro	10.0
Herbicidas	
2,4-D	10.0
2,4,5-TP Silbes	1.0
Volátiles	
Cloruro de vinil	0.2
Tetracloroetileno	0.7
Cloroformo	6.0
Benceno	0.5
1,2-Dicloroetano	0.5
Tolueno	1 000.0
Semivolátiles	
Hexaclorobenceno	0.02
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	2.0

8.5.7. Condiciones sanitarias.

Las condiciones sanitarias que deben presentar los lodos se determinan en cada país de acuerdo al criterio establecido por los especialistas a través de restricciones de uso y/o exigencias para adecuar el nivel sanitario del lodo antes de su disposición. Las alternativas

de higienización buscan minimizar riesgos de transmisión de enfermedades a través de la reducción de concentración de microorganismos patógenos.

Los límites sanitarios adoptados por cada país son muy similares, apenas diferencian en el abordaje de las restricciones y en algunos parámetros del proceso.

Cuadro 19: Límites de concentración de organismos patógenos (Cleverson, *et al* 2001)

Microorganismos	EUA (40 CFR 503)	Africa del sur (WRC 1997)	Comunidad Europea (86 / 287 / EEC)		Comunidad Europea (Nueva propuesta)
			Francia	Inglaterra	
Coliformes fecales	< 1000 UFC/g de ST	< 1000 UFC/ 10g de ST	No se menciona	Apenas definía los procesos de tratamiento de lodos y restricciones temporales para plantaciones, cosechas y pastos.	Reducción de 6 unidades logarítmicas.
Salmonella	< 3 NMP/ 4g de ST	0 NMP/ 10g de ST	< 8 NMP/ 10g de ST		0 NMP/ 50g de ST (masa húmeda)
Entérovirus	< 1 NMP/ 4g de ST	No se menciona	< 3 NMP/ 10g de ST		No se presenta
Huevos viables de helmintos	< 1 huevo/ 4g de ST	< 0 huevo/ 10g de ST	< 3 huevo/ 10g de ST		No se presenta

Los criterios adoptados por la Comunidad Europea (86/278/EEC) para la disposición superficial de los lodos exigen un tratamiento por “cualquier proceso biológico, químico, térmico o cualquiera que reduzca significativamente los riesgos a la salud pública al momento de su uso”, dejando que cada país miembro defina sus límites para atenuar el objetivo general. En los años anteriores esto no funcionó muy bien por eso la Comisión Europea introdujo criterios más exactos para asegurar que los países miembros adopten por lo menos un límite mínimo general que sea válido para todos.

A diferencia de los europeos la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) adoptó como padrón de control y garantía a la salud de la población, dos clases de calidad microbiológica de lodos (40 CFR Part 503). Lodos de la “Clase A” que permite el uso del lodo sin restricción alguna, producido a través de procesos que garanticen una concentración de microorganismos abajo del límite de detección, por un

proceso de higienización adecuado. Y los lodos de la “Clase B” producido a través de procesos convencionales de estabilización poseen algunas restricciones y recomendaciones para su uso agrícola.

África del Sur adopta un criterio semejante al de los norteamericanos, donde el lodo es clasificado en cuatro tipos, donde los lodos “Tipo C y D” pueden ser utilizados sin restricción en la agricultura por haber pasado por un proceso de higienización.

8.5.7.1. Sobrevivencia de los patógenos en el suelo.

Cuando el lodo no a pasado por proceso de tratamiento y se deposita en los suelos agrícolas, los microorganismos se fijan en la superficie del suelo y de los vegetales. El tiempo de sobrevivencia varía de acuerdo con:

- Capacidad de sobrevivencia del mismo organismo
- Textura del suelo.- En un suelo arenoso, el tiempo de sobrevivencia de los huevos de helmintos es menor que en suelos húmedos. Por lo tanto, el tiempo de sobrevivencia varia de región a región
- Incidencia de luz solar.- Los rayos solares que inciden directamente sobre los organismos del suelo producen desecación y disminuyen el tiempo de sobrevivencia
- Temperatura ambiente.- En el verano el tiempo de vida de los cistos de protozoarios y huevos de helmintos es más corto que en el invierno. En regiones donde el otoño es frío y en la primavera se presentan lluvias los patógenos sobreviven por largos periodos
- Método de aplicación.- Cuando el lodo es aplicado directamente en el suelo, la incidencia de los rayos solares ayudan a disminuir el tiempo de sobrevivencia, y cuando son inyectados al suelo los patógenos están menos expuestos a rayos del sol y aumentan el tiempo de vida. El lodo inyectado disminuye el riesgo de contacto directo hacia el hombre y los animales. La profundidad a la que los patógenos alcanzan en el suelo depende de la textura, de las fallas existentes y de las áreas de erosión
- Capacidad de retención del agua.- Los suelos arenosos propician la sobrevivencia de algunos microorganismos (actinomicetos) y disminuyen la de otros (bacterias)
- Fauna microbiana del suelo.- La competencia entre microorganismos puede favorecer o no la sobrevivencia de los patógenos y alterar el equilibrio ecológico

En relación a la sobrevivencia de los microorganismos en el suelo (Medeiros et al. 1999, citados por Cleverson *et al*) estudiaron la sobrevivencia de microorganismos patógenos de los lodos en los suelos agrícolas y comprobaron que la *salmonella* spp estaba ausente después de 42 días de aplicación del lodo; para *Enterococcus* y *coliformes fecales* presentan reducción de 4.7×10^6 hasta 3.7×10^4 con 134 días. Y en huevos de helmintos la sobrevivencia fue de 20 por ciento en 180 días.

Cuadro 20: Tiempo de sobrevivencia de los microorganismos en el suelo.

Agentes patógenos	Tipos de suelos	Tiempo de sobrevivencia media	Tiempo de sobrevivencia Máxima
Virus Enterovirus	Diferentes tipos	12 días	100 días
Bacterias Califormes fecales Salmonella ssp Vibrio cholera	superficie suelos arenosos suelos profundos	40 días 30 días 70 días 5 días	90 días 60 días 90 días 30 días
Protozoarios Amebas		10 – 15 días	30 días
Nematodos Ascaris sp. Toxocara sp. Tenia sp.	suelos irrigados suelo suelo suelo	varios meses varios meses varios meses 15 – 30 días	2–3 años 7–14 años 8 meses 3–15 meses (invierno)

8.6. Tasas de aplicación

Los efectos de los nutrimentos contenidos en los lodos pueden ser observados a corto y mediano plazo, por eso es necesario planear cuidadosamente para que la aplicación no comprometa la estabilidad de los suelos. La tasa de aplicación esta en función de las necesidades de nutrimentos de la especie que se cultiva, de la calidad agronómica del lodo (principalmente nitrógeno) en el suelo donde será aplicado y de la calidad fisico-química del lodo. Generalmente el contenido de nitrógeno del lodo puede atender las necesidades de los cultivos y por esta razón las dosis de aplicación son calculadas en función de este

elemento, los demás nutrientes como el fósforo y el potasio son complementados como en los fertilizantes químicos. La tasa de aplicación no debe generar un aporte de nitrógeno superior a la cantidad necesaria para el crecimiento del cultivo para evitar riesgos de lixiviación. En ausencia de información específica se puede adoptar la tasa de 50 por ciento de disponibilidad para el primer cultivo después de la aplicación.

Cuadro 21: Tasas de aplicación de lodos típicos de diferentes opciones de aplicación al suelo.

Opción de aplicación al suelo	Periodo de aplicación	Tasa de aplicación ton/ha.	
		Intervalo	Valor típico
Uso agrícola	Anual	2.25–67.5	11.5
Uso forestal	Un único periodo de aplicación, o una aplicación cada 3-5 años.	9–225	45
Recuperación de terrenos	Una aplicación	6.75–450	112.5
Terrenos destinados a evacuación del lodo	Anual	225–900	337.5

No se puede predecir la cantidad de nutrientes presentes en los lodos, como el contenido varia mucho es necesario analizar y evaluar las cantidades de aplicación de los lodos en porcentajes agronómicos para satisfacer los requerimientos de nutrientes.

8.7. Formas de aplicación

La aplicación del lodo líquido es relativamente simple ya que en ocasiones no son necesarios procesos de secado y este puede ser inmediatamente bombeado a las áreas de utilización, posteriormente es necesaria una labor superficial para evitar que la tierra se cólmate en perjuicio a la aireación del suelo y respiración radicular de las plantas. El lodo seco puede ser aplicado al suelo con los equipos normales utilizados para la aplicación de heces de animales, estos lodos se pueden convertir en tierra de cultivo, después de haber sido bien tratados y almacenados durante un tiempo de 18 a 24 meses.

Dependiendo del temor de la humanidad a través de la higienización los lodos pueden tener una consistencia pastosa (entre 80 y 85 por ciento de humedad) o aspecto sólido (con menos de 50 por ciento de sólidos). Tanto los lodos pastosos como los sólidos presentan problemas en la aplicación; los pastosos se adhieren en los equipos y los sólidos la formación de terrones se vuelve un problema. Con más del 25 por ciento de sólidos, los lodos presentan características que permiten la aplicación a través de equipos agrícolas clásicos. Para lodos con humedad mayor entre el 75 y 85 por ciento, la aplicación requiere equipos más complejos y sofisticados, de costo mayor y de implementos agrícolas.

8.8. Cultivos aptos para desarrollarse en los suelos tratados con lodos

Los cultivos que presentan mayores riesgos son aquellos cuyos productos consumidos tengan contacto directo con el suelo. La especial atención debe ser dada a las especies olerícolas (repollo, lechuga, etc.) o aquellos que se producen dentro del suelo (zanahoria, rábano, cebolla, etc), y que se consumen en natural.

Cuadro 22: Sensibilidad de los cultivos a metales pesados.

Muy sensibles	Sensibles	Tolerantes	Muy tolerantes
Acelga	Mostaza	Coliflor	Maíz
Lechuga	Col	Pepino	Césped
Betabel	Espinacas	Calabacita	
Zanahoria	Brócoli	Avena	
Nabo	Rábano		
Cacahuete	Tomate		
Trébol	Soya		
Alfalfa			

Los cereales son los cultivos mas recomendables, porque la mayoría pasa por un proceso industrial antes de llegar a la mesa del consumidor o no son consumidos en natural. Cultivos como el café, la caña de azúcar y las plantaciones frutales no presentan riesgos a los consumidores.

8.9. Evaluación de riesgos por la aplicación

Con objeto de evaluar adecuadamente el riesgo por la utilización de lodos residuales con fines agrícolas y forestales, se debe tener en cuenta el conjunto de factores que determinan la movilidad de los metales pesados en el suelo al que serán aplicados.

- Es necesario poner cuidado en las fluctuaciones del pH ya que a menor pH (suelos ácidos) mayor solubilidad de los metales, y por lo tanto mayor movilidad de éstos, con lo que se incrementa la toxicidad para las plantas
- La materia orgánica desempeña un papel fundamental en la retención de metales. Suelos que presentan contenidos de materia orgánica superiores al cinco por ciento, hacen que las plantas retengan mayor cantidad de metales pesados, debido a la alta capacidad de las moléculas orgánicas para formar complejos o agregados. A medida que la materia orgánica se degrada, las formas moleculares resultan ser más sencillas, con lo que el proceso de retención de metales disminuye, favoreciendo la lixiviación de los mismos y permitiendo su movilización. Se ha verificado la tendencia a formar complejos con la materia orgánica en Cu y Ni. La retención del Cd, Cr, Hg y Pb aumenta con el contenido de materia orgánica del suelo
- Cuando existe la presencia de aguas subterráneas, es necesario conocer el grado de lixiviación de estos y la capacidad de los suelos para formar complejos
- Monitorear la presencia de los organismos patógenos es necesario para poder puesto que estos condicionan la calidad de los cultivos desarrollados en estos suelos
- La presencia de apatito e hidroxiapatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] en los suelos tratados con los lodos mejora la inmovilización de los metales por la siguiente combinación de factores: al elevado contenido de calcio que permite el intercambio iónico de éste con los metales presentes, a la formación de fosfatos metálicos extremadamente insolubles, mostrándose altamente efectivo para Pb, y en menor medida, para Cd y Zn, y al incremento de la alcalinidad en el caso del hidroxiapatito.

8.10. Utilización de los lodos residuales en algunos países

Los lodos residuales han sido utilizados desde hace mucho tiempo en algunos países, sobre todo en los desarrollados ya que por su temprano desarrollo industrial fueron los primeros que tuvieron problemas con los residuos, por lo tanto fueron los primeros en utilizar los lodos. En México el uso de los lodos residuales es aun en baja escala puesto que los proyectos y estudios para su utilización son muy escasos. A continuación se describen algunos países que utilizan los lodos residuales en las tierras de agricultura (información obtenida de un atlas global por Matthews en 1998).

Australia.

El uso del lodo es muy reducido ya que la mayoría de los suelos son muy sensibles para su aplicación (lugares de extracción de agua potable, parques nacionales y bosques nativos). Los productos de lodos digeridos y lodos desecados son proporcionados a los granjeros libremente, pero aquellos lodos procesados (composta o higienizados con algún método alcalino) son vendidos por su valor como abonos. Cuando se ven en la necesidad de aplicar lodos al suelo deben cumplir con los requisitos ambientales establecidos en el país, para lo cual se deben de llevar muestreos de las áreas del suelo donde se desea evacuar los lodos. Las estrategias de muestreo son desarrolladas por el ministerio de agricultura. Una vez obtenida la información de la calidad del suelo y la calidad del lodo se determinan los cálculos de la cantidad que se podrá aplicar. Para calcular la carga del lodo se basan en una capa de tierra vegetal de 7.5 cm y una densidad del suelo de 1.3 g/cm^3 , para el uso agrícola el lodo debe estar dentro de la clasificación C de la legislación actual del país. El nitrógeno es un limitante para determinar la cantidad de lodo a aplicar, para lo cual se debe calcular el nitrógeno disponible presente en el lodo y el nitrógeno no disponible.

Austria.

El uso es muy controvertido en el país pero sigue siendo una opción muy importante en el uso agrícola. Más del 50 % del lodo producido en el país se utiliza en la agricultura, cada estado es responsable de la protección del suelo y la utilización del lodo con fines benéficos según la legislación. Los estándares para la reutilización se decretan dentro de un marco de una legislación para la protección del suelo, en la diversa regulación, los estándares se fijan para determinar la concentración máxima de contaminantes potenciales en el lodo y el suelo, aspectos higiénicos, frecuencia de análisis, cantidad de aplicación, tiempos de uso, entre otros. En los estados Burgenland y Vorarlberg cerca del 70% del lodo se utiliza en agricultura, mientras que en otros estados su uso es mucho menor, ya que aun no es aceptado por la mayoría de los productores. La legislación en el país es muy flexible pues el método de uso depende generalmente de la situación local, sin proponerse ninguna técnica. El método de uso más común es utilizar el lodo desecado. El uso del lodo líquido (es cerca de 4% de la materia seca) se acepta solamente en un cierto estado.

Bélgica.

La legislación en el país es estricta, para su uso en tierras agrícolas se establecen estándares de concentración de metales y de pH, entre otros. La cantidad de materia seca no puede exceder de seis toneladas por hectárea por un periodo de tres años, cuando se aplican cantidades superiores a estas se deben realizar análisis consecutivo a los lodos utilizados. Cuando se aplican lodos a terrenos donde serán aprovechado el forraje, se debe esperar por lo menos seis semanas después de aplicar el lodo antes de cosechar. Si se pretende utilizarlos en árboles frutales solo se podrá hacer durante la época de crecimiento. Cuando se tiene planeado aplicarlo a aquellos cultivos que se pueden consumir crudos no se debe aplicar el lodo 10 meses antes de la cosecha. De esta manera es como se tiene contemplado el uso de los lodos en el país pero no menciona el uso de los lodos en cultivos específicos. El lodo se puede utilizar en líquido o forma desecada, si se utiliza en forma desecada es necesario tratarla con cal o FeCl_3 ya que estos tienen efectos benéficos en la estructura y pH del suelo. El lodo líquido se inyecta en el suelo con maquinaria especial y el lodo seco se extiende por la tierra, después de aplicarlo es necesario arar el terreno para evitar la evaporación de componentes que causen olor u otra característica desagradable.

Chile.

Se compararon los efectos de los lodos y las aplicaciones de nitrógeno de un fertilizante químico en el cultivo de trigo invernal. Se demostró que el nitrógeno orgánico contenido en el lodo actuaba como una fuente de nitrógeno de lenta liberación, proporcionando un suministro más constante durante los periodos críticos de llenado del grano en comparación con el aporte del fertilizante comercial.

Los rendimientos máximos se obtuvieron con una dosis de 70 kg N/ha cuando se aplicó fertilizante y 90 kg/ha cuando el nitrógeno se aplicó en forma de lodo. No se observaron diferencias significativas al comparar la composición promedio de los granos. Por otro lado el aumento en la dosis del fertilizante nitrogenado incrementó las concentraciones de Cu y N en la paja, mientras que mayores dosis de lodo provocaron un aumento en las concentraciones de Zn, Cu, Pb y N. Todas las concentraciones de metales en pajas de trigo, estuvieron bajo los niveles considerados dañinos para el consumo animal.

China.

El uso del lodo en China es muy aceptado por la población, pues la consideran buen acondicionador y fertilizante del suelo. La aplicación más usada es de 10-20 toneladas por hectárea por año, muchos la aplican antes de la siembra, pues aseguran que mejora la disponibilidad del nitrógeno lentamente y contribuye al depósito del fósforo del suelo. Los agrónomos y horticultores han estudiado el uso de los lodos en la horticultura y en los jardines, poniendo énfasis en el posible peligro ambiental por los contaminantes presentes en los lodos, sobre todo los metales pesados que pueden entrar a la cadena alimenticia hasta llegar al hombre. Los trabajos se han venido realizando desde 1995 y han mostrado que los lodos son buenos para fertilizar flores, plantas y plantas de ornato.

Los lodos crudos presentan malos olores y alto contenido de bacterias que representan un gran peligro para la sociedad, para corregir estos problemas la mayoría de las veces se aplican altas temperaturas antes de utilizarlos. Estos experimentos tienen como objetivo la utilización de los lodos durante 70-80 años consecutivos ya que los precios de los fertilizantes es alto, el fertilizante de estiércol vegetal es escaso y la producción de lodos asta en aumento.

España.

En 1995 se empezó a realizar estudios en la reutilización de lodos, financiados por el Banco Europeo de Desarrollo, en el Marco del Programa del Mediterráneo de Asistencia Técnica Medioambiental y promovido por el Cairo Wastewater Organization.

A fin de respetar las aportaciones limites en un ciclo de diez años, establecidas por las Normas Europeas. Se aplicaron dosis de 40 toneladas por hectárea en terrenos de dos fincas del país (los pinos y Valdencantos en 1998) con la finalidad de monitorear la persistencia de los metales pesados en el suelo y la creación de fertilidad por los mismos. Dicho monitoreo durara diez años y hasta la fecha los resultados han sido positivos.

Estados Unidos.

La utilización agrícola de los lodos es una práctica común en el sureste de los Estados Unidos. La reutilización del lodo se autoriza bajo regulaciones municipales de la gerencia de 1988 y siguió vigente hasta 1995. El uso de los lodos han tenido resultados favorables en estados como Alabama, Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, New Hampshire, New York, Pennsylvania y Vermont. La Part 503/USEPA/CFR, órgano regulador de los Estados Unidos mantiene restricciones en el uso de los lodos en tierras inclinadas, en tierras bajas, tierras que colindan con corrientes perennes o intermitentes y en las tierras contiguas a las residencias o a los abastecimientos de agua.

El departamento de protección al medio ambiente determina cuales terrenos son más aptos para la aplicación de los lodos, como por ejemplos, existen restricciones para los suelos donde los niveles de fósforo y el drenaje son altos, pero en especial la cantidad de nitrógeno disponible en el lodo y en el suelo.

Francia.

La cantidad de lodo en los cultivos agrícolas depende principalmente del cultivo al que se desee aplicar o de los cultivos regionales. En Francia a los cultivos que se les aplica lodo residual principalmente son: maíz, cebada, avena, remolacha forrajera, maíz, rábanos.

- Maíz, cebada, avena. 30 toneladas de lodo desecado por hectárea por año
- Remolacha forrajera: la aplicación típica de lodo desecado es de 30-40 toneladas por hectárea por año
- Maíz: 30-50 toneladas de lodo desecado por hectárea por año
- Rábanos: 30-50 toneladas de lodo desecado por hectárea por año

La aplicación se realiza después de la cosecha para que durante los días inactivos del terreno los lodos puedan alcanzar la estabilización completa, sin embargo, la aplicación en estos cultivos es muy baja puesto que de cualquier modo los minerales adicionales de los fertilizantes es necesario. La cantidad es determinada de acuerdo al contenido de fósforo y nitrógeno presente en el lodo. El uso estándar consiste en 30 toneladas de lodo desecado por hectárea por año, o 6 toneladas de lodo desecado con una rotación cada 3 años.

El área agrícola a la cual se destina la aplicación de lodos es de alrededor de 450 hectáreas. La profundidad de arado normal después de la aplicación debe ser entre 20-30 centímetros. El contenido del metal pesado del lodo debe ser inferior o igual a valores de referencia estándares y una cantidad de 30 toneladas de lodo desecado por hectárea por 10 años.

Inglaterra.

En el este de Inglaterra cerca del 80 % de las 130000 toneladas de lodo seco producidos anualmente se utilizan en agricultura. Las cantidades de uso están destinadas específicamente a los cereales o al maíz, azúcar, remolacha, papas y otros tubérculos. La cantidad típica aplicada es de cinco toneladas de lodo seco por hectárea por año, pero si el tratamiento resulta de calidad podría llegarse a aplicar de 15-20 toneladas de lodo seco. Las autoridades trabajan junto con los agricultores para monitorear los contaminantes y para capacitar a los agricultores en cuanto a la determinación de fósforo y nitrógeno disponible presentes en los lodos para determinar la cantidad de aplicación. Si la granja está en un área nitrato-sensible el uso anual del lodo sería restringido a los 5 t/ha (175 kilogramos N/ha); en áreas menos sensibles, la tarifa se puede levantar a 7 t/ha (250 kilogramos N/ha). La profundidad normal del arado debe de ser de 20 cm, y la supervisión del suelo será a los 15 cm de profundidad. Se estima que la aplicación del lodo se podría utilizar en los terrenos por cerca de 130 años y mientras más profunda es la arada los años útiles se extienden (25 cm hasta 160 años).

La utilización en los jardines es un método rentable pues los costos al momento del traslado son bajos, pero aun no es bien aceptado por la población. La horticultura se practica en una escala muy baja. Se han hecho investigaciones comparándolas con estiércol vegetal, hasta ahora los lodos presentan mejores ventajas. Actualmente está aumentando el interés sobre el uso y es posible que, en los próximos años, los lodos se puedan proveer a los granjeros fácilmente.

Italia.

La región de Apulia en Italia consiste principalmente en tierra árida, y por lo general la utilización del lodo es en baja escala pues los agricultores temen a las enfermedades que este podría ocasionar, así que los grandes productores de lodos son obligados a pagar a los parcelarios para que reciban el lodo y en ocasiones como basura.

México.

Se llevaron acabo aplicaciones de lodo en los terrenos agrícolas cercanos a la planta de tratamiento de Aguascalientes, solo que no se llevo el control de las aplicaciones, por lo tanto la investigación fracaso, debido a que los suelos perdieron capacidad para producir debido a las altas aplicaciones de lodos consecutivamente.

En trabajos realizados por el CINVESTAV en Irapuato se demostró la capacidad fertilizante de los lodos. Se experimento con maíz “H-220” a los cuales se les aplico tanto lodos irradiados como lodos crudos en varios porcentajes y se les comparo con una aplicación de 20 kg de N/ha de sulfato de amonio. Al momento de la cosecha se determino que existió una clara respuesta del cultivo del maíz a la aplicación de nitrógeno en cualquiera de sus formas. Esta respuesta fue en algunos casos hasta de un incremento del 100 por ciento cuando se aplico lodo y cuando se aplico fertilizante. Asimismo la aplicación de lodos irradiados y crudos fue similar. La aplicación del nitrógeno en forma de lodo fue más eficiente que el fertilizante comercial; posiblemente por la lenta liberación del nitrógeno del material orgánico, así como a la presencia de otros macro y micronutrientes y factores biológicos.

De manera resumida se puede decir que según los datos obtenidos, se puede obtener el mismo rendimiento de maíz cuando se aplica fertilizante comercial que cuando se aplica lodo al 50 por ciento de la dosis recomendada para el maíz en la región.

Suecia.

El uso del lodo en los terrenos agrícolas se vio afectado desde 1998 ya que los lodos presentaban altas concentraciones de mercurio, cadmio, plomo y zinc excediendo los niveles permitidos. Cuando se aplican el factor limitante será la concentración de acumulación permitida durante cierto tiempo del contaminante que este en mayor

proporción. La regulación para el uso de los lodos en las actividades agrícolas se han hecho más estrictas a partir del año 2 000. Se cree que para los próximos años se dejara utilizar los lodos ya que además de ser más estricta la legislación de la Unión Europea, en Suecia el contenido de metales pesados en los lodos es muy alto debido a que en el país la actividad económica más importante es industrial.

Los lodos que presentan mayor calidad higiénica se utilizan para abonar plantaciones de árboles, céspedes y campos de golf. En la ciudad de Goteborg 10000 toneladas del lodo desecado se utilizan anualmente. El lodo se mezcla con la corteza, 1-2 m³ en cantidad de una tonelada por hectarea de lodo desecado.

C O N C L U S I O N

Debido a las características físicas, químicas y biológicas de los lodos, pueden ser aprovechados por una gran variedad de cultivos, siempre y cuando se tome en cuenta las medidas necesarias, los métodos adecuados y las normas existentes al momento de la

aplicación, para que de esta manera aplicar solo la cantidad necesaria y así prevenir efectos no deseables en el medio ambiente y la salud pública.

Los lodos en los cultivos agrícolas no se pueden utilizar como un sustituto de los fertilizantes caros, si no que más bien es solo un complemento de los mismos que ayudan a que las cantidades de fertilizantes sintéticos se reduzcan considerablemente y con ello minimizar un poco los costos de producción.

En México la utilización de los lodos residuales en los suelos degradados y cultivos agrícolas se podría llevar a cabo de manera eficiente si se toman las medidas necesarias para la aplicación, debido que los lodos de desecho producido en su mayoría son de origen municipal, por lo tanto, el contenido de compuestos tóxicos es relativamente bajo y además los núcleos urbanos están creciendo considerablemente en los últimos años y con ello el incremento de los lodos residuales.

BIBLIOGRAFÍA

Ante proyecto NOM-004-ECOL-1998. Tratamiento y Disposición de Lodos Residuales. Expedido por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Bellapark C. V. 1988. Agricultura Biológica en Equilibrio con la Agricultura Química. Fertilización Natural la Agricultura del Futuro. Primera edición. Editorial AEDOS, S.A. Barcelona, España.

Bruce A. 1984. Sewage Sludge Stabilization and Desinfection. Edited by WRC, Published for the Water Research Center by Ellis Horwood Limited Publishers. Chichester 1984.

Cardozo V. L., E. Ramírez, G. Moeller y V. Escalante. 1998. Criterios para el Aprovechamiento de Lodos Residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Morelos, México.

Cleverson V. A., V. Sperling y F. Fernandes. 2001. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposicao Final. Principios do Tratamento Biológico de Aguas Residuarias. Volume 6. Editorial SEGRAC. Brasil.

Collí, M. J. 2000. Paquetes Tecnológicos para el Tratamiento de Excretas y Aguas Residuales en Comunidades Rurales. IMTA. Morelos, México.

Cruz O. A., I. Teran y G. Moeller C. 1996. Tratamiento Anaerobio de Lodos Residuales de Fosas Sépticas. Conferencia de Tratamiento de Aguas Residuales. Guanajuato, Guanajuato, México.

Damron D. y Bitton. 1980. Sludge–Health Risk of Land Application. Ed. Ann Arbor Science. Michigan, United States of America.

Diseño de tratamiento de aguas residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Centro de información y actualización del conocimiento, A. C. Morelos, México.

Eckenfelder, W. Jr. y D.L Ford. 1970. Water Pollution Control. Pemberton Press. Austin and New York. USA.

González A. Z., I. Cano, B. Jiménez y P. Vizguerra. 2001. Eliminación de Metales en Aguas Naturales por Biomateriales. XI Congreso Nacional de Irrigación. Memoria, Expo Agro 2001. Guanajuato, México.

González T., J. Delijorge y A. Vázquez. 2001. Recuperación y Reutilización de las Aguas Residuales en la Producción Agrícola. XI Congreso Nacional de Irrigación. Memoria, Expo Agro 2001. Guanajuato, México.

Iñiguez C. G. 2001. Biodegradación de Desechos de Origen Orgánicos. Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A. C. Volumen 6. Numero 3. D.F., México.

Kato E. M. 2001. Rehúso y Saneamiento de Aguas Residuales Industriales. XI Congreso Nacional de Irrigación. Memoria, Expo Agro 2001. Guanajuato, México.

Lue-hing C., R. Zenz y R. Kuchenrither. 1992. Municipal Sewage Sludge Management: Processing Utilization and Disposal. Water Quality Management Library. Volume 4. TECHNOMIC publishing CO., Inc. Lancaster, Pennsylvania, USA.

Lue-hing C., R. Zenz y R. Kuchenrither. 1998. Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal. Water Quality Management Library. Volume 4. TECHNOMIC publishing CO., Inc Washington. D. C. USA

Managing Sludge by Composting. Design... Operation... Quality Control... Compost... Uses... Problem-Solving Research. Edited by the Staff of BioCycle Journal of Waste Recycling. January, 1984. Printed in the United States of America.

Manual de Tratamiento de Aguas Residuales para Rehúso, Elaborado y Editado por la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México, D. F. , abril de 1985.

Matthews P. 1998. A Global Atlas of Wastewater Sludge and Biosolids Use and Disposal. Scientific and Technical Report No. 4. IAMQ. (International Association and Water Quality). Edited by LONDON ENGLAND.

Maya R. C., G. Campos, y B. Jiménez. 1996. Enfermedades por los Lodos. Conferencia de Tratamiento de Aguas Residuales. Guanajuato, Guanajuato, México.

Metcalf y Heddy. 1996. Ingeniería de Aguas Residuales (Redes de Alcantarillado y Bombeo). McGraw – Hill. Inc, USA.

Metcalf y Heddy. 1996. Ingeniería de Aguas Residuales (Tratamiento y Vertido). McGraw – Hill. Inc, USA.

Miller T. G. Jr. 1994. Ecología y Medio Ambiente. Grupo editorial Iberoamérica S. A. de C. V. Nebraska, USA.

Nebel y Wriqth. 1998. Ciencias Ambientales (Ecología y Desarrollo Sostenible). Sexta edición. Prentice Hall, Inc. USA.

Noyola R. A., E. Vega, J. Ramos y C. Calderón. 2000. Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales. Manuales IMTA. Coordinación de Desarrollo profesional e Institucional. Morelos, México.

Qiao, L H. 1996. The Effect of Clay Amendment on Speciation of Heavy Metal in Sewage Sludge. Water Science and Technology. Vol. 34.

Page A., T. Gleason, J. Smith Jr. K. Iskandar y L. Sommers 1983. Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land. Sponsored by U. S. Environmental Protection Agency, Cooperative State Research Service National, Science Fundation, University of California – Kearney Fundation of Soil Science. University of California.

Parr J., E. Epstein and G. Willson. 1977. "Composting of Sewage Sludge for Utilization as a Fertilizer and soil Conditioner". FAO soil Bulletin No. 35.

Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal e Industrial Sludge. May, 1982. Washington, D. C. Sponsored by Hazardous Materials Control Research Institute. Printed in the United States of America.

Proceedings of National Conference on Municipal and Industrial Sludge Composting–Materials Handling. November, 1980. New Carrollton, Maryland (Washington, D. C. suburb). Printed in the United States of America.

Revista Agua. La Desinfección del Agua. Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la Salud. 1999.

Ríos G. L. 2002. Arranque de Reactores en Procesos Secuenciales Aerobio- Anaerobio Utilizada en la Ultima Fase del Proceso Aerobio con un Consorcio Inmovilizado de Soporte Natural. Tesis. UAC. Coahuila, México.

Rivero D. J. 1994. Desarrolla de Tecnologías para el Tratamiento de Lodos Residuales. IMTA. Morelos, México.

Seoáñez C. M. 1999. Aguas Residuales Urbanas. Tratamientos Naturales de Bajo Costo y Aprovechamiento. Segunda edición. Ediciones mundi-prensa. Madrid, España.

Seoáñez C. M. 1999. Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales. Fundamentos Científicos, Tecnologías y Diseño. Ediciones mundi-prensa. Madrid, España.

Sette R. R. 1996. Tratamiento de Aguas Residuales. Editorial Reverte, S. A. Barcelona, España.

Turk A., J. Turk y J. Wittes. 1972. Ecología – Contaminación – Medio Ambiente. Nueva Editorial Interamericana S. A. de C. V. D. F., México.

Turk J. y A. Turk. 1973. Ecología – Contaminación – Medio Ambiente. Nueva Editorial Interamericana S. A. de C. V. D. F., México.

Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production. National Academy Press. National Research Council Washington, D. C. 1996. Printed in the United States of America.

Walker J. , W. Burge, R. Chaney, E. Epstein and J. Minzies. 1975. Trench Incorporation of Sewage Sludge in Marginal Agricultural Land. Environmental Protection Technology Series. EPA.

Fuentes de Internet:

http://www.aguapotable.fcpages.com/tratamiento_de_lodos.htm

<http://edafologia.ugr.es/Revista/tomo5/a1t.htm>

<http://www.semarnat.gob.mx/sniarn/suelos/cifras.shtml>

http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_ambientales/estadisticas_am_98/suelos/suelos08.shtml

<http://www.jrc.es/iptsreport/vol23/spanish/ENV2S236.htm>

<http://www.udl.es/usuarios/lea/archivos%20pdf/biogasIPCENA.pdf>

<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-161.pdf>

<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/repindex/rep046.html>

<http://www.cepis.org.pe/eswww/repamar/gtzproye/lodos/lodos.html#2.%20Aspectos>

http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/otros/gestion_residuos/bases_conceptuales/capitulo_12.pdf