

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**METALES PESADOS EN LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE LA UAAAN**

POR:

ARBEIS GONZÁLEZ GÓMEZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Metales pesados en lodos de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de la UAAAN

Por:

Arbeis González Gómez

TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador, Como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

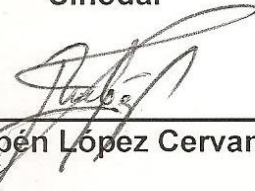
Aprobado Por:

Asesor principal



Dr. Edmundo Peña Cervantes

Sinodal



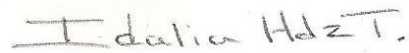
Dr. Rubén López Cervantes

Sinodal




Ing. Antonio Ilizaliturri Verastegui

Sinodal



M.C. Idalia María Hernández Torres

"ANTONIO NARRO"



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la división de ingeniería



Coordinación de
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2011.

AGRADECIMIENTO

A DIOS

Por permitirme llegar a este momento importante de mi vida, por darme sus bendiciones, porque aun sintiéndome solo estaba conmigo en todo momento y en cualquier lugar. Por permitirme tener una familia y guiarme siempre de su mano para concluir mi carrera profesional, por otorgarme el milagro de la vida y darme todo lo que tengo aún sin ser merecedor de ello.

A MI MADRE

A la mejor madre del mundo a la mujer que adoro, amo y admiro por su capacidad... **Sra. Luz María Gómez Nucamendi**, gracias por cuidar de mi, por darme tanto amor y buenos consejos, pero sobre todo por darme más de lo que ella quería.

A MI ALMA TERRA MATER

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de formarme profesionalmente, por impartir educación de calidad y cumplir con sus objetivos de docencia e investigación y a todos los maestros e investigadores que hacen posible esta labor, especialmente a mis asesores **Dr. Edmundo Peña Cervantes, Dr. Rubén López Cervantes, Ing. Antonio Ilizaliturri Verastegui, M.C. Idalia María Hernández Torres**: gracias por su apoyo en la realización de este trabajo de investigación, en la asesoría y en los buenos consejos brindados para hacer posible esta tesis.

A MI FAMILIA, AMIGOS Y COMPAÑEROS DE GENERACION

Gracias por su apoyo y confianza... porque el solo hecho de confiar en mí es un motivo para no defraudarlos.

DEDICATORIA

A MI MADRE

Sra. **Luz María Gómez Nucamendi**... madre, doy gracias a DIOS por elegirte para mi, por el maravilloso tiempo que anidé en tu vientre, por velar mi sueño, por no cuidar de mis caídas sino motivarme a levantarme, porque tu sola mirada bastaba para hablarme, porque aunque tu vida es frágil siempre me sonríes, gracias por enseñarme que nunca es tarde para prepararse y aprender nuevas cosas, por dejarme descubrir que detrás de tu carácter firme existe un noble corazón rebosante de amor por servir a quien te pide tu mano, gracias por que hasta ahora eres el ejemplo de valentía y fortaleza.

Gracias por el apoyo incondicional, por confiar en mí, por permitir hacer las cosas por usted madre, gracias por sus buenos consejos que se ven reflejados en el hombre que ha hecho de mí. Gracias por hacer de mi lo que ahora soy... mil palabras no podrán describir lo que siento por usted madre y lo agradecido que estoy por darme su apoyo en mi formación profesional... pero sobre todo agradezco por dame más de lo que usted quería.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
INDICE DE CUADROS	vi
INDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
I. INTRODUCCION	1
Objetivos.....	2
Hipótesis.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Definición de agua residual.....	3
2.2. Clasificación de las aguas residuales	4
2.2.1. Aguas domésticas o urbanas	4
2.2.2. Aguas residuales industriales	4
2.2.3. Aguas de usos agrícolas	4
2.2.4. Aguas pluviales	4
2.3. Tratamientos de las aguas residuales	5
2.3.1. Tratamiento preliminar.....	5
2.3.2. Tratamiento primario.....	5
2.3.3. Tratamiento secundario	5
2.3.4. Tratamiento terciario.....	6
2.4. Productos de desechos en el tratamiento de aguas.....	6
2.5. Definición de lodo residual.....	7
2.6. Digestión aerobia y digestión anaerobia.....	7
2.7. Contaminantes presentes en los lodos.....	7
2.8. Tipos de lodo	8
2.8.1. Lodo primario.....	8
2.8.2. Lodo secundario	8
2.8.3. Lodo terciario	8
2.9. Clasificación de los lodos	9

2.9.1. Lodos peligrosos	9
2.9.2. Lodos no considerados peligrosos	9
2.9.3. Otros lodos	9
2.10. Legislación para el uso de los lodos residuales.....	10
2.11. Definición de biosólidos	10
2.12. Aprovechamiento de los biosólidos	11
2.13. Disposición final de lodos y biosólidos.....	12
2.14. Métodos de disposición del lodo residual	12
2.14.1. Confinamiento del lodo.....	12
Impacto ambiental del confinamiento de los lodos	13
2.14.2. Incineración	14
Impacto ambiental de la incineración de los lodos.....	15
2.14.3. Características del lodo residual para aplicarlo al suelo	15
2.14.3.1. Cantidad del lodo residual	17
2.14.3.2. Contenido de sólidos totales.....	17
2.14.3.3. Contenido de sólidos volátiles	19
2.14.3.4. pH.....	19
2.14.3.5. Materia orgánica.....	20
2.14.3.6. Patógenos	20
2.14.3.7. Nutrimentos	22
2.14.3.8. Metales pesados en lodos	23
2.14.3.9. Contaminantes peligrosos	27
III. MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1. Localización y características de la planta de tratamiento de aguas residuales	28
3.2. Metodología	28
3.3. Ubicación de los puntos de muestreos	28
3.4. Obtencion y preparacion de muestras	30
3.5. Diseño experimental	31
3.6. Variables evaluadas	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32

4.1. Metales Pesados Totales	32
4.2. Otros elementos importantes.....	34
4.3. Metales pesados hidrosolubles.....	35
4.4. Otros elementos hidrosolubles importantes.....	36
4.5. Algunas características químicas importantes de los lodos residuales para su clasificación	37
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
VI. LITERATURA CITADA	41
ANEXOS	46

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tipo y clase de los biosólidos y su aprovechamiento.....	11
Cuadro 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	20
Cuadro 3. Límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos y su clasificación.	26
Cuadro 4. Parámetros de interés evaluados.....	30
Cuadro 5. Comportamiento de los metales pesados en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN.	33
Cuadro 6. Comportamiento de elementos importantes en la caracterización del lodo residual en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN.	35
Cuadro 7. Concentraciones de elementos hidrosolubles, importantes en la caracterización del lodo residual en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN	36
Cuadro 8. Concentraciones de otros elementos hidrosolubles, importantes en la caracterización del lodo residual en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN.	37
Cuadro 9. Comportamiento de algunas características químicas importantes en la caracterización del lodo residual.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Croquis de la planta de tratamiento de agua residual y puntos de muestreo.....	29
--	----

RESUMEN

Actualmente el agua es un recurso indispensable e insuficiente debido a la alta tasa de crecimiento de la población, razón por la cual se hace necesaria la reutilización de este recurso mediante procesos de tratamiento pero a consecuencia de dichos tratamientos son generados grandes volúmenes de lodos o biosólidos, una de las alternativas para la disposición final de los biosólidos es su utilización como mejoradores de suelos agrícolas por su alto contenido de materia orgánica, además son una fuente importante de nutrimentos, sin embargo uno de los factores que limita su disposición son los metales pesados, el objetivo de la presente investigación es cuantificar la concentración y distribución de metales pesados como el Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, comparando los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002. Para lo cual se obtuvieron muestras simples de lodos de ocho diferentes etapas del tratamiento haciendo un muestreo por semana durante el periodo de mayor actividad en la Universidad (febrero a mayo), se obtuvieron muestras representativas mezclando los lodos de tres submuestras, hasta obtener cuatro muestras compuestas las cuales se prepararon para el análisis de metales pesados totales e hidrosolubles. De acuerdo a los resultados obtenidos las concentraciones de los metales pesados en su forma hidrosoluble están muy por debajo de lo establecido por la norma y con respecto a la forma total aunque la concentración de los metales pesados en los lodos es mayor aun sigue estando dentro de norma, por lo que estos se pueden clasificar como excelentes pudiéndose recomendar para su aplicación a los suelos agrícolas.

Palabras clave: *lodo residual, metales pesados, agua residual, tratamientos de lodos residuales, nutrimentos.*

I. INTRODUCCION

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 han 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. En México 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 *et al.*, 1988). 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.

El problema de la acumulación de residuos sólidos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales es un problema ambiental que cada día cobra mayor relevancia en México. La NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF 2002), establece en el punto 3.5, que los lodos residuales que han sido estabilizado por algún proceso se denominan biosólidos.

Una de las alternativas para la disposición final de los biosólidos es su utilización como mejoradores de suelos agrícolas por su alto contenido de materia orgánica, además son una fuente importante de macronutrientes como el N, P y K y micronutrientes como Cu y Zn (Azevedo *et al.*, 2003).

Los biosólidos que son destinados a uso agrícola también pueden contener metales pesados por lo que es importante conocer su contenido total por el riesgo existente de que se acumulen en el suelo.

Para el caso del agua residual y sólidos generados en la UAAAN no existe un estudio sobre el contenido y distribución de metales pesados en las diferentes etapas del tratamiento, y sin embargo estas se usan para riego agrícola y los sólidos no tienen un uso y/o confinamiento determinado. En el agua residual de la Universidad un elemento potencialmente tóxico importante, es el Cromo, el cual es utilizado desde hace muchos años para la determinación de la materia orgánica del suelo y la demanda química de oxígeno (DQO) de aguas residuales, el cual está sujeto a ser precipitado por las condiciones del medio ambiente y acumularse en los lodos.

Sabiendo la importancia del tratamiento de las aguas residuales así como del lodo que se genera en las diferentes etapas del tratamiento y la necesidad de darle un uso determinado al mismo se realizó el presente trabajo de investigación, planteándose los siguientes:

Objetivos

- Cuantificar la concentración de los elementos Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo y Zinc en los lodos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Determinar la distribución de estos mismos elementos en los lodos generados en las diferentes etapas del tratamiento de aguas residuales.
- Determinar la calidad del lodo producido en la planta de tratamiento de aguas residuales, en relación al contenido y distribución de los metales pesados, así como en algunas características químicas para uso en suelos agrícolas.

Hipótesis

- Los metales pesados se concentran y distribuyen de forma heterogénea en los lodos residuales de las diferentes etapas de tratamiento de aguas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Definición de Agua Residual

En la Legislación Mexicana de acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996, se consideran como aguas residuales “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas” [Diario Oficial de la Federación (DOF), 1997].

Para Seoáñez (1999), las aguas residuales son los líquidos procedentes de la actividad humana, que llevan en su composición gran parte de agua, y que generalmente son vertidos a cursos o masas de agua continental o marina.

En cambio, para Fair *et al.* (1966), Juárez (2005), el agua residual se origina por la introducción en ella de organismos patógenos o sustancias tóxicas que la hacen inapropiada para consumo humano o uso doméstico.

Concepto similar considera Metcalf y Eddy (1998), pues mencionan que desde el punto de vista de las fuentes de generación, se puede definir el agua residual como “la combinación de los residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales”.

Finalmente, Martínez (2001), expone que son aguas degradadas debido al uso municipal o pecuario, mezcladas o no con aguas superficiales, subterráneas o de lluvia, y que contienen 0.10 por ciento de sólidos en suspensión o solución, lo que las convierte en peligrosas para uso inmediato.

Los conceptos anteriores dejan ver la variedad de componentes que el agua residual contiene, siendo necesarios procesos muy diversos para devolverle su calidad inicial, sobre todo en nuestros días, en que las sustancias en ella vertidas, son mucho más complejas.

2.2. Clasificación de las Aguas Residuales

De acuerdo a Reynolds (2002), las aguas residuales pueden englobarse dentro de cuatro clases:

2.2.1. Aguas Domésticas o Urbanas

Estas resultan de la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua procedente de casas, edificios comerciales e instituciones, zonas en las que no se efectúan, o solo en muy poca escala, las operaciones industriales; junto con las aguas superficiales o de precipitación pluvial que puedan agregarse. El Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York (1976), inclusive, considera el agua de infiltración subterránea como parte de estas mismas. Constituyentes comunes de estas aguas son los desechos humanos y animales, desperdicios caseros; además de elevadas cantidades de sólidos diversos, materia orgánica, grasas, aceites y detergentes.

2.2.2. Aguas Residuales Industriales

Son las aguas desechadas de los procesos industriales, las que pueden disponerse en forma aislada o pueden agregarse a las domésticas urbanas.

2.2.3. Aguas de Usos Agrícolas

Son las desechadas por la agricultura, en sus diferentes facetas, las cuales retornan a los cuerpos de agua más cercanos, una vez que la demanda de los suelos queda satisfecha.

2.2.4. Aguas Pluviales

Están formadas por los escurrimientos superficiales de las lluvias, mismas que fluyen desde los techos, pavimento y otras superficies naturales de terreno.

2.3. Tratamientos de las Aguas Residuales

Sostiene Mujeriego (1990), que los métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de fuerzas físicas son conocidos como operaciones unitarias y aquellos en los que la eliminación de contaminantes se consigue mediante reacciones químicas o biológicas se conocen como procesos unitarios. Las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir lo que se conoce como tratamientos, los cuales son: preliminar, primario, secundario y terciario o avanzado. Con estos tratamientos se busca suplir la falta de capacidad autodepuradora del medio ambiente debido al exceso de carga de los afluentes. Los tratamientos son:

2.3.1. Tratamiento Preliminar

El objetivo de un tratamiento preliminar es retirar del agua residual aquellos sólidos suspendidos que por su naturaleza presentan interferencias en etapas posteriores del proceso.

2.3.2. Tratamiento Primario

Los objetivos de este tratamiento son: eliminar tanto la materia decantable, orgánica e inorgánica, mediante decantación, como eliminar la materia flotante y las espumas mediante barrido superficial. Se elimina así entre 25 - 50 por ciento de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), entre 50 - 70 por ciento de material en suspensión (MES) y 65 por ciento de los aceites y grasas del afluente. Se elimina una parte del nitrógeno orgánico, del fósforo orgánico y de los metales pesados contenidos en el afluente, pero no afecta a la materia coloidal ni a la disuelta.

2.3.3. Tratamiento Secundario

Consiste en la eliminación de la materia orgánica biodegradable, tanto disuelta como coloidal, mediante un proceso biológico aeróbico. En presencia de oxígeno diversos microorganismos aeróbicos metabolizan la materia

orgánica contenida en el agua obteniendo un crecimiento microbiano y subproductos inorgánicos (dióxido de carbono, y agua principalmente). Para completar el tratamiento han de separarse los microorganismos del agua tratada para obtener un afluente secundario desprovisto de materia en suspensión. Hay una decantación secundaria similar a la primaria de donde se obtiene la materia biológica denominada fangos secundarios o fangos biológicos y que normalmente se mezclan con los fangos primarios para ser tratados conjuntamente.

2.3.4. Tratamiento Terciario

Se utiliza cuando se quiere eliminar algún componente del agua residual que no se ha podido eliminar con el tratamiento secundario. Son procesos específicos que permiten obtener un agua residual sin nitrógeno, fósforo, materia en suspensión no decantada, materia orgánica no biodegradable, metales pesados o materia disuelta. Elimina la materia coloidal y en suspensión que inhibe la desinfección efectiva de los virus.

2.4. Productos de desechos en el tratamiento de aguas

En un estudio realizado por el IMTA (1998), en una planta de tratamiento de aguas residuales obtuvieron una estimación media de producción de lodos de tres litros de lodos por persona por día, con 20 gramos de materia seca por litro. De la misma manera Bellapark (1988), menciona que en un tratamiento se obtienen 2.5 litros de lodos por día, con 20 gramos de materia seca por litro. De manera general los productos generados en los sistemas de tratamientos son los siguientes:

- ❖ Arena
- ❖ Espuma
- ❖ Lodo primario
- ❖ Lodo secundario
- ❖ Lodo químico (formado en la etapa físico - química).

2.5. Definición de lodo residual

En la NOM-004-SEMARNAT-2002, se definen los lodos residuales como sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamientos de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

Por otro lado la EPA (1995), define el lodo residual como los residuos sólidos, semisólidos o líquidos, removidos en los procesos de tratamientos primarios, secundarios o avanzados del agua residual. El lodo incluye escorias o sólidos removidos en los procesos de tratamiento y cualquier material derivado del lodo.

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.

2.6. Digestión aerobia y digestión anaerobia

Según la NOM-004-SEMARNAT-2002, la digestión aerobia es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en bióxido de carbono y agua por los microorganismos en presencia de oxígeno. En cambio la digestión anaerobia es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en gas metano, bióxido de carbono y agua por los microorganismos en ausencia de oxígeno disuelto y combinado.

2.7. Contaminantes presentes 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

2.8. Tipos de lodo

2.8.1. Lodo primario

El lodo primario, es el lodo que resulta del tratamiento primario del agua residual, y que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contiene de 93 a 99.5 por ciento de agua, así como también los sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual o fueron agregados durante los procesos de tratamiento. Los tratamientos primarios remueven los sólidos (EPA, 1984).

2.8.2. Lodo secundario

Los tratamientos secundarios del agua residual generalmente involucran un proceso de clarificación primario seguido de un tratamiento biológico y una clarificación secundaria (EPA, 1990). El lodo generado por procesos de tratamiento secundarios del agua residual, tales como los sistemas biológicos activados y filtros de goteo, tienen un contenido de sólidos bajo (0.5 a 2%) y son más difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

2.8.3. Lodo terciario

Los lodos terciarios son producidos por procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como aluminio, fierro, sales, cal o polímeros orgánicos, incrementan la masa del lodo y usualmente el volumen del lodo. Generalmente, si la cal o polímeros son usados, las características del espesamiento y deshidratación del lodo serán mejores, si se usan fierro o sales

de aluminio, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducido.

2.9. Clasificación de los lodos

La clasificación es utilizada por la legislación para determinar cuáles lodos residuales son factibles para su tratamiento y reúso, y en los cuales no es conveniente la aplicación al suelo, y por lo tanto, cuál será el lugar de disposición final. De acuerdo a varios procesos productivos, se pueden presentar las siguientes alternativas:

2.9.1. 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.

2.9.2. 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.

2.9.3. Otros lodos

A los que no se les revaloriza pero su concentración en contaminantes es relativamente baja, en este caso la legislación autoriza su disposición en un relleno sanitario de tipo municipal, con las restricciones que las normas establecen para ese tipo de desechos.

2.10. Legislación para el uso 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 debe ser específica 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 (LGEEPA, 1998), se menciona que toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga 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. 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 análisis detallado del lodo para la identificación y caracterización de sus constituyentes y para determinar su aptitud para la aplicación al suelo.

2.11. Definición de Biosólidos

La NOM-004-SEMARNAT-2002, define a los biosólidos como los lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrimentos y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento.

El termino biosólidos se origino dentro de la industria del tratamiento de aguas residuales, tratando de definir la porción descontaminada y agrícolamente viable de los lodos residuales por los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Actualmente es utilizado para describir a los lodos que contienen principalmente productos orgánicos con altos contenidos de nutrimentos esenciales para las plantas que pueden ser benéficamente reciclados como fertilizante y mejoradores del suelo (Pissani,1998).

Según Sorber (1994), el termino lodo difiere de biosólido este último se refiere a un producto tratado que es cuidadosamente verificado y periódicamente reutilizado a través de aplicaciones innovativas.

2.12. Aprovechamiento de los biosólidos

Es el uso de los biosólidos como mejoradores o acondicionadores de los suelos por su contenido de materia orgánica y nutrimentos, o en cualquier actividad que represente un beneficio. El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en el cuadro 1 y su contenido de humedad hasta el 85% (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Cuadro 1. Tipo y clase de los biosólidos y su aprovechamiento.

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contactos publico directo durante su aplicación. • Los establecidos para las clases B y C.
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contactos publico directo durante su aplicación. • Los establecidos para la clase C.
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramientos de suelos • Usos agrícolas

La aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetara a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.

2.13. Disposición final de lodos y biosólidos

Es la acción de depositar de manera permanente lodos y biosólidos en sitios autorizados.

Los sitios para disposición final de lodos y biosólidos, serán los que autorice la autoridad competente, conforme a la normatividad vigente en la materia.

Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002, pueden ser almacenados hasta por un periodo de dos años. El predio en el que se almacenen debe ser habilitado para que no existan infiltraciones al subsuelo y contar con un sistema de recolección de lixiviados.

Se permite la mezcla de dos o más lotes de lodos o biosólidos, siempre y cuando ninguno de ellos este clasificado como residuo peligroso y su mezcla resultante cumpla con lo establecido en la norma (NOM-004-SEMARNAT-2002).

2.14. Métodos de disposición del lodo residual

Los métodos de disposición del lodo más usados en la actualidad son: confinamiento en relleno sanitario, incineración y aplicación al suelo, éste último ha ido incrementando interés en los últimos años por su accesibilidad y factibilidad en comparación con los otros métodos de disposición (Metcalf y Eddy, 1991).

2.14.1. Confinamiento del lodo

El confinamiento del lodo puede definirse como la disposición planeada de los sólidos del agua residual incluyendo: lodo, arenas y cenizas sobre un sitio diseñado donde son enterrados y monitoreados. El lodo es llevado al confinamiento por camiones que recogen el lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Hay varios tipos de confinamientos, pero el método más usado a menudo es el que consiste en deshidratar el lodo para después transportarlo por medio de camiones al relleno sanitario, este lodo deshidratado contiene aproximadamente 80% de humedad y 20% de sólidos. Los camiones tiran el lodo dentro del relleno, en donde los tractores se encargan de enterrarlo usando una de las dos técnicas especiales de enterramiento. Estas técnicas utilizan el espacio más eficientemente y forman una pendiente para el drenaje de la precipitación. Los cinco métodos de confinamiento más utilizados en la actualidad consisten en:

1. Tirar el lodo en arena y grava dentro de un pozo abierto previamente y cavado por un bulldozer, el pozo es tapado posteriormente para controlar olores y otros problemas.
2. Tirar el lodo en un terreno y nivelarlo.
3. Tirar el lodo sobre la superficie del relleno y mezclar con basura durante la compactación.
4. Tirar el lodo dentro de un pozo.
5. Deshidratar el lodo en la planta de tratamiento, después se lleva al relleno, se tira y se entierra inmediatamente.

Impacto ambiental del confinamiento de los lodos

Los dos contaminantes de preocupación ambiental por la disposición y confinamiento de los desperdicios son los gases y lixiviados. El lixiviado es generado debido a que el agua penetra al relleno y el gas debido a la descomposición de la materia orgánica.

La producción de gas de la materia orgánica empieza antes de que sea confinado. Los principales gases que son generados de la descomposición de la materia orgánica son el dióxido de carbono y metano. El dióxido de carbono es importante en las áreas con agua de buena calidad, debido a que es soluble con el agua, contrario de otros gases que pueden producirse dentro del relleno los cuales son insolubles. Cuando el dióxido de carbono se disuelve en el agua baja el pH, el cual crea una corrosividad ambiental. También crea un

incremento en la dureza del agua. Usualmente el efecto del dióxido de carbono es mayor durante los primeros meses de descomposición y puede continuar por algunos años.

La producción de lixiviados dentro de un relleno depende de las cantidades de agua que entran en el relleno. La lixiviación resulta cuando la cantidad de agua que entra excede la cantidad de agua que puede ser retenida por el residuo. Esta es una razón para que la investigación del terreno y las características del suelo sean esenciales para el diseño de los rellenos. Las causas principales de la intrusión de los excesos de agua son debidas a un incremento de los niveles freáticos. Otras consideraciones que deben evaluarse son la topografía y el clima del lugar, debido a que esos dos factores pueden causar un impacto dramático sobre el relleno si estos no son evaluados apropiadamente. El mejor método para manejar los lixiviados es prevenir o limitar su producción desde los orígenes.

2.14.2. Incineración

Uno de los métodos más populares de la disposición de residuos es la incineración. Esta consiste en la destrucción completa de materiales por medio de calor a sus constituyentes inertes. El lodo residual en forma de torta o pastel normalmente contiene de 55 a 85% de humedad. Este no puede ser quemado hasta que el contenido de humedad sea reducido a por lo menos el 30%. El propósito de la incineración es para reducir el lodo a su volumen mínimo, como la ceniza. Hay tres objetivos en la incineración que deben cumplirse: secar la torta de lodo, destruir el contenido de sólidos volátiles por medio de calor y producir un residuo estéril o ceniza. Las cenizas generadas por la incineración de los lodos son llevadas a un relleno sanitario o son usadas para concreto. Hay cuatro tipos básicos de incineradores usados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos son el incinerador de múltiple coraza, el incinerador de cama fluida, el horno eléctrico y el horno ciclónico. Cada sistema tiene su método distinto de incineración y mientras uno puede ser más eficiente en costos, otro puede tener más impacto sobre el medio ambiente.

Impacto ambiental de la incineración de los lodos

Uno de los impactos ambientales que tiene la incineración de los lodos es sobre el aire. El humo descargado de los incineradores o flujo de gas debe ser incoloro. El flujo de gas es una emisión principalmente hecha de nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Hay indicios de cloruros y sulfuros en el gas, si los niveles llegan a ser altos, éstos pueden causar la posibilidad de corrosión. Con respecto al color de la descarga, si hay una cantidad significativa de partículas en la emisión, éstas serán detectadas por el color. El chorro puede variar de una apariencia negra a una apariencia blanca y tendrá un rastro amarillo claro a marrón oscuro. La descarga puede también tener olores no deseados que juntos con el color de las emisiones deben controlarse adecuadamente para ocasionar daños mínimos.

2.14.3. Características del lodo residual para aplicarlo al suelo

Según Celis *et al.* (2006), la aplicación de lodos residuales al suelo pueden mejorar las propiedades físicas del mismo como la densidad aparente, la estructura, porosidad y retención de agua, lo cual puede reflejarse en un incremento en el rendimiento de los cultivos junto a los beneficios del uso de los lodos, también deben considerarse los riesgos que representan estos materiales, ya que cada material es diferente y puede contener altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos para los cultivos o para los consumidores de los productos de los mismos, como son los metales pesados.

Determinar la conveniencia del lodo para aplicarlo al suelo, por la caracterización de sus propiedades, es el primer paso indispensable en la planeación y diseño de un sistema de aplicación de lodo (EPA, 1995). La composición del lodo será fundamentalmente en las siguientes decisiones de diseño:

- Si el lodo puede ser aplicado al suelo a bajos costos.
- Cuál práctica de aplicación es la más factible técnicamente.

- La cantidad de lodo que se aplicará por unidad de área, ya sea anualmente o acumulativamente.
- El grado de control de regularidad y los sistemas de monitoreo requeridos.

Las propiedades más importantes del lodo que se necesitan caracterizar son:

- Cantidad
- Contenido de sólidos totales
- Contenido de sólidos volátiles
- pH
- Materia orgánica
- Patógenos
- Nutrientes
- Metales pesados
- Contaminantes peligrosos

La composición del lodo depende principalmente de las características del influente del agua residual que entra a las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los procesos de tratamiento usados. Entre más industrializada esté una ciudad, tendrá mayores posibilidades de tener un contenido de metales pesados mayor, y será un problema para la aplicación del lodo al suelo. Los requerimientos para los pretratamientos industriales y los programas de prevención de contaminantes, así como los procesos avanzados de tratamiento en las aguas residuales y lodos, generalmente tenderán a reducir los niveles de contaminantes del lodo final que sale de las plantas de tratamiento.

La composición química del lodo puede variar grandemente entre las plantas de tratamiento y también en el tiempo. Esta variabilidad en la composición del lodo, subraya la necesidad de un programa de muestreo firme que aporte una composición estimada confiable del lodo (Ostergaard, 1997).

2.14.3.1. Cantidad del lodo residual

La cantidad de lodo que se aplicará al suelo, afectará la evaluación del terreno y el diseño en varios aspectos importantes, incluyendo la superficie de suelo necesaria, tamaño del equipo de transportación, instalaciones de almacenamiento y costos. La cantidad de lodo disponible, también afectará la selección de las prácticas de aplicación (p.e. aplicación a suelos agrícolas, forestales, sitios de contacto público o recuperación de terrenos), así como las dosis de aplicación y la agenda de operación.

La cantidad del lodo puede medirse en dos formas: en volumen del lodo húmedo, el cual incluye el contenido de agua y el contenido de sólidos, o en masa de los sólidos secos del lodo. El volumen del lodo es expresado en galones, litros o en metros cúbicos, mientras que la masa usualmente se expresa en términos de peso, en unidades de toneladas métricas. Debido a que el contenido de agua puede ser alto y muy variado, la masa de los sólidos secos del lodo, es usada a menudo para comparar el lodo con las diferentes proporciones de agua (EPA, 1984).

Los factores importantes que afectan el volumen y masa del lodo, son las fuentes del agua residual y los procesos de tratamiento del agua y lodo residual. Por ejemplo, las contribuciones industriales en las corrientes del agua residual, pueden incrementar significativamente la cantidad de lodo generado de una cantidad dada de agua residual. También, al incrementar el grado de tratamiento del agua residual generalmente incrementa el volumen del lodo residual. Además, algunos procesos de tratamiento reducen el volumen del lodo, algunos reducen la masa del lodo y algunos incrementan la masa del lodo mientras mejoran otras características del lodo (EPA, 1984).

2.14.3.2. Contenido de sólidos totales

El contenido de sólidos totales (ST) del lodo residual, incluye a los sólidos suspendidos y sólidos disueltos y usualmente es expresado como el

porcentaje de los sólidos totales presentes en un lodo residual. Los sólidos totales pueden afectar el potencial de los sistemas de diseño de aplicación del lodo en varios aspectos, incluyendo:

- *Tamaño de los sistemas de transportación y almacenamiento.* Si el contenido de sólidos es alto, será más bajo el volumen del lodo que se transportará y almacenará debido al bajo contenido de agua que será manejada.
- *Modo de transporte:* Diferentes tipos de transportación para la aplicación del lodo (pipas, camiones, etc.) serán usados dependiendo del contenido de sólidos del lodo que será aplicado.
- *Métodos y equipo de aplicación:* Los métodos de aplicación del lodo al suelo (esparcido superficialmente, inyectado o irrigado por aspersión) y los tipos de equipo de aplicación necesarios serán variados dependiendo del contenido de sólidos del lodo.
- *Métodos de almacenamiento:* Diferentes métodos de almacenamiento serán usados dependiendo del contenido de sólidos (p.e., tanques para el lodo líquido o pilas para el lodo deshidratado).

En general, es menos costoso transportar el lodo con un alto contenido de sólidos (lodo deshidratado) que transportarlo con un bajo contenido de sólidos (lodo líquido). Estos costos ahorrados en transporte deben compararse contra los costos de deshidratación de lodos. Típicamente, el lodo líquido tiene un contenido de sólidos de 2 a 12%, mientras el lodo deshidratado tiene un contenido de sólidos de 12 a 40% (incluyendo aditivos químicos). El lodo seco o composteado típicamente tiene un contenido de sólidos encima del 50%.

El contenido de sólidos totales depende, del tipo de lodo residual (primario, secundario o terciario), si el lodo ha sido tratado previo a la aplicación al suelo y cómo fue tratado. Los procesos de tratamiento tales como espesamiento, acondicionamiento, deshidratación, composteo y secado pueden bajar el contenido de agua y así incrementar el porcentaje de sólidos.

2.14.3.3. Contenido de sólidos volátiles

Los sólidos volátiles del lodo (SV), son compuestos orgánicos que son reducidos cuando el lodo es calentado a 550°C (1,022°F) bajo condiciones de oxidación. El contenido de sólidos volátiles del lodo, da una estimación del contenido del material orgánico. El contenido de sólidos volátiles es comúnmente expresado como el porcentaje de los sólidos totales que son sólidos volátiles. Los sólidos volátiles son un determinante importante de problemas potenciales de olores para los sitios de aplicación. La reducción de los sólidos volátiles es una opción para satisfacer los requerimientos de reducción de atracción de vectores, en E.U.A. Muchos lodos desestabilizados contienen 75 a 85% de sólidos volátiles base peso seco. Varios procesos de tratamiento, incluyendo digestión anaerobia, digestión aerobia, estabilización con cal y composteo, pueden usarse para reducir el contenido de sólidos volátiles, y así el potencial de olores. Una digestión aerobia, el método más común para estabilización de lodos, generalmente biodegrada cerca del 50% de los sólidos volátiles en un lodo residual.

2.14.3.4. pH

El pH del lodo puede afectar la producción de los cultivos en los sitios donde es aplicado el lodo, ya que altera el pH del suelo e influye en la asimilación de metales por la planta. Los niveles de patógenos y el control de vectores, son otras razones importantes para ajustar el pH del lodo. Un pH bajo en el lodo (menos de 6.5) promueve lixiviación de metales, mientras uno alto (mayor de 11) mata muchas bacterias y, en conjunción con el pH neutro o alto del suelo, puede inhibir el movimiento de metales pesados a través del suelo, algunas alternativas para la reducción de patógenos incluyen el incremento de los niveles del pH.

2.14.3.5. *Materia orgánica*

El nivel relativamente alto de materia orgánica en el lodo, le permite ser usado como un acondicionador de suelos, mejorando las propiedades físicas del suelo (p.e. incrementa la filtración y la capacidad de retención del agua). Las propiedades del lodo para acondicionar suelos son especialmente útiles para la recuperación de terrenos, por ejemplo, para las minas estropeadas.

2.14.3.6. *Patógenos*

Los microorganismos causantes de enfermedades conocidos como patógenos, incluyen a las bacterias, virus, protozoos, y huevecillos de helmintos, frecuentemente están presentes en las aguas residuales municipales y en el lodo crudo. Los patógenos pueden representar un peligro para la salud pública, si éstos son transferidos a los cultivos alimenticios sobre los suelos en el cual el lodo es aplicado, contenido en los escurrimientos de los sitios de aplicación a las aguas superficiales, o transportado lejos de los sitios por los vectores tales como insectos, roedores y aves. Por esta razón, la NOM-004-SEMARNAT-2002, establece los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (cuadro 2).

Cuadro 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN Coliformes fecales NMP/g en base seca	PATÓGENOS <i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	PARÁSITOS Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables
NMP= Número más probable

Generalmente, el lodo proyectado para aplicarlo al suelo, es estabilizado por los procesos químicos y biológicos. La estabilización reduce grandemente el

número de patógenos en el lodo, incluyendo bacterias, parásitos, protozoos y virus (Sagik *et al.*, 1979), así como el potencial de olores.

El óxido de calcio (CaO) es utilizado comúnmente para la estabilización de lodo residual, la adición de este químico produce un aumento en el pH.

Según Jiménez *et al.* (2000), es necesario mantener el pH en un mínimo de 12 por 2 horas para reducir la concentración de coliformes fecales y *Salmonella spp.* Por debajo de 200 como número más probable por gramo en base seca (NMP/g).

Sostiene la EPA (1987), EPA (1992), que los vegetales que crecen en los suelos infectados se contaminan fácilmente. Por ello, es vital conocer la supervivencia de los microorganismos patógenos en los vegetales y en el suelo, para poder evaluar así los problemas a que puede dar lugar un vertido y para controlar la eficacia en la eliminación de gérmenes de los diferentes tratamientos de depuración de las aguas residuales urbanas y lodos.

La supervivencia de los organismos patógenos en suelos, aguas, vegetales o en el aire, puede variar desde días a semanas, o incluso meses, dependiendo de la humedad, de la temperatura del medio y del tipo de organismo.

Las bacterias, los quistes de protozoos y los huevos de helmintos, se adhieren tenazmente a la superficie de las plantas y quedan así protegidos del ambiente externo.

Los factores más importantes son, desde luego, la humedad y la temperatura; la supervivencia es casi siempre máxima ante un contenido óptimo de humedad y a temperaturas adecuadas.

Las plantas pueden contaminarse directamente durante la aplicación del lodo, o indirectamente por contacto con el suelo. Diversos estudios demuestran que las bacterias patógenas humanas, las amibas y los huevos de helmintos, no son capaces de atravesar la superficie limpia de los vegetales sanos, pero pueden entrar fácilmente a través de grietas o heridas que interrumpen sus barreras naturales de defensa.

La luz solar reduce el número de organismos. También se ha comprobado que las plantas con hojas múltiples y pliegues profundos en la superficie, dan recuentos de coliformes más altos que las lisas.

Las bacterias patógenas se extinguen a números insignificantes (99% se extinguen) en 12 días (*Salmonella sp.*), o 18 días (coliformes fecales) a una temperatura de 15°C. Se ha observado que los coliformes sobreviven más de 34 días en alfalfa.

En cuanto a la supervivencia de *Salmonella* y *Shigella* en suelos y vegetales, se cree que es menor, o en todo caso igual, a la observada para coliformes.

La textura influye en la rapidez de su desaparición: Las bacterias fecales desaparecen más rápidamente en suelos arenosos que en los francos o en los arcillosos.

Los organismos de mayor preocupación a la salud asociados con la aplicación de aguas y lodos residuales son la *Salmonella*, debido a su predominio y patogenicidad; *Ascaris*, debido a la extrema resistencia del huevo; *Taenia*, debido a la exposición del ganado vacuno y virus, debido a su habilidad para resistir la desactivación y penetrar el suelo, y la dificultad de su monitoreo.

2.14.3.7. Nutrimientos

Los nutrientes presentes en los lodos tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), entre otros, son esenciales para el crecimiento de las plantas. El nivel de nutrientes es importante para determinar las dosis de aplicación de lodo. Niveles excesivos de nutrientes debido a las altas dosis de aplicación, pueden resultar en una contaminación ambiental del agua subterránea y superficial y debe ser evitado.

Los niveles de nutrientes, particularmente de nitrógeno, pueden variar significativamente por esta razón los análisis deben realizarse con el lodo actual que será aplicado al suelo. Típicamente, los niveles de nutrientes en el lodo

son considerablemente más bajos que los de fertilizantes comerciales. Especialmente potasio, el cual está usualmente a menos del 0.5%. De esta manera, la aplicación de fertilizantes complementarios (usualmente) será indispensable con el lodo, para sostener un crecimiento vegetativo óptimo.

2.14.3.8. Metales pesados en lodos

Los metales pesados son elementos electropositivos, que presentan un número, peso atómico y densidad superiores a 5 gr cm^{-3} (Tirelf, 1981 y Duffus, 1988). De manera natural, se encuentran ampliamente distribuidos y son movilizados por los ciclos biogeoquímicos.

El destino de los metales pesados en el suelo dependen de un gran número de procesos edafogénicos y propiedades que se dan en él como: disolución, complejación, migración, precipitación, oclusión, difusión, formación de enlaces con la materia orgánica (M.O.), adsorción y absorción por la microbiota y la volatilización; todos estos procesos son controlados por diferentes propiedades de los suelos como son: pH, potencial redox, porcentaje de M.O., capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.), contenido de carbohidratos, óxidos e hidróxidos de hierro y magnesio y los minerales arcillosos (Tamaríz, 1996 y Basta *et al.*, 1993).

Las cantidades de metales disponibles están controladas en gran parte por el intercambio iónico. Además posiblemente existen ciertos procesos de adsorción que comprenden uniones covalentes con ciertos grupos funcionales de las superficies de las arcillas. El intercambio de cationes y las quelaciones de la materia orgánica son los principales procesos que facilitan la disponibilidad de los metales.

En general, las propiedades del suelo que ejercen un efecto directo en la adsorción de los metales son: pH > M.O. > C.I.C. (Basta *et al.*, 1993).

El pH es uno de los parámetros más importantes que controlan las formas de los elementos en el suelo, (López y López, 1990). Este influye de manera muy importante en la solubilidad y como consecuencia en la absorción de los metales por las plantas. El aumento del pH reduce la asimilación y absorción del aluminio, cobre, hierro, cobalto, zinc y manganeso (Loué, 1988). El cadmio y el plomo en suelos de cultivo pueden incrementar sus concentraciones al disminuir el pH del suelo (Holgrem, *et al.*, 1993).

El incremento en los valores de pH y del contenido de M.O. es fundamental para reducir la movilidad y la disponibilidad de los metales pesados en el suelo, dicho comportamiento es atribuido a la formación de complejos órgano - metálicos (Abdelrahman y Al-Ajmi, 1994, Kuo y Baker, 1980).

Según Ahumada *et al.* (2004) se sabe que la materia orgánica y otros componentes aportados al suelo por los lodos pueden modificar la distribución y movilidad de metales pesados, lo que podría afectar principalmente la asimilabilidad de ciertos elementos como Cu y Zn.

La M.O. presente en el suelo contiene una fuerte proporción de metales pesados y en él juegan un papel importante en el proceso de nutrición vegetal. Los suelos muy pobres en M.O. generalmente son pobres en metales pesados. Por lo tanto, la M.O. que tiene metales pesados es una fuente importante de minerales esenciales para la planta, ya que estos son retenidos como coloides orgánicos e inorgánicos y de esta manera son disponibles para los sistemas biológicos (Zunino y James, 1997).

La textura del suelo interviene en la dinámica de los metales, ya que la formación de macroporos puede causar una rápida infiltración y redistribución del agua y de los solutos del suelo, modificando el pH y la C.I.C. y por consecuencia la disponibilidad de los metales (Boekhold y Van der Zee, 1992). Saeki *et al.* (1993), mencionan que existe un incremento general en la concentración de metales pesados de las fracciones gruesas a las finas, por lo

tanto, las arcillas contienen mayores cantidades de metales pesados. Por otro lado, los suelos con textura fina o con horizonte con altos niveles de M.O. tienen una mayor capacidad de adsorción de metales que los suelos con textura arenosa y baja cantidad de M.O. (Stahl y James, 1991).

Entre los metales pesados existentes, algunos son micronutrientes esenciales para las plantas como lo son el Cu y el Zn, pero otros como Cd, Pb, Cr, Ni, Hg y Co, no lo son y pueden, a partir de una determinada concentración, resultar tóxicos para algún componente de la cadena trófica suelo-planta-animal-hombre. La acumulación de metales pesados puede ocurrir en tallos, hojas y fruto, causando problemas muy variados.

Cuando los lodos residuales son manejados en forma inadecuada, pueden constituir un riesgo a la salud (As, Cd, Hg, Pb, Se, y Zn), a los cultivos (Cu, Ni, y Zn), y a los ecosistemas del suelo y agua (N, P).

El Cd, Ni, Cu, y Zn, son los metales más problemáticos debido a sus efectos negativos sobre el metabolismo y la fisiología de la planta, tales como baja actividad nitrogenásica y fosfatásica, disminución en la respiración mitocondrial, daños en los cloroplastos, cierre de los estomas, baja tasa de transpiración y fotosíntesis, reducción de turgencia y clorosis, entre otros. Estos efectos son de gran preocupación en la colectividad, por lo que muchos investigadores se han dedicado al estudio de los mismos, cuando estos metales han sido incorporados al suelo a través de los residuos orgánicos, especialmente cuando se aplican lodos residuales (Wallace *et al.*, 1977).

Basándose en evaluaciones extensivas del riesgo de los metales pesados del lodo, la NOM-004-SEMARNAT-2002 regula 8 metales en el lodo que será aplicado al suelo, estableciendo sus límites máximos permisibles (cuadro 3).

Cuadro 3. Límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos y su clasificación.

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES (mg kg ⁻¹) En base seca	BUENOS (mg kg ⁻¹) En base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7 500

Las concentraciones de metal en el lodo en gran parte dependen del tipo y cantidad de los residuos industriales descargados dentro de los sistemas de tratamiento del agua residual. Debido a que los metales generalmente son insolubles, éstos se presentan en el lodo en concentraciones más altas, que en las aguas residuales, y la deshidratación del lodo tiene un impacto mínimo en la reducción de las concentraciones del metal en el lodo que es destinado para aplicaciones al suelo. El pretratamiento del agua residual industrial descargada dentro de los sistemas residuales ha sido efectivo para reducir el contenido de metales, del lodo generado en una planta de tratamiento (EPA, 1995).

Según Hue (1996), el contenido de metales pesados es el factor más importante para determinar el uso de lodos.

La acumulación de metales en determinados tejidos u órganos es variable, algunos como por ejemplo el Cr y Pb son bloqueados a nivel radicular, otros, como Cd y Hg son más zootóxicos-fitotóxicos, es decir, pueden acumularse en tejido vegetal hasta concentraciones tóxicas para animales, sin efecto adverso para la planta, por el contrario la elevada fitotoxicidad del Cu, Ni y Zn hacen que el vegetal actúe de barrera de protección frente a la cadena trófica. En general, las hortalizas tienden a asimilarlos con mayor facilidad que las gramíneas,

siendo al mismo tiempo más sensibles a la toxicidad las primeras y más tolerantes las segundas.

Con respecto a la preocupación de la salud humana acerca del uso de lodos tratados sobre los cultivos, el Cromo es el metal considerado de mayor preocupación, debido a que se le considera como agente cancerígeno.

2.14.3.9. Contaminantes peligrosos

El lodo no está incluido en una lista de residuos específicos denominados peligrosos por EPA, ni los datos disponibles sugieren que el lodo manifiesta características de un residuo peligroso, la cual incluye corrosividad, reactividad, explosividad y toxicidad. La naturaleza no peligrosa del lodo, de cualquier modo, no puede ser asumida.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La presente investigación se realizó en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la Ciudad de Saltillo, Coahuila, México. En la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada a los 25°21'14" Latitud Norte y 101°2'2" Longitud Oeste y 1767 msnm, dicha PTAR colinda al Norte con el jardín botánico "Ing. Gustavo Aguirre Benavides", al Sur con el jardín hidráulico, al Este con el departamento de Fitomejoramiento y al Oeste con el departamento de horticultura.

El clima que predomina en la región es una modificación propuesta por García (1973), a la clasificación de Köppen, que presenta un clima con la siguiente clasificación: BWhw(x')(e), muy seco, semicálido, con invierno fresco, extremoso, con lluvias de verano y precipitación invernal superior a 10% de la total anual, con temperatura media anual de 19.8 °C y precipitación media anual de 298.5 milímetros.

3.2. METODOLOGIA

En la planta de tratamiento de aguas residuales, se identificaron y localizaron los diferentes puntos de muestreos ubicándolos en las diferentes etapas de tratamiento de agua residual y se realizaron muestreos simples en los sitios definidos.

3.3. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREOS

Se localizaron y ubicaron ocho diferentes puntos de muestreos (considerados como tratamientos) en las diferentes etapas de tratamiento de agua residual de la PTAR y donde en cada etapa de tratamiento se depositan lodos residuales estos puntos se muestran en la figura 1.

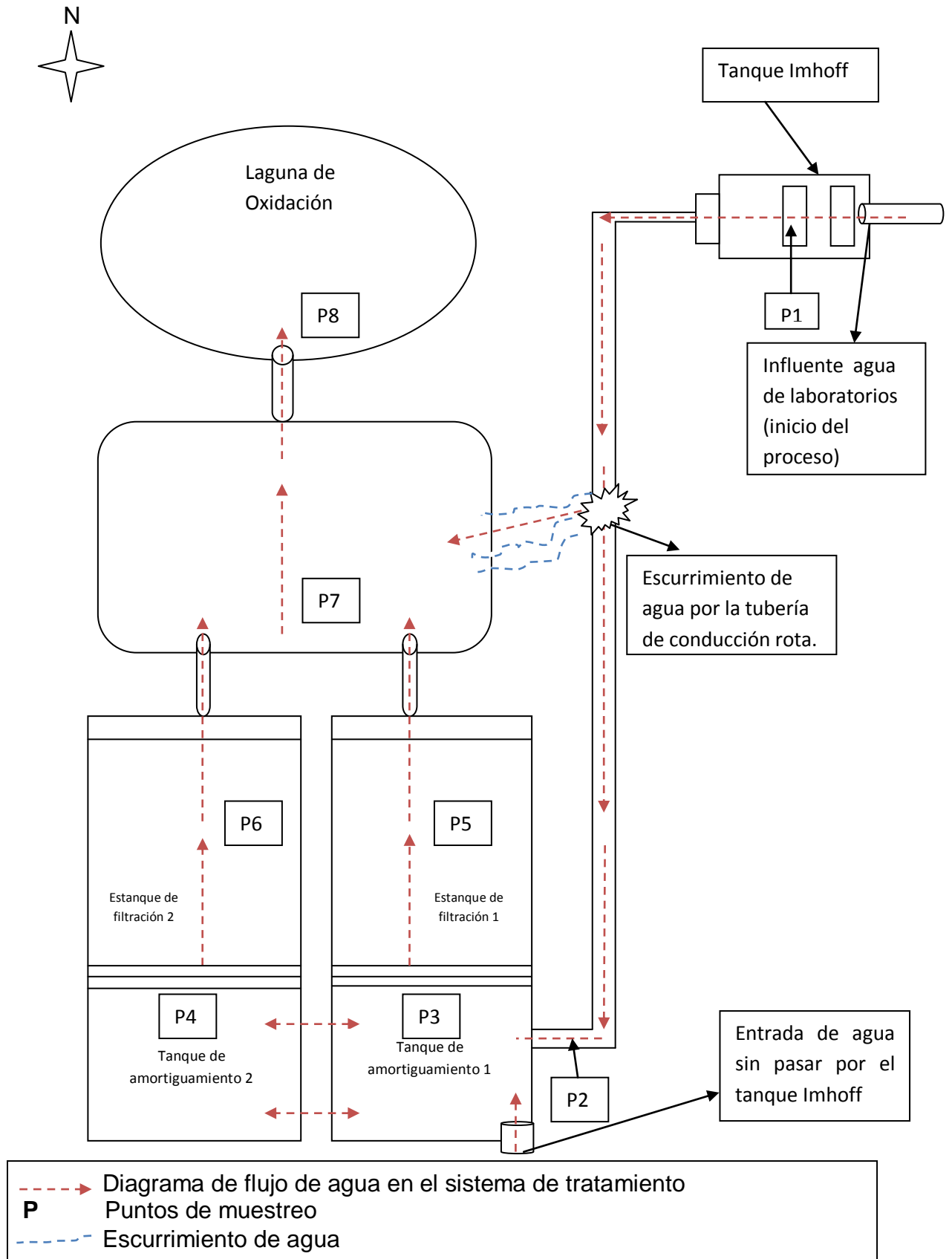


Figura 1. Croquis de la planta de tratamiento de agua residual y puntos de muestreo

Una vez localizados los puntos de muestreos, se tomaron muestras simples de lodos residuales un día por semana durante doce semanas consecutivas en los mismos puntos de muestreo durante los periodos de mayor actividad en la Universidad, es decir, en los meses de febrero a mayo.

3.4. OBTENCION Y PREPARACION DE MUESTRAS

La obtención de las muestras de lodos se realizó, recolectando cuatro kilogramos aproximadamente de lodo semisólido de cada punto de muestreo depositándolo en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas, obteniendo así 32 kilogramos de lodos aproximadamente en los ocho puntos de muestreo.

Posteriormente se seco el lodo a la intemperie durante 24 horas, se tamizo a dos milímetros de diámetro y se almaceno para su posterior análisis. Al tiempo de ir obteniendo los diferentes tratamientos de lodo se le determino en el laboratorio de química de suelos los análisis que se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Parámetros de interés evaluados

PARÁMETRO	MÉTODO
Metales pesados totales	Calcinación y recuperación con Ácido Nítrico
Metales pesados hidrosolubles	Relación lodo:agua 5:100
Materia orgánica total	Calcinación en mufla
Materia orgánica oxidable	Walkley y Black
pH	Potenciómetro
Conductividad Eléctrica (C.E.)	Extracto de saturación en pasta

Para la cuantificación de metales pesados totales se calcino en mufla dos gramos de lodo secado y tamizado, a las cenizas recuperadas se les agrego Ácido Nítrico (HNO_3) y se aforo a 100 ml. Por otra parte para los metales pesados hidrosolubles se peso cinco gramos de lodo, se les agrego 100 ml de agua destilada y se agito por 24 horas aproximadamente, se filtró y se obtuvo la muestra liquida en frascos de plásticos para ser leídas en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica SpectrAA VARIAN 5.

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental usado para el análisis de los resultados de los metales pesados en su forma total fue un diseño completamente al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento, utilizando para esto el paquete de diseños experimentales de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Versión 2.5, para el análisis de la comparación de medias, fue utilizado el mismo paquete (Olivares, 1994).

3.6. VARIABLES EVALUADAS

Las variables se evaluaron acorde a los objetivos planteados considerando como metales pesados a los elementos Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Zinc (Zn), además, tomando en cuenta algunas propiedades químicas como pH, C.E., contenido de materia orgánica (M.O.) y otros elementos tales como Cobalto (Co), Fierro (Fe), Manganeso (Mn), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Potasio (K). Todos ellos se analizaron en su forma total e hidrosoluble.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se exponen y discuten en función de cada variable. La información que se presenta corresponde a los análisis de laboratorio que se realizaron a los diferentes tratamientos con sus respectivas repeticiones. Para los metales pesados, pH, M.O. y C.E. se realizó el análisis de varianza (ANVA) correspondiente y la comparación de medias y para los hidrosolubles nada más la media aritmética.

4.1. METALES PESADOS TOTALES

En el cuadro 5 se presentan los resultados del contenido de metales pesados totales en los diferentes tratamientos de lodo residual.

En el cuadro 5 podemos observar que el **Cromo (Cr)** presenta diferencia significativa entre tratamientos, concentrándose más en los tratamientos 6, 1 y 4 y estabilizando las concentraciones en los tratamientos 3, 5 y 7 sin embargo, las menores concentraciones detectables de Cr se obtuvieron en los tratamientos 2 y 8. Las altas concentraciones de Cr se presentan sobre todo en puntos donde se tiene menor o nula presencia de plantas de carrizo real (*Gynerium sagitta*) que puedan realizar alguna extracción. Resultados similares encuentra Hue (1996), quien sostiene que la acumulación de metales pesados en determinados tejidos u órganos es variable, algunos como por ejemplo el **Cr** y **Pb** son bloqueados a nivel radicular, por lo que se plantea que las plantas de carrizo real tienen un efecto directo en la concentración y distribución heterogénea de este elemento respecto a los demás tratamientos.

Sin embargo, era de esperarse mayores concentraciones de Cr debido a que se hacen importantes descargas de aguas residuales procedentes de los diferentes laboratorios de la Universidad, donde el Cr es utilizado desde hace muchos años para la determinación de la M.O. del suelo y la demanda química de oxígeno de aguas residuales (DQO).

Cuadro 5. Comportamiento de los metales pesados en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN (mg kg⁻¹).

TRATAMIENTOS	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
T1	ND	51.25 b	130.00 a	130.00 a	50.00	2437.50 a
T2	ND	36.25 c	26.25 c	68.75 bc	42.50	537.50 cd
T3	ND	30.00 cd	83.75 ab	40.00 c	26.25	812.50 c
T4	ND	52.50 ab	96.25 ab	90.00 b	32.50	1362.50 b
T5	ND	25.00 cd	21.25 c	58.75 bc	43.75	263.75 d
T6	ND	63.75 a	123.75 b	86.25 b	30.00	1637.50 b
T7	ND	26.25 cd	16.25 c	76.25 b	32.50	337.50 cd
T8	ND	22.50 d	6.25 c	37.50 c	31.25	125.00 d
CV %	ND	21.73	49.67	31.87	44.82	37.730

ND = no detectable

Medias con igual letra son estadísticamente iguales (DMS $p \leq 0.05$)

Como se puede ver en el cuadro 5 el **Cobre (Cu)** presenta diferencias significativas entre tratamientos, con valores que van desde 6.25 hasta 130 mg kg⁻¹. Los tratamientos 1, 6, 3 y 4, aunque son diferentes no lo son desde el punto de vista estadístico. Los tratamientos 2, 5, 7 y 8 no son diferentes estadísticamente entre ellos pero son significativamente diferentes a los anteriormente señalados. Los valores más altos se presentan sobre todo en los puntos con mayores impurezas es decir donde se tienen las descargas directas del agua residual y la mayor producción de lodos, en este caso el tanque Imhoff y el tanque de amortiguamiento 1 (tratamiento 1 y 3 respectivamente). En el tratamiento 7 y 8 que son respectivamente el punto previo a la laguna de oxidación y la laguna de oxidación se tienen los resultados más bajos.

El **Níquel (Ni)** aunque no presento diferencias significativas entre tratamientos, si podemos observar que los valores encontrados varían de 26.25 a 50.00 mg kg⁻¹ desde el punto de vista estadístico podemos pensar que este elemento se distribuye homogéneamente, sin embargo una diferencia importante como la que presentan los tratamientos 1 y 3 hacen pensar en un posible riesgo para los cultivos como lo menciona Wallace *et al.*, (1977), quien encontró que el Cu, Ni,

y Zn, si se acumulan y si no son controlados adecuadamente pueden llegar a ser excesivos.

El Cadmio (Cd). El Cd no fue detectado por el método utilizado lo que muestra que las concentraciones son nulas o extremadamente pequeñas.

En general se puede observar en el cuadro 5 que la mayor concentración de elementos se presenta en el punto uno, que es donde llega el agua por primera vez y donde no ha recibido ningún tratamiento todavía, además en este punto se tiene la mayor producción de lodo, aun con todo esto las concentraciones de metales pesados se encuentran en menor cantidad a los valores permisibles exigidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002, mostradas en el cuadro 3. Lo cual dio como resultado un lodo de excelente calidad con respecto a estos metales pesados totales. El elemento que puede requerir un control aunque no inmediato y que hace que cambie la clasificación de excelente a bueno sería el Zn.

En los anexos se presenta el análisis de varianza (ANVA) detallado para cada elemento.

4.2. OTROS ELEMENTOS IMPORTANTES

Dentro del análisis de metales pesados en los lodos residuales se detectaron otros elementos importantes considerados como nutrimentos esenciales para las plantas, estos se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Comportamiento de elementos importantes en la caracterización del lodo residual en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN.

TRATAMIENTOS	Co mg kg ⁻¹	Fe %	Mn mg kg ⁻¹	Ca %	Mg %	Na %	K %
T1	15.0 a	0.24	112.50 a	14.18 b	0.51 d	0.43	0.07 b
T2	12.5 abc	0.20	77.50 cd	19.39 a	1.73 a	0.41	0.08 b
T3	6.3 d	0.16	35.00 f	6.73 d	0.45 d	0.46	0.09 ab
T4	10.0 c	0.22	66.25 de	10.44 bcd	0.58 cd	0.62	0.10 ab
T5	13.8 ab	0.10	77.50 cd	23.83 a	0.68 cd	0.38	0.06 b
T6	10.0 c	0.25	52.50 ef	8.33 cd	0.59 cd	0.36	0.14 a
T7	10.0 c	0.28	92.50 bc	12.73 bc	1.48 ab	0.41	0.13 a
T8	11.3 bc	0.18	98.75 ab	13.59 b	1.13 bc	0.38	0.10 ab
CV %	19.59	45.57	16.57	25.25	41.67	27.53	36.75

Medias con igual letra son estadísticamente iguales (DMS $p \leq 0.05$)

A excepción de los elementos Fe y Na, todos los demás elementos analizados muestran diferencia significativa entre tratamientos. Debido a que estos elementos son considerados como nutrimentos esenciales para las plantas es importante mencionarlos dentro de la caracterización de lodo si se pretende aplicar al suelo como mejorador agrícola.

4.3. METALES PESADOS HIDROSOLUBLES

En el cuadro 7 se presentan los valores de algunos metales pesados en su forma hidrosoluble, considerados también en la caracterización del lodo residual.

Como se esperaba el Cd no fue detectado, en cambio el Cr, Pb, Ni, Cu y Zn se detectaron pero en valores muy bajos. Que van de 0.5 a 11.5 mg kg⁻¹ esto es normal ya que las formas hidrosolubles de los metales pesados y en general de los elementos, siempre se presenta en cantidades más pequeñas debido al bajo poder de extracción del agua y/o a la insolubilidad de los compuestos en los cuales se encuentran estos, es así que siempre en esta forma se encontraran en menor cantidad que las formas totales extraídas con ácidos fuertes concentrados.

Cuadro 7. Concentraciones de elementos hidrosolubles, importantes en la caracterización del lodo residual en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN (mg kg⁻¹).

TRATAMIENTOS	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
T1	ND	1.0	1.0	1.5	1.0	11.5
T2	ND	0.5	0.5	1.5	1.0	0.50
T3	ND	1.0	0.5	1.5	1.0	8.00
T4	ND	1.0	0.5	1.5	0.5	6.50
T5	ND	0.5	0.5	3.5	1.0	1.50
T6	ND	1.0	1.0	3.0	0.5	8.50
T7	ND	0.5	1.0	1.0	1.0	0.50
T8	ND	0.5	0.5	4.0	1.0	0.50

ND = no detectable

Como lo mencionan Manzione y Merrill, (1989), el pH es un factor esencial la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino. Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles, tal es el caso del Cr. La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo (y por tanto, también sus solubilidad).

4.4. OTROS ELEMENTOS HIDROSOLUBLES IMPORTANTES

En el cuadro 8 se presentan las medias de tratamientos para otros elementos hidrosolubles considerados como nutrimentos esenciales para las plantas.

El Co y el Mn fue no detectable (ND) en este caso la influencia del pH en la solubilidad de los elementos es un factor muy importante a considerar ya que de ello depende la disponibilidad de los nutrimentos para las raíces de las plantas y sabiendo que las concentraciones totales presentadas en el cuadro 6 fueron mucho menores, no se esperaba detectar estos elementos , sobre todo Fe, Mn y Co, no de esta forma los elementos alcalinotérreos como Ca, Mg, K y Na, que son elementos muy abundantes en nuestro medio ambiente.

Cuadro 8. Concentraciones de otros elementos hidrosolubles, importantes en la caracterización del lodo residual en las diferentes etapas de la PTAR de la UAAAN (mg kg⁻¹).

TRATAMIENTOS	Co	Fe	Mn	Ca	Mg	Na	K
T1	ND	42.5	ND	1450	207.5	690	110
T2	ND	5.0	ND	1380	335.0	540	85
T3	ND	23.5	ND	2225	1989.0	1810	435
T4	ND	13.5	ND	1465	464.5	1085	175
T5	ND	9.0	ND	1185	189.0	515	90
T6	ND	36.5	ND	3025	1648.0	845	125
T7	ND	7.5	ND	940	203.5	605	120
T8	ND	9.5	ND	945	196.5	545	95

ND = no detectable

Como ya se menciona anteriormente que la influencia del pH en la solubilidad de los elementos es un factor determinante, se tiene el siguiente ejemplo, en un suelo puede haber mucho K pero si no está soluble, a la planta no le sirve para nada ya que no lo puede tomar. Pues el pH influye en la solubilidad del K y de los demás minerales y de acuerdo con Manzione y Merrill, (1989), en la investigación resultaron algunos elementos solubles disponibles para las plantas en los lodos residuales.

4.5. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS IMPORTANTES DE LOS LODOS RESIDUALES PARA SU CLASIFICACIÓN

De acuerdo a la EPA, (1995), determinar la conveniencia del lodo para aplicarlo al suelo, por la caracterización de sus propiedades, es el primer paso indispensable en la planeación y diseño de un sistema de aplicación de lodo. Menciona también que algunas de las propiedades más importantes de este material que se necesitan caracterizar son: pH, C.E., M.O., entre otras.

Con base a lo antes mencionado los valores de pH concentrados en el cuadro 9 no presentan diferencias significativas entre tratamiento identificándose el valor más bajo en el tratamiento 6 (pH 6.8) y el valor más alto en los tratamientos 1, 5 y 7 (pH 7.2) sin embargo todos los valores se acercan a la neutralidad lo cual puede inhibir el movimiento de metales pesados a través del suelo, esto también de acuerdo a reportes elaborados por la EPA. (1995).

Los valores usualmente encontrados en lodos residuales municipales, mayoritariamente, son cercanos a la neutralidad (Ayuso *et al.*, 1992, Bernal *et al.*, 1998, Pascual *et al.*, 1998).

Los valores de C.E. presentan diferencia significativa entre tratamientos, los más altos se concentran en los tratamientos 2 y 6 con valores de 2163 y 2213 $\mu\text{S cm}^{-1}$ respectivamente y los valores más bajos en los tratamientos 5 y 8 con su respectiva concentración en $\mu\text{S cm}^{-1}$ 1375 y 1395, (cuadro 9).

Durante las etapas de tratamientos del agua residual la salinidad se va concentrando de manera diferente en todos los. Las concentraciones de sales se debe principalmente por los elementos calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) según lo fundamenta Porta *et al.*, 2003, por lo que una aplicación de lodo al suelo arriba de 8 mS cm^{-1} causa problemas de salinidad en el suelo y solo se puede plantar árboles y plantas que resistan mucho la sal.

Cuadro 9. Comportamiento de algunas características químicas importantes en la caracterización del lodo residual.

TRATAMIENTOS	pH	C.E. $\mu\text{S cm}^{-1}$	M.O. (calcinación) %	M.O. (Walkley y Black) %
T1	7.2	1755 abc	32.50 b	14.20 c
T2	7.0	2163 a	31.25 bc	16.60 bc
T3	7.0	2075 b	73.75 a	48.39 a
T4	7.1	1900 abc	33.75 b	22.83 bc
T5	7.2	1375 c	17.50 bc	13.88 c
T6	6.8	2213 a	57.50 a	31.49 ab
T7	7.2	1558 bc	21.25 bc	16.09 bc
T8	7.1	1395 c	12.50 c	10.70 c
CV %	3.3	22.95	37.23	53.60

Medias con igual letra son estadísticamente iguales (DMS $p \leq 0.05$)

La M.O. se analizo mediante dos métodos reportándose los resultados en el cuadro 9, esto con el fin de conocer la M.O. total en los lodos y la fácilmente oxidable.

En ambos métodos hay diferencia significativa entre tratamientos variando las concentraciones desde 12.5 % hasta 73.75 % con el método de calcinación, por otra parte con el método de Walkley y Black se obtuvieron valores menores al primer método siendo estos los valores del tratamiento 3 y 6 los que presentan mayor contenido de M.O.

La concentración de M.O. esta dada en función de las etapas del tratamiento de las aguas residuales, observándose que en el tratamiento 3 para ambos métodos el contenido de M.O es relativamente alto debido a la descarga directa de agua en el tanque de amortiguamiento 1 sin pasar por el tanque Imhoff, lo cual altera la concentración de los demás tratamientos, notándose una disminución en la concentración de M.O. en los últimos dos tratamientos.

Sin embargo las concentraciones de M.O. en ambos métodos son relativamente altos con lo que de acuerdo con la EPA. (1995), un nivel relativamente alto de M.O. en el lodo, permite ser usado como un acondicionador de suelos, mejorando las propiedades físicas del suelo (p.e. incrementa la filtración y la capacidad de retención del agua). También al incrementar los valores del contenido de M.O. reduce la movilidad y la disponibilidad de los metales pesados.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación bajo los objetivos y la hipótesis planteada, se concluye lo siguiente:

Con respecto a la concentración de metales pesados totales, no se tiene riesgo potencial de alcanzar niveles elevados en la acumulación del lodo residual a corto plazo, puesto que la concentración de los mismos es inferior a las establecidas en los límites máximos permisibles de la NOM-004-SEMARNAT-2002. Lo cual dio como resultado un lodo de excelente calidad con respecto a estos metales pesados totales.

Dado que resulto ser un lodo tipo excelente con clase A respecto al contenido de metales pesados totales, la NOM-004-SEMARNAT-2002, establece el aprovechamiento de estos lodos en usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación, usos forestales, mejoradores de suelos, y usos agrícolas, sujetándose a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme en la normatividad vigente en la materia.

Finalmente aunque los lodos presentan buenas características físicas y químicas se recomienda realizar una estabilización de estos previo a su uso o disposición final dado que se deben considerar otras características entre ellas la patógena, al mismo tiempo se debe aclarar que la determinación de la calidad del lodo residual no reduce el grado de riesgo asociado a la disposición final, sino que permite un conocimiento sobre el riesgo y de esta manera el uso de técnicas para reducirlo.

VI. LITERATURA CITADA

- Abdelrahman, H. A., Al-Ajmi, H. 1994. Heavy metals in some water and wastewater irrigated soils of Oman. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 25 (5-6): 605-613.
- Ahumada, I., Escudero, P., Carrasco, A., Castillo, G., Ascar, L. Fuentes, E. 2004. Use of Sequential Extraction to Assess the Influence of Sewage Sludge Amendment on Metal Mobility in Chilean Soils. *J. Environ. Monit.* (6): 327- 334.
- Ayuso, M., Hernández, T., García, C., Costa, F. 1992. Utilización de un lodo aerobio como sustitutivo de fertilizantes fosforados inorgánicos. *Suelo y Planta.* (2): 271-280.
- Azevedo, M.L., Ferracciú, L.R., Guimaraes, L.R. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Sci. Agric.* 60, 793–806.
- Basta, N. T., Pantone, D. J., Tabatabai, M. A. 1993. Path analysis of heavy metal adsorption by soil. *Published in Agon. J.* 85: 1054-1057.
- 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.
- Bernal, M., Navarro, A., Sánchez, M. M., Roig A., Cegarra, J. 1998. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biol. Biochem.* 30 (3): 305-313.
- Boekhold, A. E., Van der Zee S. E. 1992. Significance of soil chemical heterogeneity for spatial behavior of Cadmium in field soils. *Soil. Sci. soc. Am. J.* 56: 747-745.
- Cardozo, V. L., Ramírez, E., Moeller, G., V. Escalante, 1998. *Criterios para el aprovechamiento de aguas residuales.* Instituto mexicano de tecnología del agua (IMTA). Morelos, México.

- Celis, J., Sandoval, M., Zagal, E., Briones, M. 2006. Efecto de la Adición de Biosólidos Urbanos y de Salmonicultura sobre la Germinación de Semillas de Lechuga (*Lactucasati va L.*) en un Suelo Patagónico. Rev. Ciencia del Suelo y Nutr. Veg. 6 (3): 13- 25.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. 1976. Manual de tratamiento de aguas. Limusa. México. pp: 34 – 45.
- Duffust, H. 1988. Toxicología ambiental. Omega. España. pp 24-94.
- Fair, G. M., Geyer, J. C., Okun, D. A. 1966. Water and wastewater engineering. Vol. 1. Water supply and wastewater removal. John Wiley Sons, Inc. Japan. pp: 234 -454.
- García, E. 1973. Precipitación y probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evaluación, Volumen 13.
- Holgrem, G. G., Mayer, M. H., Chaney, R. L., Daniel, R. B. 1993. Cadmium, Lead, Sinc, Copper and Nickel in agricultural soils of United States of America. J. Environ. Qual. 22:335-348.
- Hue, N.V. 1996. Land application of biosolids. Environmental Soil Chemistry, University of Hawaii. Sludz. Htm at agrss. Sherman. Hawaii. Edu. 9 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) 1998. Tratamiento y aprovechamiento de residuos de curtiduría por composteo y vermicomposteo. Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550.
- Jiménez, B., Barrios, J. A., Maya, C. 2000. “Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado”. Instituto de ingeniería UNAM. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: memorias técnicas México D.F. 2000. p. 1 – 13.
- Juárez, J. J. 2005. Aguas residuales: contaminantes y tratamiento. España.

- Kuo, S., Baker, A. S. 1980. Sorption of Cooper, Zinc and Cadmium by some acid soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44: 969-974.
- Ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. DOF. 1998. México, D.F.
- López, J. L., López, J. M. 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. Ediciones Mundi - Prensa. España. 264 p.
- Loué, L. 1988. Los microelementos en la agricultura. Ediciones Mundi - Prensa. España. 326 p.
- Manziona, M.A., Merrill, D.T. 1989. Trace Metal Removal by Iron Coprecipitation: Field Evaluation. Electric Power Research Institute.
- Martínez, O. V. 2001. Utilización de aguas residuales en el cultivo y aprovechamiento de *Kochia scoparia* (L.) (Schrad). UAAAN.
- Metcalf, Eddy. 1991. Wastewater engineering treatment and disposal reuse. Third edition. Mc. Graw Hill.
- Metcalf; Eddy. 1998. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3ª. Edición. Vol.I. McGraw-Hill. México. pp: 28 – 123.
- Mujeriego, R. 1990. Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya. España. pp: 14 – 36.
- Norma Oficial Mexicana. DOF. 1997. NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en agua y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana. DOF. 2002. NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección Ambiental, Lodos y Biosólidos. Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos

Naturales. Diario Oficial de la Federación. Publicada el 15 de Agosto del 2003.

Olivares, S. E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL Versión 2.5. Facultad de Agronomía UANL. Marín, N.L.

Ostergaard H. B. 1997. Sewage sludge amended soils and heavy metals. Birgitpr.htm at weber.u.washington.edu. 8 p.

Pascual, J., Hernández, T., García, C., Ayuso, M. 1998. Enzymatic activities in an arid soil amended with urban organic wastes: laboratory experiment. *Biores. Tech.* 64: 131-138.

Pissani, Z.J.F. 1998. Tratamiento y aprovechamiento agrícola de las aguas residuales. Postgrado, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N.L.

Porta, J., López, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-prensa. Madrid.

Reynolds, K. A. 2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. Universidad de Arizona. USA. pp: 1 – 3.

Saeki, K., Okazaki, M., Kubota, M. 1993. Heavy metals in a semi-enclosed hypereutropic system: Lake Teganuma, Japan. *Water, Air and Soil Pollution.* 69:79-91.

Sagik, B., Moore, B., Forber, C. 1979. Public health aspects related to the land application of municipal sewage effluents and sludges. In: Sopper, W.E., and S.M. Kerr, eds. *Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land.* University Park, PA: Pennsylvania State University Press. pp. 241-263.

Seoáñez, C. M. 1999. Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Ediciones Mundi – Prensa. pp: 49 – 95.

- Sorber, A. Charles. 1994. Biosolids, a blue print for public acceptance. *Water Environment and Technology*. Water Environment Federation. 6:5:61.
- Stahl, R. S., James B. R. 1991. Zinc sorption by B horizon soils a function of pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1529-1597.
- Tamaríz, J. V. R. 1996. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlizco, Puebla. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias UNAM.
- Tirelf, N. M. 1981. *Environment and health*. Ann Arbor Science. USA. 652 p.
- U.S. EPA. 1984. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA/625/10-84/003. Cincinnati, Ohio.
- U.S. EPA. 1987. Survival and transport of pathogens in sludge-amended soil: A critical literature review. EPA/600/2-87/028. Cincinnati, Ohio.
- U.S. EPA. 1990. National Sewage Sludge Survey: Availability of information and data, and anticipated impacts on proposed regulations. *Fed. Reg.* 55(218).
- U.S. EPA. 1992. Technical support document for land application of sewage sludge, Vol. I. EPA/822/R-93900/9 (NTIS PB93110583). Washington, DC.
- U.S. EPA. 1995. Process design manual: Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage EPA/625/R-95/001. Cincinnati, Ohio.
- Wallace, A., Romney, E., Alexander, G., Kinnear, J. 1977. Phytotoxicity and some interactions of the essential trace metals iron, manganese, molybdenum, Zinc, Copper, and Boron. *Soil Sci. Plant Anal.*
- Zunino, H., James, M. P. 1997. Metal-binding organic macromolecules in soil: 2 characterization of the maximum binding ability the macromolecules. *Soil. Sci.* 123: 188-202.

ANEXOS

ANALIS DE VARIANZA (ANVA) DE VARIABLES DE INTERES EVALUADAS

COBALTO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	205.468750	29.352678	8.6703	0.000
ERROR	24	81.250000	3.385417		
TOTAL	31	286.718750			

C.V.=16.59%

COBRE

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	72,861.718750	10408.817383	10.6388	0.000
ERROR	24	23,481.250000	978.385437		
TOTAL	31	96,342.968750			

C.V.=49.67%

CROMO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	6,646.875000	949.553589	13.6055	0.000
ERROR	24	1,675.000000	69.791664		
TOTAL	31	8,321.875000			

C.V.=21.73%

NIQUEL

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	1,905.468750	272.209808	1.0401	0.431
ERROR	24	6,281.250000	261.718750		
TOTAL	31	8,186.718750			

C.V.=44.82%

PLOMO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	25,171.875000	3,595.982178	6.563	0.000
ERROR	24	13,150.000000	547.916687		
TOTAL	31	38,321.875000			

C.V.=31.87%

FIERRO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	9440328.000000	1348618.250000	1.5806	0.189
ERROR	24	20478096.000000	853254.000000		
TOTAL	31	29918424.000000			

C.V.=45.57%

ZINC

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	18281280.000000	2611611.500000	20.7991	0.000
ERROR	24	3013524.000000	125563.500000		
TOTAL	31	21294804.000000			

C.V.=37.73%

MANGANESO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	17809.375000	2544.196533	15.8086	0.000
ERROR	24	3862.500000	160.937500		
TOTAL	31	21671.875000			

C.V.=16.57%

CALCIO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	89686409216.000000	12812344320.00000	10.7883	0.000
ERROR	24	28502786048.000000	1187616128.00000		
TOTAL	31	118189195264.00000			

C.V.=25.25%

MAGNESIO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	670553856.000000	95793408.000000	6.9185	0.000
ERROR	24	332302848.000000	13845952.000000		
TOTAL	31	1002856704.000000			

C.V.=41.67%

SODIO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	18687424.000000	2669632.000000	1.8900	0.116
ERROR	24	33900544.000000	1412522.625000		
TOTAL	31	52587968.000000			

C.V.=27.53%

POTASIO

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	2237188.000000	319598.281250	2.7468	0.030
ERROR	24	2792500.000000	116354.164063		
TOTAL	31	5029688.000000			

C.V.=36.75%

pH

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	0.627563	0.089652	1.5735	0.191
ERROR	24	1.367432	0.056976		
TOTAL	31	1.994995			

C.V.=3.35%

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	3170144.000000	452877.718750	2.6420	0.035
ERROR	24	4114016.000000	171417.328125		
TOTAL	31	7284160.000000			

C.V.=22.95%

MATERIA ORGANICA POR EL METODO DE CALCINACION EN MUFLA

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	25,171.875000	3,595.982178	6.563	0.000
ERROR	24	13,150.000000	547.916687		
TOTAL	31	38,321.875000			

C.V.=31.87%

MATERIA ORGANICA POR EL METODO DE WALKLEY Y BLACK

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	7	4420.844727	631.549255	4.6372	0.002
ERROR	24	3268.621094	136.192551		
TOTAL	31	7689.465820			

C.V.=53.60%