

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**CALIDAD DE BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES (PTAR) DE SALTILLO, COAH. PARA USO AGRÍCOLA**

Por:

ARTURO DE JESÚS GÓMEZ LÁZARO

TESIS

**Presentada como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**CALIDAD DE BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES (PTAR) DE SALTILLO, COAH. PARA USO
AGRÍCOLA**

Realizado por:

ARTURO DE JESÚS GÓMEZ LÁZARO

**Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Dra. Manuela Bolívar Duarte

Asesor principal

M.C. Luis Pérez Romero

Asesor

Dr. Vicente De Paul Álvarez Reyna

Asesor

Ing. Rolando Sandino Salazar

Asesor

Dr. Luis Samaniego Moreno

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Mayo del 2015.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, porque es y siempre será la casa que me recibió y me dio la oportunidad de formarme profesionalmente y me enseñó a enfrentarme al mundo.

A la Dra. Manuelita Bolívar Duarte, mi asesor principal, por todo su apoyo durante mi carrera y la realización de la tesis.

A mis asesores el Dr. Vicente de Paul Álvarez R., el M.C. Luis Pérez Romero e Ing. Rolando Sandino Salazar por el apoyo en el presente trabajo.

A todos mis profesores que formaron parte de mi formación profesional.

A la QFB. Ana Paola Moreno Garza, Lic. Ma. del Socorro Mireles y la Biol. Silvia Guerrero por su fundamental apoyo durante la realización de este trabajo.

A la secretaria María de Jesús Martínez, doña Antonia Valenzuelay a T.A. Patricia Fuentes por su amistad y apoyo durante el curso de mi carrera.

A mis amigos y hermanos que estuvieron a mi lado estos años, Francisco J. Arguello, Elizabeth Hernández, Rogelio A. Cruz, Erick E. Gonzales, Cesar Maya, Yetlanezi Badillo, José Puc, Araceli T. Ferrer, Enrique Meoño, Alexis Aguilar, a los paisas (Tavo, Fredy, Yohan, Ozni) en fin son tantos pero les agradezco a todos mis compañeros por compartir tantas experiencias.

DEDICATORIAS

A mis padres, Sonia Edith Lázaro Rodríguez, Jorge Arturo Gómez Toledo y mi hermano José Ángel Gómez Lázaro, por todo el apoyo incondicional y la confianza que me han brindado durante toda mi vida y por todos los sacrificios que han realizado para que yo pudiera lograr todo esto, gracias por creer en mí.

A mi esposa Alma Delia Ruíz Acevedo y a mi hija Vanessa Mabel Gómez Ruíz que han sido mi motor para seguir avanzando y mejorando cada día de mi existencia, para ustedes que me han brindado su amor siempre.

A mis Familiares abuelitos (porque siempre se sintieron orgullosos de mí) tíos, padrinos, primos, agradezco de todo corazón a todos y cada uno de ustedes que siempre tuvieron confianza en mí, a pesar de la distancia siempre los recuerdo.

Le dedico este trabajo a la vida por permitirme ser parte de esta gran aventura y por todos los hermosos momentos que me han tocado experimentar y sobre todo la cantidad de personas que he conocido.

En general este trabajo está dedicado a todas las personas que han formado parte de mi

historia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	3
<i>DEDICATORIAS</i>	4
<i>ÍNDICE DE CONTENIDO</i>	6
<i>ÍNDICE DE CUADROS</i>	8
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	10
<i>I. RESUMEN</i>	1
<i>II. INTRODUCCIÓN</i>	2
2.1. Objetivos	4
<i>III. REVISIÓN DE LITERATURA</i>	5
3.1. Concepto de Biosólidos	5
3.1.1. Niveles de Tratamiento del Agua Residual	5
3.1.2. Clasificación de Lodos	6
3.2. Aprovechamiento de Biosólidos	9
3.2.1. Beneficios de los Biosólidos	9
3.2.2. Riesgos de los Biosólidos	11
3.3. Características de los Biosólidos	12
3.3.1. Características Físicas	12
3.3.2. Características Químicas	12
3.3.3. Características Biológicas	13
3.4. Parámetros de Importancia en Biosólidos	13
3.4.1. Cantidad de Lodo Residual (biosólido)	13
3.4.2. Contenido de Sólidos Totales	14
3.4.3. Contenido de Sólidos Volátiles	14

3.4.4. Potencial de Hidrógeno (pH)	17
3.4.5. Conductividad Eléctrica (CE)	17
3.4.6. Materia Orgánica (MO)	18
3.4.7. Patógenos	18
3.4.8. Nutrientes	20
3.4.9. Metales Pesados	25
3.4.10. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	25
3.4.11. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	26
3.4.12. Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF)	26
3.5. Métodos de Aplicación	26
3.5.1. Aplicación del Lodo Líquido	27
3.5.2. Aplicación de Lodo Deshidratado	28
3.6. Normatividad	28
3.6.1. Especificaciones	29
3.7. Muestreo y análisis de lodos y biosólidos	32
3.7.1. La frecuencia de muestreo	32
IV. MATERIALES Y METODOS	35
4.1. Ubicación y Características de la Planta de Tratamiento.	35
4.2. Muestreo	39
4.3. Análisis de Laboratorio	40
4.3.1. Parámetros de observación:	40
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
VII. LITERATURA CITADA	52

ÍNDICE DE CUADROS

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	3
<i>DEDICATORIAS</i>	4
<i>ÍNDICE DE CONTENIDO</i>	6
<i>ÍNDICE DE CUADROS</i>	8
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	10
<i>I. RESUMEN</i>	1
<i>II. INTRODUCCIÓN</i>	2
2.1. Objetivos	4
<i>III. REVISIÓN DE LITERATURA</i>	5
3.1. Concepto de Biosólidos	5
3.1.1. Niveles de Tratamiento del Agua Residual	5
3.1.2. Clasificación de Lodos	6
3.2. Aprovechamiento de Biosólidos	9
3.2.1. Beneficios de los Biosólidos	9
3.2.2. Riesgos de los Biosólidos	11
3.3. Características de los Biosólidos	12
3.3.1. Características Físicas	12
3.3.2. Características Químicas	12
3.3.3. Características Biológicas	13
3.4. Parámetros de Importancia en Biosólidos	13
3.4.1. Cantidad de Lodo Residual (biosólido)	13
3.4.2. Contenido de Sólidos Totales	14

3.4.3. Contenido de Sólidos Volátiles	14
3.4.4. Potencial de Hidrógeno (pH)	17
3.4.5. Conductividad Eléctrica (CE)	17
3.4.6. Materia Orgánica (MO)	18
3.4.7. Patógenos	18
3.4.8. Nutrientes	20
3.4.9. Metales Pesados	25
3.4.10. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	25
3.4.11. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	26
3.4.12. Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF)	26
3.5. Métodos de Aplicación	26
3.5.1. Aplicación del Lodo Líquido	27
3.5.2. Aplicación de Lodo Deshidratado	28
3.6. Normatividad	28
3.6.1. Especificaciones	29
3.7. Muestreo y análisis de lodos y biosólidos	32
3.7.1. La frecuencia de muestreo	32
IV. MATERIALES Y METODOS	35
4.1. Ubicación y Características de la Planta de Tratamiento.	35
4.2. Muestreo	39
4.3. Análisis de Laboratorio	40
4.3.1. Parámetros de observación:	40
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
VII. LITERATURA CITADA	52

ÍNDICE DE FIGURAS

I. RESUMEN

Para el tratamiento de aguas residuales urbanas en plantas de tratamiento se requieren de procesos físicos, químicos y biológicos que generan una enorme cantidad de productos tales como los lodos orgánicos. Para esto son sometidos a procesos de espesamiento, digestión y deshidratación, adquiriendo con ello el nombre de biosólidos. En los lodos obtenidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Saltillo, Coah. se realizaron análisis para determinar su calidad y clasificación de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002, teniendo como resultado biosólidos excelentes y de clase A factibles para la aplicación en pastizales.

Palabras claves: Lodos orgánicos. Biosólidos. Tratamiento. Residuales. Pastizales.

II. INTRODUCCIÓN

Los desperdicios generados por los hombres y la de los animales para fertilizar las tierras se han utilizado desde los inicios de la agricultura; pero en la actualidad el fenómeno del urbanismo, provocado por el desarrollo de las naciones, ha causado problemas tan grandes con la generación continua y progresiva de todo tipo de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, es por eso que la aplicación de lodos ha aumentado considerablemente. Esto es posible gracias a las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales, mejorando algunos factores para la reutilización de los lodos residuales.

Para el manejo de aguas residuales urbanas en plantas de tratamiento se requiere de procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales generan una enorme cantidad de lodos orgánicos. Para esto son sometidos a procesos de espesamiento, digestión y deshidratación, adquiriendo el nombre de biosólidos. Éstos son originados principalmente por fuentes domésticas.

El uso de los biosólidos cada vez incrementa su grado de importancia en todo el mundo y es fomentado tanto por la Agencia de Protección Ambiental (U.S. EPA, 1995a)

como también por distintos organismos e instituciones de los principales países desarrollados.

Ya que los nutrientes son consumidos por las plantas y convertidos en biomasa útil, los biosólidos se pueden utilizar como un sustituto parcial de fertilizantes químicos y también actúan como mejoradores del suelo, pues facilitan el transporte de nutrientes, aumentan la retención del agua y por lo tanto mejoran el suelo para el establecimiento del cultivo.

La producción de biosólidos a partir del tratamiento de aguas residuales no es nueva en el mundo, con esto se tienen opciones comerciales a partir de su transformación en fertilizantes agrícolas.

Las constantes investigaciones que se realizan han dado buenos resultados ofreciendo más alternativas para el reúso de estos biosólidos, ya que su aplicación agrícola es fundamental para el sector alimenticio. Por lo anterior el trabajo realizado tiene los siguientes objetivos:

2.1. Objetivos

- Determinar la calidad y clasificar los biosólidos producidos en dicha PTAR de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002.
- Establecer si estos biosólidos son factibles para la aplicación en pastizales.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Concepto de Biosólidos

Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento son llamados Biosólidos (Diario Oficial de la Federación-DOF-2003).

Para Jurado, et. al. (2007), los biosólidos son un subproducto del tratamiento de aguas que tienen alto potencial para utilizarse como fertilizantes o mejoradores de suelo.

3.1.1. Niveles de Tratamiento del Agua Residual

Los niveles de tratamiento del agua residual son los siguientes (Flores y Flores, 2005) (citado por Moreno, 2014):

- Tratamiento preliminar. Tratamiento básico que se le da a los vertidos con el fin de remover sólidos gruesos y objetos que puedan impedir el funcionamiento de bombas y equipos.
- Tratamiento primario. Conjunto de operaciones utilizadas en la separación de los sólidos sedimentables o de materiales flotantes, por medios gravitacionales o mecánicos. En algunos casos se requiere de ayudas físicas o químicas para remover los sólidos sedimentables o el material flotante y aumentar su eficacia.

- Tratamiento secundario. Se utiliza para la reducción de la carga orgánica y de los sólidos en suspensión del vertido, por métodos bioquímicos o biológicos.

- Tratamiento terciario. Es aquél requerido después del tratamiento secundario, cuando el agua va a ser reutilizada. Elimina un 99 por ciento de los sólidos y además se emplean varios procesos químicos para garantizar que el agua esté libre de impureza.

3.1.2. Clasificación de Lodos

Por su origen (fase o proceso de tratamiento del agua en que se generaron) los lodos se clasifican en primarios, secundarios o terciarios.

- Lodo primario. Lodo que resulta del tratamiento primario del agua residual, que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contiene de 93 a 99.5 por ciento de agua, así como los sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual (U.S. EPA, 1984).

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

- Lodo terciario. 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 y usualmente el volumen del lodo. Generalmente, si la cal o polímeros son usados, las características del espesamiento y deshidratación del lodo serán mejores, mientras si fierro o sales de aluminio son usadas, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducida.

Los lodos generados en cada nivel de tratamiento se muestran en el Cuadro 1 (Robledo, 2012).

Cuadro 1. Lodos generados por cada nivel de tratamiento de las aguas residuales (Robledo, 2012).

Parámetro	Unidad	Nivel de tratamiento		
		Primario	Secundario	Terciario
Cantidad de lodos generada	Lodo/10 ⁶ L agua tratada	2500-3500	15000-20000	10000
Sólidos Totales (ST)	%	3.0 – 7.0	0.5 – 2.0	0.2 – 1.5
Materia Orgánica (M.O.)	% en base seca	60 - 80	50 – 60	35 - 50

3.2. Aprovechamiento de Biosólidos

Las tres opciones más importantes para el uso y la disposición final de biosólidos son la confinación en rellenos sanitarios, la incineración, y la reutilización en la agricultura y bosques. La disposición en rellenos sanitarios y la incineración, a pesar de su viabilidad, representan un riesgo de contaminación para el suelo, las aguas subterráneas y el aire, además de que representa un desperdicio de nutrientes, que pueden ser utilizados en la agricultura, pastizales o bosques (Jurado, et. al., 2004).

El mismo autor dice que de acuerdo a las leyes ambientales, así como a las condiciones económicas, en la actualidad la aplicación de biosólidos a tierras agrícolas, de bosques y de pastizales, es recomendable y benéfica. Aproximadamente el 49 y 47 por ciento de los lodos orgánicos se reutilizan en la agricultura de los Estados Unidos y de la comunidad Europea, respectivamente.

3.2.1. Beneficios de los Biosólidos

Para Morales (2008) los beneficios se pueden resumir de la siguiente manera:

- Incorpora materia orgánica.
 - Mejora las propiedades físicas del suelo.
 - Aumenta la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua de suelo.

- Mejora la estructura del suelo ya que al descomponerse los biosólidos se liberan sustancias que unen las partículas del suelo.
- Disminuye la erosión del suelo al aumentar la cobertura vegetal lo que reduce el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y el escurrimiento superficial.
- Los suelos se cultivan con más facilidad.
- Mejora la fertilidad del suelo.
 - Incorpora nitrógeno, fósforo y otros nutrientes en formas fácilmente aprovechables por la planta, lo que significa una mayor fertilidad del suelo.
 - Los nutrientes del suelo son liberados más fácilmente.
 - El costo del suministro de los nutrientes es menor en comparación con los fertilizantes inorgánicos ya que en muchas ciudades los biosólidos son gratuitos.
- Mejora las propiedades biológicas.
 - Aporta carbono y nitrógeno lo que estimula la actividad de los microorganismos que descomponen la materia orgánica del suelo.
 - Incrementa la actividad de las lombrices de tierra mejorando las características físicas del suelo.
- Beneficios para la sociedad.
 - Los costos son menores cuando los biosólidos se utilizan en la agricultura que cuando se desechan mediante la incineración o confinamiento.
 - Reduce la necesidad de buscar lugares apropiados para confinar los biosólidos.

- Se reduce la contaminación de aire y agua al evitar la incineración o la acumulación de grandes cantidades de biosólidos en una pequeña área lo que aumenta el riesgo de que se lixivien acuífero nutriente y metales pesados en cantidades que son contaminantes.
- Se reduce el uso de fertilizantes inorgánicos.
- Se reduce los olores que se producen al almacenar grandes cantidades de biosólidos.

3.2.2. Riesgos de los Biosólidos

Los lodos contienen, en poca cantidad, varios productos que pueden ser tóxicos para las plantas, presentar inconvenientes o hasta ser peligrosos para el hombre a través de las plantas. Estos microcontaminantes pueden ser divididos en orgánicos y minerales. También contienen un número muy elevado de gérmenes inofensivos; pero junto con estos, en los lodos, están muy concentrados microorganismos de origen fecal que son igual de dañinos para los seres vivos (Gamrasni, 1985). Es necesario que los biosólidos sean tratados o desinfectados especialmente para que estos patógenos sean eliminados.

El nitrógeno puede ser aplicado en exceso, causando su acumulación en el suelo. El exceso de nitrógeno eventualmente se convertirá en nitratos que pueden pasar al agua del subsuelo. Se sabe que cantidades elevadas de nitratos (mayor de $10 \text{ Mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$) en el agua son peligrosas para salud humana (Robledo, 2012).

Algunos biosólidos son ricos en minerales solubles, como calcio, magnesio, sodio, sulfatos y cloruros. Estas sales se pueden acumular en la zona radicular a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción causando que maduras en hojas, clorosis, raquitismo a las plantas y en general, bajos rendimientos (Moreno, 2014). El mal olor e insectos pueden ser causados si los biosólidos no han sido tratados adecuadamente antes de ser aplicados o si se los deja mojados por muchos días en la superficie del suelo.

3.3. Características de los Biosólidos

Las características son determinantes para el uso de biosólidos en el suelo, estas pueden agruparse en tres categorías: físicas, químicas y biológicas (Flores y Flores, 2005).

3.3.1. Características Físicas

El contenido de sólidos y de materia orgánica son las características físicas más importantes, el contenido de sólidos afecta el método de aplicación y el crecimiento de las plantas, mientras que el contenido de materia orgánica puede afectar la disponibilidad la acumulación de nutrientes y elementos traza.

3.3.2. Características Químicas

Las propiedades químicas afectan el crecimiento de las plantas, de igual manera cómo influyen las características químicas y físicas del suelo.

Las características químicas más importantes son el pH, las sales solubles, los macro y los micronutrientes para los vegetales.

3.3.3. Características Biológicas

Las aguas residuales contienen una flora y una fauna variadas que se encuentran en parte en los lodos. Los patógenos son la propiedad biológica más importante de los biosólidos, aunado de ellos también existen poblaciones microbianas indígenas que incluyen bacterias, hongos, actinomicetos y protozoarios, los cuales mejoran y ayudan a la descomposición de la materia orgánica.

El contenido de nutrientes vegetales y las propiedades biológicas hacen de este subproducto un recurso muy valioso para la agricultura, la silvicultura y la restauración de los suelos.

3.4. Parámetros de Importancia en Biosólidos

Para los autores (Bolívar, 2012 y 2013) y (Martínez, 1998), se deben considerar los siguientes parámetros para la caracterización de los biosólidos:

3.4.1. Cantidad de Lodo Residual (biosólido)

La cantidad de lodo que se aplica al suelo, afecta 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 afecta 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 (U.S. EPA, 1984).

3.4.2. Contenido de Sólidos Totales

El contenido de sólidos totales (ST) del lodo residual, incluye a los sólidos suspendidos y sólidos disueltos, usualmente expresado como el porcentaje de los sólidos totales presentes en un lodo residual. Típicamente, el lodo líquido tiene un contenido de sólidos de 2 a 12 por ciento de sólidos, mientras el lodo deshidratado tiene un contenido de sólidos de 12 a 40 por ciento de sólidos (incluyendo aditivos químicos). El lodo seco o composteado típicamente tiene un contenido de sólidos superior al 50 por ciento.

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 tratamiento. 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 como se muestra en el cuadro 2 (U.S. EPA, 1984).

3.4.3. Contenido de Sólidos Volátiles

Los sólidos volátiles del lodo (SV), son compuestos orgánicos que son reducidos cuando el lodo es calentado a 550°C 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 (Martínez, 1998).

Cuadro 2. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación (U.S. EPA, 1984).

PROCESO DE TRATAMIENTO Y DEFINICIÓN	EFECTO SOBRE EL LODO	EFECTO SOBRE LAS PRÁCTICAS DE APLICACIÓN
<p>Espesamiento:</p> <p>Separación por gravedad del agua y sólidos, flotación o centrifugación. (Los espesadores del lodo pueden ser usados como tanques para igualar flujos, para minimizar los efectos de las fluctuaciones de las cantidades de lodo en procesos de tratamiento subsecuentes).</p>	<p>Incrementa la concentración de sólidos en el lodo, debido a la remoción de agua, por medio de esto, baja el volumen del lodo. Puede suministrarse una función mezclada en combinación y mezclar lodo primario y lodo secundario.</p>	<p>Costos de transportación del lodo más bajos para todas las prácticas (agrícolas, forestales, recuperación de terrenos, sitios de contacto público).</p>

<p>Acondicionamiento:</p> <p>Alteración de las propiedades físicas del lodo para facilitar la separación del agua en el lodo. El acondicionamiento puede realizarse de diferentes maneras, por ejemplo, la adición de químicos inorgánicos tales como cal y cloruro férrico; agregando químicos orgánicos tales como polímeros.</p>	<p>El acondicionamiento puede incrementar la masa de los sólidos secos que serán manejados sin incrementar el contenido orgánico del lodo. El acondicionamiento también puede mejorar la compactibilidad y estabilización del lodo. Generalmente, el lodo tratado con polímeros tiende a ser pegajoso, y menos manejable que otros lodos.</p>	<p>El lodo tratado con polímeros puede requerir consideraciones especiales de operación para aplicarlos al suelo.</p>
<p>Deshidratación:</p> <p>Separación del agua y sólidos. Los métodos de deshidratación incluyen: filtros de vacío, centrifugadoras, filtros prensa, cintas prensa, lagunas y camas de secado de arena.</p>	<p>Incrementa la concentración de sólidos del lodo mediante la remoción de agua, por medio de esto baja el volumen del lodo. La deshidratación puede incrementar los sólidos del lodo del 15% al 40% para lodo orgánico y 45% o más para algunos lodos inorgánicos. Un poco de nitrógeno y otros materiales solubles son removidos con el agua. Mejora la facilidad de manejo debido a la conversión del lodo líquido a un pastel húmedo.</p>	<p>Los requerimientos de aplicación son reducidos y disminuyen los costos de transportación para todas las prácticas.</p>
<p>Composteo:</p> <p>Proceso aerobio que incluye la estabilización biológica del lodo en un windrow, pila estática aireada.</p>	<p>Baja la actividad biológica, puede destruir más patógenos, degrada el lodo a un material como el humus.</p>	<p>Excelentes propiedades para el acondicionamiento de suelos. Puede contener menos niveles de nutrientes que menos lodo procesado.</p>
<p>Secado a calor:</p> <p>La aplicación de calor mata patógenos y elimina más el contenido de agua.</p>	<p>Desinfecta al lodo, destruye más patógenos, baja considerablemente el potencial de olores y actividad biológica.</p>	<p>Reduce grandemente el volumen del lodo.</p>

3.4.4. Potencial de Hidrógeno (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. Un pH bajo en el lodo (menos de 6.5) promueve lixiviación de metales, mientras un pH 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. En el cuadro 3 se muestra la escala de los valores de pH y su interpretación (Bolívar, 2013)

Cuadro 3. Escala de valores de pH (Bolívar, 2013).

ESCALA	INTERPRETACIÓN
Menos de	Extremadamente ácido
4.6 - 5.19	Muy fuertemente ácido
5.2 - 5.59	Fuertemente ácido
5.6 - 6.19	Medianamente ácido
6.19 - 6.59	Ligeramente ácido
6.6 - 6.79	Muy ligeramente ácido
6.8 - 7.19	Neutro
7.2 - 7.39	Muy ligeramente alcalino
7.4 - 7.79	Ligeramente alcalino
7.8 - 8.39	Medianamente alcalino
8.4 - 8.79	Fuertemente alcalino
8.8 - 9.39	Muy fuertemente alcalino
Más de	Extremadamente alcalino

3.4.5. Conductividad Eléctrica (CE)

Conductividad es la medida de la capacidad que tiene un material para conducir la corriente eléctrica. Las soluciones nutritivas contienen partículas iónicas que llevan cargas

y por lo tanto poseen esta habilidad. Cuanto mayor es la cantidad de estos iones disueltos en el agua la conductividad de la solución resultante es mayor. Por lo tanto la medición de la conductividad eléctrica de una solución nutritiva tiene una relación directa con la cantidad de materiales sólidos disociados que hay disueltos en ella (Bolívar, 2012).

3.4.6. Materia Orgánica (MO)

El nivel relativamente alto de materia orgánica en el lodo, permite al lodo 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.

3.4.7. Patógenos

Los microorganismos causantes de enfermedades conocidos como patógenos, mostrados en el Cuadro 4 (U.S. EPA, 1990) 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 el suelo 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 insectos, roedores y aves.

Cuadro 4. Principales patógenos en el lodo y agua residual (U.S. EPA, 1990).

Organismos	Síntomas de la enfermedad
<p>Bacteria Salmonella sp. Shigella sp. Vibrio cholerae Campylobacter jejuni Escherichia coli (entero patógena)</p>	<p>Salmonelosis (envenenamiento de alimentos), fiebre tifoidea. Disentería basilaria. Cólera Gastroenteritis Gastroenteritis</p>
<p>Virus Entéricos Virus Hepatitis A Virus Norwalk y Norwalk-like Rotavirus Enterovirus Poliovirus Virus coxsackie Echovirus Reovirus Astrovirus Calcivirus</p>	<p>Hepatitis infecciosa Gastroenteritis epidémica con diarrea severa Gastroenteritis aguda con diarrea severa Poliomieltis Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, escalofrío, diarrea, etc. Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebre, escalofrío, diarrea, etc. Infecciones respiratorias, gastroenteritis Gastroenteritis epidémica Gastroenteritis epidémica</p>
<p>Protozoos Cryptosporidium Entamoeba histolytica Giardia lamblia Balantidium coli Toxoplasma gondi</p>	<p>Gastroenteritis Enteritis aguda Giardiasis (incluye diarrea, retorcijones abdominales y pérdida de peso) Diarrea y disentería</p>
<p>Gusanos de helmintos Ascaris lumbricoides Ascaris suum Trichuris trichiura Toxocara canis Taenia saginata Taenia solium Necator americanus Hymenolepis nana</p>	<p>Toxoplasmosis Trastornos digestivos y nutricionales, dolor abdominal, vómitos, agitaciones. Puede producir síntomas tales como tosidos, dolores de pecho y fiebre Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso. Fiebre, molestias abdominales, dolores musculares, síntomas neurológicos Nerviosismo, insomnios, anorexia, dolores abdominales, trastornos digestivos. Nerviosismo, insomnios, anorexia, dolores abdominales, trastornos digestivos Enfermedad de anquilostoma Taeniasis</p>

Los helmintos o gusanos pertenecen al subreino de los Metazoarios, lo que denota que son animales multicelulares, en los cuales las células se hayan diferenciadas formando órganos con funciones especiales, y además divididos en dos ramas, los Platelmintos (gusanos planos) y los Nematelmintos (gusanos redondos). Los Platelmintos están subdivididos en dos clases, los Tremátodos (duelas) y los Céstodos (tenias). Los Nematelmintos incluyen la clase Nemátodo, de los cuales algunos son parásitos del hombre; mientras que la mayoría son formas de vida libre o parásitos de los animales y de las plantas (Bolívar, 2012).

3.4.8. Nutrientes

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 (U.S. EPA. 1995a).

Nitrógeno. El nitrógeno puede estar presente en el lodo en forma inorgánica, ya sea en forma de amonio (NH_4), en forma de nitrato (NO_3) o en forma orgánica. La forma en que el N está presente en el lodo es un factor importante en la determinación de cuanto nitrógeno está disponible para las plantas, así como el potencial de contaminación de N a las aguas subterráneas (Martínez, 1998).

El contenido de N orgánico del lodo puede variar del 1 al 10 por ciento en base peso seco. Los componentes orgánicos encontrados en el lodo principalmente son aminoácidos, que indican la presencia de materiales proteínicos. Después de la aplicación al suelo, los microbios del suelo descompondrán a los componentes del nitrógeno orgánico del lodo, resultando una liberación de NH_4 , el cual puede ser asimilado por los cultivos o la vegetación.

Fósforo, Potasio y otros nutrientes. El lodo contiene concentraciones variadas de otros macro y micronutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas, algunos constituyentes del lodo, tales como fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y hierro (Fe), fácilmente forman compuestos insolubles con los sólidos del lodo y permanecen así en niveles relativamente altos en el lodo (Martínez, 1998).

Otros constituyentes del lodo, tales como el potasio (K) y el sodio, están solubles en el agua y son descargados con las aguas residuales tratadas, a menos que un proceso especial de tratamiento avanzado, sea usado para removerlos, se reducirán más sus concentraciones en el lodo, si el lodo es deshidratado (por centrifugadoras o prensas), mientras que el secado con calor o aire resultará en un incremento de los niveles debido a que esos constituyentes no son volátiles.

Para Bolívar (2013) también los siguientes nutrientes son de gran importancia para el desarrollo vegetativo de las plantas y para los suelos.

Carbonatos (HCO_3^-). Los carbonatos en suelo y agua se presentan en forma de carbonatos pocos solubles de los metales alcalinos térreos y por esto se interfieren en la determinación de los cationes canjeables, afectando la descomposición de la disolución del suelo extraído.

Bicarbonatos (HCO_3^-). La valoración de los iones bicarbonatos en las aguas incluyendo las disoluciones de los suelos, corresponden a la llamada alcalinidad total. Las especies de plantas difieren notablemente en su tolerancia al ion bicarbonato, el cual ejerce efectos tóxicos específicos que producen daños serios aún a bajas concentraciones.

Cloruros (Cl^-). Los cloruros son compuestos muy solubles, por esta razón el cloro, en climas húmedos se lava del suelo con facilidad. Los suelos ricos en sales solubles suelen contener cantidad de cloruros en solución y como éstas son muy solubles, se desplazan hacia abajo cuando llueve y hacia arriba cuando el agua se evapora en la superficie del suelo.

Sulfatos (SO_4^{2-}). El azufre orgánico se presenta en el suelo en forma de sulfato. La mayoría de los compuestos minerales de azufre (excepto CaSO_4) son muy solubles a cualquier pH, por lo tanto, se haya sujetos a rápidas pérdidas por lavado cuando aumenta su concentración en la solución del suelo. Los suelos de regiones áridas suelen contener cantidades de azufre semejantes a las zonas húmedas, pero la mayor parte se encuentra en forma mineral. Las plantas absorben azufre del suelo en forma de ión sulfato (SO_4^{2-}) y

del aire en forma de dióxido de azufre (SO_2). El azufre es un componente esencial de todas las proteínas de las plantas y de algunas hormonas.

Sodio (Na^+). El Sodio del suelo puede ejercer efectos secundarios importantes, sobre el desarrollo vegetal a través de modificaciones estructurales adversas en el suelo, si este contiene cantidades apreciables de sodio, el suelo se vuelve lodoso causando una aireación deficiente y con baja disponibilidad de agua, esto es esencialmente cierto en suelos de textura arcillosa.

En las regiones húmedas, la lixiviación elimina el sodio a causa de su débil atracción con los sitios de intercambio catiónico en las regiones áridas, el sodio se puede acumular como carbonato de sodio. Aun cuando el sodio no se considera como esencial para el crecimiento de las plantas, resulta benéfico para algunas de ellas. Tiene una importancia esencial con relación a los problemas alcalinos y son muy importantes los métodos para determinar su contenido en los suelos, las plantas y las aguas.

Calcio(Ca^{2+}). El Calcio en el suelo y en las plantas se encuentra en forma de catión bivalente. Es componente de minerales poco solubles como la calcita CaCO_3 o el yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Estos minerales son lavados del suelo en regiones muy húmedas, pero persisten en los horizontes superficiales de muchos suelos áridos. El Calcio es un componente estructural de la pared celular y por tanto es vital para la formación de nuevas células, por otra parte el Calcio se encuentran de tal manera integrado en la pared celular, no es posible utilizar el que poseen las células viejas para construir nuevas.

Activa la temprana formación y crecimiento de las raicillas; mejora el vigor de la planta y hace el tallo más resistente; ayuda a mejorar la estructura del suelo; neutraliza los tóxicos producidos en la planta; estimula la formación de semilla y grano; aumenta el contenido de Calcio en alimentos y forrajes; en algunas de sus formas ayuda a controlar la acidez del suelo. La interpretación de acuerdo al contenido de calcio en el suelo se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Niveles de calcio en suelos agrícolas (Bolívar y Guerrero, 2013).

Nivel de Ca⁺⁺ ppm	kg/ha	Interpretación
500	1125	Pobre
900	2025	Medio
1200	2700	Rico
1600	3600	Muy rico

Magnesio (Mg²⁺). El ion Mg²⁺ es químicamente similar al ion Calcio. Sin embargo, en comportamiento de ambos muestra importantes diferencias en las plantas y en el suelo. La mayor parte del Mg²⁺ presente en las plantas se encuentra en la clorofila y en las semillas ya que este es necesario para formación de azúcar; ayuda a la asimilación de otros nutrientes, actúan como transportador del fósforo dentro de la planta; promueve la formación de aceites y grasas, en cierta forma corrige la acidez del suelo, la interpretación de acuerdo al contenido de calcio en el suelo se muestra en el Cuadro 6 (Bolívar, 2013).

Cuadro 6. Niveles de magnesio en suelos agrícolas (Bolívar y Guerrero, 2013).

Nivel de Mg⁺⁺ ppm	kg/ha	Interpretación
12	27	Pobre
25	56	Medio
50	112	Rico
125	281	Muy rico

3.4.9. Metales Pesados

El lodo puede contener cantidades variadas de metales; en concentraciones bajas en el suelo, algunos de esos metales son utilizados como nutrientes o para el crecimiento de las plantas y frecuentemente son agregados por fertilizantes inorgánicos comerciales, tales como el Co, Cu, Fe, Mo y Zn. Pero en altas concentraciones, algunos metales pueden ser tóxicos para los humanos, animales y las plantas (U.S. EPA, 1995a).

Según relata el autor anterior, 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 generalmente están presentes en el lodo en concentraciones altas, que en las aguas residuales, y la deshidratación del lodo tiene un impacto mínimo en la reducción de las concentraciones de metal en el lodo que es destinado para aplicaciones al suelo.

5

En cuanto a la calidad del agua se deben de tomar muy en cuenta los siguientes parámetros según los autores (Bolívar, 2012).

3.4.10. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La demanda bioquímica de oxígeno, se refiere a la cantidad de oxígeno que requiere una

población de microorganismos para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua.

3.4.11. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno, se refiere a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar bajo condiciones específicas, la materia orgánica y la inorgánica, contenida en el agua.

3.4.12. Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF)

Debido a que las aguas residuales son de composición variada provenientes de descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas, contienen diferentes tipos de microorganismos contaminantes y las diferentes concentraciones, dependiendo de su fuente.

3.5. Métodos de Aplicación

Existen diversos métodos para la aplicación de biosólidos al terreno (Martínez, 1998). La selección del método depende del tipo de terreno y consistencia de los biosólidos. Los biosólidos líquidos contienen esencialmente del 94 al 97 por ciento de agua y cantidad de sólidos relativamente baja (del 3 al 6 por ciento), características posibilitan que su aplicación al suelo sea por medio de su inyección, mediante dispositivos diseñados especialmente, o simplemente aplicados superficialmente cuando se trata de biosólidos desecados (deshidratados), con la ayuda de maquinaria normalmente

utilizada en labores agrícolas.

3.5.1. Aplicación del Lodo Líquido

La aplicación del lodo en estado líquido es interesante debido a su sencillez. No es necesario llevar a cabo procesos de deshidratación y el transporte del lodo líquido se puede realizar por bombeo. Las concentraciones comunes del lodo aplicado al terreno en estado líquido varían entre el 1 y el 10 por ciento. El lodo líquido se puede aplicar al terreno con el uso de dispositivos o métodos de riego similares a los empleados para la distribución de agua residual.

La distribución del lodo se puede realizar por distribución en superficie, inyección o incorporación sub superficial. La distribución superficial puede realizarse mediante camiones cisterna equipada con tuberías de distribución montados en la parte posterior, con rociadores o aspersores de cañón de alta capacidad. Este tipo de aplicación es ideal para ser usado en terrenos agrícolas (Martínez, 1998).

El lodo líquido puede aplicarse por inyección más abajo de la superficie del suelo reportado por los autores (Pissani y Guzmán, 1999), siendo este método el preferido por los agricultores. Las ventajas atribuidas a la aplicación por inyección o inmediata incorporación al suelo incluyen la minimización de la posibilidad de generación de olor y de la atracción de vectores. Los equipos con inyectoros especializados han sido desarrollados para no dañar los cultivos. La inyección deberá hacerse perpendicular a la pendiente para evitar que el líquido se desplace cuesta abajo a lo largo del corte y se

encharque al final de la pendiente.

3.5.2. Aplicación de Lodo Deshidratado

El lodo deshidratado puede aplicarse a la tierra cultivable con equipo similar al usado para la aplicación del estiércol de animal.

La posibilidad de aplicación del lodo mediante distribuidores de abono convencionales constituye una ventaja importante, ya que los agricultores pueden aplicar el lodo al terreno con su propia maquinaria es decir con ayuda de una rastra u otra forma de labranza. Otras ventajas incluyen la reducción de costos de transporte, almacenamiento y distribución del lodo (Martínez, 1998).

3.6. Normatividad

El Diario Oficial de la Federación (DOF,2003) establece que los biosólidos por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la Norma Oficial Mexicana NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002. PROTECCIÓN AMBIENTAL: LODOS Y BIOSÓLIDOS, ESPECIFICACIONES Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL.

3.6.1. Especificaciones

I. - Las personas físicas o morales interesadas en llevar a cabo el aprovechamiento o disposición final de los lodos y biosólidos a que se refiere esta Norma Oficial Mexicana, deberá de recabar la constancia de no peligrosidad de los mismos en términos del trámite SEMARNAT-07-007.

II. - Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la especificación I, pueden ser manejados como residuos no peligrosos para su aprovechamiento o disposición final como se establece en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2003).

III. - Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, deben cumplir con la especificación IV, V y VI, que se encuentran establecidos en los Cuadros 8, 9 y 10 de la presente Norma Oficial Mexicana.

IV. - Los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores, demostrando su efectividad. Para lo cual se pueden aplicar cualquiera de las opciones descritas, de manera enunciativa pero no limitativa. Se deben conservar los registros del control por lo menos durante los siguientes cinco años posteriores a su generación.

V. - Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

VI. - El DOF (2003) establece que los límites máximos permisibles de metales pesados como se puede observar en el cuadro 7, también establece los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos como se muestra en el Cuadro 8 y para el aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y

clase, como se especifica en el Cuadro 9 con un contenido de humedad hasta el 85 por ciento.

Cuadro 7. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (DOF, 2003).

Contaminante	Excelentes	Buenos
(Determinado en forma total)	(Mg/Kg en base seca)	(Mg/Kg en base seca)
Asésico	4	7
Cadmio	39	85
cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Cuadro 8. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (DOF, 2003).

CLASE	Indicador Bacteriológico de Contaminación.	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g en base seca.)	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca.	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.

Cuadro 9. Aprovechamiento de biosólidos (DOF, 2003).

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	} Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.
Excelente o	B	} Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.
Excelente o		} Usos forestales.
Bueno		} Mejoramientos de suelo. }

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

VIII. - Para la disposición final de los lodos y biosólidos, éstos deben cumplir con la especificación I y con los límites máximos permisibles para el contenido del indicador de contaminación, patógeno y parásito especificado en el cuadro 8, para clase C.

3.7. Muestreo y análisis de lodos y biosólidos

El generador de lodos y biosólidos por medio de laboratorios acreditados debe realizar los muestreos y análisis correspondientes para demostrar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana y deberá conservar los registros por lo menos los siguientes cinco años posteriores a su realización.

3.7.1. La frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo y análisis para los lodos y biosólidos se realizará en función del volumen de lodos generados como se establece en el cuadro 10 (DOF, 2003).

Cuadro 10. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos (DOF, 2003).

Volumen generado por año (Ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 1500 hasta 15000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 15000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1. Ubicación y Características de la Planta de Tratamiento.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbano (PTAR) de Saltillo, Coah, se encuentra ubicada en el Municipio de Ramos Arizpe, Coah. en las coordenadas geográficas 25°30'53.04" Latitud Norte y 100°58'5.30" Longitud Oeste, con una elevación de 1435 msnm (Figura 1).

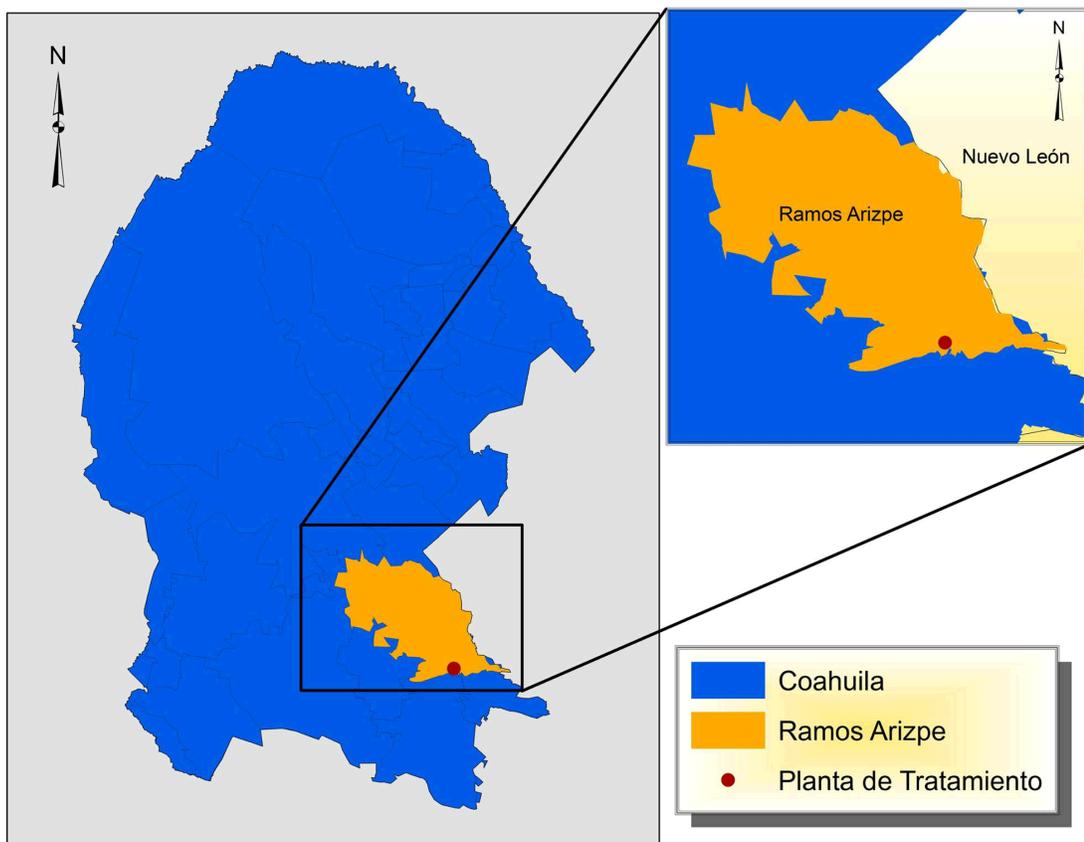


Figura 1. Ubicación de la PTAR de Saltillo, Coah.

La PTAR fue construida en un terreno con una superficie de 9.2 has y tiene una capacidad nominal de tratamiento de 1,200 LPS (litros por segundo), tratando actualmente cerca de 940 LPS con calidad secundaria y con venta actual de hasta 60,000 metros cúbicos mensuales suministrados a la Empresa DeAcero, el resto del agua residual tratada es descargada al arroyo los Cárdenas, sin embargo dentro de los alcances del Proyecto Ejecutivo de la Planta Tratadora, se incluyó la construcción de un módulo de Tratamiento Terciario con una capacidad de 150 LPS, buscando incrementar el reúso del agua tratada específicamente del sector Industrial ubicado en el Municipio de Ramos Arizpe, Coah.

La PTAR consiste en una planta de tratamiento de Lodos Activados Convencional en alta tasa, con coagulación-floculación en el sedimentador primario y cloración al efluente secundario. Consta de cinco (5) módulos en paralelo (Figura 2) de 240 LPS de capacidad media cada uno para un total de 1200 LPS. Así mismo se ha tomado en consideración un flujo máximo de 2,160 LPS a repartir en los cinco módulos a partes iguales (432 LPS c/u).



En la entrada de la Planta se tiene un área de captación de sólidos de gruesos incluyendo un pretratamiento a base de cribado medio y fino, así como un desarenado y desengrasado, continuando con un Tratamiento Primario Avanzado, así como un Tratamiento Secundario con Desinfección a Base Cloro Gas. Se tiene un tratamiento de lodos con digestión anaerobia y deshidratación por filtros banda. Se tiene disponible un módulo de filtración terciaria de 150 LPS, todo esto se muestra en la Figura 3.

4.2. Muestreo

Se realizó el muestreo en la PTAR de Saltillo, Coah, tomándose dos muestras, la primera tomada de la fosa de almacenamiento de lodos digeridos y la segunda de la disposición final de los biosólidos (deshidratado) que la planta genera y de donde se lleva al laboratorio para su respectivo estudio (Figura 4).



Figura 2. Muestra de lodo deshidratado de la PTAR de Saltillo, Coah.

Una vez ubicada la salida de los lodos residuales (lodo digerido y deshidratado) se procedió a tomar un poco del material con bolsas y un recipiente, para posteriormente vaciarla en un galón de plástico, para que este no se derramara utilizamos también un embudo.

4.3. Análisis de Laboratorio

Obtenidas las muestras, se llevaron al laboratorio de Calidad de Aguas en el Departamento de Riego y Drenaje en donde se determinaron los parámetros establecidos para la calidad de los biosólidos, para obtener indicadores de fertilidad y además determinar si cumple con las normas requeridas para la utilización del mismo en terrenos agrícolas.

4.3.1. Parámetros de observación:

Conductividad eléctrica (CE). La determinación de conductividad se realizó midiendo la resistencia de la solución. La unidad básica de la conductividad es el $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, el recíproco de la unidad de resistencia. Para determinar la CE se tomaron 100 gr de la muestra y en seguida se saturó de agua destilada en un contenedor y se mezcló hasta obtener una pasta un poco líquida. Después se procedió a filtrar el saturado para la obtención de la solución de la muestra (líquido). Una vez obtenida se determinó la CE con la ayuda del conductivímetro YSI Incorporado (modelo 32), introduciendo la celda de conductividad, mientras se espera a que la lectura se estabilice, para posteriormente tomar la lectura.

Potencial de Hidrogeno (pH). Para realizar la determinación del pH se tomó de la solución obtenida del filtrado antes mencionado. Para la obtención de este parámetro se utilizó el potenciómetro (Orion, modelo 420A) con el cual se introdujo el electrodo dentro de la solución para después esperar a que se estabilizara para poder tomar el pH.

Nitrógeno (N). Ya que se carecía de los reactivos necesarios para la realización de los métodos comúnmente utilizados, se optó por utilizar la relación (por ciento de Materia Orgánica)/20 = por ciento de Nitrógeno, que nos otorga un valor estimado de contenido de este elemento en relación al dato obtenido de Materia Orgánica.

Fósforo (P). Para la determinación de P se tomó 2.5 gr de la muestra seca (biosólido); se le agregó 50 ml de bicarbonato de sodio 0.5 M y se agitó durante 30 minutos. Después se filtró en un vaso de precipitados por medio de un embudo y papel filtro. Se tomó 20 ml de muestra en un matraz de aforación de 100 ml. De forma paralela se elaboró un testigo o blanco con 20 ml de bicarbonato de sodio en otro matraz de aforación de 100 ml. A partir de aquí lo siguiente se realiza en ambos matraces. Se agregó una gota de p-Nitrofenol y se le quitó el color amarillo con ácido clorhídrico 1:1. Se añadió una gota de cloruro estanoso y se aforó con agua destilada para después dejar reposar por 20 minutos. Pasado el tiempo se utilizó el espectrofotómetro (Metertek SP-830) a 660 nm de longitud de onda para obtener la transmitancia y así poder obtener el valor de Fósforo por medio de la curva de calibración de Fósforo.

Potasio (K). Para la obtención de este parámetro se pesó 5 gr de muestra seca, se agregó 10 ml de Nitrato de Sodio al 25 por ciento y se puso a agitar durante 20 minutos para después filtrar. Se prepararon en una celda del fotocolorímetro dos tubos (un testigo y una muestra). A cada tubo se le puso 1 ml de alcohol etílico después tres gotas de cobaltinitrito de sodio.

Siguiendo con el procedimiento se le agregó a uno de los tubos 1 ml de la solución que obtuvimos del filtrado de la muestra y al otro se le añadió 1 ml de Nitrato de Sodio el cual sería el testigo; en ambos tubos se adicionaron 5.5 ml de agua destilada. Inmediatamente después se agitaron por inversión dos veces y usando el fotocolorímetro se obtuvo el valor de K.

Materia Orgánica (MO). Para determinar la MO se pesó 1 gr de muestra (biosólido) seca, se le agregó 10 ml de Dicromato de Potasio 1 N y 20 ml de Ácido Sulfúrico concentrado. Se dejó reposar hasta que se enfrió. Después se le agregaron 100 ml de agua destilada y se de nueva cuenta se esperó hasta que se enfriara. Se le añadieron tres gotas de Orto-fenantrolina y se tituló con Sulfato Ferroso hasta que obtuvo un color rojo ladrillo. Se tomó el valor de los mililitros de titulación para la obtención del resultado.

Metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, y zinc). Estos parámetros fueron proporcionados por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Saltillo, Coahuila.

Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV) y Sólidos Disueltos Totales (SDT). Para la obtención de estos parámetros se utilizó la metodología que marca la NMX-AA-034-SCFI-2001 (análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y Residuales tratadas).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). La determinación de la DBO se llevó a cabo por medio del procedimiento indicado por la NMX-AA-028-SCFI-2001 (análisis de agua - determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, Residuales (DBO₅) y residuales tratadas)

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Para determinar este parámetro se realizó procedimiento señalado por la NMX-AA-030-SCFI-2001 (Análisis de agua - determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas).

Coliformes Totales y Coliformes Fecales. Estos parámetros se obtuvieron con la realización de la metodología correspondiente de acuerdo a la NMX-AA-42-1987 (calidad del agua determinación del número más Probable (nmp) de coliformes Totales, coliformes Fecales (termotolerantes) *yescherichia coli*).

Huevos de Helmintho y *Salmonella* spp. Estos datos fueron proporcionados por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Saltillo, Coahuila.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se tienen los resultados obtenidos durante los análisis de laboratorio y datos proporcionados de los biosólidos.

Cuadro 11. Parámetros obtenidos de las muestras de Biosólidos.

PARAMETRO	RESULTADO	NOM-004-SEMARNAT-2002
Conductividad Eléctrica (CE)	3.55	NA
Potencial de Hidrógeno (pH)	7.9	NA
Nitrógeno (N)	0.23 %	NA
Fósforo (P)	63.9 kg/ ha	NA
Potasio (K)	> 900 kg/ha	NA
Materia Orgánica (MO)	4.57 %	NA
Metales Pesados (ultimo resultado - mes abril):		
- Arsénico (As)	< 5 mg/Kg	< 41 mg/Kg
- Cadmio (Cd)	< 2 mg/Kg	< 39 mg/Kg
- Cobre (Cu)	154.9 mg/Kg	< 1500 mg/Kg

- Cromo (Cr)	33.4 mg/Kg	< 1200 mg/Kg
- Mercurio (Hg)	3.06 mg/Kg	< 17 mg/Kg
- Níquel (Ni)	25.5 mg/Kg	< 420 mg/Kg
- Plomo (Pb)	95.1 mg/Kg	< 300 mg/Kg
- Zinc (Zn)	2, 503.2 mg/Kg	< 2800 mg/Kg
Solidos Suspendidos Totales (SST)	4, 980 mg/L	NA
Solidos Suspendidos Volátiles (SSV)	3, 490 mg/L	NA
Solidos Totales (ST)	6, 250 mg/L	NA
Solidos Totales Volátiles (STV)	4, 400 mg/L	NA
Solidos Disueltos Totales (SDT)	2, 750 mg/L	NA
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	68.4 mg/L	NA
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1, 070 mg/L	NA
Coliformes Totales	< 2 NMP/100 cm ³	NA
Coliformes Fecales	< 2 NMP/100 cm ³	< 1000 NMP/g
Huevos de Helminto	0	< 1 helmintos/g

<i>Salmonella spp.</i>	< 3 NMP/ gBS	< 3 NMP/g
------------------------	--------------	-----------

NA= No Aplica

La conductividad eléctrica indica que es medianamente salino, lo que es un buen indicador, ya que muchos de los pastizales tienden a resistir niveles de sal elevados.

Tiene un pH medianamente alcalino, lo cual indica que no hay una alta disponibilidad de los metales pesados a excepción de As y Cr, además de que indica que no afectará en la disponibilidad de los nutrientes esenciales.

Es medianamente rico en Nitrógeno, lo que es benéfico para el desarrollo del cultivo y del pastizal, ya que no tiende a causarle un exceso de este elemento.

Los biosólidos tienen presencia de Fosforo y Potasio en cantidades elevadas, lo que puede ser de gran ayuda en las características nutricionales del suelo.

Ya que se presentó un alto contenido de materia orgánica es un indicador de que es un buen mejorador del suelo, pues al incorporarse ayudaría beneficiando la estructura causando una buena porosidad, elevando la capacidad de intercambio catiónico, disminuyendo los riesgos de erosión y ayudando a disminuir cambios bruscos de pH.

Los metales pesados se encuentran dentro de lo normal, a excepción del Zinc que se encuentra un poco elevado pero sin llegar a ser excesivo. En base a los límites permisibles de los metales pesados de la NOM-004-SEMARNAT-2002 estos lodos se clasifican como excelentes.

Se requiere una cantidad mínima de oxígeno para que los microorganismos puedan oxidar la materia orgánica.

En estos biosólidos se requiere una cantidad alta de oxígeno para que se pueda lograr la oxidación de la materia orgánica y la inorgánica, esto podría ser un factor importante a considerar.

Respecto a los sólidos (SST, SSV, ST, STV y SDT), estos contienen una cantidad alta ya que la muestra se encuentra en una forma más sólida.

Ya que la cantidad de Coliformes Totales, Coliformes Fecales, Huevos de helmintos y *Salmonella spp.* en esta muestra se encontraron básicamente imperceptibles indica que estos biosólidos son de clase A de acuerdo a los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

De acuerdo a los resultados obtenidos estos biosólidos se clasifican como excelentes de clase A.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La toxicidad de los biosólidos de la PTAR se encuentra dentro de la clasificación A de los límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos de la NOM-004-SEMARNAT-2002.
- Así mismo estos lodos se clasifican como excelentes de acuerdo a los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos de la misma norma.

Por lo tanto se recomienda que estos biosólidos sean utilizados para uso agrícola, principalmente en pastizales.

VII. LITERATURA CITADA

Bolívar D., M., G.A.P. 2012. Manual de prácticas de aguas residuales. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 32 pág.

Bolívar D., M., M. S. 2013. Manual de prácticas de suelos salinos y sódicos. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 26 pág.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2003. NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, D.F.

Flores, T.F.J., Flores, P.L. 2005. Los biosólidos de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Aguascalientes: características y uso. Investigación y ciencia. Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.

Gamrasni, M. A. 1985. Aprovechamiento Agrícola de las aguas negras urbanas. Editorial Limusa. México.

Jurado, P.; Arredondo, T.; Flores, E.; Olalde, V. y Frías, J. 2007. Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrimentos del suelo y la producción de forraje en pastizales semiáridos. *TERRA Latinoamericana*, 25(2), 211 p.

Jurado, P.; Luna, M. y Barretero, R. 2004. Aprovechamiento de Biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Tec Pecu. México*. 42 (3), 382 p.

Martínez, R.E. 1998. Estudio para determinar el uso de lodos residuales sobre los suelos agrícolas de cuatro municipios de Nuevo León. Tesis. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Buenavista, Coahuila, México. 206 pág.

Morales, M.F. 2008. Aplicación de biosólidos para rehabilitación de pastizales degradados: efecto sobre la vegetación. Tesis. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Buenavista, Coahuila, México. 58 pág.

Moreno, H.J. 2014. Calidad de biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) bosque urbano de Torreón, Coah. para uso agrícola. Tesis. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Buenavista, Coahuila, México. 59 pág.

Pissani, Z.J.F., Guzmán, R.J.L. 1999. Evaluación preliminar de la aplicación de lodos en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). FAUANL-DYCUSA-SADM. Marín, N.L. México. 46p.

- Robledo, S.E. 2012. Manejo y Uso de biosólidos en suelos Agrícolas. Doctorado. Colegio de Postgraduados Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 170 pág.
- U.S. EPA. 1984. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA/625/1084/003. Cincinnati, OH.
- 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. 1995a. Process design manual: Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage EPA/625/R-95/001. Cincinnati, OH. E.U.A.